

# Wärmepumpenplanung auf Basis von Verbrauchsdaten mit einfachen Exceltools

Manuskript für den Bauphysikkalender 2025.

## Zusammenfassung

Mit drei kostenlosen Excel-Tools lassen sich zeit- und kostenoptimierte Wärmepumpenplanungen für den Bestand durchführen. Der Beitrag zeigt dies für ein teilmodernisiertes Mehrfamilienhaus aus der Nachkriegszeit.

Mit der „Standardbilanz“ kann im Rahmen einer Energieberatung 2.0 das Gebäude nachgebildet werden. Der Jahresverbrauch sowie eine kurze Zustandsbeschreibung sind die Leitschnur. Zu geplanten Maßnahmen - wie einem Wärmepumpeneinbau - gibt es erste realistische Erkenntnisse bzgl. der Wirtschaftlichkeit und Emissionsminderung.

Auf Basis von unterjährigen Verbrauchsdaten liefert die „Energieanalyse“ eine Gebäudeheizkennlinie, d. h. einen Zusammenhang von Nettoheizlast zur Außentemperatur. Damit können Wärmepumpe sowie Spitzenlasterzeuger gefunden werden.

„Optimus“ dient schlussendlich dazu, die Gebäudeheizkreise des Bestands zu optimieren oder um Heizkörper zu identifizieren, die besser getauscht werden, um das gesamte Projekt wärmepumpentauglich(er) zu machen.

## Schlüsselworte

- Wärmepumpenplanung
- Anlagenoptimierung
- Energieverbrauch
- Energieberatung
- Energiebilanzierung

## Autoren

Jagnow, Kati, Prof. Dr.-Ing.: 1997–2001 Studium der Technischen Gebäudeausrüstung, FH Braunschweig/Wolfenbüttel, 2004 Promotion an der Universität Dortmund, Fakultät Bauwesen, 2001–2003 wiss. Mitarbeit am Trainings- & Weiterbildungszentrum Wolfenbüttel e.V., seit 2004 selbständig im Ingenieurbüro, seit 2010 Lehrtätigkeit an der Hochschule Magdeburg-Stendal, seit 2014 Professur im Fachbereich Wasser, Umwelt Bau und Sicherheit Bauwesen, Schwerpunkte: Qualitätssicherung für Anlagentechnik; Energiegutachten und Optimierungskonzepte.

Wolff, Dieter, Prof. Dr.-Ing.: Jg. 1952, nach Abschluss des Studiums der Chemietechnik (1976) und der Promotion (1980 Thema: Latentwärmespeicherung) an der Uni Dortmund, 7 Jahre Industrieerfahrung (Honeywell-Centra), 1983: Leiter Sonderentwicklung. 1987 Professor an der Ostfalia – Hochschule Wolfenbüttel mit den Schwerpunkten: Neue Energietechnologien, Integrierte Planung. 1996 - 2004 Obmann des DIN-Ausschusses: „DIN 4701, Teil 10“: Norm zur EnEV - GEG. Mitarbeit in DIN- und VDI-Ausschüssen. Träger der VDI-Ehrenplakette.

Gebhardt, Katharina, Dipl.-Ing. (FH) M. Eng.: Studium der Architektur (Diplom 2005) und Master Energieeffizientes Bauen und Sanieren (2011) an der Hochschule Magdeburg-Stendal, 2011 – 2022 wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Hochschule Magdeburg-Stendal, Fachbereich Bauwesen, Fachgebiet Bauphysik / Energiekonzepte, seit 2024 Lehrbeauftragte für Bausanierung, seit 2022 selbstständige Architektin mit Schwerpunkt Bauphysik / Energieeffizienz / Nachhaltigkeit.

## Inhalt

<b>1</b>	<b><i>Einführung</i></b> .....	<b>3</b>
1.1	Ziel der Tools .....	3
1.2	Beispielprojekt.....	4
<b>2</b>	<b><i>Beratung mit der „Standardbilanz“</i></b> .....	<b>5</b>
2.1	Hintergrund und Motivation .....	5
2.2	Umfang des Tools .....	6
2.3	Ein- und Ausgaben.....	6
2.4	Anwendungsbeispiel.....	8
2.5	Notwendigkeiten und Möglichkeiten von Modifikationen .....	11
2.6	Updates und Bezugsquelle .....	12
<b>3</b>	<b><i>Planung mit der „Energieanalyse“</i></b> .....	<b>12</b>
3.1	Hintergrund und Motivation .....	12
3.2	Umfang des Tools .....	13
3.3	Ein- und Ausgaben.....	14
3.4	Anwendungsbeispiel.....	19
3.4.1	Randdaten der Wärmepumpe .....	19
3.4.2	Planungsideen.....	21
3.4.3	Bestand .....	22
3.4.4	Vorlauftemperaturoptimierung.....	25
3.4.5	Gebäudeverbesserung und Vorlauftemperaturoptimierung.....	25
3.4.6	Einsatz einer kleineren Wärmepumpe .....	27
3.4.7	Minimale Außentemperatur und Auslegung des Heizstabes.....	31
3.4.8	Bestandsauslegung mit Bruttoheizlast.....	32
3.5	Notwendigkeiten und Möglichkeiten von Modifikationen .....	34
3.6	Updates und Bezugsquelle .....	34
<b>4</b>	<b><i>Optimierung mit „Optimus“</i></b> .....	<b>34</b>
4.1	Hintergrund und Motivation .....	34
4.2	Umfang des Tools .....	34
4.3	Anwendungsbeispiel.....	35
4.4	Notwendigkeiten und Möglichkeiten von Modifikationen .....	38
4.5	Updates und Bezugsquelle .....	38
<b>5</b>	<b><i>Hintergrundwissen</i></b> .....	<b>39</b>
5.1	Energieanalyse aus dem Verbrauch.....	39
5.1.1	Daten aus Wärmemengenzählern.....	40
5.1.2	Übergang zur Bedarfsanalyse .....	41
5.1.3	Daten aus Endenergiezählern.....	42
5.2	Fingerabdruck oder h-Wert und Heizgrenztemperatur .....	43
5.3	Brutto- und Nettoheizlast.....	44
5.4	Außentemperaturverlauf und Deckungsanteile .....	45
5.5	Wärmepumpentheorie und -praxis .....	46
<b>6</b>	<b><i>Fazit und Ausblick</i></b> .....	<b>48</b>
<b>7</b>	<b><i>Quellen</i></b> .....	<b>50</b>

## Allgemeiner Hinweis zur Schriftfassung

Im Rahmen dieses Buchbeitrags wird zur Mehrzahlbildung von Personengruppen (bei Unkenntnis der Gruppenzusammensetzung) das generische Maskulinum verwendet. Zudem nennen sich die Autorinnen und der Autor in diesem Sinne vereinfachend Autoren (auch in Kenntnis der Geschlechter dieser Dreiergruppe).

# 1 Einführung

*Zweifellos ist die Wärmepumpe aktueller denn je und hat unter dem Eindruck der Energieverknappung und der Energiepreisentwicklung einen Stellenwert erhalten, den vor wenigen Jahren nur wenige einzuräumen gewagt hätten.*

*Neue Verfahren – oder besser gesagt, die Neu- und Weiterentwicklung des „alten“ Verfahrens der Wärmepumpe – bringen zunächst einmal Unruhe und teilweise auch Verwirrung, da viele mit Problemen konfrontiert werden und sich zunächst einarbeiten müssen. [11]*

Dieses Zitat stammt nicht aus einer aktuellen Pressemeldung, sondern aus dem Vorwort des Fachbuchs „Wärmepumpen – Grundlagen und Praxis“ von 1977 der Autoren Hans Ludwig von Cube und Fritz Steimle. Problematisch war rückblickend beurteilt allerdings: nach zwei Ölpreiskrisen verharrten die Gas- und Ölpreise mehr als drei Jahrzehnte auf einem weitgehend konstanten und niedrigen Niveau. Und die prognostizierte Unruhe hielt sich in Grenzen.

Heute, 50 Jahre später, ist der Satz aus Sicht der Planerschaft jedoch wieder oder vielmehr immer noch passend. Eine gewisse Unruhe und Verwirrung gehen um bei der Beantwortung der Fragen zur passenden Dimensionierung einer Wärmepumpe samt daraus resultierender Wirtschaftlichkeit sowie der Möglichkeiten, überhaupt eine Wärmepumpe in ein bestehendes Gebäude einzubauen. Und: Gas- und Ölpreise haben sich seit 1973 jedes Jahrzehnt verdoppelt.

Die verfügbaren Planungstools zur Beantwortung obiger Fragen weisen eine große Bandbreite an Zeiterfordernis und Detailreichtum auf: von wenigen Klicks in Onlinetools, die nur die Angabe von Auslegungsvor- und -rücklauftemperaturen erfordern, bis hin zu vielstündig zu befüllenden Profisimulationsprogrammen.

Um den notwendigen und beschleunigten Ausbau von Wärmepumpen in den nächsten Jahren zu unterstützen, kann wie nachfolgend beispielhaft beschrieben, mit einem überschaubaren Aufwand auf Verbrauchsauswertungen der letzten Jahre zurückgegriffen werden. So, wie sie beispielsweise in Energieverbrauchsausweisen vermieteter Mehrfamilienhäuser vorliegen oder aus alten Öl- und Gasabrechnungen entnommen werden können.

Bei heute geschätzten 2,4 Mrd. m<sup>2</sup> beheizter Wohnfläche in Ein- und Zweifamilienhäusern und 1,6 Mrd. m<sup>2</sup> in Mehrfamilienhäusern erscheint den Autoren dies ein sinnvoller Weg, um mit der eingesetzten Planungszeit zu guten Realeffizienzen der Anlagen zu kommen.

Die vorgestellten Tools sind auch geeignet, um Teilaspekte der rechnerischen Nachweise bzw. Datenerhebungen im Zusammenhang mit dem Gebäudeenergiegesetz (GEG), der Bundesförderung für energieeffiziente Gebäude (BEG), individuellen Sanierungsfahrplänen (iSFP) sowie dem Wärmeplanungsgesetz (WPG) im Umfang zu verschlanken und damit zu beschleunigen. Auf Basis des vorhandenen bzw. absehbaren Energieberater-, Planer- und Handwerker mangels plädieren die Autoren auch dafür – ohne schon alle Details in Gänze „in der Schublade“ zu haben.

## 1.1 Ziel der Tools

Vorgestellt werden nachfolgend drei Planungstools auf Basis von Microsoft Excel. Dies sind in der gewählten Reihenfolge nach Aufgabenstellung:

- Beratung (Kapitel 2): die „Standardbilanz“, mit der auf Basis zweier Typgebäude näherungsweise, aber sehr schnell herausgefunden werden kann, mit welchen Maßnahmen am Gebäude wie große Einsparungen an Endenergie und Emissionen erzielbar sind und wie wirtschaftlich sich diese darstellen. Hiermit ließe sich – bezogen auf die hier beschriebene Thematik – feststellen, ob eine Wärmepumpe sinnvoll ist, wie eine zusätzliche Photovoltaik das System verändert und ob man besser vorher oder später noch Dämmmaßnahmen, den Austausch von Fenstern oder eine zusätzliche Lüftungsanlage einplanen sollte.
- Planung (Kapitel 3): die „Energieanalyse aus dem Verbrauch“, mit der auf Basis von jährlichen oder z. B. monatlichen Verbrauchsdaten Energiekennwerte abgeleitet werden, aber auch maximale Heizlasten von Gebäuden näherungsweise bestimmt werden können. Dieses Hilfsmittel lässt sich mit geringem Aufwand auch verwenden, um eine passende Wärmepumpenleistung für das Gebäude zu finden, den ggf. notwendigen Spitzenlastzeuger zu bemessen und für das System eine Gesamteffizienz, aber auch für die Einzelkomponenten der Gebäude- und Anlagentechnik Einzeleffizienzwerte zu bestimmen.
- Optimierung (Kapitel 4): das Programm „Optimus“, auf dessen Basis sich u. a. Systemtemperaturen in einem Heizsystem optimieren lassen, aber auch der hydraulische Abgleich durchführen lässt. Im Falle der Wärmepumpenanlage lässt sich damit feststellen, welche notwendige Vorlauftemperatur auf Basis der vorhandenen Heizflächen in dem Gebäude gegeben ist. Aber es kann auch die Frage geklärt werden, welche Heizflächen vielleicht punktuell und mit kleinem Aufwand getauscht werden müssen, um eine deutlich bessere Auslegungsvorlauftemperatur zu erzielen.

Das Gesamtpaket könnte man als „Energieberatung 2.0“ zusammenfassen. Mit einem überschaubaren Berechnungs- und Zeitaufwand kann festgestellt werden, ob ein Bestandsgebäude wärmepumpentauglich ist und welche Wärmepumpe passend wäre. Während die Maßnahme sich dann in der Umsetzungsplanung befindet und die Komponenten bestellt werden, folgt der etwas größere Aufwand – nämlich die raumweise Erfassung des Bestandsgebäudes. Mit der vereinfachten Raumheizlastermittlung nach dem OPTIMUS-Standard [4][7] lässt sich das System anschließend temperaturoptimieren und hydraulisch abgleichen.

## 1.2 Beispielprojekt

Die drei Programme sollen exemplarisch an einem 4-Familienhaus in Braunschweig vorgestellt werden, siehe Abbildung 1. Das Gebäude aus dem Jahr 1953 befindet sich in einem teilsanierten Zustand. Wände und Fenster wurden bereits früher einmal ertüchtigt. Ihr energetischer Zustand entspricht etwa der Wärmeschutzverordnung 1984. Der Bestandsgaskessel ist 1991 eingebaut worden. Die Wohnungen haben elektrische Durchlauferhitzer zur Trinkwarmwasserversorgung.



Abbildung 1 Beispiel: 4-Familienhaus in Braunschweig

Geplant ist eine zentrale Wärmepumpe für Raumheizung sowie eine Verbesserung ausschließlich des oberen und unteren Gebäudeabschlusses. Die Trinkwarmwasserversorgung soll nicht geändert werden, auch Wand und Fenster bleiben unverändert erhalten. Eine Photovoltaikanlage wird ebenfalls untersucht, weil die Planungserfahrung vermuten lässt, dass dies sinnvoll sein wird.

Für das Mehrfamilienhaus ist ein Energie-Verbrauchsausweis vorhanden, siehe Abbildung 2. Er zeigt die Jahresverbrauchsdaten von 2014 bis 2016. Sie werden im Kapitel 3.3 ausgewertet. Auf Basis der tatsächlichen messtechnischen Ausstattung des Gebäudes sind nur Gaszählerwerte verfügbar, die auch nur einmal im Jahr erfasst wurden. Zur Demonstration der Programme wurden zusätzlich fiktive monatliche Zwischenablesewerte daraus abgeleitet.



Abbildung 2 Beispiel: Energieausweis mit Verbräuchen 2015 – 2016

Die Gebäudenutzfläche beträgt laut Energieausweis  $A_N = 289,8 \text{ m}^2$ . Die realistisch abgeschätzte beheizte Energiebezugsfläche des Gebäudes wird allerdings mit  $A_{EB} = 241 \text{ m}^2$  angesetzt. Dies entspricht der häufig anzutreffenden Abweichung um den Faktor 1,2.

## 2 Beratung mit der „Standardbilanz“

### 2.1 Hintergrund und Motivation

Man nehme...

- das übliche Bilanzschema von Nutz-, über End- bis Primärenergie sowie  $\text{CO}_2$ ,
- ein durchschnittliches Ein- und Zweifamilienhaus sowie ein Mehrfamilienhaus auf Basis statistisch belastbarer Größendaten (Geometrie),
- typische vorhandene Gebäude- und Technikausstattung in den 20 Millionen Bestandswohngebäuden (prozentuale Vorkommenshäufigkeiten),
- Erfahrungen aus Projekten mit Kennwerten für reale Effizienzen sowie Auswirkungen der Qualitätssicherung,
- Prognosen zur Bestandsentwicklung (Zubau/Abriss), Kosten und Energieträgerherkunft

und programmiere ein Exceltool. Die sich ergebende „Standardbilanz“ erlaubt eine Bedarfsbilanz für zwei Durchschnittsgebäude (Ein- und Zweifamilienhaus sowie Mehrfamilienhaus) auf Basis typischer Effizienzmerkmale aus Feldmessungen, jeweils mit und ohne Qualitätssicherung (hydraulischer Abgleich etc.).

Hintergrund der gewählten Programmierung sind zwei Aspekte: die Bewertung soll sehr schnell gehen und sie soll im Mittel zu den Endenergieverbrauchswerten bundesdeutscher Gebäude passen. Insbesondere der zweite Aspekt unterscheidet sie damit von typischen Bedarfsbilanzen (EnEV, GEG,) die für Bestandsgebäude tendenziell größere Bedarfs- als Verbrauchsendenergien ermitteln. Das Tool wurde – um diesem Problem zu begegnen – an realen Verbrauchsdaten für den Wohngebäudebestand Deutschlands kalibriert. Zur Vertiefung dieser Thematik wird auf [6] und [5] verwiesen.

## 2.2 Umfang des Tools

Die „Standardbilanz“ enthält die in Abbildung 3 genannten Arbeitsmappen, die nachfolgend kurz im Umfang beschrieben werden. Ein Link zur ausführlichen Beschreibung ist in Kapitel 2.6 zu finden.

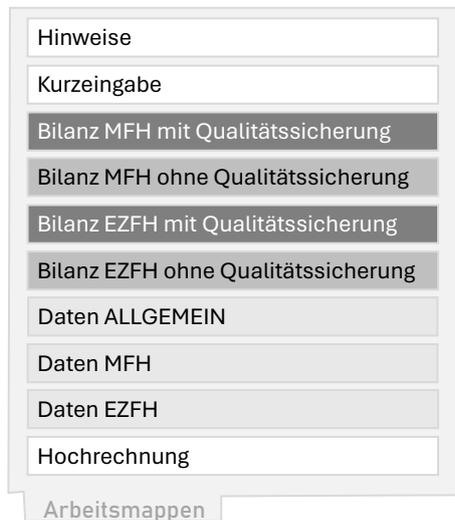


Abbildung 3 Umfang des Tools „Standardbilanz“

- Das Blatt „Hinweise“ gibt eine Einführung zur Programmierung und zu den Farblegenden der Ein- und Ausgabezellen.
- Die „Kurzeingabe“ ermöglicht es, in einem Blatt – druckbar eine Seite A4 – ein Projekt mit allen Ein- und Ausgaben vor und nach einer Modernisierung darzustellen. Allerdings sind an dieser Stelle keine Rechenwege nachvollziehbar.
- Die 4 Blätter „Bilanz...“ liefern die zugehörigen Rechenwege. Dabei ist unter Qualitätssicherung eine Zusammenfassung der folgenden Maßnahmen zu verstehen: Wärmebrückenoptimierung, Luftdichtheit, hydraulischer Abgleich mit Reglereinstellung, lückenlose Leitungsdämmung, passende Technikdimensionierung.
- Das Blatt „Daten Allgemein“ enthält Annahmen, die für beide Typgebäude gleichermaßen gelten, z. B. die Klimadaten, Nutzungsranddaten, Erzeugereffizienzen, aber auch die Bewertung der Energieträger mit Emissionsfaktoren sowie Preise und Kosten.
- Die Blätter „Daten MFH“ und „Daten EZFH“ fassen die Eingaben zusammen, die nur für einen Gebäudetyp gelten, z. B. die geometrischen Daten sowie die im Bestand typischen Vorkommenshäufigkeiten bestimmter Qualitäten der Hülle und Technik. Letzteres ist Grundlage für „mittlere Gebäude“ bzw. „Typgebäude“.
- Die „Hochrechnung“ liefert eine Summation über Deutschland – in der Annahme, dass die EZFH und MFH entsprechend in millionenfach identischer Ausprägung vorkommen. Auf diesen Aspekt des Tools wird im Rahmen dieser Veröffentlichung nicht weiter eingegangen, es wird auf [6] verwiesen.

## 2.3 Ein- und Ausgaben

Die Typgebäude werden mit elf Kenndaten zur Gebäudehülle, Lüftungstechnik, Erzeugung, Verteilung und Solartechnik beschrieben, siehe Abbildung 4. Die jeweiligen Optionen zur Auswahl sind angezeigt.

Dabei beschreibt der jeweils erste Eintrag in der betreffenden Rubrik „Ø“ eine Mittelwertbildung über Deutschland. Die dabei entstehenden mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten sind sicherlich ohne weitere Erläuterung verständlich. Bei den technischen Rubriken heißt dies: eine gemittelte Technikausstattung (beispielsweise 9 % Solarthermie und 91 % keine Solarthermie – also bilanziell eine fiktive viel zu kleine Anlage). Die Auswahl der Option „Durchschnitt“ ist somit eher für Makrostudien geeignet, in denen es um „ganz Deutschland“ geht als für den konkreten Einzelfall.

Die „Energieberatung 2.0“ entspricht einer ersten „kleinen Mikrostudie des untersuchten Gebäudes“ im Sinne eines vereinfachten individuellen Sanierungsfahrplans iSFP, aber mit einem geschätzt um den Faktor 10 verminderten Zeit- und Bauteilerhebungsaufwand für die Gebäudehülle und die Komponenten der Anlagentechnik.

<b>Qualität Außenwand</b> <input type="radio"/> (U = 0,70 W/m <sup>2</sup> K) schlecht (U = 1,0 W/m <sup>2</sup> K) mittel (U = 0,65 W/m <sup>2</sup> K) gut (U = 0,32 W/m <sup>2</sup> K) best (U = 0,15 W/m <sup>2</sup> K)	<b>Wärmeerzeuger Heizung</b> <input type="radio"/> (Deutschlandmittel) Holzkessel Gas-Niedertemperaturkessel Öl-Niedertemperaturkessel Gas-Brenwertkessel Öl-Brennwertkessel Fernwärme Stromdirekt/speicherheizung Außenluftwärmepumpe + El. Erdsreichwärmepumpe	<b>Art der Lüftung</b> <input type="radio"/> (Deutschlandmittel) Fensterlüftung/Abluftanlage Lüftungsanlage mit WRG
<b>Qualität Dach oder obere Decke</b> <input type="radio"/> (U = 0,50 W/m <sup>2</sup> K) schlecht (U = 1,0 W/m <sup>2</sup> K) mittel (U = 0,45 W/m <sup>2</sup> K) gut (U = 0,26 W/m <sup>2</sup> K) best (U = 0,15 W/m <sup>2</sup> K)	<b>Wärmeerzeuger Trinkwarmwasser</b> <input type="radio"/> (Deutschlandmittel) Holzkessel Gas-Niedertemperaturkessel Öl-Niedertemperaturkessel Gas-Brenwertkessel Öl-Brennwertkessel Fernwärme Durchlauferhitzer/Direktstrom Außenluftwärmepumpe + El. Erdsreichwärmepumpe	<b>Verteilnetz und Übergabe Heizung</b> <input type="radio"/> (Deutschlandmittel) Netz & Heizkörper Netz & Fußbodenheizung dezentral
<b>Qualität Boden oder Kellerdecke</b> <input type="radio"/> (U = 0,76 W/m <sup>2</sup> K) schlecht (U = 1,0 W/m <sup>2</sup> K) mittel (U = 0,70 W/m <sup>2</sup> K) gut (U = 0,38 W/m <sup>2</sup> K) best (U = 0,20 W/m <sup>2</sup> K)		<b>Verteilnetz Trinkwarmwasser</b> <input type="radio"/> (Deutschlandmittel) dezentral zentral mit Zirkulation zentral ohne Zirkulation
<b>Qualität Fenster</b> <input type="radio"/> (U = 2,1 W/m <sup>2</sup> K) schlecht (U = 2,7 W/m <sup>2</sup> K) mittel (U = 1,6 W/m <sup>2</sup> K) gut (U = 1,3 W/m <sup>2</sup> K) best (U = 0,9 W/m <sup>2</sup> K)		<b>Vorhandensein Solarthermie</b> <input type="radio"/> (Deutschlandmittel) ohne mit
		<b>Vorhandensein Photovoltaik</b> <input type="radio"/> (Deutschlandmittel) ohne mit

Abbildung 4 Übersicht der Eingaben in das Tool „Standardbilanz“

Abbildung 5 zeigt eine Übersicht der Bilanzergebnisse. Zunächst ist anzumerken, dass die Eintragungen in der Zeile „V“ für den Bestand gelten (vorher) und die Zeile „N“ jeweils die Sanierung bzw. Modernisierung abbildet (nachher).

Wichtige Ergebnisse		Erzeugereffizienz		Primärenergie Heizung		Emissionen Heizung & Warmwasser		Gesamtkostendifferenz der Maßnahmen		(mittlere) Energiepreise	
"Fingerabdruck" = nutzflächenbezogene Steigung (Transmission & Lüftung)		Heizwärmebedarf (Nutzwärme)	Wärmeabgabe des Erzeugers	Endenergie Heizung	Nutzen sowie Endenergie Heizung & Warmwasser	Emissionen incl. Haushaltsstrom	Energiekosten	ggf. Investitionskostenzuschuss oder CO <sub>2</sub> -Bepreisung für Wirtschaftlichkeit		Energiepreise	
1	Wichtige Ergebnisse										
2											
3	W/m <sup>2</sup> K	q <sub>H</sub>	q <sub>W</sub>	q <sub>W</sub>	q <sub>W</sub>	q <sub>W</sub>	q <sub>W</sub>	q <sub>W</sub>	q <sub>W</sub>	q <sub>W</sub>	q <sub>W</sub>
4	V: 1,77	99,0	106,3	0,80	132,9	132,9	132,9	132,9	132,9	132,9	132,9
5	N: 1,48	76,2	83,5	2,54	13,1	36,4	36,4	36,4	36,4	36,4	36,4
6	-16%	-23%	-21%	212%	-75%	-73%	-73%	-73%	-73%	-73%	-73%
7											
8	W/m <sup>2</sup>	q <sub>H</sub>	q <sub>W</sub>	q <sub>W</sub>	q <sub>W</sub>	q <sub>W</sub>	q <sub>W</sub>	q <sub>W</sub>	q <sub>W</sub>	q <sub>W</sub>	q <sub>W</sub>
9	V: 56	14,6	16,1	1,00	16,1	17,7	17,7	17,7	17,7	17,7	17,7
10	N: 47	14,6	16,1	1,00	16,1	17,7	17,7	17,7	17,7	17,7	17,7
11	-16%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Abbildung 5 Übersicht der Ausgabegrößen der „Standardbilanz“

Es werden ausgegeben:

- der Fingerabdruck des Gebäudes  $h$  in  $W/(m^2K)$  (trotz gleicher physikalischer Einheit nicht mit einem mittleren  $U$ -Wert oder dem  $H_T$ -Wert nach GEG zu verwechseln; der  $h$ -Wert bezieht sich auf die Nutzfläche anstelle der Hüllfläche) und die spezifische Heizlast, detailliert beschrieben in Kapitel 5.2 und 5.3,

- die Bilanz der Heizungsanlage von Heizwärmebedarf über Wärmeabgabe des Erzeugers und Erzeugereffizienz bis zu End- und Primärenergie; gleiches analog für die Trinkwassererwärmung,
- die Nutz- und Endenergie des Gebäudes insgesamt, der Haushaltsstrom (der bis heute nicht Teil einer GEG-Bilanz ist, auch wenn die Autoren dies für sehr sinnvoll halten) und die daraus resultierenden Emissionen,
- die erzeugte Energiemenge einer Photovoltaikanlage, der selbstgenutzte Anteil und die daraus resultierende Rückspeisung,
- die Energiekosten für den Einkauf von Energieträgern und unter Berücksichtigung des Stromverkaufs, wenn er vorhanden ist,
- die Investitionskosten der angewählten Verbesserungsmaßnahmen, jeweils als Vollkosten und als energierelevante Mehrkosten (letzteres unter der Annahme, dass ohnehin Maßnahmen aus Gründen des Bestandserhalts notwendig waren),
- eine Jahreskostenberechnung aus Energie, Wartungs- und Unterhalts- und Kapitalkosten sowie die Ausweisung des äquivalenten CO<sub>2</sub>-Preises, der angibt, wieviel Geld als Kapitaldienst und bei Mehrkostenbetrachtung auch unterschiedliche Unterhaltskosten jährlich in die Hand genommen werden muss, um eine Tonne CO<sub>2</sub>/a einzusparen,
- sofern die angewählten Maßnahmen unwirtschaftlich sind, wird ausgewiesen, welche Förderung erforderlich wäre, um sie gerade so wirtschaftlich werden zu lassen; alternativ welcher zusätzliche CO<sub>2</sub>-Preis auf die Energieträger politisch beschlossen werden müsste, damit es ohne Förderung eine Grenzwirtschaftlichkeit gibt.

Die konkreten Zahlen aus Abbildung 5 werden im Kapitel 2.4 genauer anhand des Beispielprojektes beschrieben.

## 2.4 Anwendungsbeispiel

Das im Kapitel 1.2 beschriebene Gebäude wird abgebildet. Die Eingaben werden so getätigt, dass einerseits die reale Ausführung berücksichtigt wird und andererseits eine bestmögliche Annäherung an den gemessenen Gasverbrauch von  $q_H = 141 \text{ kWh}_s/(\text{m}^2\text{a})$  erfolgt. Die Verbrauchsauswertung der gegebenen Gasverbräuche wird in Kapitel 3.3 näher erläutert.

Ausgangszustand		Sanierter Zustand	
<b>1. Typgebäude wählen</b>			
<input type="radio"/> EFH 		<input checked="" type="radio"/> MFH 	
Wohnfläche	141,6 m <sup>2</sup>	470 m <sup>2</sup>	
Personen	2,7	12,2	
<b>3. Lüftung beschreiben</b>			
Lüftungsart	Fensterlüftung/Abblendeanlage	Fensterlüftung/Abblendeanlage	
<b>4. Verteilnetze und Übergabe beschreiben</b>			
Heizung	Netz-Ab-Heizkörper	Netz-Ab-Heizkörper	
Warmwasser	dezentral	dezentral	
<b>5. Haupterzeuger beschreiben</b>			
Heizung	Gas-Niedertemperaturkessel	Außenluftwärmepumpe + TL	
Warmwasser	Durchlaustrichler/Direktronom	Durchlaustrichler/Direktronom	
<b>6. Zusatzerzeuger beschreiben</b>			
Solarthermie	ohne	ohne	
Photovoltaik	ohne	mit	
<b>2. Gebäudehülle beschreiben</b>			
Außenwand	mittel (U = 0,65 W/m <sup>2</sup> K)	mittel (U = 0,65 W/m <sup>2</sup> K)	
Dach/OGD	mittel (U = 0,45 W/m <sup>2</sup> K)	best (U = 0,15 W/m <sup>2</sup> K)	
Boden/KD	schlecht (U = 1,0 W/m <sup>2</sup> K)	best (U = 0,20 W/m <sup>2</sup> K)	
Fenster/Türen	schlecht (U = 2,7 W/m <sup>2</sup> K)	schlecht (U = 2,7 W/m <sup>2</sup> K)	

Abbildung 6 Eingaben des Beispielprojektes in das Tool „Standardbilanz“

Abbildung 6 zeigt die Eingaben jeweils im Ausgangszustand und nach der geplanten Modernisierung der oberen Geschossdecke, Kellerdecke und der Wärmeerzeugung einschließlich Photovoltaik.

Die Standardbilanz ermittelt mit den gewählten Eingaben eine Endenergie nur für Heizung von  $q_H = 139,3 \dots 146,4 \text{ kWh}_{HS}/(\text{m}^2\text{a})$ , siehe Abbildung 7 (dort unter „2.“). Dies wird als gute Annäherung an den gemessenen Verbrauch angesehen. Tendenziell ist davon auszugehen, dass im realen Gebäude keine nennenswerten Qualitätssicherungsmaßnahmen anzutreffen sind und dass daher der obere Wert die Realität besser widerspiegelt.

Eine wichtige Größe für die Wärmepumpenplanung ist der in Abbildung 7, Abschnitt 1 genannte „Fingerabdruck“  $h$  von  $1,48 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$  nach der Modernisierung und mit Qualitätssicherungsmaßnahmen (auf die Wohnfläche bezogene Transmissions- und Lüftungsheizlast). Er wird im Kapitel 3.4.5 verwendet, um die Wärmepumpeneffizienz nach der baulichen Verbesserung zu überprüfen. Weitere Ausführungen siehe Kapitel 5.2.

		Ausgangszustand		Sanierter Zustand		Differenz/Abweichung	
<b>1. Leistungskennwerte</b>							
		mit QS	ohne QS	mit QS	ohne QS	mit QS	ohne QS
$h$	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	1,77	1,88	1,48	1,60	-16%	-15%
$\dot{q}$	$\text{W}/\text{m}^2$	56	60	47	51	-16%	-15%
<b>2. Heizungsbilanz</b>							
		mit QS	ohne QS	mit QS	ohne QS	mit QS	ohne QS
$q_h$	$\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$	99,0	107,9	76,2	85,9	-23%	-20%
$q_{\text{out}gH}$	$\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$	106,3	117,3	83,9	96,7	-21%	-18%
$\eta JAZ_H$	---	0,80	0,75	2,54	2,15	217%	186%
$q_H$	$\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$	132,9	156,4	33,1	45,1	-75%	-71%
$q_{PH}$	$\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$	132,9	156,4	36,4	49,6	-73%	-68%
<b>3. Trinkwarmwasserbilanz</b>							
		mit QS	ohne QS	mit QS	ohne QS	mit QS	ohne QS
$q_w$	$\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$	14,6		14,6		0%	
$q_{\text{out}gW}$	$\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$	16,1	16,7	16,1	16,7	0%	0%
$\eta JAZ_W$	---	1,00	1,00	1,00	1,00	0%	0%
$q_w$	$\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$	16,1	16,7	16,1	16,7	0%	0%
$q_{PW}$	$\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$	17,7	18,4	17,7	18,4	0%	0%
<b>4. Gebäudebilanz</b>							
		mit QS	ohne QS	mit QS	ohne QS	mit QS	ohne QS
$q_{hw}$	$\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$	114,8	125,5	92,4	104,4	-20%	-17%
$q_{HW}$	$\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$	149,0	173,1	49,2	61,8	-67%	-64%
$q_{el}$	$\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$	32,4		32,4		0%	
<b>5. Photovoltaikbilanz</b>							
		mit QS	ohne QS	mit QS	ohne QS	mit QS	ohne QS
$q_{PV}$	$\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$	0,0		32,0		k.A.	
$q_{PV,\text{selbst}}$	$\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$	0,0	0,0	28,9	29,8	k.A.	k.A.
$q_{PV,\text{rück}}$	$\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$	0,0	0,0	3,1	2,2	k.A.	k.A.
<b>6. Emissionsbilanz</b>							
		mit QS	ohne QS	mit QS	ohne QS	mit QS	ohne QS
$e_{HW}$	$\text{kg}/(\text{m}^2\text{a})$	29,3	33,9	12,3	15,4	-58%	-54%
$e$	$\text{kg}/(\text{m}^2\text{a})$	37,4	42,0	13,2	16,1	-65%	-62%

Abbildung 7 Ausgabegrößen des Beispielprojektes der „Standardbilanz“ – Aspekt: Bilanzen

Darüber hinaus sollen die Ergebnisse der Berechnung kurz abschnittsweise vorgestellt werden. Abschnitt 1 zeigt die Leistungskennwerte, die zur Auslegung von Wärmeerzeugern verwendet werden können, neben dem Fingerabdruck auch die flächenbezogene Heizlast. Hier ist zu sehen, dass sich die Heizlast durch die beiden Dämmmaßnahmen um ca. 15 % vermindert. Da Außenwand und Fenster nicht geändert werden, ist hier nur eine moderate Verbesserung festzustellen.

Die Heizungsbilanz im Abschnitt 2 zeigt eine Verminderung der Nutzwärme um etwa 20 ... 23 %, der zu erzeugenden Wärme um knapp 18 ... 20 % und der Endenergie um mehr als 70 %. Letzteres ist dem Energieträgerwechsel von Erdgas zu Strom zuzuschreiben. Die Jahresarbeitszahl (als Kombination von Wärmepumpe und einem geringen Spitzenlastanteil aus Direktstrom) liegt bei nur 2,54 – unter der Annahme einer Qualitätssicherung. Sonst ist der Wert noch geringer. Dies ist sehr konservativ angenommen. Die „Energieanalyse“ kommt in Kapitel 3.4.3 auf etwas bessere Werte (2,65).

Die Gebäudebilanz in Abschnitt 4 zeigt im Zielzustand eine Endenergie von 49 ... 62 kWh<sub>el</sub>/(m<sup>2</sup>a) für Heizung und Trinkwassererwärmung. Die große Spannweite ist den starken Auswirkungen einer Qualitätssicherung auf die Gebäude- und Wärmepumpeneffizienz geschuldet. Der Haushaltsstrom von ca. 32 kWh/(m<sup>2</sup>a) wird als pauschaler Ansatz unverändert übernommen.

Im Abschnitt 5 zur Photovoltaikbilanz wird unter Annahme einer pauschalen Anlagengröße in dem Standard-MFH ein Ertrag von 32 kWh/(m<sup>2</sup>a) abgeschätzt. Etwa 29 ... 30 kWh/(m<sup>2</sup>a) können selbst genutzt werden und 2 ... 3 kWh/(m<sup>2</sup>a) werden rückgespeist.

Die Emissionsbilanz umfasst die Bereiche: Heizung, Warmwasser und Haushaltstrom und berücksichtigt ebenfalls die Selbstnutzung von Photovoltaik. Schlussendlich können die Emissionen insgesamt um etwa 62 ... 65 % vermindert werden.

		Ausgangszustand		Sanierter Zustand		Differenz/Abweichung	
		mit QS	ohne QS	mit QS	ohne QS	mit QS	ohne QS
<b>7. Vollkostenbilanz</b>							
$I_0$	€			146.192 ...	148.426		
$k_{aqu}$	€/tCO <sub>2</sub>					573 ...	547
$K_i$	€/a			6.517 ...	6.650		
$K_u$	€/a			1.217 ...	1.245		
$K_e$	€/a	16.467 ...	18.071	8.221 ...	9.967	-50% ...	-45%
$K_a$	€/a	16.467 ...	18.071	15.955 ...	17.862	-1.729 ...	-1.454
Zuschuss $I_0$	---			0% ...	0%		
zus. $k_{em}$	€/tCO <sub>2</sub>			0 ...	0		
Erdgas	€/kWh	0,136		0,136 ...	0,136		
Strom	€/kWh	0,350		0,350 ...	0,350		
<b>8. Mehrkostenbilanz</b>							
$I_0$	€			111.023 ...	112.560		
$k_{aqu}$	€/tCO <sub>2</sub>					519 ...	494
$K_i$	€/a			4.992 ...	5.082		
$K_u$	€/a			911 ...	928		
$K_e$	€/a	16.467 ...	18.071	8.221 ...	9.967	-50% ...	-45%
$K_a$	€/a	16.467 ...	18.071	14.123 ...	15.976	-2.344 ...	-2.094
Zuschuss $I_0$	---			0% ...	0%		
zus. $k_{em}$	€/tCO <sub>2</sub>			0 ...	0		
Erdgas	€/kWh	0,136		0,136 ...	0,136		
Strom	€/kWh	0,350		0,350 ...	0,350		

Abbildung 8 Ausgabegrößen des Beispielprojektes der „Standardbilanz“ – Aspekt: Kosten

Abbildung 8 zeigt in zwei Abschnitten die Voll- und Mehrkostenbilanz für die Maßnahme. Es folgen exemplarisch die Erläuterungen nur zur Vollkostenbilanz. Eine Investitionssumme von etwa 146 ... 148 T€ für die Dämmung des oberen und unteren Gebäudeabschlusses, die Anschaffung der Außenluftwärmepumpe sowie der Photovoltaikanlage in dem Standard-MFH werden abgeschätzt. Die Varianz ergibt sich aus der Annahme, dass das Gebäude eine etwas größere Heizlast aufweist, wenn keine Optimierung der Wärmebrücken und Luftdichtheit erfolgt ist. Mit dem eingesetzten Kapital zeigt sich ein äquivalenter Emissionspreis von 550 ... 570 €/t (der Preis, eine Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalent einzusparen).

Aus den Investitionskosten ergeben sich jährliche Kapitalkosten  $K_i$  sowie in Folge Wartungs- und Unterhaltskosten  $K_u$ . Aus den Endenergien der Abschnitte 4 und 5 (Abbildung 7) folgen die jährlichen Energiekosten  $K_e$ . Damit können Gesamtkosten  $K_a$  vor und nach der Modernisierung verglichen werden. Die Bilanz zeigt in diesem Fall eine Ersparnis von 1450 ... 1730 €/a. Damit ist es nicht erforderlich, diese Maßnahme zu bezuschussen, um sie wirtschaftlich werden zu lassen.

Zuletzt sei angemerkt, dass die Ergebnisse – da sie fast immer flächenbezogen angegeben werden – auf ähnliche Gebäude übertragbar sind. Zu beachten ist, dass möglichst eine ähnliche Belegung und Kompaktheit vorliegen, wobei dies aber kein Ausschlusskriterium ist.

Die wichtige Gebäudekenngröße „Fingerabdruck“  $h$  berücksichtigt die Transmissions- und Lüftungsverluste und damit v. a. für die Transmissionswärmeverluste auch die Kompaktheit des Gebäudes, da sie als spezifische Größe das Verhältnis Hüllfläche zu beheizter Fläche beinhaltet. Auf das Braunschweiger 4-Familienhaus sind die Werte trotz der Wohnflächenunterschiede (241 m<sup>2</sup> hier gegenüber 470 m<sup>2</sup> des Typgebäudes nach Standardbilanz) sehr gut übertragbar.

Absolute Kostenangaben, wie die geschätzten Investitionskosten, die Energie- und Bauunterhaltungskosten und die Gesamtkosten können in erster Näherung entsprechend unterschiedlicher Wohnflächen proportional korrigiert werden.

## 2.5 Notwendigkeiten und Möglichkeiten von Modifikationen

Das Excel-Tool ist komplett ohne Passwortschutz verfügbar. Alle Bilanzen können von kundigen Anwendern entsprechend der ausführlichen Beschreibung des Tools (Link siehe Abbildung 9) modifiziert werden.

Es wird angeraten, folgende Ansätze vor einer eigenen Anwendung des Tools kritisch zu bewerten, die im Blatt „Daten\_ALLG“ zu finden sind:

- Energiepreise: die hinterlegten Preise bilden den Stand von ca. 2020 ab. Sie müssen angepasst werden auf entweder das aktuelle Niveau oder ein erwartbares Niveau der nächsten Jahre. Letzteres ist im Beispiel erfolgt, siehe Tabelle 1. Dabei waren die Zahlen des „Langfristszenarien“-Projektes des BMWK die Leitschnur [8].
- Emissionsfaktoren: es gilt prinzipiell die gleiche Aussage wie für die Preise. Im Beispielprojekt gelten die Werte aus Tabelle 1. Teilweise substituierte Primärstoffe (z. B. Biogasanteile im Gasnetz usw.) sind darin berücksichtigt.
- Investitionskostenansätze: die hinterlegten Kostenansätze (z. B. der Preisansatz für die Dämmung einer Wand in €/m<sup>2</sup> oder für die Wärmepumpenleistung in €/kW) bilden den Stand von ca. 2015 ... 2019 ab. Sie können grundsätzlich modifiziert werden oder nur pauschal durch Hinzufügen von Preisindizes. Letzteres ist für das hier vorgestellte Anwendungsbeispiel erfolgt, indem pauschal auf alle Maßnahmen der Faktor 1,4 angesetzt wurde.

Energieträger	(brennwertbezogener) Preis, in [€/kWh]	(brennwertbezogener) Emissionsfaktor, in [g/kWh]
Erdgas	0,136	190
Heizöl	0,136	275
Strom	0,350	250
Wärmepumpenstrom	0,310	250
Fernwärme	0,150	150
Holz	0,085	15
PV-Strom	-0,070	0

**Tabelle 1 Annahmen zu Energiepreisen und Emissionsfaktoren für das Beispielprojekt**

Darüber hinaus bietet das Tool die Möglichkeit, optional folgende Szenarien im eigenen Projekt auszuprobieren:

- ein sparsameres Nutzerverhalten im Bereich der Trinkwassererwärmung (im Beispielprojekt nicht gewählt)
- ein milderes Klima als das heutige (im Beispielprojekt nicht gewählt)
- ein komplett anderes Preismodell für die Energiepreise – allein auf Basis der CO<sub>2</sub>-Emissionen (im Beispielprojekt nicht gewählt)

Für die Hochrechnung der Entwicklung des Gesamtbestandes lassen sich die Zeitpunkte 2020, 2035 und 2050 auswählen (Berücksichtigung von Rückbau, Abriss, Größenveränderung der Gebäude im statistischen Mittel sowie der Bevölkerungsentwicklung) sowie übliche und ambitionierte Modernisierungsstrategien testen. Beides ist im Beispielprojekt nicht relevant.

## 2.6 Updates und Bezugsquelle

Abbildung 9 zeigt den Link zur Software samt Handbuch mit Erläuterungen. Darin ist auch eine ausführliche Erläuterung enthalten, welche Berechnungsansätze beispielsweise angesetzt werden, um die typisierten Annahmen zu bestimmen (z. B. die Innentemperatur aus der Belegung, die Vorlauftemperatur aus dem Baustandard usw.)



Abbildung 9 Link zur Software „Standardbilanz“

Das Tool ist seit 2020 kostenlos verfügbar und es wird gepflegt. Falls Fehler angezeigt werden, gibt es ein Update. Es wurden bislang noch keine generellen Überarbeitungen der Kosten- und Preisansätze getätigt.

# 3 Planung mit der „Energieanalyse“

## 3.1 Hintergrund und Motivation

Der Hintergrund der Programmierung in seiner ersten Ausfertigung 2006 war die standardisierte Witterungskorrektur von Jahresverbrauchsdaten als Basis für eine Energieberatung. Der witterungskorrigierte Verbrauch diente als Validierung der ingenieurmäßigen Bedarfsbilanzierung. Im Laufe der Zeit wurden andere Auswertungsroutinen ergänzt.

Aus heutiger Sicht ist die wichtigste Motivation, einen Mehrnutzen aus unterjährigen Verbrauchswerten (Wochen- oder Monatswerte) zu ziehen: zur Detailbewertung von Bestandsgebäuden, zum Monitoring von Modernisierungen, aber auch als Planungsgrundlage für die Auswahl passender Blockheizkraftwerke (im zurückliegenden Zeitraum 2016 ... 2020) und aktuell von Wärmepumpen (heute).

### 3.2 Umfang des Tools

Die „Energieanalyse“ enthält die in Abbildung 10 genannten Arbeitsmappen, die nachfolgend kurz im Umfang beschrieben werden.

Deckblatt
Vorgaben
Witterungskorrektur Beratung
Witterungskorrektur GEG
Witterungskorrektur Bericht
Zähler
Energieanalyse Brennstoff
Energieanalyse Wärme
Energieanalyse Wasser
Energieanalyse Strom
Energieanalyse Kessel
Energieanalyse Mix
Kennwerte
Wärmepumpen Dimensionierung
Jahresdauerlinie BHKW
Kumulierter Verbrauch
Datenbank
Wetter
Arbeitsmappen

Abbildung 10 Umfang des Tools „Energieanalyse“

- Das „Deckblatt“ dient als solches, für den Fall, dass ein Ausdruck erstellt wird. Dann enthält es ein Inhaltsverzeichnis über die beigefügten Auswertungen.
- Als „Vorgaben“ sind die Eingaben zum Gebäudestandort (Wetterstation), zur Fläche und Personenbelegung sowie zu den Energiegehalten der eingesetzten Energieträger zu verstehen. Darüber hinaus muss angegeben werden, welche Zeiträume als Referenz für ein Langzeitklima dienen sollen.
- Die drei Mappen zur „Witterungskorrektur“ ermöglichen die Auswertung von Jahresverbrauchsdaten. Es erfolgt eine Zeit- und Witterungskorrektur der Energiemengen auf Langzeitbedingungen. Im Falle der Beratung wird als Referenzort der Standort des Gebäudes verwendet und im Falle des GEG Potsdam als Standardstandort Deutschland. Ein Bericht fasst die Ergebnisse zusammen.
- Die Datenerfassung im Blatt „Zähler“ ermöglicht die Eingabe verschiedener unterjähriger Zählerwerte – jeweils mit Ablesedatum und Zählerstand.
- Die diversen „Energieanalysen“ liefern die Auswertungen der unterjährigen Zählerwerte. Es werden beispielsweise Korrelationen zwischen den Energieverbräuchen (als zeitlich gemittelter Leistungskennwert bzw. Dauerleistung) und der Außentemperatur hergestellt.

- Die sich ergebenden „Kennwerte“ (z. B. die Endenergie pro Fläche, der Wasserverbrauch pro Kopf, die Heizgrenztemperatur usw.) werden ermittelt und anhand von Bandtachos bewertet bzw. eingeordnet.
- Die Mappen zur „Wärmepumpendimensionierung“ sowie zur „Jahresdauerlinie BHKW“ dienen der Bewertung bivalenter Systeme. Sie schaffen einen Übergang von Leistungskennwerten der Erzeuger (Auslegung) zu Jahresenergiemengen, z. B. Deckungsanteilen und Jahreseffizienzen. Bei der Auswahl von Wärmepumpen können derzeit nur Geräte zur reinen Heizwärmeerzeugung mit der Quelle Außenluft bewertet werden. Eine Begründung folgt in Kapitel 3.4.2.
- Für Öl-, Holz- oder Kohleeinkäufe liefert der „kumulierte Verbrauch“ ein Hilfsmittel zur systematischen Auswertung der diskontinuierlich eintreffenden Einkaufsbelege.
- Die „Datenbank“ enthält für 71 Wetterstationen im Bundesgebiet die Außentemperaturen als Tageswerte seit 1.1.1970 (sofern jeweils verfügbar) fortlaufend.
- Die Mappe „Wetter“ liefert interessante Einblicke in den Temperaturverlauf am gewählten Ort, z. B. über die Angabe der Erwärmung je Jahrzehnt (Ergebnis für die Messtation in Magdeburg: 0,5 K/10 a).

### 3.3 Ein- und Ausgaben

Eine Auswahl von Ein- und Ausgaben des Tools zeigen die nachfolgenden Abbildungen. Um die Darstellung einfach und verständlich zu halten, wird das Beispielmehrfamilienhaus zur Illustration aus Kapitel 1.2 gewählt.

Abbildung 11 zeigt die Zuordnung des Projektes zu einer Klimastation, hier Magdeburg – wobei auch Hannover eine naheliegende Klimastation wäre. Jeder Station ist eine minimale Außentemperatur in Anlehnung an die DIN EN 12831-1 [2] zugeordnet. Für den Fall, dass Jahreswerte ausgewertet werden sollen, muss eine Heizgrenztemperatur gewählt werden. Im Beispiel des Braunschweiger MFH wird von 15°C als Außentemperatur ausgegangen, oberhalb der nicht mehr geheizt wird.

Auswahl einer Klimastation	
aus einer Liste von Stationen:	Magdeburg <input type="button" value="v"/> Hilfe: siehe Karte und Tabelle rechts
minimale Außentemperatur:	-12 °C stattdessen eigener Wert: <input type="text" value=""/>
Grunddaten für Vergleichskennwerte und Auswertung	
Wohnfläche	241,00 m <sup>2</sup> Personen 8
Auswahl der Heizgrenztemperatur für Witterungskorrektur	
<input type="text" value="15"/> °C	Typische Werte: 15°C Bestand bis 1995 (und Referenz für Energieausweis) 12°C WSchV, EnEV/GEG, Niedrigenergiegebäude 10°C Niedrigstenergie- und Passivgebäude, KfW EH 40

Abbildung 11 Eingabedaten für Standort, Gebäudedaten und Heizgrenztemperatur in der „Energieanalyse“

Da das Wetter über die Jahre nennenswerte Schwankungen aufweist, variieren auch die Verbrauchswerte entsprechend. Für den Vergleich verschiedener Jahre wird daher ein „Langzeitklima“ als sinnvolle Basis verwendet. Auch wenn Wärmeerzeuger auf Basis der Verbräuche gewählt werden sollen, ist dies angebracht. Üblich sind – je nach Anwendungszweck – zurückliegende Zeiträume von 10 bis 30 Jahren Länge. Für das hier präsentierte Projekt wird ein eigener Zeitraum definiert: ein 15-Jahreszeitraum 2009 – 2023, siehe Abbildung 12. Für die Auslegung einer Wärmepumpe erscheint dies sinnvoll, da die sehr geringen Wintertemperaturen der z. B. 1980er und 1990er Jahre somit nicht mehr Grundlage der Auswahl sind.

Auswahl eines Referenzzeitraums für das Langzeitklima			
<input type="text" value="eigener Zeitraum"/>		01.01.1970 bis 31.12.1999 01.01.1980 bis 31.12.2009 (EnEV/GEG-Referenz) eigener Zeitraum	
von bis	<b>01.01.2009</b> <b>31.12.2023</b>	verfügbare Daten:	01.01.1970 26.01.2024

Abbildung 12 Eingabedaten zum Langzeitklima in der „Energieanalyse“

Abbildung 13 zeigt die Übersichtstabelle zur Erfassung der Energieträgerdaten, insbesondere die Heiz- und Brennwerte sowie die CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Für die gängigen Stoffe sind Eintragungen vorhanden, jedoch sind auch Freifelder für eigene Ergänzungen gegeben. Auch im Beispielprojekt wurde eine solche Zeile benutzt, um die Werte des Energieausweises (siehe Abbildung 2 in Kapitel 1.2) hinterlegen zu können.

Die Rohdaten des Energieausweises sind grundsätzlich heizwertbezogen. Dies regelt der Gesetzgeber. Das gilt auch für das im Projekt verbrauchte Erdgas. Dieses wurde zwar brennwertbezogen angerechnet, jedoch wurden die Daten für den Ausweis entsprechend korrigiert. Damit keine erneute Brennwert-Heizwert-Umrechnung erfolgt, wurde unter „Eigene“ eine entsprechende Zeile eingefügt. Ansonsten kann nachvollzogen werden, was üblicherweise erfolgt: der Brennwert eines Erdgases wird eingetragen und der Heizwert daraus standardmäßig mit dem Divisor 1,11 bestimmt – siehe Erdgas H und L in der Tabelle.

Energieträgerdaten							
		Grund- einheit	Energie- einheit	Energiegehalt		Umrechnung $f_{Hi/Hs}$	CO <sub>2</sub> -Äqu. (H <sub>i</sub> -bezogen) g/kWh
				Brennwert H <sub>s</sub>	Heizwert H <sub>i</sub>		
Gase	m <sup>3</sup> Erdgas E (früher H)	m <sup>3</sup>	kWh/m <sup>3</sup>	11,57	10,42	1,11	245
	m <sup>3</sup> Erdgas LL (früher L)	m <sup>3</sup>	kWh/m <sup>3</sup>	9,85	8,87	1,11	245
	kWh Erdgas (Brennwert)	kWh	kWh/kWh	1,00	0,90	1,11	245
	<< >>	m <sup>3</sup>	kWh/m <sup>3</sup>		0,00	1,11	245
	<< >>	m <sup>3</sup>	kWh/m <sup>3</sup>		0,00	1,11	245
	<< >>	m <sup>3</sup>	kWh/m <sup>3</sup>		0,00	1,11	245
Flüssigkeiten	l Heizöl EL	l	kWh/l	10,60	10,00	1,06	305
	m <sup>3</sup> Flüssiggas	m <sup>3</sup>	kWh/m <sup>3</sup>	32,90	30,18	1,09	260
	kg Flüssiggas	kg	kWh/kg	13,95	12,80	1,09	260
	l Flüssiggas 0% Butan	l	kWh/l	7,16	6,57	1,09	260
	l Flüssiggas 10% Butan	l	kWh/l	7,25	6,65	1,09	265
	l Flüssiggas 50% Butan	l	kWh/l	7,67	6,97	1,10	270
Feststoffe	kg Braunkohlebriketts	kg	kWh/kg	5,60	5,30	1,06	450
	srm Braunkohlebritetts	srm	kWh/srm	4030	3810	1,06	450
	kg Steinkohlebriketts	kg	kWh/kg	9,20	9,00	1,02	435
	srm Steinkohlebritetts	srm	kWh/srm	6840	6690	1,02	435
	kg Koks	kg	kWh/kg	8,30	8,20	1,01	440
	kg Laubholz Mix	kg	kWh/kg	4,36	4,10	1,06	6
	kg Buche	kg	kWh/kg	4,41	4,15	1,06	6
	rm Buche 15% Restfeuchte	rm	kWh/rm	2010	1890	1,06	6
	srm Buche 15% Restfeuchte	srm	kWh/srm	1125	1060	1,06	6
	kg Nadelholz Mix	kg	kWh/kg	4,68	4,40	1,06	6
	kg Fichte	kg	kWh/kg	4,59	4,32	1,06	6
	rm Fichte 15% Restfeuchte	rm	kWh/rm	1455	1370	1,06	6
	srm Fichte 15% Restfeuchte	srm	kWh/srm	810	765	1,06	6
	kg Hackschnitzel	kg	kWh/kg	4,57	4,30	1,06	35
	srm Hackschnitzel	srm	kWh/srm	845	795	1,06	35
	kg Pellets	kg	kWh/kg	5,21	4,90	1,06	41
srm Pellets	srm	kWh/srm	3385	3185	1,06	41	
andere	Fern/Nahwärme	kWh	kWh/kWh	1,00	1,00	1,00	295
	Strom	kWh	kWh/kWh	1,00	1,00	1,00	500
Eigene	Erdgas heizwertbezogen	kWh	kWh/kWh	1,00	1,00	1,00	245
	<< >>						

Abbildung 13 Energieträgerdaten in der „Energieanalyse“

Die drei Jahresverbräuche an Erdgas werden in der Eingabemaske samt zugehörigem Messzeitraum hinterlegt, siehe Abbildung 14. Das Analysetool ermittelt die Heizgradtage im genannten Zeitraum und am genannten Ort und stellt sie den Langzeitwerten gegenüber. Im ersten Zeitraum ergeben sich beispielsweise 43,6 kWh/a – während der Langzeitwert sich auf 49,6 kWh/a beläuft. Der Messzeitraum war zu warm, eine Korrektur für diesen Umstand liefert der Faktor „1,14“. Entsprechend ist das zweite Jahr ebenfalls etwas zu warm, aber das dritte war zu kalt. Die Details, die zu den genannten Heizgradtagen geführt haben (Anzahl von Heiztagen, mittlere Außentemperatur an diesen Heiztagen), lassen sich in der Exceltabelle nachlesen. Es wird an dieser Stelle darauf verzichtet, die Werte anzugeben.

Sofern der Verbrauchskennwert einen Anteil an Trinkwarmwasser enthalten hätte – was im Beispielprojekt nicht der Fall war – müsste dieser Anteil separiert werden. Er benötigt keine Witterungskorrektur. Es stehen mehrere Optionen zur Verfügung, den Anteil abzuschätzen.

Verbrauchserfassung und Witterungskorrektur - Energieberatung / Individueller Standort							
<b>Allgemeine Daten</b>							
Jahr bzw. Messperiode		(I)	(II)	(III)			
normiert auf Langzeitklima in Magdeburg	Zeitraum von bis	01.01.2014 31.12.2014	01.01.2015 31.12.2015	01.01.2016 31.12.2016			
Wetterdaten, hier: Heizgradtage G15	- im Verbrauchszeitraum	43,6 kWh	46,5 kWh	52,0 kWh		49,6 kWh	Magdeburg
	- Standardwerte	49,6 kWh/a	49,6 kWh/a	49,6 kWh/a		49,6 kWh/a	Magdeburg
	Klimakorrekturfaktor Beratung	1,14	1,07	0,95			
<b>Verbrauchsdaten und Anteil für Warmwasser</b>							
Verbrauchsdaten	1. Erdgas Heizwertbezug	26041 kWh	30079 kWh	31656 kWh			Heizwert: 1,00 kWh/kWh
	2. << >>						kWh/
	3. << >>						kWh/
	Gesamtverbrauch	26041 kWh	30079 kWh	31656 kWh			
Enthält der Verbrauch Warmwasser?	Abschätzung des Warmwasseranteils						
<input checked="" type="radio"/> ja	<input checked="" type="radio"/> schätzen mit Wohnflächenansatz nach HeizKoV für:	241,00 m² WF	<input type="radio"/> schätzen mit Nutzwärme 600 kWh/(P a) und 50 % Anlagen-nutzungsgrad im Wohnbau für:	8 Personen	<input type="radio"/> schätzen mit jährlichem Warmwasserverbrauch (60°C) nach HeizKoV		<input type="radio"/> eigene Vorgabe für Warmwasseranteil (z.B. aus Energiebilanz oder pauschal)
<input checked="" type="radio"/> nein							

Abbildung 14 Eingaben von Jahresverbrauchsdaten in der „Energieanalyse“

Abbildung 15 zeigt die Ergebnisse der Korrektur. Der heizwertbezogene Verbrauch beträgt witterungskorrigiert 127 kWh/(m²a). Das führt zu der Erkenntnis, dass der brennwertbezogene Verbrauch entsprechend um den Faktor 1,11 höher und somit bei 141 kWh/(m²a) liegen müsste. Dieser Wert wurde als Basis für die Nachbildung des Gebäudes in der „Standardbilanz“ nach Kapitel 2.4 verwendet.

Unter Verwendung der Witterungskorrektur auf das „Standardklima Deutschland“ und das 30-Jahresklima der GEG-Normen liegt der Wert auf ähnlichem Niveau bei 148 kWh/(m²a). Dies soll an dieser Stelle nur erwähnt werden, wird jedoch nicht weiterverfolgt. Nähere Ausführungen zu den Rechengängen sind in [12] nachzulesen.

Witterungs- und Zeitkorrektur (für die Energieberatung)					
Heizung	vor Korrektur	26.041 kWh	30.079 kWh	31.656 kWh	kWh
	nach Korrektur	29.597 kWh/a	32.068 kWh/a	30.194 kWh/a	kWh/a
	Anteil (vom korrigierten Verbrauch)	100%	100%	100%	
Trinkwarmwasser	vor Korrektur	kWh	kWh	kWh	kWh
	nach Korrektur	kWh/a	kWh/a	kWh/a	kWh/a
	Anteil (vom korrigierten Verbrauch)				
Summe	korrigierter Gesamtverbrauch	29.597 kWh/a	32.068 kWh/a	30.194 kWh/a	kWh/a
<b>Witterungskorrigierte Endenergie (heizwertbezogen) am Standort</b>					
Der witterungskorrigierte Verbrauch (Endenergie) aus Messwerten von 3 Messperiod(en) bzw. 1093 Tagen beträgt:					30.600 kWh/a
Der Wert enthält keine Energie für Warmwasser.					127,0 kWh/(m²a) Wohnfläche

Abbildung 15 Auswertung der Jahresverbrauchsdaten in der „Energieanalyse“

Mit Abbildung 16 erfolgt der Einstieg in die Energieanalyse von unterjährigen Zählerdaten, z. B. Wochen- oder Monatswerten. Anhand des genannten Schemas kann grundsätzlich ausgewählt werden, welche Zähler es gibt und wie diese im weiteren Verlauf heißen sollen. Im Beispielgebäude soll es einen Gaszähler geben („B1 Hauptzähler Brennstoff“) sowie einen Wärmemengenzähler hinter dem Gaskessel („Q1 Gesamtproduktion Wärme“).

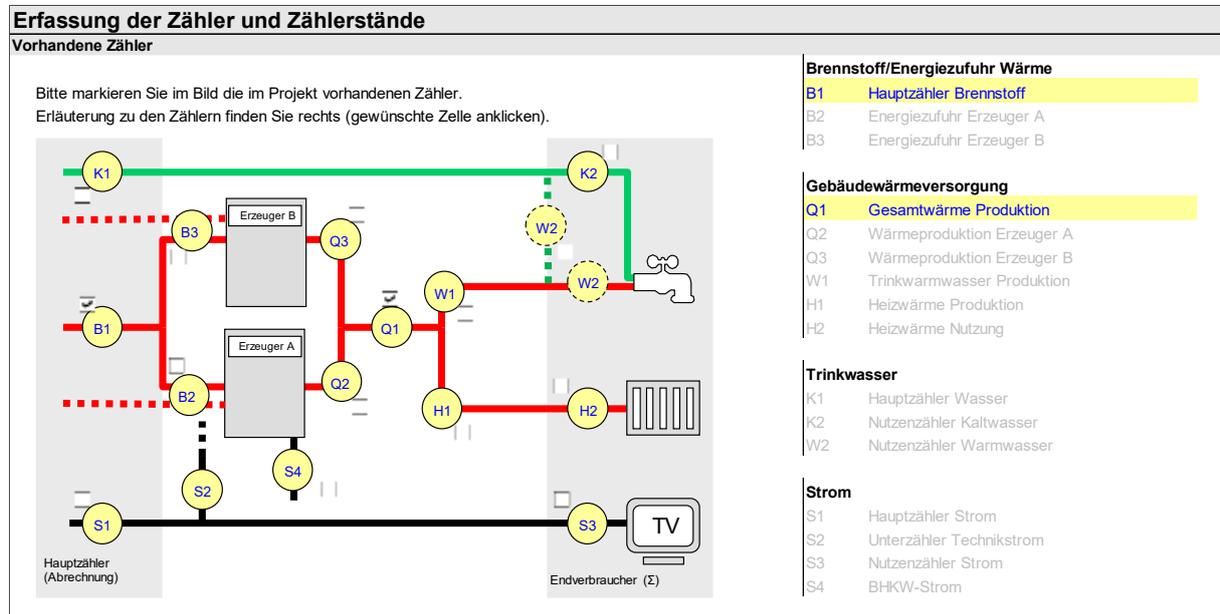


Abbildung 16 Eingaben von Zählerschemata in der „Energieanalyse“

Die zum Zählerschema gehörigen Einzelmesswerte müssen nachfolgend hinterlegt werden. Im Einzelnen handelt es sich um die Eingabe eines Datums und des zugehörigen Zählerstandes, der sich entsprechend fortlaufend erhöht. Abbildung 17 zeigt beispielhafte Eintragungen für das MFH in einem Zeitraum von 2 Jahren. Ob penibel eine monatliche Ablesung eingehalten wird, ist nicht entscheidend. Wichtiger ist, dass das korrekte Datum hinterlegt ist. Der Verbrauch zwischen zwei Ablesungen wird mit der Zeitdifferenz in eine mittlere Leistung umgerechnet. Näheres hierzu ist Kapitel 5.1 zu entnehmen.

### Zählerdaten

Datum	Hauptzähler Brennstoff	Energiezufuhr Erzeuger A	Energiezufuhr Erzeuger B	Gesamtwärme Produktion	Wärmeproduktion Erzeuger A	Wärmeproduktion Erzeuger B	Trinkwarmwasser Produktion	Heizwärme Produktion	Heizwärme Nutzung	Hauptzähler Wasser	Nutzenszähler Kaltwasser	Nutzenszähler Warmwasser	Hauptzähler Strom	Unterzähler Technikstrom	Nutzenszähler Strom	BHKW-Strom
	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	kWh	MWh	MWh	kWh	kWh	MWh	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	kWh	kWh	kWh	kWh
01.01.2014	42.000			11.067												
03.02.2014	42.704			15.754												
07.03.2014	43.233			19.766												
02.04.2014	43.519			21.869												
02.05.2014	43.638			22.851												
01.06.2014	43.776			23.923												
01.07.2014	43.791			24.180												
04.08.2014	43.793			24.292												
01.09.2014	43.813			24.342												
01.10.2014	43.824			24.268												
02.11.2014	43.945			25.035												
02.12.2014	44.374			27.900												
01.01.2015	44.935			31.764												
05.02.2015	45.678			37.100												
04.03.2015	46.243			40.992												
04.04.2015	46.792			44.954												
02.05.2015	47.019			46.937												
01.06.2015	47.115			47.719												
01.07.2015	47.139			48.275												
01.08.2015	47.144			48.410												
07.09.2015	47.149			48.346												
02.10.2015	47.242			48.621												
01.11.2015	47.565			50.827												
05.12.2015	47.974			53.295												
01.01.2016	48.324			55.670												

Abbildung 17 Eingaben von unterjährigen Zählerständen in der „Energieanalyse“

Durch die Korrelation der Verbrauchswerte als mittlere Leistungen über der mittleren Außentemperatur entstehen die Auswertungen in Abbildung 18 und Abbildung 19. Legt man die zugeführte Energie – also hier das Erdgas – zugrunde, zeigt sich unter anderem eine Heizgrenze von 15,2°C. Dazu wurde definiert, dass alle Punkte unterhalb von 14°C sicher in die Heizperiode fallen und alle Punkte oberhalb von 16°C sicher dem Sommer zuzuordnen sind. Der Bereich dazwischen wurde nicht verwendet, um die Steigung ( $H = 0,657 \text{ kW/K}$ ) und die waagerechte Grundleistung (0,16 kW) zu ermitteln. In einem Gebäude mit zentraler Trinkwassererwärmung über Erdgas wäre in diesem Bild ein „richtiger“ Sommersockel erkennbar. Im Beispiel handelt es sich um vermeidbare Sommerheizung – in geringem Umfang, weil die Trinkwassererwärmung dezentral elektrisch erfolgt und im Gasverbrauch nicht enthalten ist.

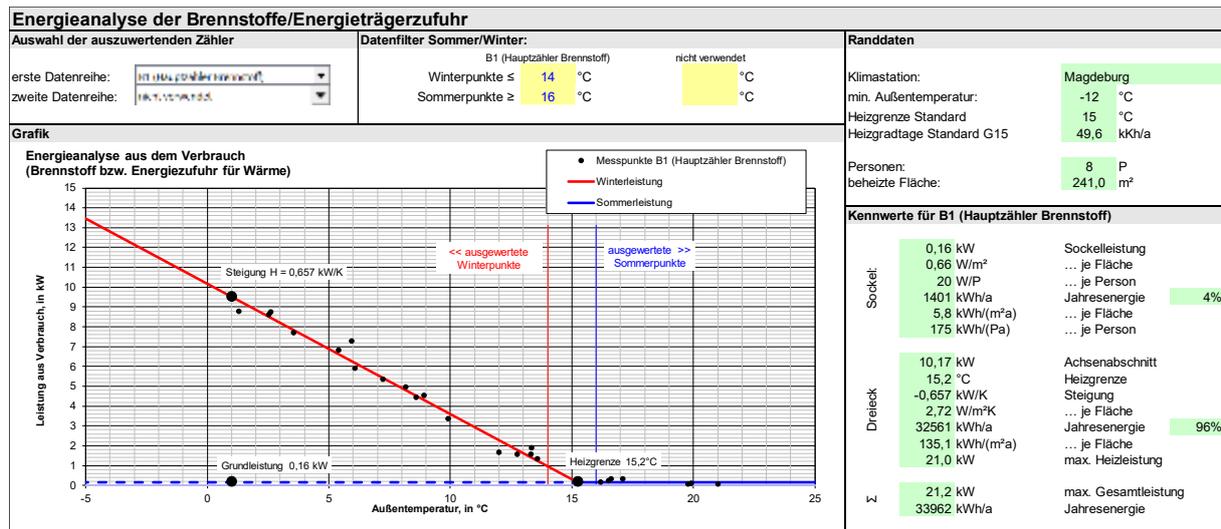


Abbildung 18 Auswertung in Form einer „Energieanalyse der Brennstoffe“

Eine analoge Auswertung – jedoch auf Basis des Wärmemengenzählers hinter dem Kessel – zeigt eine ähnliche Heizgrenze, jedoch deutlich andere Kennlinien. Die Kesseffizienz ist in den Kennwerten nicht enthalten, somit zeigen sie den Leistungsbedarf des Gebäudes (hier für die Heizung). Die sich ergebende Steigung von  $H = 0,463 \text{ kW/K}$  ist die relevante Größe für die Wärmepumpenauslegung in Kapitel 3.4. Weitere Hintergrundinformationen zur Thematik liefert das Kapitel 5.1.

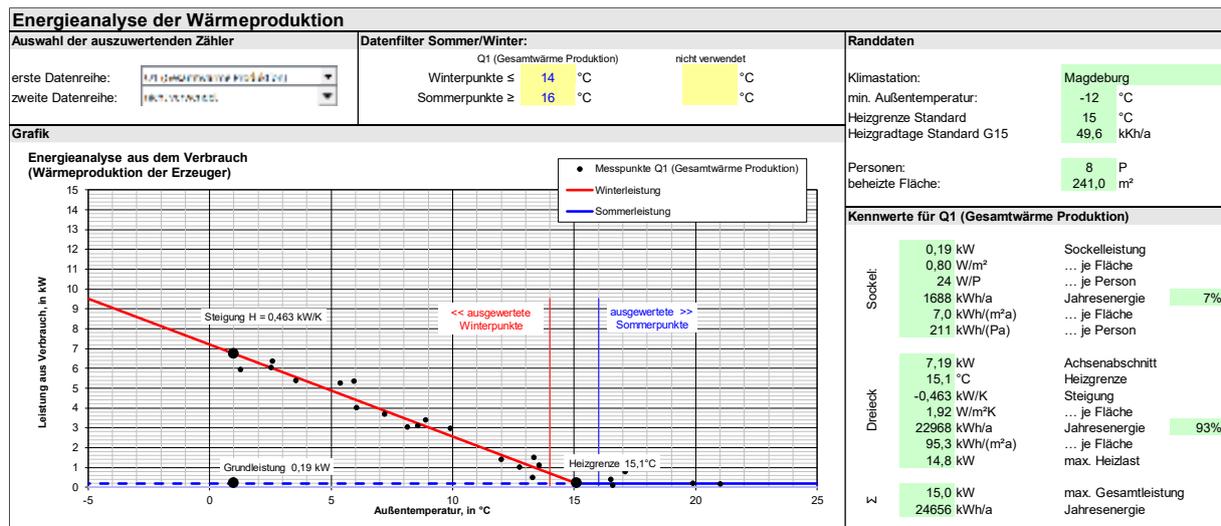


Abbildung 19 Auswertung in Form einer „Energieanalyse der Wärmeproduktion“

Aus Steigung und Grundleistung werden jeweils rechts in der Auswertung weitere Kennwerte abgeleitet. Unter anderen sind dies personen- oder flächenbezogene Werte, die zum Vergleich mit anderen Projekten oder der Literatur dienen. Darüber hinaus ist die maximale Heizlast (brutto) angegeben, die sich wie folgt bestimmen lässt:

$$\dot{Q}_{\text{brutto}} = 0,463 \text{ kW/K} \cdot (20 - (-12)) \text{ K} = 14,8 \text{ kW}.$$

### 3.4 Anwendungsbeispiel

Die Weiterführung des Anwendungsbeispiels dient explizit der Hauptzielrichtung des Beitrags: der Wärmepumpendimensionierung. Dieser Abschnitt ist wie folgt gegliedert: zunächst wird erläutert, welche Daten der Wärmepumpe benötigt werden und warum (3.4.1), anschließend werden einige grundlegende Planungsideen zu Wärmepumpen dargelegt (3.4.2).

Für das Bestandsgebäude wird eine beispielhafte Wärmepumpe gewählt (3.4.3). Da die Vorlauftemperatur recht hoch ist, sich aber mit wenig Aufwand absenken lässt, wird eine Version mit geringerer Vorlauftemperatur untersucht (3.4.4). Anschließend wird die für das Gebäude vorgesehene Gebäudeverbesserung – Geschoss- und Kellerdeckendämmung – näher betrachtet (3.4.5).

Eine Erläuterung zur Auswahl des Spitzenlasterzeugers folgt (3.4.6), wobei auch thematisiert wird, wie sich ein verändertes Klima – hier speziell nicht so kalte Winter – äußert. Der Einsatz einer Wärmepumpe mit anderer Größe (3.4.7) sowie die einer alternativen Auslegung auf Basis der Bruttoheizlast (3.4.8) schließen das Beispiel ab.

#### 3.4.1 Randdaten der Wärmepumpe

Das Tool „Energieanalyse“ verfolgt das Ziel, die veränderte Effizienz der Wärmepumpe im Verlauf der Heizperiode – also unter veränderlichen Quellen- und Senktemperaturen – abzubilden. Ideal wäre ein weit ausgedehntes Kennfeld von Herstellerdaten zur Effizienz bzw. zu aufgenommener elektrischer Leistung und abgegebener Wärmeleistung. Realistisch betrachtet, müssen aber oft wenige Kenndaten ausreichen. Viele Hersteller stellen nur eine überschaubare Anzahl von Prüfpunkten für die gewählte Wärmepumpe zur Verfügung.

Als Minimum an Eingangsdaten sind drei Prüfstandwerte vorgesehen. Prinzipiell besteht Wahlfreiheit seitens des Bedieners, aber es soll möglichst eine große Bandbreite von Quelltemperaturen zugrunde gelegt werden. Abbildung 20 zeigt die Eingaben im Projekt. Prüfpunkte an den für Außenluftwärmepumpen üblichen Quelltemperaturen von  $-7^{\circ}\text{C}$ ,  $2^{\circ}\text{C}$  und  $7^{\circ}\text{C}$  wurden recherchiert. Die zur Verfügung stehende Vorlauftemperatur von  $35^{\circ}\text{C}$  passt zwar nicht zum Projekt (es sind Heizkörper vorhanden, die auch bleiben sollen), wird aber hingenommen. Dieser Basisdatensatz dürfte der am häufigsten anzutreffende sein. Er liegt auch der Ermittlung von gemittelten jährlichen Arbeitszahlen nach VDI 4650 [10] zugrunde.

Die Wärmepumpeneffizienz, aber auch die Leistungen hängen von den Einsatztemperaturen ab, wie an den Daten erkennbar ist. Aus der Thermodynamik lässt sich eine theoretische „ideale“ Effizienz ableiten, aus den Prüfstandsdaten die reale. Dazwischen steht der exergetische Wirkungsgrad als „Abschlagsfaktor“. Die Wärmepumpe ist aber gleichzeitig regelbar. Damit ist auch eine Abhängigkeit der Effizienz von der Kompressorbelastung gegeben. Eine quadratische Korrelation des exergetischen Wirkungsgrades  $\zeta_{\text{ex}}$  (griechisch Zeta) von der Belastung  $\phi$  zeigt die Kurve rechts im Bild. Die Herleitung soll an dieser Stelle übersprungen werden, es wird auf Kapitel 5.5 verwiesen. Für den Anwender ist wichtig: es soll eine umgekehrte Parabel (mit einem erkennbaren Maximum innerhalb des Bereichs der Kompressorbelastung zwischen 0 und 1) abgeleitet werden können – dann sind die Prüfstandswerte praktikabel gewählt.



Abbildung 20 Eingaben von Wärmepumpenprüfstandsdaten in der „Energieanalyse“

Es werden aber noch weitere Randdaten zur Bewertung benötigt, wie Abbildung 21 zeigt. Die maximale elektrische Kompressorleistung (hier 8 kW) ist die Basis aller Auswertungen zur Kompressorbelastung. Es handelt sich um den Wert, der u. a. auch für die Bemessung der Stromzufuhr und Absicherung angegeben wird. Dieser Wert findet sich daher in den technischen Unterlagen unter der Rubrik „Anschlussleistung“, „max. elektrische Nennleistung“ oder „Bemessungsleistung max.“. Die Heizstableistung ist damit jedoch nicht gemeint.

Die maximal mögliche Vorlauftemperatur (hier 65°C bei einer Propanwärmepumpe) wird üblicherweise von jedem Hersteller angegeben – zu Werbezwecken beispielsweise. Die minimale Vorlauftemperatur ist ggf. schwierig zu bestimmen. Der hier hinterlegte Wert (30°C) entstammt der regelungstechnischen Beschreibung des Gerätes. Geringere Werte werden vermieden, um das Takten des Gerätes zu beschränken.

Weitere Daten der Wärmepumpe			
max. elektrische Nennleistung	8,0	kW	
Bereich minimale bis maximal zulässige Vorlauftemperatur	30	...	65 °C
Kompressor Regelbereich oben	60%	Abschlagsfaktor Realbetrieb	90%
Kompressor Regelbereich unten	10%	Abschlagsfaktor Taktbetrieb	80%

Abbildung 21 Eingaben von weiteren Randdaten für Wärmepumpen in der „Energieanalyse“

Die Regelbarkeit von Kompressoren ist begrenzt. Außerdem haben Kompressoren ein Wirkungsgradkennfeld (ähnlich wie geregelte Pumpen, bei Kompressoren abhängig vom Druckverhältnis, aber auch von den eingesetzten Kältemitteln und den besonderen Eigenschaften des Kältemittelkreislaufs, und hier v. a. des meist elektronisch geregelten Expansionsventils), in dessen Bereich sich ein Optimum finden lässt. Meist findet sich dieses Optimum im Bereich geringer Kompressorbelastungen zwischen typisch 10 ... 30 %. Die Parabel aus Abbildung 20 hat bei einer Belastung von 15 % ihr Maximum.

Aus dieser Überlegung heraus werden regelbare Kompressoren üblicherweise nicht dauerhaft mit 100 % Belastung betrieben (allenfalls kurzfristig bei Startvorgängen). Ein künftig noch weiter über Feldmessungen und Herstellerdatenbanken zu validierender Wert liegt bei 60 % als oberer Regelbereich. Auch im unteren Bereich sind der Regelung Grenzen gesetzt. Aus Herstellerunterlagen ergibt sich – bis bessere Erkenntnisse verfügbar sind – ein unterer Regelbereich von typisch 10 ... 20 %. Dieser untere Regelbereich könnte für eine weitere Optimierung im Betrieb auch variabel (abhängig von Außen- und Vorlauftemperatur) oder auch von unterschiedlich hohen Regelabweichungen, variabel eingestellt werden. Dieser Gesichtspunkt wird hier aber nicht weiter untersucht und verfolgt.

Für ein- oder mehrstufige Wärmepumpen konnten noch keine weiteren Erkenntnisse gewonnen werden. Es wird empfohlen, bis auf weiteres beide Werte auf 100 % zu setzen (bzw. auf einen vom Hersteller bekannten bzw. definierten Wert).

Als „Abschlagsfaktoren“ sollen an dieser Stelle multiplikative Werte verstanden werden, die nicht für die Auslegung dienen, sondern nur für die Bewertung des „realen Jahresbetriebs“. Bis über Feldmessungen zukünftig bessere Erkenntnisse gewonnen werden, werden die in Abbildung 21 genannten Werte angesetzt. Sie bedeuten: „Realbetrieb“: im gesamten Jahr wird pauschal die JAZ mit den Faktor 0,9 abgewertet, um z. B. Effekte wie das Abtauen zu berücksichtigen. Zusätzlich wird nur in der Phase mit Taktbetrieb (Außentemperaturen über dem sogenannten „Inverterpunkt“, Erläuterungen folgen) die noch weiter verminderte Effizienz aufgrund von Ein- und Ausschaltvorgängen bewertet.

Aus den genannten Daten kann die Leistungskennlinie der Wärmepumpe im oberen und unteren Regelbereich sowie für verschiedene Vorlauftemperaturen erstellt werden. Dies zeigt für 3 Wärmepumpen eines Herstellers Abbildung 22. Der Regelbereich des Kompressors liegt jeweils bei 10 % ... 60 %. Die Kennfelder zeigen Wärmeleistungen für Auslegungsvorlauftemperaturen von 40 °C ... 65°C. Für das hier vorgestellte Projekt wird zunächst die „große“ Wärmepumpe (rot) gewählt und im Kapitel 3.4.6 die mittlere (orange) untersucht.

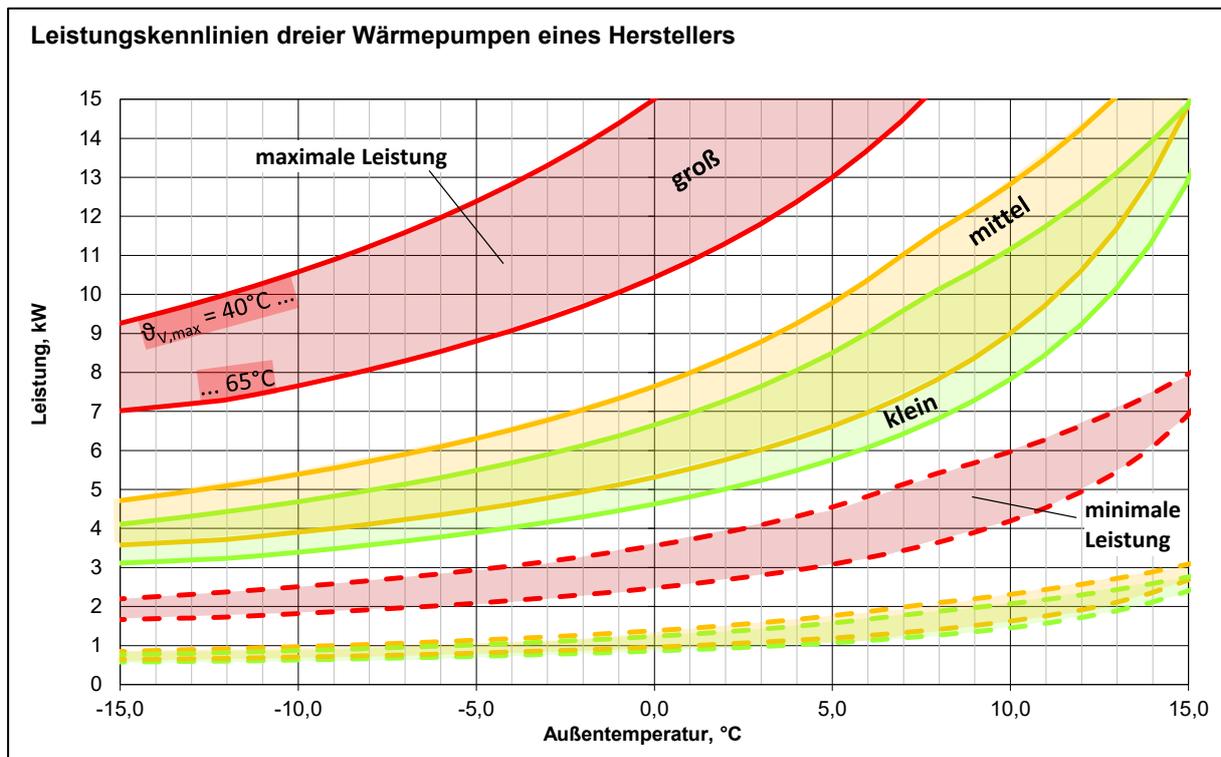


Abbildung 22 Vergleich der Leistungskennlinien verschiedener Wärmepumpen eines Herstellers

### 3.4.2 Planungsideen

Bevor die Ergebnisse für das Praxisprojekt vorgestellt werden, sollen allgemeine Planungsideen für Wärmepumpen kurz zusammengefasst vorgestellt und begründet werden. Sie haben auch Rückwirkungen auf die Programmierung der „Energieanalyse“.

1. In der Bestandsmodernisierung dürfen aus Investitionskosten Gründen häufiger Außenluft- als Erdreichwärmepumpen zum Einsatz kommen, vgl. auch [3]. Daher wurde zunächst dieses Marktsegment in dem Tool abgebildet, das sich – mit Verbrauchsdaten als Basis – an Bestandsplaner richtet.

2. Getrennte Wärmepumpen nur für die Raumheizung und für die Trinkwassererwärmung werden von den Autoren grundsätzlich empfohlen. Die Gesamteffizienz im Betrieb wird hierdurch wesentlich erhöht und die Gesamtinvestitionen sind in der Regel vergleichbar. In großen Gebäuden ist ohnehin von einer Aufteilung der Maximalleistung auf mehrere Geräte auszugehen, so dass sich kaum Mehraufwand ergibt. Die Entkopplung von Heizung und Trinkwarmwasser ist auch eine diskutabile Lösung, die wenig „Stress“ im Betrieb verspricht, v. a. bei weitgehendem Planungsverzicht. In der Programmierung ist zunächst nur die getrennte Ausstattung (bzw. nur die Auslegung der Heizungswärmepumpe) programmiert.
3. Allgemein gilt für Wärmepumpen wie für alle anderen Erzeuger, dass sie passend zu dimensionieren sind. Das heißt nach Ansicht der Autoren, dass die Nettoheizlast maßgeblich ist und die Bruttoheizlast allenfalls alternativ untersucht wird. Dies ist die Logik der Programmierung.
4. In Bestandsgebäuden, bei denen künftig noch weitere Leistungsminderungen zu erwarten sind, wie z. B. im Beispiel-MFH aufgrund der Dämmung des oberen und unteren Gebäudeabschlusses, muss auf jeden Fall der künftige Zustand mit untersucht werden. Stehen in Kürze umfassende Verbesserungen an, ist ggf. die Wärmepumpe erst einmal zu unterdimensionieren, damit später das Takten geringer ausfällt. Es ist ggf. der alte Wärmeerzeuger bis dahin weiterzuverwenden. Im Falle von Großprojekten kann auch eine Kaskade von mehreren Wärmepumpen aufgebaut werden, so dass später ein Gerät entfernt werden kann. Eine Kaskadenlösung kann zurzeit in der Programmierung nicht untersucht werden.
5. Sofern ein Heizstab der Spitzenlasterzeuger ist, besteht bei ca. 9 kW vielfach eine derzeit praktische Grenze je Wärmepumpe. Größere Geräte benötigen eine andere Absicherung. Für größere Projekte ist eine getrennte und detaillierte Untersuchung erforderlich.
6. Es wird weiterhin empfohlen, die Hydraulik – soweit möglich – einfach zu halten. In kleinen und mittelgroßen Anlagen bis ca. 30 kW thermische Leistung im Auslegungsfall können einfache Raumheizkreise mit nur einer zentralen Heizkreispumpe versorgt werden. Die Heizkreispumpe ist meist im Außengerät monoenergetischer Luft-Wasser-Wärmepumpen integriert und sorgt über ein einstellbares Überströmventil für definierte Druckverhältnisse in den angeschlossenen Heizkreisen. Ein für das Abtauen und zur Begrenzung von zu häufigem Takten klein ausgelegter Reihenpufferspeicher wird üblicherweise im Wärmepumpenrücklauf eingebaut.

### 3.4.3 Bestand

Für den Bestand sind noch Angaben zu tätigen, die den Heizkreis betreffen, siehe Abbildung 23. Insbesondere ist die maximale Vorlauftemperatur am kältesten Tag (Auslegungsvorlauftemperatur) einzutragen. Im Projekt wird der Wert verwendet, den die Heizlastberechnung (siehe Kapitel 4.3) liefert: 65°C. Er deckt sich auch mit der im Bestand – vor Ort an der jetzigen Kesselregelung – vorzufindenden Einstellung.

Die Auslegungsspreizung wird mit 10 K angesetzt (also: 65/55°C bei der minimalen Außentemperatur von -12°C). Für die Abbildung des Jahresbetriebs mit Berechnung der Jahresarbeitszahl wird eine Regelung nach Heizkurve angenommen. Der Heizflächenexponent liegt dabei bei 1,3 (er beschreibt den nichtlinearen Zusammenhang zwischen der Wärmeabgabe einer Heizfläche von der Temperaturdifferenz der mittleren Heizwassertemperatur zum Raum, Vertiefung siehe [4]).

Daten des Heizkreises			
Auslegungsvorlauftemperatur bei -12°C	65	°C	Heizflächenexponent
Auslegungsspreizung bei -12°C	10	K	1,3

Abbildung 23 Eingaben von Heizkreis- und Gebäudedaten in der „Energieanalyse“ – Version Bestand

Das Gebäude wird durch seine Gebäudeheizkennlinie:  $H = h \cdot A_{EB}$  beschrieben. Sie ist in diesem Fall aus einer Wärmemengenmessung hinter dem Bestandskessel abgeleitet. Die zugehörige Grafik ist als Abbildung 19 in Kapitel 3.3 zu finden. Die Steigung liegt bei  $H = 0,463 \text{ kW/K}$  bei einer Heizgrenztemperatur von  $\vartheta_{HG} = 15,1^\circ\text{C}$ . Das Gebäude hat eine Heizlast von  $12,6 \text{ kW}$  (netto) und  $14,8 \text{ kW}$  (brutto) bei der minimalen Außentemperatur am Standort ( $-12^\circ\text{C}$ ).

Ein alternativer Ansatz zur Ermittlung dieser Größen wäre das Verfahren der „Standardbilanz“, siehe Kapitel 2.4.

Abbildung 24 zeigt das Ergebnis als Leistungsdiagramm. Für jede Außentemperatur, die in den Langzeitwetterdaten des Ortes anzutreffen sind, wird die Gebäudeheizkennlinie berechnet. Der Normpunkt ist markiert. Die Wärmepumpenleistung wird als Kennfeld abgebildet – zwischen der maximalen und minimalen Leistung und unter Berücksichtigung der Vorlauftemperatur, die sich bei der jeweiligen Außentemperatur ergibt.

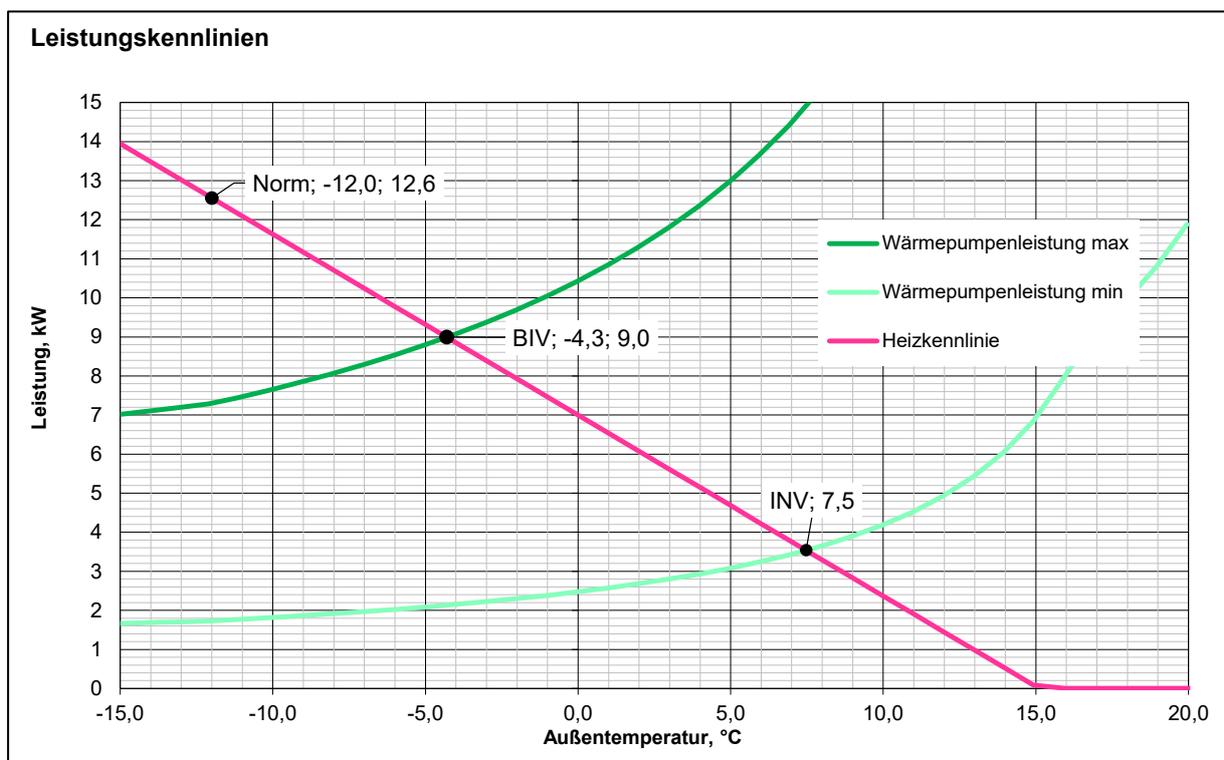


Abbildung 24 Ausgabe der Leistungskennlinien in der „Energieanalyse“ – Version Bestand

Die obere Linie ergibt sich bei maximaler Kompressorbelastung (hier angenommen mit 60% der Kompressornennleistung von  $8,0 \text{ kW}$ ). Auf ihr liegt der Bivalenzpunkt („BIV“) als Schnittpunkt mit der Gebäudeheizkennlinie. Ist es kälter, muss ein zweiter Erzeuger einspringen. Liegt der Bivalenzpunkt rechnerisch bei oder unterhalb der minimalen Außentemperatur, ist monovalenter Betrieb gegeben.

Die untere Linie ergibt sich bei minimaler Kompressorbelastung. Auf ihr liegt der Inverterpunkt („INV“), ebenfalls als Schnittpunkt mit der Gebäudeheizkennlinie. Ist es wärmer, muss die Wärmepumpe takten, weil sie nicht tiefer modulieren kann (hier angenommen mit 10% der Kompressornennleistung von  $8,0 \text{ kW}$ ).

Abbildung 25 zeigt denselben Zusammenhang, jedoch unter Berücksichtigung der Häufigkeit des jeweiligen Vorkommens der Temperaturen, vgl. auch Kapitel 5.4. Die sehr geringen Außentemperaturen sind selten. Unterhalb des Bivalenzpunktes bricht die Wärmepumpenleistung erkennbar ein – das ist zu tolerieren, weil es nicht häufig auftritt. Oberhalb (rechts) des Inverterpunktes ergibt sich Taktbetrieb (gestrichelte senkrechte Gerade).

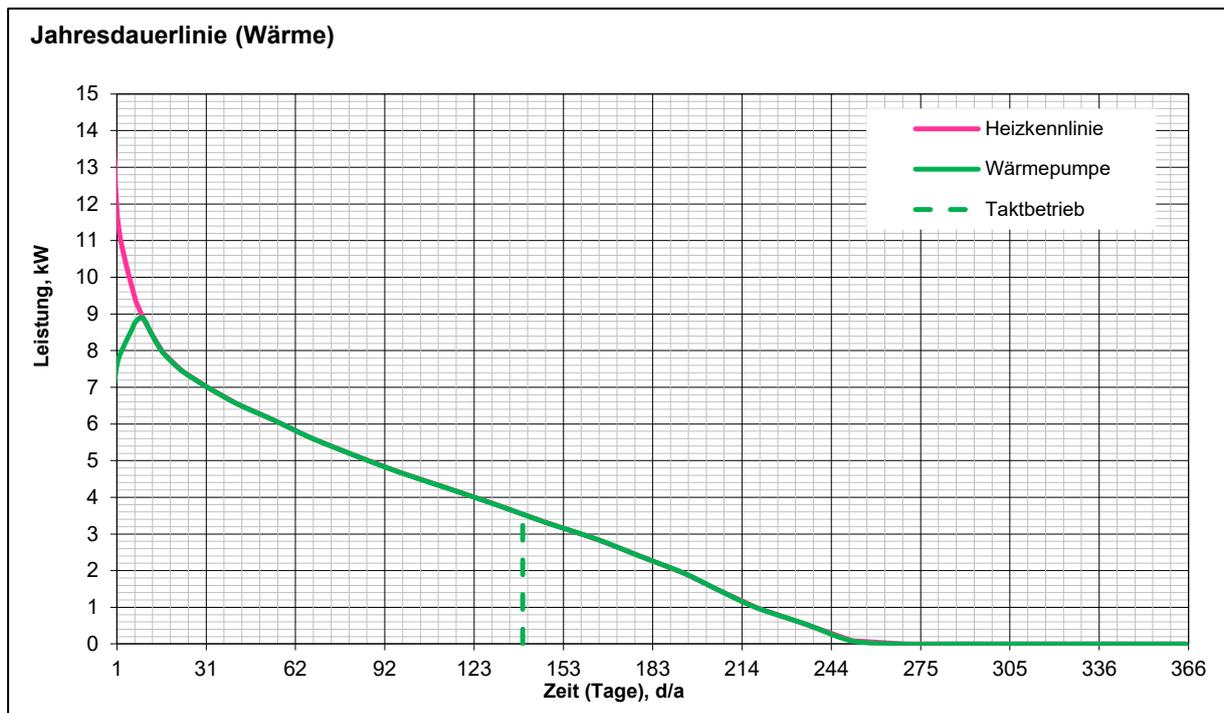


Abbildung 25 Ausgabe der Jahresdauerlinie in der „Energieanalyse“ – Version Bestand

Abbildung 26 fasst die Erkenntnisse tabellarisch zusammen. Bivalenz- und Inverterpunkt werden aufgeführt. Für beide Punkte werden Zeitangaben gemacht, die über die Häufigkeit des Vorkommens informieren. So müsste – unter Verwendung des Klimas der letzten 15 Jahre – der 2. Erzeuger durchschnittlich nur an 9 Tagen pro Heizperiode eingesetzt werden. An 115 Tagen muss die Wärmepumpe takten. Die Länge der Heizzeit insgesamt beträgt 255 Tage pro Jahr.

Der Heizstab für den Auslegungspunkt – das heißt die Fehlleistung bei minimal  $-12^{\circ}\text{C}$  – liegt bei 5,3 kW. Es kann selbstverständlich auch ein anderer Erzeuger zum Einsatz kommen. Der Leistungsanteil des Spitzenlasterzeugers beträgt 42 % der Nettoheizlast (5,3 kW von 12,6 kW). Entsprechend hat die Wärmepumpe einen Leistungsanteil von 58 % der Nettoheizlast.

Bivalenz- und Inverterpunkte			Deckungsanteile				
Bivalenzpunkt	-4,3	$^{\circ}\text{C}$	Wärmepumpe	stetig	76,6%	=	98,3%
	9,0	kW		taktend	21,7%		
darunter	9	d/a	Spitzenlast				1,7%
Inverterpunkt	7,5	$^{\circ}\text{C}$	<b>Heizzeit</b>				
	3,54	kW		255	d/a		
darüber	115	d/a	<b>COPs</b>				
<b>Heizstabelleistung bzw. Leistung Spitzenlasterzeuger</b>				ideal	mit Betriebskorrekturen		
Leistung 2. Erzeuger	5,3	kW	System gesamt	3,02	2,65		
Heizlast gesamt	12,6	kW	Wärmepumpe gesamt	3,13	2,73		
			Wärmepumpe - stetiger Betrieb	2,81	2,53		
			Wärmepumpe - Taktbetrieb	5,20	3,74		

Abbildung 26 Ergebnisse der Wärmepumpenplanung in der „Energieanalyse“ – Version Bestand

Wird das Flächenintegral unter der Kurve nach Abbildung 25 gebildet, ergeben sich die Deckungsanteile für die Wärmepumpe von 98,3 % und für den Spitzenlasterzeuger von 1,7 %. Die Werte decken sich sehr gut mit denen aus der VDI 4650 [10]. Für einen parallelen Betrieb mit Luft als Wärmequelle und einem Leistungsanteil der Wärmepumpe von 60 % werden 98 % Deckungsanteil angegeben. Eine gewisse Unschärfe besteht allerdings durch die Brutto- und Nettoheizlastabweichung, siehe auch Kapitel 5.3.

Die Gesamteffizienz der Wärmepumpe wird mit einer Jahresarbeitszahl von 2,73 bestimmt. Dieser Wert enthält die Abschläge für den Realbetrieb und das Takten. Wird der Spitzenlasterzeuger als Heizstab mitbilanziert (mit einer Arbeitszahl von 1,0) ist das Gesamtsystem entsprechend schlechter. Es hat dann eine Systemarbeitszahl von 2,65.

### 3.4.4 Vorlauftemperaturoptimierung

Wird die Vorlauftemperatur im Bestand um 5 K abgesenkt – auf dann 60°C – verbessert sich die Situation. Die Bedingungen für die Absenkung (Überprüfung der Heizflächen mit dem Tool „Optimus“) sind in Kapitel 4.3 beschrieben.

Tabelle 2 zeigt die neuen Ergebnisse tabellarisch im Vergleich zu den alten. Da die Wärmepumpe aufgrund der geringeren Vorlauftemperatur auch am kältesten Tag eine höhere Effizienz aufweist, steigt ihre Leistung. Damit sinkt der Bivalenzpunkt und auch die erforderliche Heizstableistung.

	Variante „Bestand“	Variante „Bestand mit Vorlauftemperaturoptimierung“
Vorlauftemperatur (bei -12°C)	65°C	60°C
Bivalenzpunkt	-4,3°C	-5,0°C
Leistung der Wärmepumpe (bei -12°C)	7,3 kW	7,7 kW
Leistung des Heizstabes (bei -12°C)	5,3 kW	4,9 kW
Deckungsanteil Spitzenlasterzeuger	1,7 %	1,4 %
Inverterpunkt	7,5°C	7,1°C
Tage im Taktbetrieb	115 d/a	121 d/a
JAZ nur Wärmepumpe	2,73	2,92
JAZ gesamt	2,65	2,85

**Tabelle 2 Variantenvergleich Bestand – Bestand mit Temperaturoptimierung**

Der Inverterpunkt verschiebt sich ebenfalls. Es fallen 6 Tage mehr im Taktbetrieb an. Das verschlechtert zwar die Betriebsbedingungen, aber insgesamt überwiegen die Vorteile. Die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe verbessert sich (günstigere Systemtemperatur), die des Systems auch (geringerer direkter elektrischer Nachheizbedarf).

### 3.4.5 Gebäudeverbesserung und Vorlauftemperaturoptimierung

Werden die Verbesserungsmaßnahmen an der Gebäudehülle durchgeführt, verläuft die Leistungskennlinie des Gebäudes flacher. Da hierfür keine Messdaten verfügbar sind, muss an dieser Stelle auf eine andere Möglichkeit zurückgegriffen werden, den zukünftigen Kennwert H zu bestimmen. An dieser Stelle wird die „Standardbilanz“ des modernisierten Gebäudes genutzt, siehe Kapitel 2.4 und dort Abbildung 7.

Der „Fingerabdruck“ des bilanzierten Standard-MFH liegt bei  $h = 1,48 \text{ W/m}^2\text{K}$  nach der Modernisierung und mit Qualitätssicherungsmaßnahmen. Dieser Wert wird auf das Beispiel-MFH in Braunschweig übertragen. Damit ergeben sich anhand der beheizten Fläche  $A_{EB}$  eine Steigung und eine Nettoheizlast von:

$$H = h \cdot A_{EB} = 1,48 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 241 \text{ m}^2 = 357 \text{ W/K} = 0,357 \text{ kW/K.}$$

$$\dot{Q}_{\text{netto}} = 0,357 \text{ kW/K} \cdot (15 - (-12)) \text{ K} = 9,6 \text{ kW.}$$

Das Gebäude hat eine Heizlast von 9,6 kW (netto) bei der minimalen Außentemperatur am Standort (-12°C). Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass die Vorlauftemperatur aufgrund der getätigten Dämmmaßnahmen auf dann 55°C abgesenkt werden kann.

Abbildung 27 zeigt das neue Leistungsdiagramm mit der bisherigen Wärmepumpe. Sowohl der Bivalenzpunkt als auch der Inverterpunkt sinken. Das bedeutet, dass eine geringere Leistung für den Spitzenlasterzeuger benötigt wird und dessen Deckungsanteil im Verlauf eines Jahres sinkt. Im Gegenzug steigt aber auch der Zeitanteil, in dem die Wärmepumpe im Taktbetrieb ist, was Abbildung 28 zeigt.

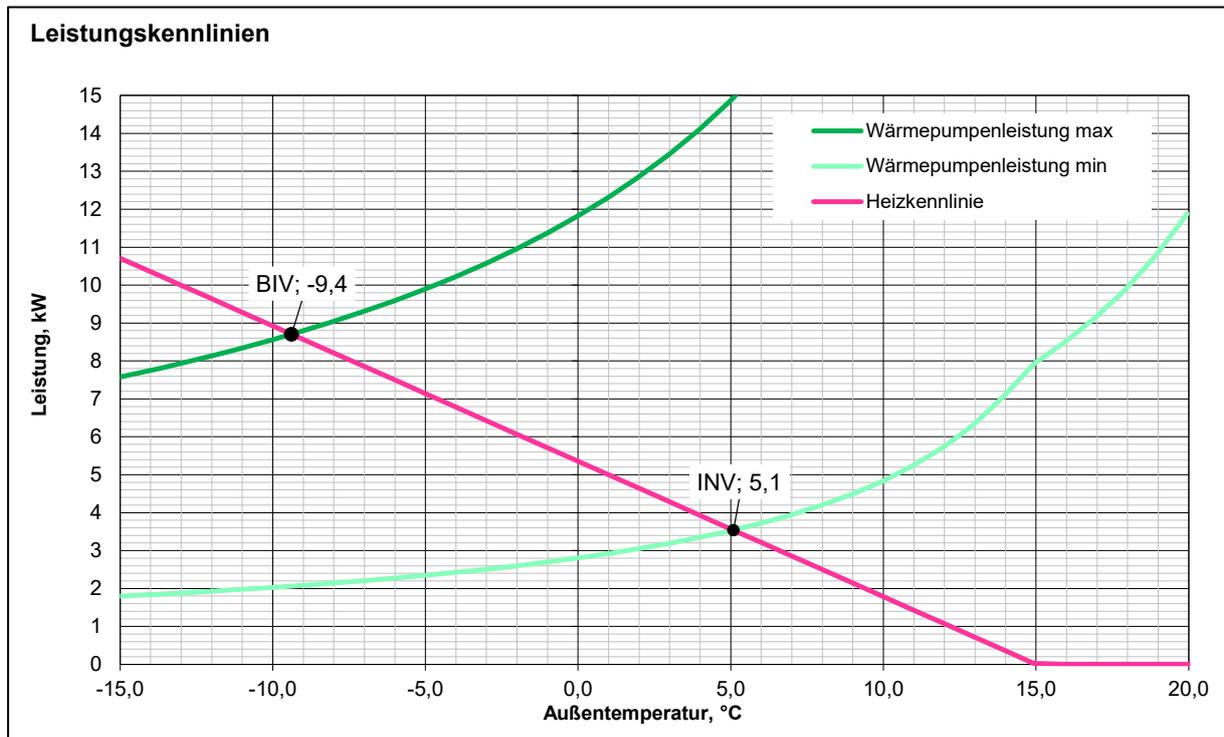


Abbildung 27 Ausgabe der Leistungskennlinien in der „Energieanalyse“ – Version Modernisierung

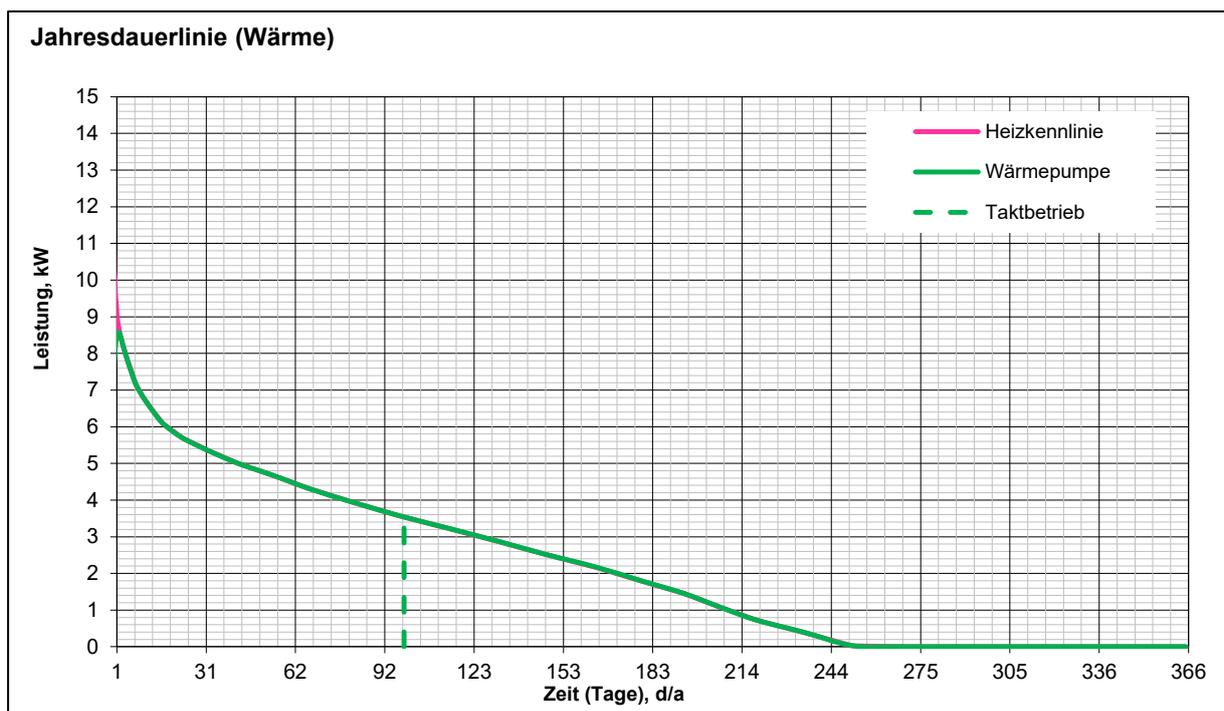


Abbildung 28 Ausgabe der Jahresdauerlinie in der „Energieanalyse“ – Version Modernisierung

Tabelle 3 fasst die Ergebnisse zusammen. Nach der Gebäudemodernisierung ist die identische Wärmepumpe in Relation zum Gebäude größer dimensioniert.

	Variante „Bestand“	Variante „Modernisierung“
Steigung H	0,463 W/K	0,357 kW/K
Heizlast (bei -12°C)	12,6 kW	9,6 kW
Vorlauftemperatur (bei -12°C)	65°C	55°C
Bivalenzpunkt	-4,3°C	-9,4°C
Leistung der Wärmepumpe (bei -12°C)	7,3 kW	8,2 kW
Leistung des Heizstabes (bei -12°C)	5,3 kW	1,5 kW
Deckungsanteil Spitzenlasterzeuger	1,7 %	0,2 %
Inverterpunkt	7,5°C	5,1°C
Tage im Taktbetrieb	115 d/a	154 d/a
JAZ nur Wärmepumpe	2,73	3,18
JAZ gesamt	2,65	3,16

**Tabelle 3 Variantenvergleich Bestand – Modernisierung**

Hinsichtlich der Effizienz treten mehrere Effekte gleichzeitig auf:

- der Zeitanteil mit Taktbetrieb nimmt deutlich zu und verschlechtert die Effizienz der Wärmepumpe in dieser Zeit,
- die abgesenkte Vortauftemperatur verbessert jedoch insgesamt die Wärmepumpeneffizienz,
- die geringere Gebäudeleistung verschiebt den Bivalenzpunkt nach unten und vermindert damit den Spitzenlastanteil fast auf null.

Die positiven Effekte überwiegen, so dass nach der Gebäudeverbesserung sich eine Jahresarbeitszahl des Systems incl. einer elektrischen Nachheizung von etwa 3,2 einstellt.

### 3.4.6 Einsatz einer kleineren Wärmepumpe

Eine nächstkleinere Wärmepumpe soll im Bestand und nach der Modernisierung gleichermaßen untersucht werden. Bei recht ähnlichen Effizienzen hat die kleinere Wärmepumpe nur eine maximale Kompressorleistung von 3,5 kW (statt 8 kW).

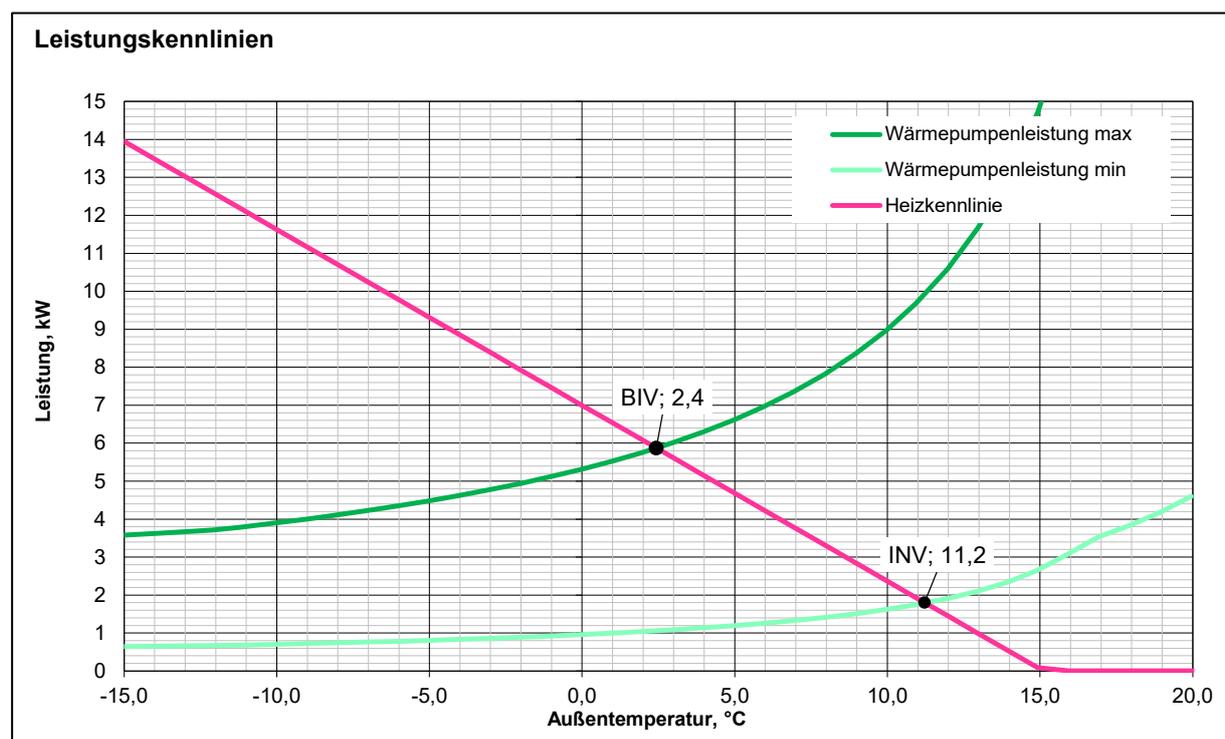


Abbildung 29 Ausgabe der Leistungskennlinien in der „Energieanalyse“ – Version Bestand mit kleinerer Wärmepumpe

Abbildung 29 und Abbildung 30 zeigen die Leistungskennlinie und Jahresdauerlinie für den Bestand. Sie sind vergleichbar mit denen aus Kapitel 3.4.3. Wegen der geringeren Leistung der Wärmepumpe als vorher verschieben sich sowohl Bivalenz- als auch Inverterpunkt zu höheren Temperaturen. Eine weitere Auswertung folgt unten mit Tabelle 4.

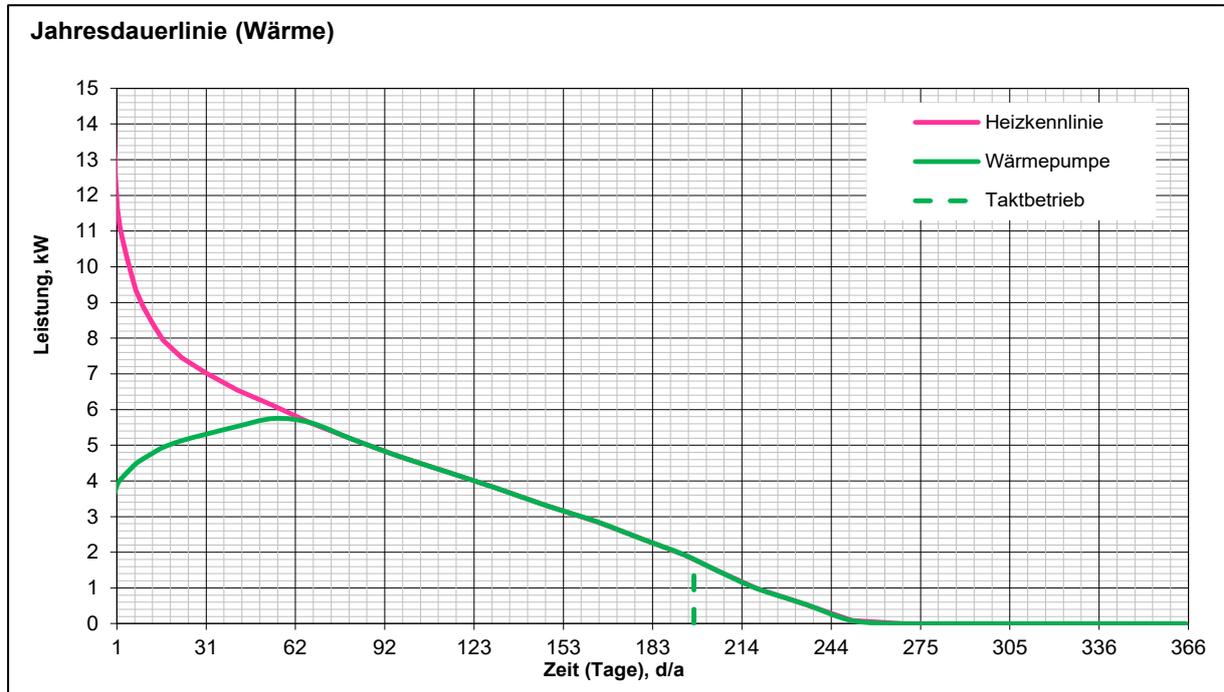


Abbildung 30 Ausgabe der Jahresdauerlinie in der „Energieanalyse“ – Version Bestand mit kleinerer Wärmepumpe

Abbildung 31 und Abbildung 32 (Kombination aus Gebäudeverbesserung und Wahl der kleineren Wärmepumpe) sind vergleichbar mit den Grafiken aus Kapitel 3.4.5. Die Auswirkungen der geringeren Wärmepumpenleistung sind grundsätzlich vergleichbar mit denen im Bestand: Bivalenz- und Inverterpunkt sind bei höheren Temperaturen zu finden als vorher. Einen Vergleich aller Varianten liefert Tabelle 4.

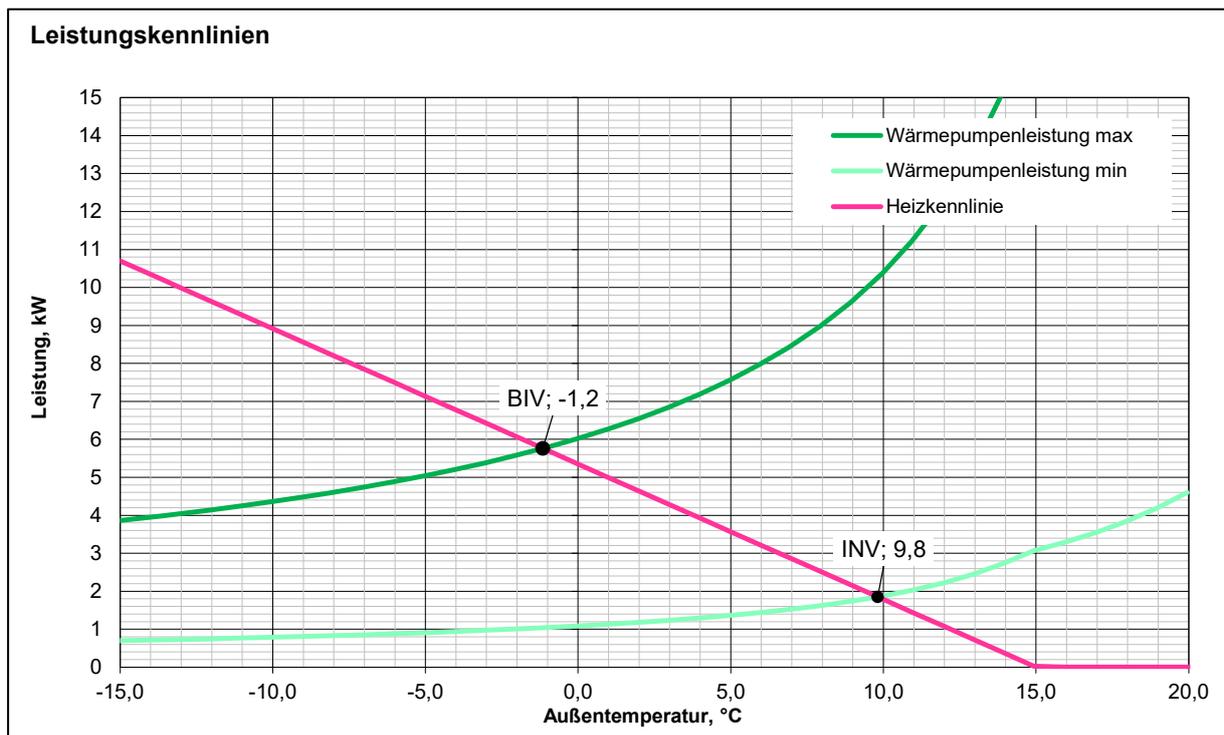


Abbildung 31 Ausgabe der Leistungskennlinien in der „Energieanalyse“ – Version Modernisierung mit kleinerer Wärmepumpe

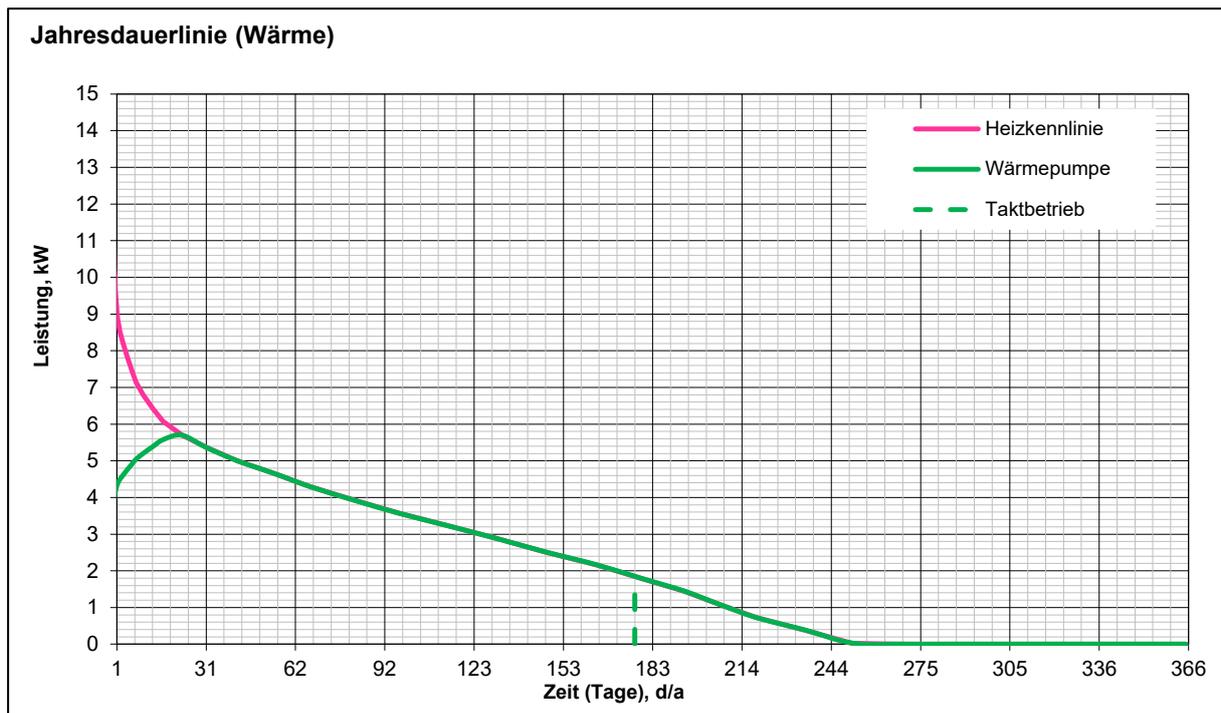


Abbildung 32 Ausgabe der Jahresdauerlinie in der „Energieanalyse“ – Version Modernisierung mit kleinerer Wärmepumpe

Die Verringerung der Wärmepumpenleistung führt zu den Auswirkungen, die bereits in Kapitel 3.4.5 angerissen wurden. Sie sollen an dieser Stelle noch einmal aufgegriffen werden.

	Variante „Bestand“		Variante „Modernisierung“	
	groß	klein	groß	klein
Wärmepumpe				
Kompressornennleistung	8 kW	3,5 kW	8 kW	3,5 kW
Steigung H	0,463 W/K		0,357 kW/K	
Heizlast (bei -12°C)	12,6 kW		9,6 kW	
Vorlauftemperatur (bei -12°C)	65°C		55°C	
Bivalenzpunkt	-4,3°C	2,4°C	-9,4°C	-1,2°C
Leistung der Wärmepumpe (bei -12°C)	7,3 kW	3,8 kW	8,2 kW	4,2 kW
Leistung des Heizstabes (bei -12°C)	5,3 kW	8,8 kW	1,5 kW	5,5 kW
Deckungsanteil Spitzenlasterzeuger	1,7 %	12,8 %	0,2 %	4,6 %
Inverterpunkt	7,5°C	11,2°C	5,1°C	9,8°C
Tage im Taktbetrieb	115 d/a	57 d/a	154 d/a	75 d/a
Effizienzen				
JAZ gesamt	2,65	2,27	3,16	2,83
JAZ nur Wärmepumpe	2,73	2,80	3,18	3,11
Belastung				
optimale Kompressorbelastung	15 %	18 %	15 %	18 %
gegebene Kompressorbelastung $\phi$	24 %	44 %	16 %	35 %

Tabelle 4 Variantenvergleich große Wärmepumpe – kleine Wärmepumpe

Bei ansonsten gleichen Randdaten verschiebt sich jeweils der Bivalenzpunkt zu höheren Außentemperaturen mit geringerer Wärmepumpenleistung. Gleichmaßen steigt die Leistungsanforderung an den zweiten Erzeuger (Heizstab) und sein Deckungsanteil nimmt zu. Zudem verschiebt sich aber auch der Inverterpunkt nach oben. Das Takten der kleineren Wärmepumpe im selben Gebäude beginnt später und der Zeitanteil im Taktbetrieb sinkt entsprechend. Das betrifft beide Gebäudeniveaus gleichermaßen.

Hinsichtlich der Effizienz des Gesamtsystems treten also mehrere Effekte gleichzeitig und gegenläufig auf:

- bei der großen Wärmepumpe nimmt der Zeitanteil mit Taktbetrieb deutlich zu und verschlechtert die Effizienz der Wärmepumpe in dieser Zeit und damit das Gesamtsystem
- allerdings nimmt bei einer großen Wärmepumpe auch der sich ergebende Spitzenlastanteil des zweiten Erzeugers ab, was das Gesamtsystem verbessert.

Der letztgenannte Effekt wirkt stärker, so dass sowohl im Bestand als auch in der Modernisierung die jeweils große Wärmepumpe besser abschneidet als die kleinere (Bestand:  $2,65 > 2,27$  und Modernisierung:  $3,16 > 2,83$ ).

Daraus könnte man nun schlussfolgern, dass eine immer weitere Vergrößerung der Wärmepumpe das System immer besser machen müsste. Dies ist jedoch nicht der Fall. Wenn zukünftig weitere Modernisierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle vorgenommen werden, wird die Auswahl der kleineren Wärmepumpe der richtige Weg sein.

Wenn weiterhin das Zuschalten des Heizstabs manuell eingeleitet würde, was an jedem Regler einstellbar möglich ist, könnten weitere Einsparungen erzielt werden. Die dann geringfügigen Unterschiede der reinen Wärmepumpenarbeitszahlen: 3,11 (kleine Wärmepumpe) gegenüber 3,18 (große Wärmepumpe) sind dann vernachlässigbar. Der Vorteil nur halb so vieler Tage der kleineren Wärmepumpe im Taktbetrieb gegenüber der größeren wird aus Sicht der Autoren als höher eingeschätzt.

Zur Erinnerung: ein geregelter Kompressor hat ein Wirkungsgradoptimum, siehe Kapitel 3.4.1. Die umgekehrte Parabel in Abbildung 20 zeigt dies sinnbildlich. Die jeweilig optimalen Werte der beide untersuchten Wärmepumpen sind in Tabelle 4 genannt. Die optimale Belastung der Geräte liegt bei 15 % bzw. 18 %.

Ein großer Bereich unterschiedlicher Belastungen wird im Verlaufe des Jahres durchlaufen – von einem Maximum im Winter bis hin zu Schwachlastphasen, denen sich das Takten anschließt. Der zeitanteilig gemittelte Wert der realen Belastung für jede Wärmepumpe ist in der Tabelle ebenso aufgeführt. Es ergeben sich Werte von 44 % (kleine Wärmepumpe im Bestand) bis 16 % (große Wärmepumpe im modernisierten Gebäude).

Wenn nun allein die Wärmepumpen betrachtet werden, fällt im Bestandsgebäude folgendes auf: beide Wärmepumpen laufen weit entfernt vom Betriebsoptimum des jeweiligen Kompressors. In diesem Fall bringt die kleinere Wärmepumpe vor allem eine Verminderung der Taktzahlen mit sich. Der Effekt des verminderten Taktens wirkt sich effizienzverbessernd aus. Die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe steigt von 2,73 auf 2,80.

In der Modernisierung ist dies anders. Es ist bei der Verkleinerung der Wärmepumpe eine Verschlechterung der Jahresarbeitszahl von 3,18 auf 3,11 festzustellen. Die große Wärmepumpe läuft im Mittel im Bereich der optimalen Kompressorbelastung. Die kleinere Wärmepumpe führt zwar zu einem geringeren Takten, aber das Verlassen des Belastungsoptimums wiegt schwerer. Insgesamt tritt eine Verschlechterung ein.

Auch an dieser Stelle lassen sich also ebenfalls zwei gegenläufige Trends festhalten:

- mit einer knappen Dimensionierung wird zwar das Takten verringert, aber der Kompressor läuft ggf. außerhalb seines Wirkungsgradoptimums
- mit einer großzügigeren Dimensionierung ergibt sich der umgekehrte Fall.

Für das Bestandsgebäude könnte eine noch etwas größere Wärmepumpe zu einer Verbesserung führen, für die Modernisierung ist mit der gewählten „großen Wärmepumpe“ ein Optimum erreicht. Alle noch größeren Geräte führen nur noch zu mehr Takten, aber nicht mehr zu einer besseren Annäherung an die optimale Belastung.

Eine Lösung wäre: den Einsatz des Heizstabs regelungstechnisch zu begrenzen und von zukünftig immer geringerer Häufigkeit niedrigster Außentemperaturen auszugehen, wie sie sich in den letzten 15 Jahren zeigt, und wie sie mit der Klimaerwärmung zu erwarten ist. Hier wäre die Wahl der kleineren Wärmepumpe die richtige Lösung, wie nachfolgend erläutert.

### 3.4.7 Minimale Außentemperatur und Auslegung des Heizstabes

An dieser Stelle soll also der Frage nachgegangen werden, wie sich eine andere minimale Außentemperatur am gegebenen Standort auswirkt. Dies könnte z. B. eintreten, wenn die weitere Klimaerwärmung bei der Bestimmung der maximalen Heizlast berücksichtigt wird. Aber auch heute schon lässt die DIN EN 12831 [2] es zu, aufgrund der Speichermasse des Gebäudes den Wert zu korrigieren.

Für die Planung des Bestandsgebäudes soll statt  $-12^{\circ}\text{C}$  ein Wert von  $-10^{\circ}\text{C}$  verwendet werden. Alle weiteren Zahlen lassen sich mit denen aus Kapitel 3.4.3 vergleichen.

Abbildung 23 zeigt die geändert notwendigen Eingaben für den Heizkreis. Wenn sich die Heizflächen im Gebäude nicht ändern und die vorherige Eintragung „ $65^{\circ}\text{C} - 10\text{ K}$ “ bei  $-12^{\circ}\text{C}$  passen, sind nun geringere Werte einzutragen. Entlang der Heizkurve gerechnet, ergeben sich die in der Abbildung eingetragenen Werte. Zum Verständnis: Die Vorlauftemperatur nimmt immer weiter ab bis auf das Niveau der Raumtemperatur, gleiches gilt für die Spreizung bis auf null, wenn Innen- und Außentemperatur gleich sind.

Daten des Heizkreises			
Auslegungsvorlauftemperatur bei $-10^{\circ}\text{C}$	62,9	$^{\circ}\text{C}$	Heizflächenexponent
Auslegungsspreizung bei $-10^{\circ}\text{C}$	9,6	K	1,3

Abbildung 33 Eingaben von Heizkreis- und Gebäudedaten in der „Energieanalyse“ – Version Bestand mit geänderter minimaler Außentemperatur

Unter diesen Randdaten ergeben sich grundsätzlich exakt identische Werte in der Berechnung. Jedoch die Heizlast des Gebäudes ist etwas geringer und damit die Leistung des zweiten Erzeugers, also im Regelfall des Heizstabs.

Bivalenz- und Inverterpunkte			Deckungsanteile			
Bivalenzpunkt	-4,3	$^{\circ}\text{C}$	Wärmepumpe	stetig	76,6%	= 98,3%
	9,0	kW		taktend	21,7%	
darunter	9	d/a	Spitzenlast			1,7%
Inverterpunkt	7,5	$^{\circ}\text{C}$	<b>Heizzeit</b>			
	3,54	kW		255	d/a	
darüber	115	d/a	<b>COPs</b>			
<b>Heizstabileistung bzw. Leistung Spitzenlasterzeuger</b>				ideal	mit Betriebskorrekturen	
Leistung 2. Erzeuger	4,0	kW	System gesamt	3,02	2,65	
Heizlast gesamt	11,6	kW	Wärmepumpe gesamt	3,13	2,73	
			Wärmepumpe - stetiger Betrieb	2,81	2,53	
			Wärmepumpe - Taktbetrieb	5,20	3,74	

Abbildung 34 Ergebnisse der Wärmepumpenplanung in der „Energieanalyse“ – Version Bestand mit geänderter minimaler Außentemperatur

Im Projekt sinkt die Heizlast von 12,6 kW auf 11,6 kW. Die Heizstabelleistung sinkt von 5,3 kW auf 4,0 kW. Die Differenzen sind nicht identisch, denn die Wärmepumpe hat bei -10°C mehr Leistungsvermögen und damit sinkt die verbleibende Restleistung überproportional.

Die Verwendung einer abweichenden minimalen Außentemperatur hat also vor allem einen Einfluss auf die Wahl des 2. Erzeugers – nicht auf die Wahl der Wärmepumpe.

### 3.4.8 Bestandsauslegung mit Bruttoheizlast

Anhand des Bestandsgebäudes soll nachfolgend gezeigt werden, welche Auswirkungen eine Planung mit der Bruttoheizlast hat. Eine weitere theoretische Vertiefung ist in Kapitel 5.3 zu finden.

Auswahl der Datenherkunft (für die Heizkennlinie)				
	Werte aus "EAV Wärme" <input type="radio"/>	Werte aus "WittKorr" <input type="radio"/>	separate Eingabe <input checked="" type="radio"/>	
Steigung:	0,463		0,547	kW/K
Heizgrenztemperatur:	15,1		15,1	°C
min. Außentemperatur:	-12,0		-12,0	°C

Abbildung 35 Eingaben der Gebäudeheizkennlinie in der „Energieanalyse“ – Version Bestand und Bestand nach Bruttoheizlast

Für das Bestandsgebäude wird angenommen, dass die Leistung des kältesten Tages entsprechend höher liegt. Abbildung 35 zeigt die Eingaben zur Beschreibung der Gebäudeheizkennlinie. Links die Werte, die bislang zum Einsatz kamen und zur Nettoheizlast führen und rechts die modifizierten Werte.

Die Eingabe der neuen Steigung ergibt sich wie folgt:

- Nettoheizlast bei -12°C:  $0,463 \text{ kW/K} \cdot (15,1 - (-12)) \text{ K} = 12,55 \text{ kW}$
- Bruttoheizlast bei -12°C:  $0,463 \text{ kW/K} \cdot (20 - (-12)) \text{ K} = 14,82 \text{ kW}$
- Verhältnis Brutto zu Nettoheizlast:  $14,82 \text{ kW} / 12,55 \text{ kW} = 1,181$
- neue Steigung:  $0,463 \text{ kW/K} \cdot 1,181 = 0,547 \text{ kW/K}$

Hintergrund der etwas kompliziert anmutenden Überlegung: es wird angenommen, dass nur die Eingaben am Auslegungspunkt (hier für -12°C) zu korrigieren sind, aber die Heizgrenztemperatur korrekt ist und damit unverändert zum Einsatz kommt. Damit ergeben sich andere Leistungsbedarfe für die kalten Tage, z. B. ein anderer Bivalenzpunkt, aber fast identische Werte für die Übergangstage, also näherungsweise ein identischer Inverterpunkt.

Mit dieser Logik: die Gebäudeheizkennlinie verbindet die Punkte „Brutto am kältesten Tag“ und „Nettonull bei Heizgrenze“ erfolgen z. T. auch Herstellersimulationen nach VDI 4650.

Abbildung 36 zeigt das Ergebnis für die Leistungsplanung. Das Diagramm ist direkt vergleichbar mit dem aus Kapitel 3.4.3.

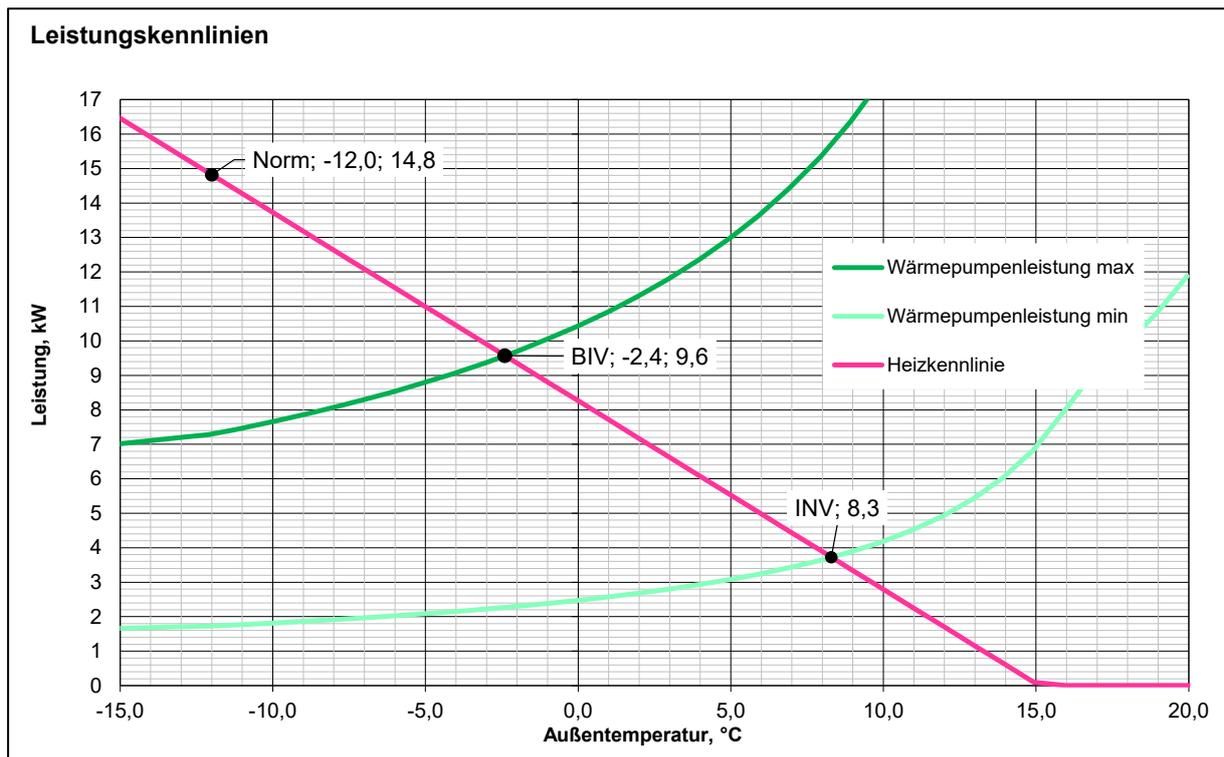


Abbildung 36 Ausgabe der Leistungskennlinien in der „Energieanalyse“ – Version Bestand mit Bruttoheizlastauslegung

Tabelle 5 fasst die Ergebnisse der Planung zusammen. Da die Heizlast am kältesten Tag deutlich größer angesetzt wird, fällt – bei Verwendung der gleichen Wärmepumpe – der Spitzenlasterzeuger größer aus. Mit 7,5 kW von 14,8 kW liegt seine Leistung etwa bei 50 %. Entsprechend beträgt der Wärmepumpenanteil ebenfalls 50 %. In der „Nettoplanung“ ergeben sich gut 40 % für den Heizstab und knapp 60 % für die Wärmepumpe.

	Variante „Bestand“	Variante „Bestand Brutto“
Heizlast	12,6 kW (netto)	14,8 kW (brutto)
Bivalenzpunkt	-4,3°C	-2,4°C
Leistung der Wärmepumpe (bei -12°C)	7,3 kW	7,3 kW
Leistung des Heizstabes (bei -12°C)	5,3 kW	7,5 kW
Deckungsanteil Spitzenlasterzeuger	1,7 %	3,2 %
Inverterpunkt	7,5°C	8,3°C
Tage im Taktbetrieb	115 d/a	102 d/a
JAZ nur Wärmepumpe	2,73	2,69
JAZ gesamt	2,65	2,56

Tabelle 5 Variantenvergleich Bestand Nettoheizlast – Bestand Bruttoheizlast

Die „Bruttoplanung“ unterschätzt etwas die Problematik des Taktens – der ermittelte Inverterpunkt wird etwas höher und damit die Tage im Taktbetrieb etwas geringer bestimmt.

Auf Basis der Planung mit der Bruttoheizlast könnte eine Fehloptimierung erfolgen, die am Ende zu einer überdimensionierten Wärmepumpe führt – mit allen Problemen, insbesondere vermehrtem Takten und zu hohen Investitionen.

Die Verfasser dieses Textes empfehlen die Verwendung der Nettoheizlast und mit dieser das Planungsziel einer Systemoptimierung nach der „Jahresarbeitszahl gesamt“.

### 3.5 Notwendigkeiten und Möglichkeiten von Modifikationen

Das Exceltool „Energieanalyse“ unterliegt einem Passwortschutz für die gesamte Arbeitsmappe, dies schützt den Rechenkern, der für Anwender nicht änderbar ist. Fehler oder Problem können über die Downloadseite gemeldet werden.

Jedoch sind die einzelnen sichtbaren Arbeitsblätter ohne Passwortschutz modifizierbar. So können Grafiken beispielsweise in der Optik oder hinsichtlich der Achsen angepasst werden.

Die Datenbank mit den tagesweisen Außentemperaturen kann frei vom Anwender ergänzt werden.

### 3.6 Updates und Bezugsquelle

Abbildung 37 zeigt den Link zur Software. Ein separates Handbuch existiert nicht, jedoch sind unter dem Link auch frühere Fachartikel zu finden, die die Theorie hinter der Auswertung erläutern.



Abbildung 37 Link zur Software „Energieanalyse“

Das Tool ist seit 2006 kostenlos verfügbar und es wird durch Aktualisierung 2024 bis heute gepflegt. Insbesondere heißt dies, dass jeweils etwa 2-mal jährlich die tagesweisen Außentemperaturen in der Datendank ergänzt werden. Darüber hinaus wird die Programmierung fehlerkorrigiert und ständig erweitert. Die Wärmepumpenauswertung ist seit 2024 vorhanden.

## 4 Optimierung mit „Optimus“

### 4.1 Hintergrund und Motivation

Die Programmierung in ihrer ersten Ausfertigung 2004 war gebunden an das DBU-Forschungsprojekt „Optimus“ [7]. Das Projekt mit dem Langtitel „Optimus - Umweltkommunikation in der mittelständischen Wirtschaft am Beispiel der Optimierung von Heizungssystemen durch Information und Qualifikation zur nachhaltigen Nutzung von Energieeinsparpotenzialen“ widmete sich u. a. dem vereinfachten hydraulischen Abgleich.

### 4.2 Umfang des Tools

Das Tool „Optimus“ enthält die in Abbildung 38 genannten Arbeitsmappen, die nachfolgend kurz im Umfang beschrieben werden. Ein Link zur ausführlichen Beschreibung ist in Kapitel 4.5 zu finden.

Intro
Projektdeckblatt
A Vorhandene Anlagentechnik
B Räume (30 x)
C Heizflächen und Ventile (30 x)
D Optimierung Temperatur
E Optimierung Druck & Ventile
Fachunternehmererklärung
Aufnahmebogen (4 x) zum Druck
Handrechenbogen (5x) zum Druck
Arbeitsmappen

Abbildung 38 Umfang des Tools „Optimus“

- Das „Intro“ ist die zentrale Startseite des Tools, das über Makros verfügt. Diese sind zur einfachen Handhabung notwendig und dienen dem Ein- und Ausblenden der zahlreichen Blätter. Von dieser Arbeitsmappe aus lassen sich alle Blätter gezielt einblenden.
- Das „Projektdeckblatt“ enthält vor allem Adressangaben zum Projekt und zum Bearbeiter. Außerdem wird der Standort und damit eine minimale Außentemperatur an dieser Stelle festgelegt.
- In der Arbeitsmappe „A“ wird das Grundsystem der gegebenen Anlagentechnik beschrieben. Insbesondere, welche Einstellmöglichkeiten die Pumpe in der Heizzentrale aufweist.
- Die Arbeitsmappen „B“ gibt es insgesamt 30 Mal. In jedem dieser Blätter wird jeweils ein Raum mit seiner Grundfläche, den Hüllflächen, Wärmedurchgangskoeffizienten, und Luftwechsellinien beschrieben.
- Ebenfalls 30-fach verfügbar ist die Arbeitsmappe „C“. Sie enthält für jeden Raum die Beschreibung von bis zu 3 Heizkörpern und dem zugehörigen Thermostatventil. Es gibt für beide Elemente Schnittstellen zu Produktdatenbanken.
- Im Blatt „D Optimierung Temperatur“ schlägt das Tool eine erforderliche Vorlauftemperatur vor, die zu bestätigen oder abweichend zu wählen ist. Die sich ergebende Rücklauftemperatur einer jeden Heizfläche sowie die Volumenströme werden bestimmt.
- Die Mappe „E“ dient der Erfassung von Druckverlusten durch zentrale Einbauten, z. B. Wasserfilter, Wärmemengenzähler oder weiterer Festwiderstände. Auch wird ein Vorschlag für eine einzustellende Druckdifferenz an der Pumpe ausgegeben. Sofern die Pumpe nicht (sinnvoll) einstellbar ist, werden alternative Verbesserungsvorschläge unterbreitet. Der Anwender legt die Druckerhöhung fest. Für alle Ventile werden daraufhin die Voreinstellungen bestimmt, sofern es sich um Ventile aus der Datenbank handelt.
- Das Projekt kann über eine „Fachunternehmererklärung“ dokumentiert werden.
- Für die Handrechnung gibt es 4 „Aufnahmebögen“ sowie 5 „Rechenbögen“ zum Ausdrucken.

### 4.3 Anwendungsbeispiel

Es wird das Bestandsgebäude im gegebenen Zustand nachgerechnet, d. h. mit den Fenstern und der Wanddämmung aus den 1990er Jahren, aber ohne die zusätzlichen Deckendämmungen. Der Hintergrund dieser Berechnung könnte der Einbau der Wärmepumpe sein, die sinnvollerweise durch einen hydraulischen Abgleich und eine Temperaturoptimierung begleitet wird.

Abbildung 39 zeigt exemplarisch die Eingabeoberfläche für einen Raum. Eingegeben werden die Hüllflächen in 4 Rubriken. Der obere Gebäudeabschluss wird vereinfachend zusammengefasst (Dächer, Decken) und mit einem repräsentativen Wärmedurchgangskoeffizienten bewertet. Auch gilt für alle Flä-

chen dieser Rubrik vereinfacht dieselbe seitige Temperatur, d.h. Außentemperatur. Eine analoge Zusammenfassung von Flächen zu niedrig beheizten Räumen und dem Keller bzw. Erdreich erfolgt. Sofern jeweils ein Wärmedurchgangskoeffizient bekannt ist, kann er eingegeben werden. Alternativ sind Vorschläge abhängig von der Konstruktion und Dämmung vorhanden. Es werden daraus die Transmissionsheizlasten bestimmt. Aus der Grundfläche wird ein Volumen abgeschätzt. Zusammen mit dem Luftwechsel wird die Lüftungheizlast ermittelt. Für den Raum ergibt sich insgesamt eine Raumheizlast, hier 333 W für ein EG-Bad.

In der Berechnung nach DIN/TS 12831-1 [2] kann detaillierter die jeweils an das Bauteil rückseitig angrenzende Temperatur beschrieben werden, auch müssen die Flächen nicht zusammengefasst werden. Darüber hinaus ist die Innentemperatur des betreffenden Raumes frei wählbar, hier werden pauschal 20°C angesetzt. Das Luftvolumen kann exakter bestimmt und Wärmebrückenzuschläge projektbezogen eingegeben werden.

Insgesamt sind somit nur die wichtigsten Einflussgrößen erfasst, so dass das Tool an dieser Stelle eher das Pareto-Prinzip verfolgt – aber praxistaugliche Ergebnisse liefert, vgl. auch [4].

**Verfahren zur Optimierung von Ein- und Zweifamilienhäusern**

**B1: Allgemeine Raumdaten** Raumbezeichnung:  Nr.  **Formblatt B: Raumheizlast**

**B2: Bestimmung der Heizlast durch Transmission und Lüftung** (siehe Handbuch - Hilfe 3 bis 7)

<b>Außenwände</b>	Fachwerk und Ziegelwände unter 36 cm, keine Dämmung	Ziegelwände über 36 cm, Wände mit 0 ... 2 cm Dämmung	alle Konstruktionen mit 3 ... 6 cm Dämmung	alle Konstruktionen mit 7 ... 12 cm Dämmung	alle Konstruktionen mit mehr als 12 cm Dämmung	Eigener Wert	Transmissionslast
Fläche: <input type="text" value="5,88"/> m <sup>2</sup>	<input type="radio"/> sehr schlecht	<input type="radio"/> schlecht	<input type="radio"/> normal	<input checked="" type="radio"/> gut	<input type="radio"/> sehr gut	<input type="text" value="0"/> W/(m <sup>2</sup> K)	<input type="text" value="94"/> W
U =	1,7 ... 2,5 W/(m <sup>2</sup> K)	1,2 ... 1,69 W/(m <sup>2</sup> K)	0,7 ... 1,19 W/(m <sup>2</sup> K)	0,3 ... 0,69 W/(m <sup>2</sup> K)	unter 0,3 W/(m <sup>2</sup> K)		
<b>Dächer und Geschossdecken zum unbeheizten Dach</b>	Steindecke, Betondecke, Stahldach mit Putz, keine Dämmung	Stahlbetonfachdach, Decken und Dächer mit 0 ... 2 cm Dämmung	Holzbalkendecken, alle Konstruktionen mit 3 ... 6 cm Dämmung	alle Konstruktionen mit 7 ... 12 cm Dämmung	alle Konstruktionen mit mehr als 12 cm Dämmung	Eigener Wert	Transmissionslast
Fläche: <input type="text" value="0,00"/> m <sup>2</sup>	<input type="radio"/> sehr schlecht	<input type="radio"/> schlecht	<input type="radio"/> normal	<input type="radio"/> gut	<input type="radio"/> sehr gut	<input type="text" value="0"/> W/(m <sup>2</sup> K)	<input type="text" value="0"/> W
U =	1,7 ... 2,5 W/(m <sup>2</sup> K)	1,2 ... 1,69 W/(m <sup>2</sup> K)	0,7 ... 1,19 W/(m <sup>2</sup> K)	0,3 ... 0,69 W/(m <sup>2</sup> K)	unter 0,3 W/(m <sup>2</sup> K)		
<b>Kellerdecken, erdreich-berührte Bauteile, Flächen zu unbeheizten Räumen</b>	Feldsteine, Stahlbeton, Stahlstein, keine Dämmung	Gewölbe mit Dielen, mit 0 ... 2 cm Dämmung	Holzbalkendecken, alle Konstruktionen mit 3 ... 6 cm Dämmung	alle Konstruktionen mit 7 ... 12 cm Dämmung	alle Konstruktionen mit mehr als 12 cm Dämmung	Eigener Wert	Transmissionslast
Fläche: <input type="text" value="4,25"/> m <sup>2</sup>	<input type="radio"/> sehr schlecht	<input type="radio"/> schlecht	<input type="radio"/> normal	<input type="radio"/> gut	<input type="radio"/> sehr gut	<input type="text" value="0"/> W/(m <sup>2</sup> K)	<input type="text" value="120"/> W
U =	1,7 ... 2,5 W/(m <sup>2</sup> K)	1,2 ... 1,69 W/(m <sup>2</sup> K)	0,7 ... 1,19 W/(m <sup>2</sup> K)	0,3 ... 0,69 W/(m <sup>2</sup> K)	unter 0,3 W/(m <sup>2</sup> K)		
<b>Fenster und Türen</b>	Einfachverglasung	Doppelverglasung (Isolierverglasung)	doppeltes Wärmeschutzglas	dreifaches Wärmeschutzglas		Eigener Wert	Transmissionslast
Fläche: <input type="text" value="0,72"/> m <sup>2</sup>	<input type="radio"/> schlecht	<input checked="" type="radio"/> normal	<input type="radio"/> gut	<input type="radio"/> sehr gut		<input type="text" value="0"/> W/(m <sup>2</sup> K)	<input type="text" value="51"/> W
U =	über 2,5 W/(m <sup>2</sup> K)	1,7 ... 2,5 W/(m <sup>2</sup> K)	1,2 ... 1,69 W/(m <sup>2</sup> K)	0,7 ... 1,19 W/(m <sup>2</sup> K)			
<b>Lüftungheizlast</b>	Raucheräume, Zulufräume bei Lüftungsanlagen	normal genutzte Räume mit undichten Fenstern	normal genutzte Räume mit dichten Fenstern	Ablufräume bei Lüftungsanlagen		Eigener Wert	Lüftungslast
Grundfläche: <input type="text" value="4,25"/> m <sup>2</sup>	<input type="radio"/> sehr hoch	<input type="radio"/> hoch	<input checked="" type="radio"/> normal	<input type="radio"/> gering		<input type="text" value="0"/> h <sup>-1</sup>	<input type="text" value="68"/> W
n =	0,7 ... 1,0 h <sup>-1</sup>	0,6 ... 0,69 h <sup>-1</sup>	0,4 ... 0,59 h <sup>-1</sup>	0,1 ... 0,39 h <sup>-1</sup>			
<b>B3: Raumheizlast</b>	Handeingabe: <input type="text" value="333"/> W	Keine Handeingabe? Summe der Werte aus B2: <input type="text" value="333"/> W		der Werte aus B2: <input type="text" value="333"/> W			

Abbildung 39 Vereinfachte Raumheizlastberechnung im Tool „Optimus“

Abbildung 40 zeigt die Eingaben zu den Heizflächen und Ventilen, am Beispiel des Wohnzimmers. Platten- bzw. Flachheizkörper können über eine Datenbank erfasst werden. Es sind Heizkörpertyp, Bauhöhe und -länge als Eingaben erforderlich. Die hinterlegte Datenbank liefert für den Wohnzimmerheizkörper eine Leistung von 2880 W unter Normbedingungen (75°C Vorlauf-, 65°C Rücklauf- und 20°C Lufttemperatur).

Auch die vorhandenen Thermostatventile können, sofern sie in der Datenbank verfügbar sind, gewählt werden. Auf der Basis erfolgt später der hydraulische Abgleich.

Bei der Wärmepumpenplanung des Bestands mit der „Energieanalyse“ fällt auf, dass eine Vorlauftemperatur von 65°C nicht optimal ist, siehe Kapitel 3.4.3. Der Wert wurde an der vorhandenen Regelung für den Bestandskessel abgelesen. In der Planung könnte die Frage entstehen, ob diese Vorlauftemperatur überhaupt korrekt ist und ob sie sich ggf. mit wenig Aufwand vermindern ließe.

**Verfahren zur Optimierung von Ein- und Zweifamilienhäusern**

**C1: Allgemeine Raumdaten** Raumbezeichnung:  Nr:  **Formblatt C: Heizkörper und Thermostatventil**

**C2: Vorhandene Heizflächen**  Heizkörper 1  neu?  Heizkörper 2  neu?  Heizkörper 3  neu?

Bauart:

Bauhöhe | Bautiefe oder -typ:

Glieder oder Baulänge:  mm

Beschreibung für sonstige Heizkörper:

**C3: Heizkörpernormleistung bei 75/65/20°C**

Berechnete Leistung:  W  W  W

Alternativ: manuelle Eingabe (siehe auch Handbuch - Hilfe 8 und 9)  W  W  W

**C4: Vorhandenes Thermostatventil**

DN | Bauform | Ventil voreinstellbar?   ja:    ja:    ja:

Hersteller und Typ (siehe auch Handbuch - Hilfe 10)

Beschreibung für sonstige Typen:

**C5: Typ, Hersteller und Einstellwert für das neue Thermostatventil** (siehe auch Handbuch - Hilfe 12)

Hersteller und Typ des neuen Ventils

Beschreibung für sonstige Typen:

Abbildung 40 Erfassung der Heizkörper und Thermostatventile im Tool „Optimus“

Abbildung 41 zeigt eine Übersicht aller Räume und Heizkörper des Mehrfamilienhauses in Braunschweig. Unter anderem ist das EG-Bad aus Abbildung 39 mit seiner Heizlast von 333 W wiederzufinden, aber auch der Wohnzimmerheizkörper aus Abbildung 40 mit seiner Normleistung von 2880 W.

**Verfahren zur Optimierung von Ein- und Zweifamilienhäusern**

**D1: Vorlauftemperatur** Vorschlag nach Optimierung:  °C Steilheit der Heizkurve:  **Empfohlen:**

Vorgaben bei direkter Fernwärmeversorgung:  °C  °C **Gewählt:**  **Formblatt D: Optimierung Temperatur**

**D2: Übertemperatur, Raumheizlasten und Heizkörpernormleistungen**

Raum	Raumheizlast	... bezogen	Summe Heizkörpernormleistungen	notwendige Übertemperatur	Volumenstrom	Rücklauf-temperatur	Hinweise
1 EG links - Wohnen	1934 W	81 W/m²	2880 W	36,8 K	108 l/h	50 °C	
2 EG links - Schlafen	1414 W	88 W/m²	2372 W	33,6 K	59 l/h	44 °C	
3 EG links - Küche	1056 W	88 W/m²	1945 W	31,2 K	37 l/h	41 °C	
4 EG links - Bad	333 W	78 W/m²	680 W	28,9 K	10 l/h	37 °C	
5 EG rechts - Wohnen	1934 W	81 W/m²	2880 W	36,8 K	108 l/h	50 °C	
6 EG rechts - Schlafen	1414 W	88 W/m²	2372 W	33,6 K	59 l/h	44 °C	
7 EG rechts - Küche	1056 W	88 W/m²	1945 W	31,2 K	37 l/h	41 °C	
8 EG rechts - Bad	333 W	78 W/m²	680 W	28,9 K	10 l/h	37 °C	
9 OG links - Wohnen	1755 W	73 W/m²	2880 W	34,1 K	76 l/h	45 °C	
10 OG links - Schlafen	1310 W	82 W/m²	2372 W	31,7 K	47 l/h	41 °C	
11 OG links - Küche	998 W	83 W/m²	1945 W	29,9 K	33 l/h	39 °C	
12 OG links - Bad	299 W	70 W/m²	680 W	26,6 K	8 l/h	34 °C	
13 OG rechts - Wohnen	1755 W	73 W/m²	2880 W	34,1 K	76 l/h	45 °C	
14 OG rechts - Schlafen	1310 W	82 W/m²	2372 W	31,7 K	47 l/h	41 °C	
15 OG rechts - Küche	998 W	83 W/m²	1945 W	29,9 K	33 l/h	39 °C	
16 OG rechts - Bad	299 W	70 W/m²	680 W	26,6 K	8 l/h	34 °C	
17							
30							
Summe/Mittelwerte					758 l/h	44 °C	

Abbildung 41 Temperaturoptimierung für das Beispiel-MFH – Version „Bestand“

Das Tool stellt für jeden Raum separat fest, wie groß das Leistungsangebot ist und welche Heizlast zu decken ist. Daraus resultiert eine „notwendige Übertemperatur“. Sie ist in jedem Raum verschieden und zeigt an, wie viel wärmer die einzelnen Heizflächen als der jeweilige Raum sein müssen, um die Leistungsanforderung abzudecken. Aus der Maximalanforderung innerhalb des Gebäudes leitet sich die Empfehlung ab, dass 65°C eine erforderliche Vorlauftemperatur ist. Damit wäre geklärt, dass die vor Ort vorgefundene Vorlauftemperatur grundsätzlich korrekt ist.

Die in Abbildung 41 weiß markieren Wohnzimmerwerte zeigen an, dass im EG etwa 37 K wärmere Heizkörper erforderlich sind als der Zielwert der Raumtemperatur von 20°C. Die Heizkörper müssen also im Mittel etwa 57°C Temperatur haben, um die erforderliche Leistung abzugeben. Das lässt sich z. B. mit einer Vorlauftemperatur von 65°C und einer Rücklauftemperatur von 50°C realisieren. Im linearen Mittel ist der Heizkörper dann 57,5°C warm, was das Soll erfüllt. Es wird allerdings nicht linear gerechnet, sondern logarithmisch, siehe [4] oder im Handbuch zur Software. Für das Verständnis ist dies an dieser Stelle nicht relevant.

Das Bild zeigt: die Wohnzimmerheizkörper sind allesamt die Schwachstellen des Gebäudes und das EG schneidet noch schlechter ab als das OG. Hohe Übertemperaturen sind im Zusammenhang mit Wärmepumpen ungünstig und mit größeren Heizflächen ergeben sich geringere Temperaturen. Im Beispielprojekt könnte man die 4 Wohnzimmerheizkörper des Typs 22 (Abbildung 40) durch solche des Typs 33 ersetzen. Bauhöhe und -breite sind unverändert. Die Heizkörperleistung steigt, das Resultat dieser Überlegung zeigt Abbildung 42.

Die Vorlauftemperatur lässt sich auf 60°C senken. Für alle Räume, die keinen neuen Heizkörper erhalten haben, verändern sich die Verhältnisse. Vor allem wird dort ein größerer Heizwasservolumenstrom benötigt.

Verfahren zur Optimierung von Ein- und Zweifamilienhäusern										
<b>D1: Vorlauftemperatur</b>								Steilheit der Heizkurve	Formblatt D: Optimierung Temperatur	
Vorschlag nach Optimierung:		60 °C		Empfohlen:		1,1				
Vorgaben bei direkter Fernwärmeversorgung:		--- °C		Gewählt:		60 °C		Gewählt: 1,1		
<b>D2: Übertemperatur, Raumheizlasten und Heizkörpernormleistungen</b>										
Raum	Raumheizlast	... bezogen	Summe Heizkörpernormleistungen	notwendige Übertemperatur	Volumenstrom	Rücklauftemperatur	Hinweise:			
1	EG links - Wohnen	1934 W	81 W/m²	3674 W	30,5 K	96 l/h	43 °C			
2	EG links - Schlafen	1414 W	88 W/m²	2372 W	33,6 K	100 l/h	48 °C			
3	EG links - Küche	1056 W	88 W/m²	1945 W	31,2 K	56 l/h	44 °C			
4	EG links - Bad	333 W	78 W/m²	680 W	28,9 K	14 l/h	40 °C			
5	EG rechts - Wohnen	1934 W	81 W/m²	3674 W	30,5 K	96 l/h	43 °C			
6	EG rechts - Schlafen	1414 W	88 W/m²	2372 W	33,6 K	100 l/h	48 °C			
7	EG rechts - Küche	1056 W	88 W/m²	1945 W	31,2 K	56 l/h	44 °C			
8	EG rechts - Bad	333 W	78 W/m²	680 W	28,9 K	14 l/h	40 °C			
9	OG links - Wohnen	1755 W	73 W/m²	3674 W	28,3 K	72 l/h	39 °C			
10	OG links - Schlafen	1310 W	82 W/m²	2372 W	31,7 K	73 l/h	45 °C			
11	OG links - Küche	998 W	83 W/m²	1945 W	29,9 K	47 l/h	42 °C			
12	OG links - Bad	299 W	70 W/m²	680 W	26,6 K	11 l/h	36 °C			
13	OG rechts - Wohnen	1755 W	73 W/m²	3674 W	28,3 K	72 l/h	39 °C			
14	OG rechts - Schlafen	1310 W	82 W/m²	2372 W	31,7 K	73 l/h	45 °C			
15	OG rechts - Küche	998 W	83 W/m²	1945 W	29,9 K	47 l/h	42 °C			
16	OG rechts - Bad	299 W	70 W/m²	680 W	26,6 K	11 l/h	36 °C			
17										
30										
Summe/Mittelwerte						940 l/h	43 °C			

Abbildung 42 Temperaturoptimierung für das Beispiel-MFH – Version „Heizkörpertausch“

Mit dieser Vorlauftemperatur wird in Kapitel 3.4.4 geplant.

#### 4.4 Notwendigkeiten und Möglichkeiten von Modifikationen

Das Exceltool „Optimus“ unterliegt keinem Passwortschutz. Alle Rechenroutinen können eingesehen und durch kundige Anwender modifiziert werden. Es empfiehlt sich, dass Anwender vorher theoretisches Grundwissen zur Heizungsoptimierung aufweisen, z. B. aus [4].

#### 4.5 Updates und Bezugsquelle

Abbildung 43 zeigt den Link zur Software samt Handbuch mit Erläuterungen. Darin ist auch eine ausführliche Erläuterung enthalten, wie die Eingaben zu tätigen sind und wie eine Handrechnung durchgeführt werden kann.



Abbildung 43 Link zur Software „Optimus“

Das Tool ist seit 2005 kostenlos verfügbar und es wird gelegentlich gepflegt, z. B. durch Hinzufügen aktueller Thermostatventilaten. Falls Fehler angezeigt werden, gibt es ein Update.

## 5 Hintergrundwissen

Der letzte Abschnitt fasst einige Hintergrundüberlegungen zu den drei Tools zusammen.

### 5.1 Energieanalyse aus dem Verbrauch

Die Energieanalyse aus dem Verbrauch wurde von den Autoren erstmals 2004 im Rahmen eines DBU-Projektes angewendet [14][13]. Bis heute halten die Autoren sie für die praktikabelste Methode des Verbrauchsmonitorings und der Planung von Erzeugungsanlagen im Bestand.

Nachfolgender Text [5] gibt Hintergrundinformationen und Formelansätze zur Auswertung, die im Tool „Energieanalyse“ programmiert ist.

Ziel der Datenaufbereitung ist die Auftragung der Messwerte in ein  $\dot{Q}$ - $\vartheta_e$ -Diagramm (witterungsabhängige Darstellung mit absoluten Kennwerten) und die Ableitung von Kennwerten in diesem Diagramm.

Die Detailanalyse beginnt mit einer Umrechnung der im Messintervall  $t_{\text{mess}}$  (in h/Messzeitraum) erfassten Energiemengen  $Q_{\text{mess}}$  (in kWh/Messzeitraum) in mittlere Leistungen  $\dot{Q}$  (in kW):

$$\dot{Q} = \frac{Q_{\text{mess}}}{t_{\text{mess}}}$$

Wenn eine Abhängigkeit des Energieverbrauchs von der Außentemperatur dargestellt werden soll, werden mittlere Außentemperaturen  $\vartheta_e$  für die Messintervalle benötigt. Die notwendigen Tagesdaten sind kostengünstig oder kostenlos über den Deutschen Wetterdienst (DWD) erhältlich. Das Tool „Energieanalyse“ greift auf diese Werte zurück.

Dem Analyseverfahren sind hinsichtlich der zeitlichen Auflösung der Daten Grenzen gesetzt. Es wird auf Basis der Erkenntnisse mehrerer Feldtests empfohlen, dass für Gebäude und Liegenschaften auf Wochen- bis Zweimonatsintervalle zurückgegriffen wird.

Bei kleineren Intervallen korrelieren aufgrund der Zeitkonstanten (Bauschwere usw.) die Energiemengen nicht mehr mit den Außentemperaturen im jeweiligen Messintervall, bei größeren Intervallen steigt die Ergebnisunsicherheit aufgrund fehlender Messpunkte (z. B. fehlende Messpunkte im Sommer).

Die Bestimmung einer Energieanalyse aus dem Verbrauch (EAV) bzw. Energiesignatur erfolgt durch Auftragung des Verbrauchs über der Außentemperatur ( $\dot{Q}$ - $\vartheta_e$ -Diagramm). Anhand dieses Verfahrens können die Heizgrenze sowie lastabhängige und lastunabhängige Energieanteile bestimmt werden. Das Verfahren ist u. a. in DIN EN 12831-1 [2], VDI 3807-5 [9] oder DIN V 18599 Bbl. 1 [1] beschrieben.

### 5.1.1 Daten aus Wärmemengenzählern

Abbildung 44 zeigt die beispielhafte Auftragung einer Gebäude-EAV für ein EFH mit Passivhauskomponenten mit Büronutzung im Erdgeschoss. Die beheizte Wohnfläche  $A_{EB}$  beträgt 211 m<sup>2</sup>. Der ausgewertete Wärmemengenzähler erfasst die Energiemengen für Heizung und Trinkwarmwasserbereitung. Es gibt insgesamt 14 Messintervalle und damit Messpunkte. Es ergibt sich ein charakteristisches Bild des Verbrauchers mit folgenden wichtigen Detailerkennnissen:

- die Grundleistung  $\dot{Q}$  (in kW), welche zusätzlich auf die Gebäudefläche bezogen werden kann ( $\dot{q}$  in W/m<sup>2</sup>), als Maß für den witterungsunabhängigen Verbrauch,
- die Heizgrenze (in °C), oberhalb der kein Heizungsverbrauch mehr erkennbar ist,
- die Steigung  $H$  (in kW/K), welche zusätzlich auf die Gebäudefläche bezogen werden kann ( $h$  in W/m<sup>2</sup>K), als Maß für den witterungsabhängigen Verbrauch und als wesentliche Kenngröße für die Anwendung der weiteren Tools, v. a. zur Auslegung von Wärmepumpen.

Als Kernheizzeit wird ein Bereich angesehen, in dem (ohne Unterbrechungen) alle Tage im jeweiligen Messintervall unter der Heizgrenze liegen. Bei ca. 3- bis 4-wöchigen Messintervallen endet die Kernheizzeit bei geschätzt 8 ... 9 °C. Es schließt sich bis zur Heizgrenze eine Übergangszeit an, dann der heizfreie Sommer.

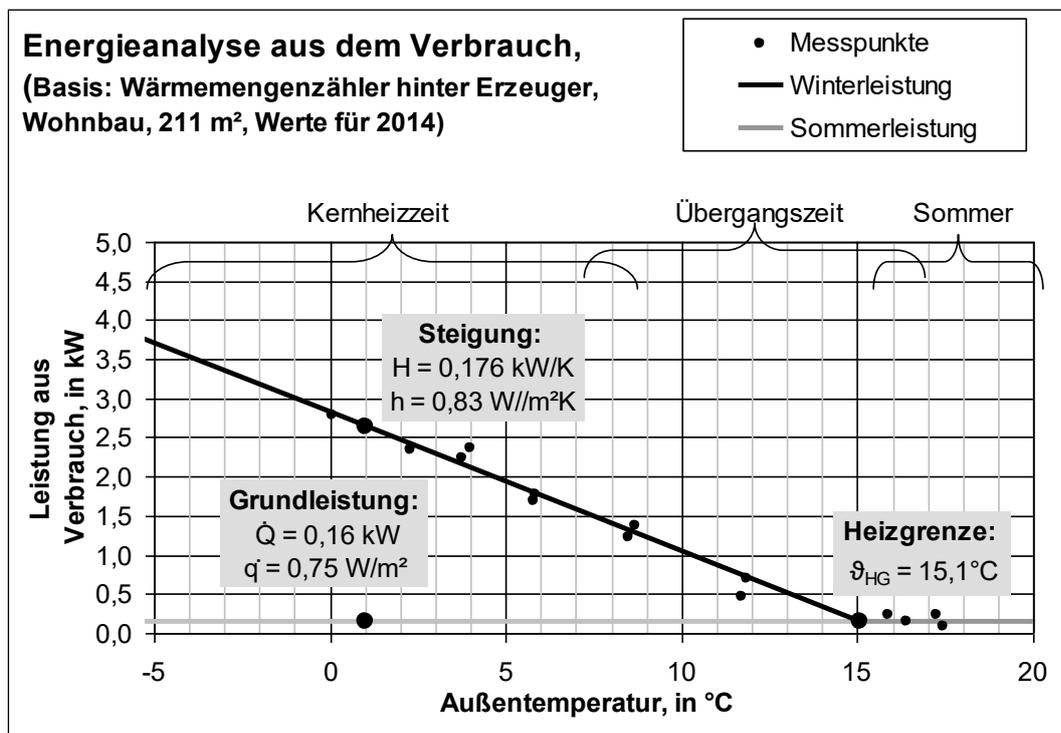


Abbildung 44 Energieanalyse eines Gebäudes auf Basis von Wärmemengenzählerwerten

Diese Auswertung liefert den Anteil witterungsunabhängigen Verbrauches  $Q_{unabhängig}$  (bezogen auf den Jahresverbrauch). Nach Abbildung 44 ergibt sich ein Wert von 1400 kWh/a (aus der Grundleistung). Bei Wohngebäuden mit gemeinsamer Heizung und Trinkwasserversorgung mit demselben Erzeuger ist dies der Trinkwarmwasseranteil  $Q_W$ .

$$Q_{unabhängig} = \dot{Q}_{Grund} \cdot 8760 \text{ h/a.}$$

Der witterungsabhängige Heizungsverbrauch  $Q_{abhängig}$  oder  $Q_H$  kann als Differenz zum Gesamtverbrauch bestimmt werden.

$$Q_{\text{abhängig}} = Q_{\text{mess}} - Q_{\text{unabhängig}}$$

Alternativ ergibt er sich auch aus der Steigung H und den Heizgradtagen G:

$$Q_{\text{abhängig}} = H \cdot G.$$

Je nachdem, welche Heizgradtage G in die Gleichung eingesetzt werden, ergibt sich der spezielle Jahreswert (mit G aus dem Untersuchungsjahr) oder der witterungskorrigierte Verbrauch (mit G als Langzeitmittelwert).

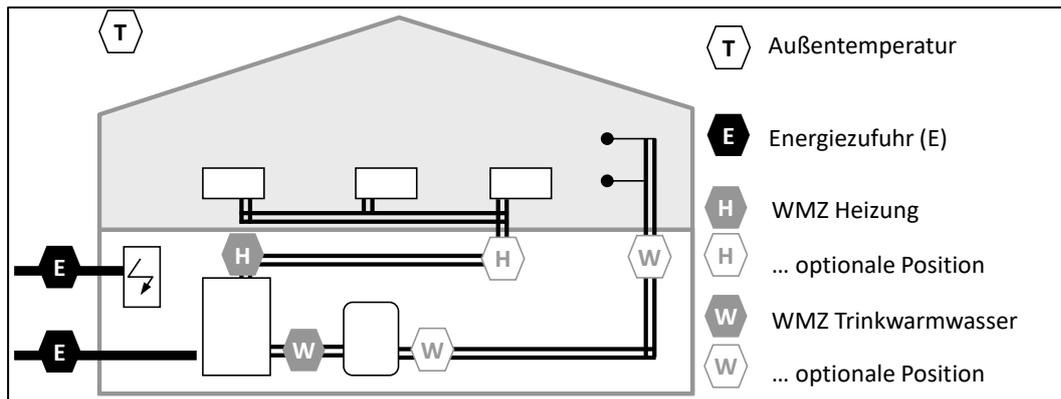


Abbildung 45 Lage von Zähl- oder Berechnungspunkten für die Größe h

Die Messwerte beschreiben je nach Lage und Anzahl der Zähler, siehe Abbildung 45:

- die Wärmeabgabe des Erzeugers (Zähler direkt hinterm Erzeuger), d. h. die Wärmezufuhr in den beheizten Bereich des Gebäudes plus Verteil- und Speicherverluste im unbeheizten Bereich,
- die Wärmezufuhr in den beheizten Bereich (Zähler in der Nähe der Verbraucher), d. h. die Wärmeabgabe des Erzeugers abzüglich Verteil- und Speicherverluste im unbeheizten Bereich.

Mit Hilfe von Kennwerten (z. B. aus [5]) lassen sich die Verteil- und Speicherverluste rechnerisch gut abschätzen und die Messwerte somit korrigieren. Die Erfahrung der Autoren mit Praxisprojekten zeigt, dass dies nur bei sehr detaillierten Analysen notwendig ist.

### 5.1.2 Übergang zur Bedarfsanalyse

Die Steigung H (in W/K) entspricht der Summe aus Transmissionsheizlast  $H_T$  und Lüftungsheizlast  $H_V$  einer Energiebedarfsrechnung:

$$H = H_T + H_V = H'_T \cdot A + n \cdot V \cdot 0,34 \frac{Wh}{m^3K} \quad \text{mit} \quad H'_T = \sum(U \cdot A \cdot F_X) + \Delta U_{WB} \cdot A$$

Der Summenwert ist abhängig von den Wärmedurchgangskoeffizienten U, Flächen A, Wärmebrücken  $\Delta U_{WB}$ , dem Gebäudevolumen V und effektivem Luftwechsel n. Mit einer Änderung dieser Werte ergibt sich eine veränderte Steigung, siehe Abbildung 46.

Wichtig für weitergehende Überlegungen ist die Tatsache, dass die Steigung der Regressionsgeraden von einer mittleren Raumtemperatur unabhängig ist. Eine veränderte Innentemperatur verschiebt die Gerade parallel.

Zukünftig sollten v. a. Abweichungen der linear angenommenen Gebäudeheizkennlinie bei sehr niedrigen Außentemperaturen untersucht werden, also unterhalb der in Abbildung 46 dargestellten Kernheizzeit. Frühere Auswertungen zeigen, dass bei Außentemperaturen unterhalb  $-2^\circ\text{C}$  ...  $-5^\circ\text{C}$  ein verändertes, also vermindertes Lüftungsverhalten der Nutzer bei natürlicher Fensterlüftung auftritt.

Dadurch würde sich auch die Heizlast bei Auslegungsaußentemperatur vermindern. Umgekehrt treten in der Übergangszeit zusätzliche Abweichungen der linear angenommenen Gebäudeheizkennlinie auf.

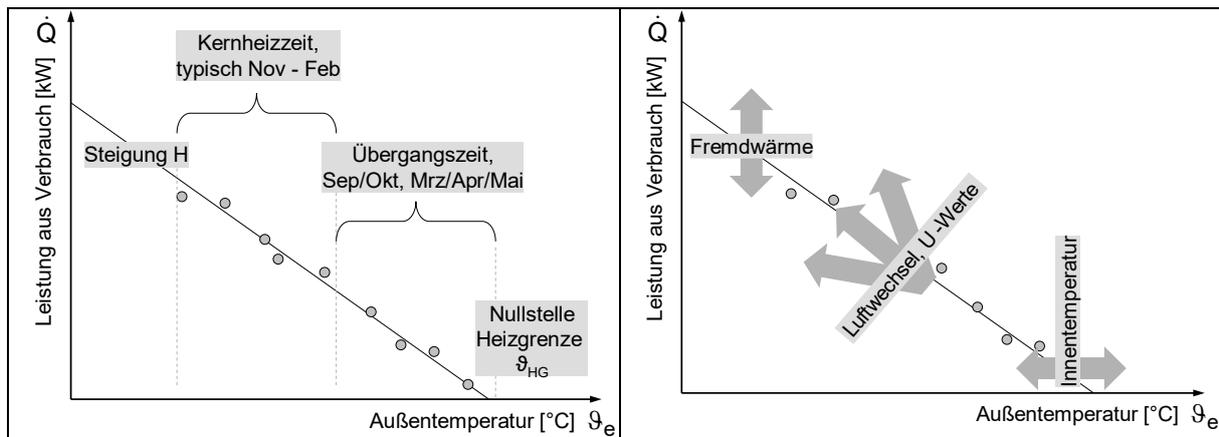


Abbildung 46 Übergang EAV zur Bedarfsberechnung des Gebäudes

Zuletzt zeigen erste Ergebnisse aus der CORONA-Zeit, dass sich ein räumlich eingeschränkter Heizbetrieb auch auf die Steigung H der linear angenommenen Gebäudeheizkennlinie und damit auch auf die Wärmepumpenauslegung auswirkt. Erste Annahmen zur Berücksichtigung des räumlich eingeschränkten Heizbetriebs finden sich in der Beschreibung zur „Standardbilanz“ (Link siehe Abbildung 9).

Die gemessene Steigung lässt sich mit der berechneten im Rahmen einer Energiekonzepterstellung vergleichen (Bedarfs-Verbrauchs-Abgleich). Alternativ und den Prozess stark vereinfachend wird bei der Bestandsbewertung, z. B. im Rahmen einer Energieberatung, komplett auf die detaillierte Aufnahme und Abschätzung der Güte der Gebäudehülle verzichtet und nur auf Basis des Messwertes gerechnet. Eine Einzelaufnahme der Bauteilflächen im Rahmen eines ISFP ist nicht mehr notwendig.

Gäbe es keine Fremdwärme, wären Heizgrenztemperatur und Innentemperatur identisch. Die im Gebäude freiwerdende Fremdwärme verschiebt die Gerade in erster Näherung parallel – unter der Annahme über das Jahr konstanter interner und solarer Lasten. Dieser Ansatz ist eine Näherung, da die solare Last in der Übergangszeit steigt, wobei die internen Lasten nachweislich leicht sinken.

Die messtechnische gegebene Gebäudeheizkennlinie H kann rechnerisch nachgebildet werden. Bei dokumentierten Werten für die Güte der Hülle ( $H_T'$ ), welche seit etwa Wärmeschutzverordnung 1995 gegeben sein müssten, ist eine Interpretation der Steigung sehr zuverlässig [16].

### 5.1.3 Daten aus Endenergiezählern

Aus Werten der Endenergiezähler lässt sich ebenfalls ein  $\dot{Q}$ - $\vartheta_e$ -Diagramm erstellen, siehe Abbildung 47. Auch damit kann eine Aufteilung in die beiden Verbrauchsanteile: witterungsabhängig- und unabhängig vorgenommen werden.

Alle Kennwerte (Grundleistung, Steigung und daraus abgeleitete Größen) lassen sich ebenso wie nach Kapitel 5.1.1 bestimmen. Jedoch enthalten sie die (unbekannte) Effizienz des Erzeugers – daher sind sie im Bild zusätzlich mit einem Stern (\*) gekennzeichnet.

Ist ein sehr guter Kessel vorhanden, dessen Effizienz nahe 100 % liegt, ergeben sich ähnliche Zahlenwerte wie bei der Auswertung von Wärmemengenzählerwerten hinter dem Erzeuger. Dies ist aber auf keinen Fall verallgemeinerbar! Vor allem, weil der Nutzungsgrad von Kesseln oder die Arbeitszahl von Wärmepumpen nicht über der Außentemperatur konstant sind und die Jahreswerte in der Praxis sehr stark schwanken können.

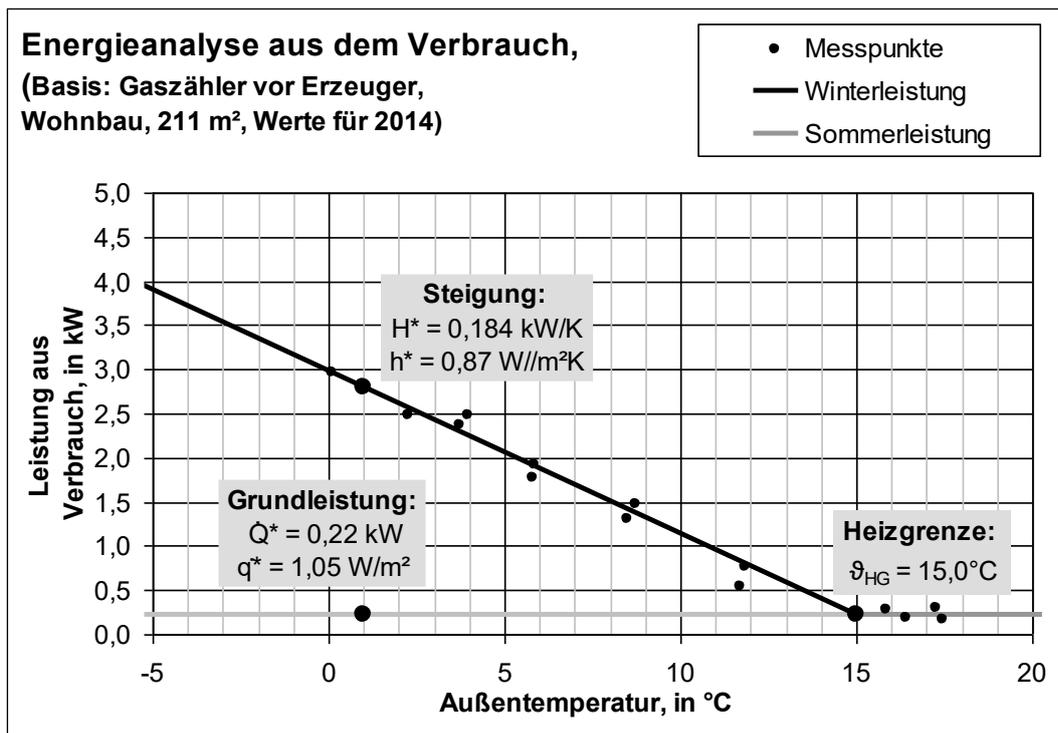


Abbildung 47 Energieanalyse eines Gebäudes auf Basis von Gaszählerwerten

Die korrekte Datenbasis zur Bestimmung der Heizlast, der Steigung  $H$  als Maß für die Qualität der Gebäudehülle und Nutzung und der Sockelleistung liefert nur ein Wärmemengenzähler hinter dem Erzeuger. Darüber hinaus erlaubt nur er die Effizienzauswertung des Erzeugers selbst.

## 5.2 Fingerabdruck oder $h$ -Wert und Heizgrenztemperatur

Grundlage für eine messtechnische Bestimmung des „Fingerabdrucks  $h$ “ sind Verbräuche, die hinter einem Wärmeerzeuger mit einem Wärmemengenzähler gemessen wurden (ohne Erzeugerverluste), siehe Kapitel 5.1.1.

Es wird ein Verlustkennwert  $h$  [in  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ] gebildet, indem die Steigung  $H$  der Regressionsgeraden [in  $\text{W}/\text{K}$ ] auf die beheizte Wohnfläche  $A_{\text{Wohn}}$  bzw. Energiebezugsfläche  $A_{\text{EB}}$  [in  $\text{m}^2$ ] bezogen wird.

Messungen an Realprojekten [15] haben die Werte aus Abbildung 48 ergeben. Günstigere, d. h. niedrigere Werte ergeben sich bei gutem Baustandard der Gebäudehülle, kompakter und luftdichter Bauweise sowie bei höherer Teilbeheizung und -belüftung.

	sehr schlecht	2 ... 3 $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	Altbau unsaniert
	schlecht	1,5 ... 2,5 $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	Altbau teilsaniert
	mittel	1,0 ... 2,0 $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	Bestand der 1980/90er
	gut	0,7 ... 1,3 $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	EnEV-Neubau
	sehr gut	0,5 ... 1,0 $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	Passivhaus, Effizienzhäuser

Abbildung 48 Typische Werte für den Fingerabdruck  $h$

Die Heizgrenztemperatur hängt mit großer Streubreite vom Heizwärmeverbrauch bzw. der Heizlast oder dem „Fingerabdruck“ – vereinfacht dem Baustandard – ab, siehe Abbildung 49. Für erste Auswertungen wird grundsätzlich 15°C als Heizgrenztemperatur von den Autoren vorgeschlagen.

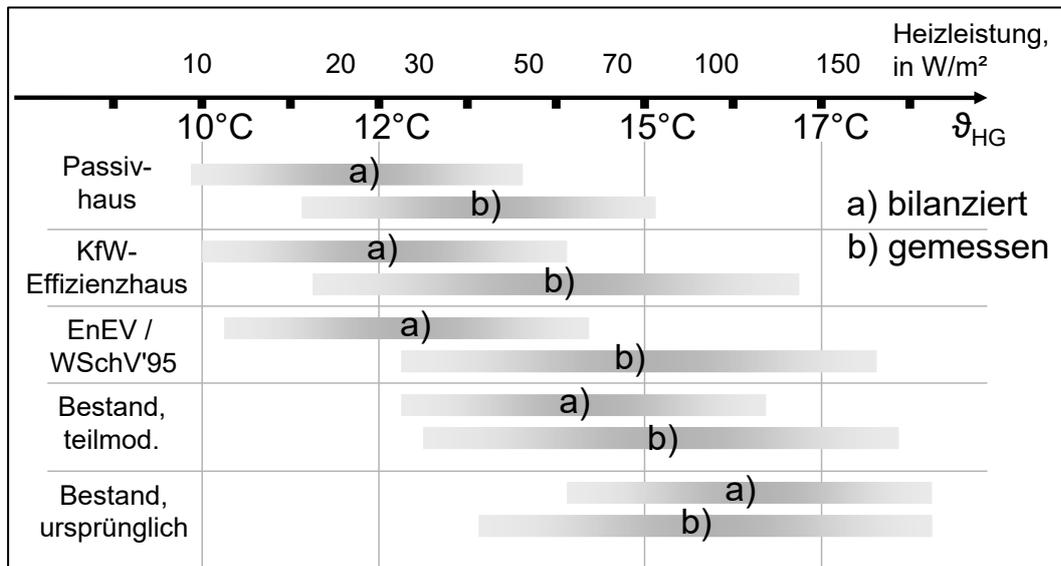


Abbildung 49 Typische Heizgrenztemperaturen im Wohnungsbau

Auch eine typische Abhängigkeit beider Größen kann wie folgt gefunden werden [6]:

$$\vartheta_{HG} = 13,3^{\circ}\text{C} + 1,14 \frac{\text{m}^2\text{K}^2}{\text{W}} \cdot h$$

### 5.3 Brutto- und Nettoheizlast

Abbildung 50 zeigt eine schematische Darstellung des Brutto- und Nettoheizlastverlaufes als Leistung [in kW] über der Außentemperatur [in °C]. Beide Linien laufen parallel, wenn identische Annahmen zur Größe H – siehe Kapitel 5.1.2 – zugrunde liegen.

Die Bruttoheizlast (Punkt „B“ in Abbildung 50) bei minimaler Außentemperatur  $\vartheta_{e,min}$  ergibt sich mit der Gebäudeheizkennlinie zu:

$$\dot{Q}_{brutto} = H \cdot (\vartheta_i - \vartheta_{e,min})$$

Zum Zeitpunkt der minimalen Außentemperatur wird damit unterstellt, dass es keine anderen Wärmequellen gibt (interne oder solare Fremdwärme) und nur Transmissions- und Lüftungsleistung wirksam sind. Bleibt diese Annahme so, dann läuft die Leistung auf die Innentemperatur  $\vartheta_i$  zu. Wenn Innen- gleich Außentemperatur ist, ergibt sich keine rechnerische Heizlast mehr.

Die Nettoheizlast (Punkt „N“ in Abbildung 50) bei minimaler Außentemperatur  $\vartheta_{e,min}$  ergibt sich mit der Gebäudeheizkennlinie zu:

$$\dot{Q}_{netto} = H \cdot (\vartheta_{HG} - \vartheta_{e,min})$$

Zu jedem Zeitpunkt wird eine gleich hohe Fremdwärmeleistung unterstellt, die die Leistungsanforderung parallel nach unten verschiebt. Mit dieser Annahme läuft die Leistung auf die Heizgrenztemperatur  $\vartheta_{HG}$  zu. Wenn Außen- gleich Heizgrenztemperatur ist, ergibt sich keine rechnerische Heizlast mehr.

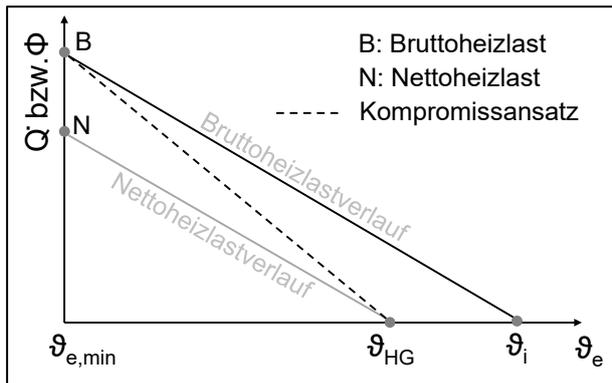


Abbildung 50 Brutto- und Nettoheizlast sowie Kompromissansatz

Die Heizlastnorm DIN/TS 12831-1 [2] folgt sowohl bei der theoretischen Ermittlung der Heizlast (über Flächen, Wärmedurchgangskoeffizienten, Luftwechsel usw.) als auch der messtechnischen Bestimmung dem Ansatz der Bruttoheizlast. Die Norm empfiehlt bisher damit die Auslegung des Wärmereizers auf der sehr sicheren Seite. Für das Mehrfamilienhaus nach Kapitel 1.2 beträgt die Überdimensionierung 18 % (Zahlen siehe Kapitel 3.4.8):

$$\frac{\text{Bruttoheizlast}}{\text{Nettoheizlast}} = \frac{20^{\circ}\text{C} - (-12)^{\circ}\text{C}}{15,1^{\circ}\text{C} - (-12)^{\circ}\text{C}} = 1,18$$

Die Heizlastberechnung für den Zweck der Wärmereizerbemessung ist eine „Punktbetrachtung“. Bei einer Anlage mit mehreren Erzeugern ist dies allein nicht zielführend. Die „Verlaufsbetrachtung“ ist dann erforderlich.

Unabhängig vom Startpunkt der maximalen Heizlast (brutto oder netto) benötigt der Verlauf einen Nulllastpunkt. In der DIN/TS 12831-1 ist diese Überlegung nicht enthalten. Rein formal würden die Gleichungen der Norm zum „Bruttoheizlastverlauf“ bis zur Innentemperatur führen. Verbrauchsmessungen selbst führen zum „Nettoheizlastverlauf“.

Die in Abbildung 50 mit „Kompromissansatz“ gekennzeichnete Linie ist ein solcher. Sie unterstellt, dass die Heizlast brutto ohne Gewinne bei der minimalen Außentemperatur startet und bei der Heizgrenztemperatur netto mit Gewinnen endet. Dieser Logik folgt teilweise die VDI 4650 [10].

## 5.4 Außentemperaturverlauf und Deckungsanteile

Um ein besseres Verständnis für die Auswirkungen von Planungsentscheidungen im Bereich der Wärmeversorgung zu erhalten, soll der Temperaturverlauf des Standortes Magdeburg dienen, siehe Abbildung 51. Es handelt sich um die Daten, die auch Planungsgrundlage für die Wärmepumpe im Kapitel 3 sind.

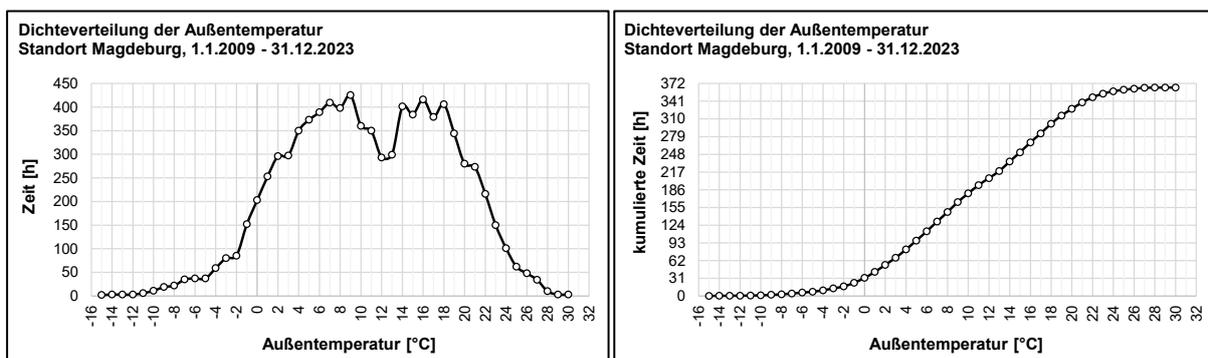


Abbildung 51 Dichteverteilung der Außentemperatur

Für den Standort des Beispielgebäudes (Braunschweig) sowie den Ort der abgebildeten Klimastation gelten in der Auslegung nach DIN/TS 12831- 1 etwa  $-12^{\circ}\text{C}$  als Normaußentemperatur [2]. Dieser Wert kommt statistisch im gewählten Zeitraum in 11 Stunden von 8760 Stunden jedes Jahr vor. Wenn die kältesten 48 Stunden eines Jahres betrachtet werden (also 2 Tage) dann fallen alle Temperaturen bis  $-9^{\circ}\text{C}$  in dieses Intervall.

Ein nennenswerter Anstieg in der Häufigkeit ergibt sich erst etwa oberhalb von  $-2^{\circ}\text{C}$ . Alle Messungen von Temperaturen bis einschließlich  $-2^{\circ}\text{C}$  zusammenaddiert ergeben einen Zeitraum von nur ca. 17 Tage im Jahr (also 2,5 Wochen).

Sehr viele Heiztage liegen im Bereich von etwa  $0^{\circ}\text{C}$  bis  $15^{\circ}\text{C}$ .

Für die Auslegung und den Jahresbetrieb heißt dies:

- Sofern die minimale Außentemperatur etwas knapper angesetzt wird ( $-10^{\circ}\text{C}$  statt  $-12^{\circ}\text{C}$  im Kapitel 3.4.7), fallen nur einzelne oder allenfalls wenige Tage des Jahres in die Gefahr einer möglichen Unterdimensionierung.
- Sofern ein zweiter Wärmeerzeuger den Bereich von  $-2^{\circ}\text{C}$  und darunter abdecken muss, ist er allenfalls zwei oder drei Wochen in Betrieb.
- Falls ein Wärmeerzeuger zum Einsatz kommt, der ein Betriebsoptimum hat – z. B. der Kompressor einer Wärmepumpe – läge dieses Optimum idealerweise bei  $8^{\circ}\text{C}$ , denn diese Temperatur kommt am häufigsten vor.

## 5.5 Wärmepumpentheorie und -praxis

Der in Kapitel 3.4.1 nur knapp beschriebene Ansatz zur Wärmepumpenbewertung soll an dieser Stelle vorgestellt werden. In den Untersuchungen der Autoren zur Abweichung zwischen Theorie (Prüfstandmessungen) und Praxis (Feldmessungen) wurde sowohl für die Prüfstandmessungen des Herstellers als auch für Messungen im Realbetrieb der gleiche Ansatz verwendet. Folgende Gleichungen wurden abgeleitet bzw. verwendet:

$$\dot{Q}_{WP} = P_{el} \cdot COP$$

Die gelieferte Wärmeleistung der Wärmepumpe  $\dot{Q}_{WP}$  hängt ab von der elektrischen Leistungsaufnahme und der Wärmepumpeneffizienz COP (Leistungszahl).

$$COP = \zeta_{ex} \cdot \varepsilon_C$$

Die Effizienz COP ist nicht konstant. Sie hängt ab von der theoretischen thermodynamischen Effizienz, der Carnot-Leistungszahl  $\varepsilon_C$ , sowie vom exergetischen Wirkungsgrad  $\zeta_{ex}$ . Letzterer stellt den Zusammenhang zwischen Theorie und Praxis her.

Die Carnot-Leistungszahl  $\varepsilon_C$  wird bestimmt durch die beiden Temperaturniveaus im Kondensator  $\vartheta_C$  und im Verdampfer  $\vartheta_0$ . Trotz grundsätzlicher Kenntnis über vorhandene Über- und Untertemperaturen an diesen beiden Wärmeübertragern wird vereinfacht angenommen, dass die Quelltemperatur  $\vartheta_{Quelle}$  als Verdampfertemperatur gilt und die Vorlauftemperatur der Anlage  $\vartheta_V$  als Kondensatortemperatur.

$$\varepsilon_C = \frac{T_C}{\vartheta_C - \vartheta_0} = \frac{\vartheta_C + 273K}{\vartheta_C - \vartheta_0}$$

$$\vartheta_0 \approx \vartheta_{Quelle}$$

$$\vartheta_C \approx \vartheta_{Vorlauf}$$

Die elektrische Leistung  $P_{el}$ , die der Kompressor aufnimmt, ist ebenfalls nicht konstant im Falle einer geregelten Wärmepumpe. Sie kann als Belastung  $\phi$  ausgehend von der maximalen elektrischen Leistung  $P_{el,max}$  dargestellt werden.

$$P_{el} = \varphi \cdot P_{el,max}$$

Auch der exergetische Wirkungsgrad  $\zeta_{ex}$  ist nicht konstant. Es wird als erster Ansatz unterstellt, dass ein quadratischer Zusammenhang (per Regression) zur Kompressorbelastung  $\phi$  besteht. Dass es also einen optimalen Bereich gibt, in dem der Kompressor seine beste Effizienz hat, sowie links und rechts davon schlechtere Werte.

$$\zeta_{ex} = a \cdot \varphi^2 + b \cdot \varphi + c$$

Die Gleichungen lassen sich mit Werten so weit ausfüllen, dass nur die Koeffizienten a, b und c als unbekannte Größen bleiben. Aus Herstellerdaten müssen zur Bestimmung dieser drei demzufolge mindestens drei Punkte bekannt sein, um das Problem über ein Gleichungssystem zu bestimmen. Für die Wärmepumpe eines Herstellers sind die Zwischenergebnisse der Auswertung in Tabelle 6 zusammengestellt.

Punkt	$\vartheta_{Quelle}$ bzw. $\vartheta_0$	$\vartheta_{Vortlauf}$ bzw. $\vartheta_C$	$\varepsilon_C$	$P_{el}$	$P_{el,max}$	$\varphi$	$\dot{Q}_{WP}$	$COP$	$\zeta_{ex}$
	°C	°C	-	kW	kW	-	kW	-	-
	*	*	**	*	*	**	*	*	**
1	-7	35	7,33	2,08	3,4	0,612	5,40	2,60	0,354
2	2	35	9,33	0,51	3,4	0,150	2,00	3,92	0,420
3	7	35	11,00	0,71	3,4	0,209	3,40	4,79	0,435

\* gegeben bzw. gemessen; \*\* berechnet

Tabelle 6 Wärmepumpenbewertung aus Herstellerdaten

Der exergetische Wirkungsgrad berücksichtigt sowohl für die Prüfstandmessungen als auch für die Messungen im Realbetrieb die tatsächlichen Aufwendungen im Kältemittelkreislauf, für den Abtauprozess als auch die zusätzlichen Verluste durch den Taktbetrieb der Wärmepumpe oberhalb des Inverterpunktes.

Für eine Wärmepumpe gleicher Baureihe zeigt Abbildung 52 die graphische Auftragung des Zusammenhangs auch aus den Messdaten ohne Heizstabeinsatz (101 Tageswerte erfasst von den Autoren zwischen November '23 und März '24).

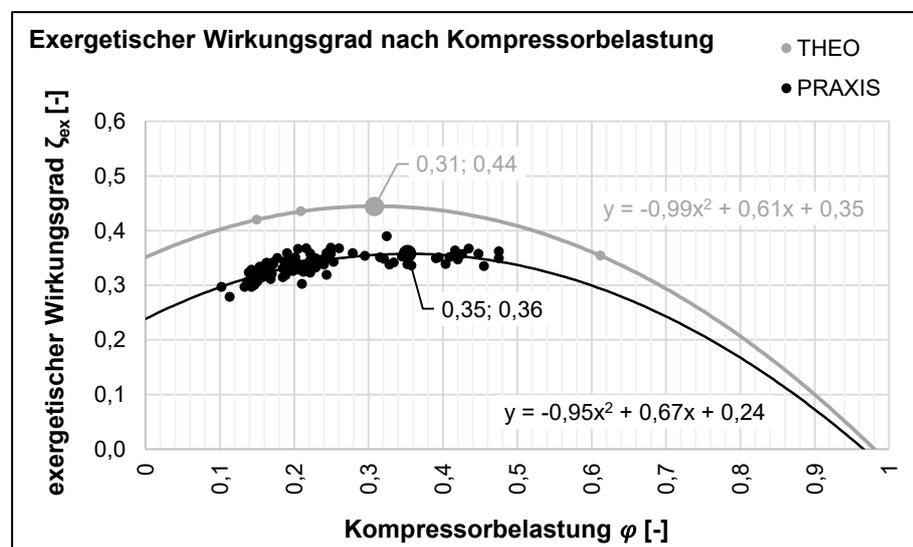


Abbildung 52 Vergleich der exergetischen Wirkungsgrade in Theorie und Praxis

Das Maximum des exergetischen Wirkungsgrades liegt anhand der Prüfstandsdaten bei einer Kompressorbelastung von  $\phi = 31\%$  und beträgt  $\zeta_{\text{ex}} = 44\%$ . Das heißt, die thermodynamische Maximaleffizienz nach Carnot wird zu  $44\%$  tatsächlich erreicht.

Aus den Messwerten resultieren dauerhaft geringere Werte. Der quadratische Zusammenhang ist insgesamt jedoch nachvollziehbar. Das gemessene Maximum liegt bei einer Kompressorbelastung von  $\phi = 35\%$  und beträgt  $\zeta_{\text{ex}} = 36\%$ .

Die Kurvenverläufe liegen auf der linken Seite des Bildes weiter auseinander als auf der rechten. Das heißt, dass bei geringen Belastungen (in der Nähe des Inverterpunktes und damit Taktbetriebs) die Diskrepanz zwischen Prüfstand und Feld größer ist.

Hauptursache der Abweichungen zwischen der Realmessung und Prüfstandwerten nach VDI 4650 [10] ist aus Sicht der Autoren, dass die Prüfstandwerte der Hersteller bei normativ nicht festgelegten unterschiedlichen elektrischen Kompressorbelastungen angegeben werden. Letztlich könnte für jeden Prüfpunkt jeweils die optimale Kompressorbelastung auf dem Prüfstand angefahren werden, auch wenn dies unter Realbedingungen nicht erfolgt. Auch Taktverluste oder Verluste von Abtauprozessen können auf dem Prüfstand minimiert werden, in der Realität aber kaum.

Als Zwischenfazit lässt sich festhalten: der Ansatz, einen exergetischen Wirkungsgrad abhängig von der Kompressorbelastung für die Berechnung zu verwenden, erscheint sinnvoll und praktikabel. Damit lässt sich näherungsweise das Regelverhalten bzw. die Effizienzabhängigkeit von der Regelung nachbilden.

Anhand der beiden Kurvenverläufe könnte auch überlegt werden, keine prozentuale Abminderung zwischen den Hersteller- und Realwerten einzuführen – so wie dies derzeit programmiert ist (vgl. Kapitel 3.4.1), sondern einen pauschalen Abschlag  $\Delta\zeta_{\text{ex}}$  auf die Theoriewerte. Dafür müssen aber noch weitere Erkenntnisse vorliegen.

## 6 Fazit und Ausblick

Mit den drei kostenlosen Tools „Standardbilanz“, „Energieanalyse“ und „Optimus“ lassen sich zeit- und kostenoptimierte Wärmepumpenplanungen für den Bestand durchführen.

Mit der „Standardbilanz“ kann im Rahmen einer Energieberatung 2.0 das betreffende Gebäude nachgebildet werden. Der Jahresverbrauch sowie eine erste Zustandsbeschreibung sind die Leitschnur. Zu geplanten Maßnahmen wie einer Kellerdeckendämmung oder einem Wärmepumpeneinbau gibt es erste realistische Erkenntnisse bzgl. der Wirtschaftlichkeit und Emissionsminderung.

Auf Basis von unterjährigen Verbrauchsdaten liefert die „Energieanalyse“ eine Gebäudeheizkennlinie, d. h. einen Zusammenhang von Nettoheizlast zur Außentemperatur. Damit können eine passende Wärmepumpe sowie ein Spitzenlasterzeuger gefunden werden. Dass die Wärmepumpe regelbar sein soll und optimalerweise ein klimafreundliches Kältemittel enthält, sind nach Ansicht der Autoren Grundvoraussetzungen. Sind in Kürze noch heizlastmindernde Maßnahmen am Gebäude geplant, sind diese bei der Auswahl der Wärmepumpe auf jeden Fall zu berücksichtigen. Eine Überdimensionierung ist aus Sicht der Investitionskosten und auch aus Sicht eines übermäßigen Taktens im Betrieb zu vermeiden.

Die Größenoptimierung der Wärmepumpe weist mehrere limitierende Faktoren auf.

Ist die Wärmepumpe zu klein, fällt der Spitzenlasterzeuger (in der Regel ein Heizstab) einerseits sehr groß aus und nimmt auch einen ergebnisrelevanten Anteil an der Jahresenergiemenge ein. Außerdem laufen die Kompressoren bei einer knappen Dimensionierung voraussichtlich oberhalb der optimalen Belastung.

Ist die Wärmepumpe zu groß, fällt der Spitzenlasterzeuger sehr klein aus oder ist nicht erforderlich. Vor allem die Wärmepumpeneffizienz bestimmt dann maßgeblich die Gesamteffizienz. Allerdings ergeben sich dann große Teile des Jahres im Taktbetrieb, was die Effizienz vermindert. Außerdem laufen Kompressoren bei einer sehr großzügigen Dimensionierung voraussichtlich unterhalb der optimalen Belastung.

Im untersuchten Gebäude und anhand der untersuchten Wärmepumpen sowie einem Mitteldeutschen Klimadatensatz lässt sich aus Sicht der Autoren feststellen, dass:

- eine getrennte Planung von Wärmepumpen für die Heizung und Trinkwasser präferiert wird,
- eine bivalente Auslegung für die Gebäudebeheizung aus Sicht der Anschaffungskosten der Wärmepumpe sinnvoll ist,
- ein Bivalenzpunkt unter  $-2^{\circ}\text{C}$  fast genauso gut ist wie einer von  $-7^{\circ}\text{C}$  oder  $-9^{\circ}\text{C}$ , weil die Anzahl von Tagen, die innerhalb eines Jahres zusammenkommen in allen Fällen überschaubar gering sind, erst darüber nimmt der Spitzenlastanteil relevant zu,
- die Auslegung auf Basis der Nettoheizlast sinnvoll erscheint; wenn dies nicht gewünscht ist dann nur der Spitzenlasterzeuger nach der Bruttoheizlast größer gewählt wird, aber nicht die Wärmepumpe,
- ein Taktbetrieb der Wärmepumpe möglichst minimiert werden soll,
- eine Kompressorbelastung der Wärmepumpe im Jahresmittel sinnvoll ist, die auch dem Optimum der Prüfstandsbelastungen entspricht; für die untersuchten Wärmepumpen ergeben sich Werte von 15 % ... 30 %

Diese Forderungen konnten im Sinne eines Kompromisses erreicht werden, indem die Nettoheizlast zu etwa  $\frac{1}{2}$  ...  $\frac{2}{3}$  von der Wärmepumpe und zu  $\frac{1}{2}$  ...  $\frac{1}{3}$  vom Spitzenlastheizstab gedeckt wurde.

„Optimus“ dient schlussendlich dazu, die Gebäudeheizkreise des Bestands zu optimieren. Das Tool kann auch verwendet werden, um Heizkörper zu identifizieren, die besser getauscht werden, um das gesamte Gebäude wärmepumpentauglich(er) zu machen.

## 7 Quellen

- [1] DIN V 18599 Beiblatt 1. Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Beiblatt 1: Bedarfs-/Verbrauchsabgleich. Berlin: Beuth Verlag, 2010.
- [2] DIN/TS 12831-1. Verfahren zur Berechnung der Raumheizlast - Teil 1: Nationale Ergänzungen zur DIN EN 12831-1. Berlin: Beuth Verlag, 2020.
- [3] Glaesmann, Nicolas. Wärmepumpenheizungen: Planungshilfe und Ratgeber für Neubauten und Bestandsgebäude. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2023.
- [4] Jagnow, Kati / Halper, Christian / Timm, Tobias / Sobirey, Marco. Optimierung von Heizungsanlagen im Bestand. Teile 1 bis 5. TGA-Fachplaner 05, 08 und 11-2003 sowie 01, 03-2004. Stuttgart: Gentner-Verlag, 2003 und 2004.
- [5] Jagnow, Kati / Wolff, Dieter. Energie 2020. Manuskript für die Loseblattsammlung, Kapitel 8 Energiekonzepte. Köln/Berlin: DWD und Beuth Verlag, 2017.
- [6] Jagnow, Kati / Wolff, Dieter. Energiespareffekte und Kosten-Nutzen-Relationen der energetischen Gebäudesanierung. Gutachten im Auftrag des Deutschen Bundestages. Braunschweig, 2020.
- [7] Jagnow, Kati / Wolff, Dieter. Optimus - Umweltkommunikation in der mittelständischen Wirtschaft am Beispiel der Optimierung von Heizungssystemen durch Information und Qualifikation zur nachhaltigen Nutzung von Energieeinsparpotenzialen - Technische Optimierung und Energieeinsparung. Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel. Wolfenbüttel, 2006.
- [8] Sensfuß, Frank et al. Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. BMWK-Projekt. 2023.
- [9] VDI 3807 Blatt 5. Verbrauchskennwerte für Gebäude - Teilkennwerte thermische Energie. Berlin: Beuth Verlag, 2014.
- [10] VDI 4650 Blatt 1. Berechnung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpenanlagen. Berlin: Beuth Verlag, 2024.
- [11] von Cube, Hans Ludwig / Steimle, Fritz. Wärmepumpen - Grundlagen und Praxis. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1977.
- [12] Wolff, Dieter / Jagnow, Kati / Gebhardt, Katharina. Auslegung von Wärmepumpen über Jahresverbrauchsdaten. TGA-Fachplaner 01-2024. Stuttgart: Gentner Verlag, 2024.
- [13] Wolff, Dieter / Jagnow, Kati. E-A-V - Energieanalyse aus dem Verbrauch. TGA-Fachplaner 09-2004. Stuttgart: Gentner-Verlag, 2004.
- [14] Wolff, Dieter / Teuber, Peter / Jagnow, Kati. Effizienz von Wärmeerzeugern. TGA-Fachplaner 10-2004.
- [15] Wolff, Dieter / Unverzagt, Anke / Schünemann, Adrian; EAV-Anwendung in der Wohnungswirtschaft. DBU-Projekt. Wolfenbüttel, 2020.
- [16] Jagnow, Kati. K. Verfahren zur energetischen und wirtschaftlichen Bewertung von Qualitätssicherungsmaßnahmen in der Heizungsanlagentechnik. Dissertation. Dortmund: Universität Dortmund, 2004.