

Optimierung von Gebäudeenergiesystemen
mit Sanierungsstrategien
für den deutschen Wohngebäudesektor
unter Einbezug von Smart Home-Systemen

Masterarbeit

Eingereicht von: Manuel Wahl
Matrikel-Nr.: 912489

Am: 12.12.2024

Betreuer: Maximilian Hillen

Gutachter: Prof. Dipl.-Ing. Thomas Kretschmer

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	II
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	IV
TABELLENVERZEICHNIS	VI
1 EINLEITUNG	1
2 THEORIE	3
2.1 THERMISCHES GEBÄUDEMODELL	3
2.1.1 KOMPONENTEN DER GEBÄUDEHÜLLE	5
2.2 NUTZ- UND LASTPROFILE	6
2.3 ENERGIESYSTEME	6
2.3.1 WÄRMEBEREITSTELLUNG UND -SPEICHER	7
2.3.2 PHOTOVOLTAIK UND STROMSPEICHER	10
2.3.3 WÄRMEABGABE VIA HEIZKÖRPER	11
2.4 GEBÄUDEAUTOMATION	12
2.4.1 NACHTABSENKUNG	13
2.4.2 ANWESENHEIT BZW. ABWESENHEIT	13
2.4.3 WEITERE FAKTOREN	13
2.5 KRITERIEN DER NACHHALTIGKEIT	13
2.5.1 ÖKOLOGISCH	14
2.5.2 ÖKONOMISCH	15
2.5.3 SOZIAL	17
2.6 NUMERIK	19
2.6.1 GENETISCHE ALGORITHMEN	19
2.6.2 MODELLIERUNG VON ENERGIESYSTEMEN ALS MIXED INTEGER LINEAR PROBLEM	20
3 METHODIK	23
3.1 ZIELSETZUNG UND HERAUSFORDERUNGEN	23
3.2 AUSGEWÄHLTE KRITERIEN DER NACHHALTIGKEIT ALS KEY PERFORMANCE INDIKATOREN	24
3.2.1 ÖKOLOGISCH: CO ₂ -EMISSIONEN (GWP)	24
3.2.2 ÖKONOMISCH: KAPITALWERT (NPV)	24
3.2.3 SOZIAL: ÜBERTEMPERATURGRADSTUNDEN	24
3.3 DATENBASIS / INPUT	25
3.3.1 ZEITBASIERTE DATEN, NUTZ- UND LAST-PROFILE, HAUSHALT	25
3.3.2 GEBÄUDEBESTAND - EUROPÄISCHE GEBÄUDEDATENBANK TABULA	26
3.3.3 KOMPONENTEN DER GEBÄUDEHÜLLE	27
3.3.4 KOMPONENTEN DER GEBÄUDETECHNIK	28
3.3.5 ENERGIETRÄGER	31
3.3.6 ZUSAMMENFASSUNG FESTLEGUNG PARAMETER	32
3.4 GEBÄUDEBETRIEB	34

3.4.1	TRINKWARMWASSER	34
3.4.2	HEIZKREIS, WÄRMEABGABE UND WÄRMEBEDARF	34
3.4.3	REGELUNG DER INNENRAUMTEMPERATUR – KOMPONENTEN DER GEBÄUDEAUTOMATION	35
3.5	SZENARIEN	37
3.5.1	GEBÄUDEAUTOMATION – BETRIEBSSTRATEGIEN ZUR REGELUNG DER INNENRAUMTEMPERATUR	37
3.5.2	BAUALTERSKLASSE – BAUJAHR	38
3.5.3	SANIERUNGSSTRATEGIEN	40
3.5.4	ZUSAMMENFASSUNG DER SZENARIEN	40
3.6	COMPUTERGESTÜTZTE OPTIMIERUNG – AUSWAHL, BERECHNUNG, FEEDBACK-LOOP	41
3.6.1	MODELLIERUNG DES GEBÄUDE-ENERGIESYSTEMS AUF BASIS VON MTRESS	41
3.6.2	PREPROCESSING – VORBEREITENDE ROUTINEN	43
3.6.3	POSTPROCESSING	44
3.6.4	GENETISCHER ALGORITHMUS – OPTIMIERENDE AUSWAHL DURCH FEEDBACKLOOP	45
4	ERGEBNISSE	47
4.1	VISUALISIERUNG UND VERGLEICHBARKEIT	47
4.1.1	ZIELGRÖßEN, GEWICHTUNG UND VISUALISIERUNG	48
4.1.2	BEWERTUNG THERMISCHE BEHAGLICHKEIT	49
4.2	ZUSAMMENHÄNGE AUSLEGUNGSOPTIMIERUNG UND REGULINGSSTRATEGIEN BZW. EMS MIT BJ. 1960	51
4.2.1	AUSLEGUNG DER GEBÄUDETECHNIK	51
4.2.2	AUSLEGUNG DER GEBÄUDEHÜLLE	58
4.2.3	KOMBINIERTE AUSLEGUNG DER GEBÄUDETECHNIK UND -HÜLLE	69
4.2.4	VERGLEICH DER VERSCHIEDENEN SANIERUNGSSTRATEGIEN IN KOMBINATION MIT DEN BETRIEBSSTRATEGIEN FÜR BJ. 1960	73
4.3	ZUSAMMENFASSUNG GEGENÜBERSTELLUNG REGULINGSSTRATEGIEN	77
4.4	GEGENÜBERSTELLUNG DER BAUJAHRE 1960, 1990 UND 2005	78
4.4.1	AUSLEGUNGSOPTIMIERUNG DER GEBÄUDETECHNIK	78
4.4.2	AUSLEGUNGSOPTIMIERUNG DER GEBÄUDEHÜLLE	79
4.5	DARSTELLUNG DER WÄRMEPUMPE UND DEREN EINFLUSS AUF DIE ERGEBNISSE	81
4.6	SENSITIVE BETRACHTUNGEN ZU EMISSIONSAKTOR GAS UND CO2-BEPREISUNG	84
5	DISKUSSION	86
5.1	BEWERTUNG DER NUMERISCHEN MODELLIERUNG	86
5.1.2	WÄRMEPUMPE UND SENKUNG DER VORLAUFTEMPERATUR	87
5.1.3	TEMPERATUR	87
5.2	KRITISCHE BETRACHTUNGEN	88
5.2.1	DER ERGEBNISSE	88
5.2.2	DER METHODIK	88
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	90
	LITERATURVERZEICHNIS	1

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Elektrisches Schaltbild des 5RC Gebäudemodells	4
Abbildung 2 Parameter der Berechnung des U-Werts nach (Rexroth, 2014)	5
Abbildung 3 Ergänzender Bauteilaufbau, eigene Darstellung mit (www.ubakus.de, 2024)	5
Abbildung 4 Gesamtenergiedurchlassgrad g-Wert (BauNetz, 2024)	6
Abbildung 5 Schematischer Kreislauf des Wärmepumpenprozesses aus (Schulz & Westkämper, 2023)	7
Abbildung 6 Wärmepumpe im bivalenten parallelen Betrieb mit Zusatzheizung(SOLARFOCUS GmbH, 2021)	9
Abbildung 7 Systemgrenzen eines Wärmepumpensystems (energie-experten.org, 2024)	9
Abbildung 8 Übersicht Global Warming Potential von Kältemitteln (KÄLTE-KLIMA GmbH, 2024)	10
Abbildung 9 Einfluss der PV-Leistung und Speicherkapazität auf den jahresmittleren Eigenverbrauchsanteil (links) und Autarkiegrad (rechts) (Weniger, 2015)	11
Abbildung 10 Beeinflussbarkeit der Betriebskosten im Planungsprozess (pure asset, 2024)	14
Abbildung 11 cradle-to-cradle als Ziel des Ökobilanz-Kreislaufs (Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, 2024)	15
Abbildung 12 Beispiel-Diagramm Gegenüberstellung von Kostenfunktionen, eigene Darstellung	17
Abbildung 13 Empfundener Behaglichkeitsbereich T_x (Dominik Hochwarth, 2024)	18
Abbildung 14 Beispiel-Plot einer Innenraumtemperatur-Simulation (Uwe Eichelmann, 2019)	18
Abbildung 15 Ablaufplan eines genetischen Algorithmus(Christian Piazzi, 2019)	20
Abbildung 16 Migration des genetischen Algorithmus (Zhang et al., 2023)	20
Abbildung 17 Beispielhaftes Energiesystem-Modell in oemof.solph (oemof-developer-group, 2024)	21
Abbildung 18 Schema des Vorgehens, eigene Darstellung	23
Abbildung 19 Schema der Agenten-Modellierung im Load-Profile-Generator (Pflugradt, 2016)	25
Abbildung 20 Diagramm zur Veranschaulichung der Herausforderung Energieträgerkosten (Fernwärme, Wärmepumpe) in die numerische Optimierung zu transformieren, eigene Darstellung	32
Abbildung 21 Diagramm Einfluss der Vorlauftemperatur auf den Wirkungsgrad von Brennwertkesseln und auf den COP von Wärmepumpen eigene Darstellung mit Werten aus (Schulz & Westkämper, 2023; Viessmann, 2019)	35
Abbildung 22 Schema des Wärmepumpenmodells für MTRESS, eigene Darstellung	43
Abbildung 23 Mögliches Ablaufschema einer NSGA2 basierten Suchfunktion (Acampora et al., 2013)	45
Abbildung 24 Beispiel einer Pareto- Kurve (Hancock et al. 2023)	48
Abbildung 25 Übersicht Diagramm Regelungsstrategien und Modernisierung der Gebäudetechnik für Bj.1960	51
Abbildung 26 Referenzmodell und Modernisierung der Gebäudetechnik Bj.1960 – Differenzierung der Wärmeerzeuger	52
Abbildung 27 REF, NTR und Modernisierung der Gebäudetechnik Bj.1960 – Differenzierung der Wärmeerzeuger	53
Abbildung 28 REF, NTR und Modernisierung der Gebäudetechnik Bj.1960 – Differenzierung der Wärmeerzeuger mit Fokus auf den Pareto-Bereich	54
Abbildung 29 REF, NTR, EMS und Modernisierung der Gebäudetechnik Bj.1960 – Differenzierung der Wärmeerzeuger mit Fokus auf den Pareto-Bereich	55
Abbildung 30 REF, NTR, EMS und Modernisierung der Gebäudetechnik Bj.1960 – Differenzierung der Wärmeerzeuger mit Fokus auf das Basis-Modell mit Instandhaltungskosten	56
Abbildung 31 Gegenüberstellung Optima der Betriebsstrategien bei Modernisierung der Gebäudetechnik für Bj.1960	57
Abbildung 32 Übersicht Diagramm Regelungsstrategien in Abhängigkeit der Modernisierung der Gebäudehülle Bj.1960	58
Abbildung 33 Diagramm Referenzmodell in Abhängigkeit der Modernisierung der Gebäudehülle Bj.1960 – Differenzierung der Gebäudehüllflächen	59
Abbildung 34 Vergleich der dominierten Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle inkl. Fenster Level im Referenzmodell 1960	60
Abbildung 35 Vergleich aller Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle im Modell Nachtabsenkung und Referenzmodell Bj. 1960	61
Abbildung 36 Vergleich aller Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle im Energy Management System Modell und Referenzmodell Bj. 1960	62

Abbildung 37 Vergleich aller Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle im Energy Management System Modell und Referenzmodell Bj. 1960 – mit Fokus auf den emissionsärmeren Bereich	63
Abbildung 38 Vergleich aller Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle im Energy Management System Modell und Referenzmodell Bj. 1960 – mit Fokus auf den kostengünstigen Bereich	64
Abbildung 39 Alle Betriebsstrategien in Abhängigkeit der Sanierung der Gebäudehülle 1960 mit Pareto-Kurven im Vergleich	65
Abbildung 40 Alle Betriebsstrategien in Abhängigkeit der Sanierung der Gebäudehülle 1960 mit Pareto-Kurven im Vergleich – Vergrößerung der überhitzten Konfigurationen	66
Abbildung 41 Betriebsstrategien in Abhängigkeit der Sanierung der Gebäudehülle 1960 mit Pareto-Kurven im Vergleich – Fokus Kostensprung	67
Abbildung 42 Gegenüberstellung Optima der Betriebsstrategien bei Modernisierung der Gebäudehülle für Bj.1960	68
Abbildung 43 Übersicht Diagramm Regelungsstrategien und Modernisierung der Gebäudetechnik sowie -hülle für Bj.1960	69
Abbildung 44 Referenzmodell und Modernisierung der Gebäudetechnik sowie -hülle Bj.1960 – Differenzierung der Wärmeerzeuger und Visualisierung der Transmissionswärmeverluste	70
Abbildung 45 REF, NTR und Modernisierung der Gebäudetechnik sowie -hülle Bj.1960 – Differenzierung der Wärmeerzeuger und Visualisierung der Transmissionswärmeverluste	71
Abbildung 46 EMS-Modell und Modernisierung der Gebäudetechnik sowie -hülle Bj.1960 – Differenzierung der Wärmeerzeuger	72
Abbildung 47 Vergleich der Pareto-Kurven der Regelungsstrategien und Modernisierungen der Gebäudetechnik sowie -hülle Bj.1960 – Differenzierung der Wärmeerzeuger und Visualisierung der Transmissionswärmeverluste	73
Abbildung 48 Gegenüberstellung der Referenz- und EMS-Modelle aller Sanierungsstrategien Bj.1960	74
Abbildung 49 Gegenüberstellung der Referenz- und EMS-Modelle aller Sanierungsstrategien Bj.1960 – vertauschte Achsen NPV<->Overheat	75
Abbildung 50 Gegenüberstellung verschiedener Sanierungsstrategien an der Gebäudehülle mit REF und EMS in Bezug auf die Übertemperaturgradstunden und Einfluss des Qualitätsniveau der Fenster Bj.1960	76
Abbildung 51 Gegenüberstellung der Pareto-Kurven der EMS der jeweiligen Baujahre 1960, 1990 und 2005 – Differenzierung der Gebäudetechnik	79
Abbildung 52 Gegenüberstellung der Pareto-Kurven der REF und EMS bei Modernisierung der Gebäudehülle der jeweiligen Baujahre 1960, 1990 und 2005	80
Abbildung 53 NPV und GWP in Abhängigkeit verschiedener Wärmepumpen-Konfigurationen der Gebäudetechnik-Sanierung Bj.1990	81
Abbildung 54 Gegenüberstellung GWP und NPV für REF, NTR und EMS in Bezug auf die Wärmepumpen-Dimensionierung Bj.1990	82
Abbildung 55 Gegenüberstellung der Optima GWP und NPV für REF und NTR in Bezug auf die Wärmepumpen-Dimensionierung Bj.1990	83
Abbildung 56 Sensitive Betrachtung des CO ₂ -Faktors für Erdgas und Biogas anhand der Modernisierung Brennwärmtessel	84
Abbildung 57 Diagramm Beispiel für Veränderung des NPV in Abhängigkeit von CO ₂ -Bepreisung – Differenzierung der Modernisierung der Gebäudetechnik für Bj.1960	85

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1 Auszug aus der Tabelle für die empfohlene operative Raumtemperatur nach DIN EN 15251 (Seifert, 2019)</i>	18
<i>Tabelle 2 Übersicht der Preissteigerungsfaktoren der Energieträger</i>	31
<i>Tabelle 3 Übersicht der festgelegten Parameter</i>	33
<i>Tabelle 4 Übersicht Varianten der betrachteten Baualtersklassen aus TABULA QUELLE</i>	39
<i>Tabelle 5 Übersicht der Szenarien</i>	40
<i>Tabelle 6 Übersicht der verwendeten MTRESS-Klassen</i>	41
<i>Tabelle 7 Übersicht der Vorlauftemperaturstufen im numerischen Energiesystemmodell</i>	43
<i>Tabelle 8 Übersicht der berechneten Szenarien der Sanierungs- und Betriebsoptimierung</i>	47

1 Einleitung

Die Energiewende ist ein zentrales politisches Instrument zur Reduktion von Treibhausgasemissionen – nicht zuletzt auch im Gebäudesektor, da hier Energie für die Nutzung und Beheizung effizienter aufgewendet und eingespart werden kann (Öko-Institut e.V., 2024).

Auch wenn laut Klimaschutzbericht 2024 sich die Emissionen des Gebäudesektors um 7,5 % (auf 102 Millionen tCO₂äq) reduziert haben (Haufe, 2024), erwartet der Expertenrat für Klimafragen in seinem Sonderbericht eine Verfehlung des Klimaziels für 2030 (Wehmann und Schultz, 2024). Derzeit liegt der prozentuale Anteil des Gebäudesektors an den deutschen Treibhausgasemissionen bei über 30 Prozent (goClimate, 2024).

Dabei soll der Bund im Gebäudesektor beispielhaft vorgehen sowie „Nachhaltigkeit von Gebäuden [...] vermehrt über den Lebenszyklus durch Einbeziehung ökologischer, ökonomischer wie auch sozialer Aspekte transparent, messbar und überprüfbar ausgewiesen werden“ (BBSR, 2019).

Auf den Berliner Energietagen 2024 wurde im Panel „Wärmepumpe als Teil des digitalisierten Gebäudes – Herausforderungen und Chancen in der Umsetzung“ (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz [BMWK], 2024) intensiv u.a. über den Einfluss von Gebäudeautomation zur Deckung des Energieverbrauchs diskutiert und ein Beitrag zur Einsparung von bis zu 20 % durch den Einsatz eines Energy Management Systems (EMS) für den Stromverbrauch prognostiziert (Klitzke, 2024).

Bereits die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung von Gebäuden macht 8 % der gesamten deutschen Treibhausgasemissionen aus (NABU et. al., 2020). Im Umkehrschluss resultieren die restlichen 22 bis 32 % aus der Nutzung des Gebäudes und Maßnahmen zur Regelung des Gebäudebetriebs könnten besonders effektiv zur Reduzierung von Kosten und Emissionen beitragen. Zum einen lässt sich bereits bei der Planung bzw. der Auswahl von Gebäudekomponenten Einfluss auf Betriebsgrößen nehmen (Senken der Vorlauftemperatur, effizientere Anlagentechnik), zum anderen kann eine nutzgerechte Regelung (Temperatur) zur Senkung des Energieverbrauchs beitragen.

Bisher stehen keine digitalen Tools zur Verfügung, welche die Auswahl verschiedener Sanierungsstrategien an der Gebäudehülle sowie der Gebäudetechnik in Kombination mit optimierten Gebäudebetrieb unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten optimieren. Demzufolge ist auf digitaler Ebene ein Programm erforderlich, welches in der Lage ist, die vielen zu erwartenden Eingangsparameter in ein numerisches Modell zu transferieren und dieses unter ausgewählten Aspekten zu berechnen. Für die Eingangsparameter braucht es einen zusammenfassenden Überblick über den deutschen Gebäudebestand, dessen Merkmale und über konventionelle, aber auch aktuelle Modernisierungs- sowie Regelungsstrategien. Schließlich müssen Faktoren festgelegt werden, anhand derer der Einfluss der einzelnen Maßnahmen bemessen und bewertet werden kann.

Deshalb wurde eine Software zur optimierenden Auswahl und Berechnung von Gebäudeenergiesystemen entwickelt, welche exemplarisch auf ausgewählte Baualterklassen von Einfamilienhäusern des deutschen Gebäudebestands angewendet wurde (Ballarini et al., 2014). Dabei wurde der Einfluss unterschiedlicher Sanierungsstrategien und Betriebsstrategien auf die Effizienz, Kosten und Emissionen der Energiesysteme untersucht. Hierfür wurde das Open-Source-Optimierungstool Model Template for Residential Energy Supply Systems (MTRESS), welches die Betriebsoptimierung ermöglicht, verwendet (Schmeling et al., 2020) und für die optimierende Konfigurierung der Sanierungsmaßnahmen wurde ein genetischer Algorithmus eingesetzt (Deb et al., 2002).

Zu Beginn der Arbeit wird ein theoretischer Überblick über die wichtigsten Elemente einer numerischen Modellierung von Gebäuden als Energiesystem (Kapitel 2) gegeben. Dabei wird ebenfalls

auf Eingangsparameter sowie auch Bewertungskriterien der Nachhaltigkeit eingegangen. Das Verfahren zur Lösungsfindung sowie die festgelegten Parameter werden in Kapitel 3 beschrieben. Anschließend folgen die Darstellung und der Vergleich der Ergebnisse aus der Anwendung des Programms (Kapitel 4). Dabei wird auf das Zusammenspiel verschiedener Konfigurationen und auf ihren Einfluss auf die Bewertungskriterien eingegangen. Das Modell, die Ergebnisse und das angewandte Verfahren werden in Kapitel 5 kritisch hinterfragt.

2 Theorie

Zunächst werden Gebäude als thermisches Modell beschrieben. Anschließend wird auf deren Nutzung eingegangen und welche Profile es braucht, um das Verhalten der Bewohnenden (2.2 Nutz- und Lastprofile) zu beschreiben. Als nächstes folgt die Erläuterung einschlägiger Anlagentechnik (2.3 Energiesysteme), welche die Temperierung des Gebäudes und die Erfüllung der Bedürfnisse der Nutzenden gewährleistet. In Kapitel 2.4 Gebäudeautomation es um das Kernthema, der Steuerung und Regelung von Gebäudetechnik mit dem Fokus auf das Verhalten und der Bedürfnisse der Bewohnenden. Folgend werden die Kriterien (2.5 Kriterien der Nachhaltigkeit) vorgestellt, anhand derer die Ergebnisse aus den methodischen Untersuchungen bewertet werden. Die Methodik wird im anschließenden Hauptkapitel 3 erläutert.

2.1 Thermisches Gebäudemodell

Gebäude unterliegen Umwelteinflüssen, wie der Außentemperatur und der Sonneneinstrahlung. Erstere sorgt durch die Temperaturdifferenz zur Innenraumtemperatur für Wärmeverluste über die Gebäudehülle (Transmission) und durch Luftaustausch (Lüftung). Zweitere bestrahlt Außenwände sowie auch Flächen im Innenraum und trägt durch Wärmestrahlung zu einer Erwärmung bei. Je nach Nutzung wird eine Innenraumtemperatur gefordert und es entstehen durch die Aktivitäten innerhalb der Gebäudehülle Wärmegewinne.

Somit lässt sich die Gebäudehülle als Systemgrenze für eine thermische Bilanzierung betrachten. Die (DIN EN ISO 13790) stellt mehrere Methoden zum Berechnen von Wärme- und Kühlbedarf vor. Sie stellt auch einen „vollständigen Satz von Gleichungen für das vereinfachte Stundenverfahren“ (ebd.).

Zur Vereinfachung für rechnergestützte Verfahren werden die thermischen Eigenschaften des Gebäudes analog zur Elektrotechnik als RC-Modell (Widerstand-Kapazität) beschrieben. Analog steht das R für (Wärmeleit-)Widerstände, das C für Kapazitäten (Wärmespeicherfähigkeit der Gebäudemasse). Die Temperaturgradienten können als Spannung und Wärmeströme als elektrische Ströme betrachtet werden.

Der Wärmeleitwiderstand R ergibt sich aus dem materialspezifischen Wärmeleitwert λ , der Materialstärke des betrachteten Elements d und dessen Position. Die Position hat einen Einfluss auf den Wärmeübergangswiderstand zwischen der Bauteiloberfläche innen und dem Innenraum / der Raumluft (R_{si}) sowie der Bauteiloberfläche außen und dem Außenraum / der Außenluft (R_{se}).

$$R = R_{si} + \frac{d}{\lambda} + R_{se} \left[\frac{m^2 K}{W} \right] \quad (1)$$

Multipliziert man den Kehrwert des Wärmeleitwiderstands mit der zugehörigen Bauteilfläche A ergibt das den temperaturabhängigen Transmissionswärmeverlust H.

$$H_{Bt} = \frac{A_{Bt}}{R_{Bt}} [W/K] \quad (2)$$

Die Gebäudemasse nimmt mit einer materialabhängigen Trägheit Wärme auf (wenn sie Kälter als anliegende Medien ist oder von Wärmestrahlung betroffen ist). Ist die Gebäudemasse wärmer als angrenzende Medien oder Flächen, gibt sie die Wärme wieder in Form von Transmission und Strahlung ab.

Das vereinfachte Stundenverfahren des 5RC Modells wurde von (Hillen et al. 2024) als thermal building model (TBM) in Python implementiert. Es besteht analog zur (DIN EN ISO 13790) aus fünf Widerständen und einem Speicher – im folgenden 5RC (Gebäude-)Modell genannt.

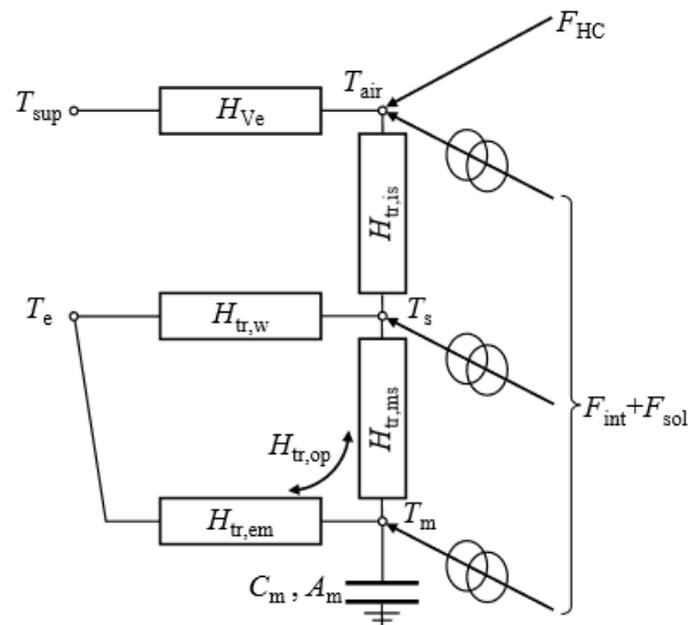


Abbildung 1 Elektrisches Schaltbild des 5RC Gebäudemodells (DIN EN ISO 13790)

Im 5RC Modell werden die Wärmeleitwiderstände zwischen mehreren Knotenpunkten betrachtet. Daraus resultieren folgende Wärmeübertragungen:

- H_{Ve} : Lüftungswärmeverluste
- $H_{tr,is}$: Wärmeübergang zwischen Innenraumtemperatur und innenseitigen Temperatur der Außenwand
- $H_{tr,ms}$: Wärmeübergang zwischen der innenseitigen Temperatur und der Gebäudemasse
- $H_{tr,em}$: Wärmeübergang zwischen der Gebäudemasse und der Außenluft
- $H_{tr,w}$: Wärmeübergang zwischen der innenseitigen Temperatur und der Außenluft

Hinzu kommt noch die Gebäudemasse als Kapazität C_m , welche über die angrenzende Fläche A_m zum Innenraum Wärme austauscht – abhängig von ihrer Temperatur, bzw. der Temperaturdifferenz zum Innen- und zum Außenraum.

$H_{tr,em}$ und $H_{tr,ms}$ werden in anderen Modellen auch zusammengefasst und sind die Transmissionswärmeverluste über die opake Hülle $H_{tr,op}$, während $H_{tr,w}$ für die Wärmeverluste über transparente Flächen steht. An dem inneren Knotenpunkt T_s werden auch die inneren und die solaren Wärmegevinne angesetzt.

Da keine Lüftungsanlage betrachtet wird, ist Temperatur der Zuluft T_{sup} gleich der Außenluft T_e .

Die inneren und die solaren Wärmegevinne F_{int} und F_{sol} werden an der inneren Gebäudehülle berücksichtigt.

Sind die physikalischen Eigenschaften der Bauteile bekannt und für eine Zeitreihe die Temperaturen und Wärmeinträge festgelegt, so kann für jeden Zeitschritt der Wärme- und Kühlbedarf ermittelt werden (F_{HC}).

2.1.1 Komponenten der Gebäudehülle

In diesem Abschnitt werden die wesentlichen thermischen Eigenschaften der betrachteten Komponenten der Gebäudehülle beschrieben. Diese bestehen aus opaken (Boden, Wände, Dach, Türen) und transparenten (Fenster, Fenstertüren usw.) Flächen, über welche der Wärmeaustausch mit der Umwelt stattfindet.

Aus dem Kehrwert des Wärmeleitwiderstands R ergibt sich der Wärmedurchgangskoeffizient (U -Wert). Bei mehrschichtigen Aufbauten (Boden, Wände, Dach) setzt sich der gesamte Wärmeleitwiderstand aus den Wärmeleitwiderständen der einzelnen Bauteilschichten zusammen:

$$U_{Bt} = \frac{1}{R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n} + R_{se}} \left[\frac{W}{m^2K} \right] \quad (3)$$

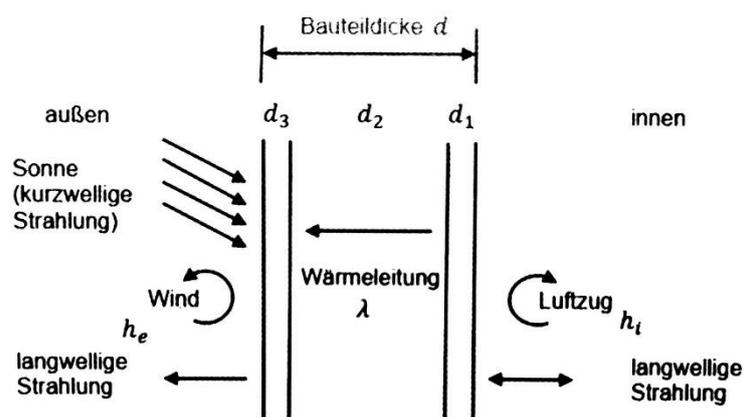


Abbildung 2 Parameter der Berechnung des U-Werts nach (Rexroth, 2014)

Durch Sanierungsmaßnahmen, also zum Beispiel dem Aufbringen einer Wärmedämmschicht, verändert sich der Schichtaufbau und damit der Wärmedurchgangskoeffizient. Ist der Schichtaufbau nicht bekannt, aber der bisherige U -Wert, wird der neue U -Wert vereinfacht ermittelt:

$$U_{Neu} = \frac{1}{R_{si} + \frac{d_{Bt}}{\lambda_{Bt}} + \frac{d_{neu}}{\lambda_{neu}} + R_{se}} \quad (4)$$

$$\text{Mit } \frac{d_{Bt}}{\lambda_{Bt}} = \frac{1}{U_{Bt}} - R_{si} - R_{se} \quad (5)$$

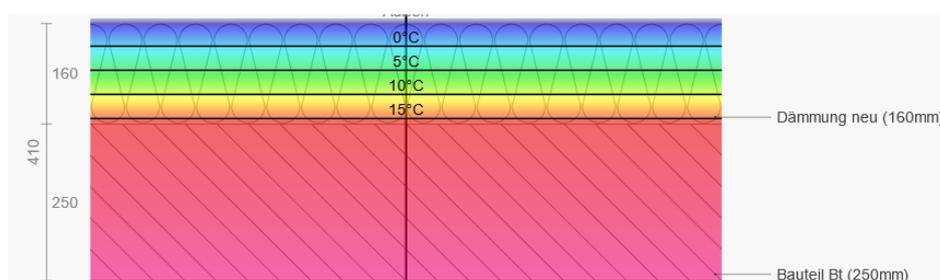


Abbildung 3 Ergänzender Bauteilaufbau, eigene Darstellung mit (www.ubakus.de, 2024)

Einbauelemente wie Fenster und Türen werden entweder ausgetauscht oder ertüchtigt. In den betrachteten Sanierungsmaßnahmen werden die Bauteile komplett ausgetauscht, sodass für den

Wärmedurchgangskoeffizienten immer der U-Wert des Herstellers bzw. des spezifischen Produktes zu verwenden ist.

Zusätzlich wird bei transparenten Flächen die Durchlässigkeit von Sonneneinstrahlung berücksichtigt. Der Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) beschreibt den Anteil an direkt wirkender durchgehender Sonneneinstrahlung und die Wärmeabgabe über das Glas selbst.

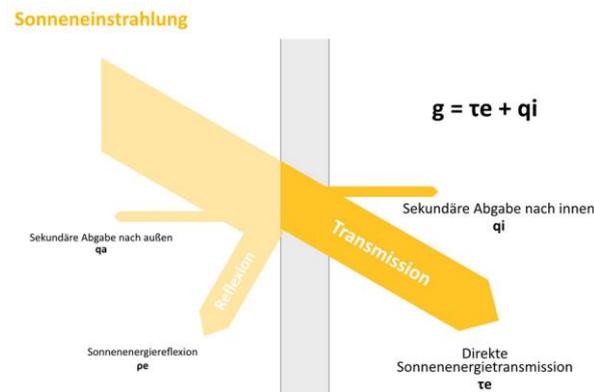


Abbildung 4 Gesamtenergiedurchlassgrad g-Wert (BauNetz, 2024)

Die Anforderungen an Fenster haben sich in den letzten Jahrzehnten gesteigert, denn sie sollen sowohl einen guten Wärmeschutz gewährleisten als auch eine übermäßige Sonneneinstrahlung verhindern. Das aktuelle (Gebäudeenergiegesetz - GEG Anlage 7 (zu § 48), 2024) schreibt Werte von maximal 1,3 W/m²K Wärmedurchgangskoeffizient und 0,6 Gesamtenergiedurchlassgrad vor.

2.2 Nutz- und Lastprofile

Die Nutzenden eines Wohnhauses oder einer Wohnung werden als Haushalt zusammengefasst. Mit ihrem Verhalten und ihren Bedürfnissen legen sie im Wesentlichen die Betriebsweise des Gebäudes fest. Daraus ergeben sich der Heizwärmebedarf, der Trinkwarmwasserbedarf und der Strombedarf.

Betrachtet man das Verhalten über einen festen Zeitraum, bezeichnet man dies als Nutzprofil. Aus den erfassten Verbräuchen oder errechneten Bedarfen über einen festen Zeitraum ergeben sich die Lastprofile.

Das Nutzprofil beschreibt zum Beispiel die Anwesenheitszeiten der einzelnen Bewohnenden, während das Lastprofil den Warmwasserbedarf über den Tag darstellt. Das Lastprofil kann auch aus detaillierten Nutzprofilen hergeleitet werden, wenn diese neben der Anwesenheit auch Dusch- und Essenszeiten beinhalten (3.3.1.1 Haushalt).

Es gibt verschiedene Ansätze, Nutz- und Lastprofile zu generieren. Diese basieren entweder auf konkreten Messreihen, die dann auf feste Bezugsgröße normalisiert werden, zum Beispiel Standardlastprofile der Netzbetreiber in Bezug auf 100.000 kWh (Stromnetz Berlin GmbH 2018). Oder sie basieren auf Annahmen und Erfahrungswerten (Profilgeneratoren) sowie Normen, die Werte von 8-12,5 kWh/m²a ansetzen (CLAGE 2023).

2.3 Energiesysteme

Auf dem Markt wird eine Vielzahl an technischen Lösungen angeboten, welche die Bedarfe eines Einfamilienhauses erfüllen. Im Folgenden werden jedoch nur die technischen Anlagenkomponenten beschrieben, welche auch in der Simulation berücksichtigt wurden.

2.3.1 Wärmebereitstellung und -speicher

2.3.1.1 Heizkessel

Die konventionelle Wärmebereitstellung erfolgt häufig über gas- oder ölbetriebene Heizkessel oder -thermen (TABULA (Loga 2015b)). Für Häuser mit hohem Wärmebedarf werden eher Kessel verwendet.

Alte Modelle, Konstanttemperaturkessel, erhitzen das Wasser konstant auf einer hohen Temperatur, damit sich kein Kondensat im Abgas bildet. Aufgrund der konstant hohen Temperaturen sind diese Anlagen überholt und nicht effizient. Neuere Bauarten, Niedertemperaturkessel, arbeiten geregelt und bei niedrigeren Temperaturen. Bei Bedarf heizen sie auf ein höheres Temperaturniveau. Dadurch sind sie effizienter. Am effizientesten sind Brennwertkessel, welche zusätzlich die Abgaswärme nutzen. Das Abgas wird so weit abgekühlt, dass sich Kondensat bildet. Durch Überschreiten des Taupunkts wird weitere Wärme über einen vorgeschalteten Wärmeübertrager an das Heizsystem abgegeben und der Energiegehalt (Brennwert) des Brennstoffes wird über seinen Heizwert hinaus genutzt. Auf den Heizwert bezogen erreichen Konstanttemperaturkessel einen Wirkungsgrad von ca. 70 % wohingegen moderne Brennwertkessel einen Wirkungsgrad von über 100 % erreichen (Schmid, 2020; Schulz & Westkämper, 2023).

2.3.1.2 Wärmepumpe

Eine Kompressions-Wärmepumpe arbeitet nach dem Prinzip des (reversiblen) Carnot-Prozess. In vier Stufen wird Wärme aus der Umwelt (Primärseite) entzogen und dem Wärmenetz des Gebäudes (Sekundärseite) zugeführt (Schmid, 2020; Schulz & Westkämper, 2023).

Als wärmeübertragendes Medium wird ein Kältemittel verwendet, welches bei Raumtemperatur normalerweise verdampfen würde. Im ersten Schritt liegt es gasförmig vor und wird in einem elektrischen Kompressor verdichtet, wobei es sich erwärmt (isentropische Kompression). Im zweiten Schritt gibt das erhitzte Kältemittel Wärme über einen Wärmetauscher an den Heizkreislauf ab. Dabei erreicht es die Sattdampfsgrenze und kondensiert. Im dritten Schritt wird das verflüssigte Kältemittel über eine Drossel entspannt und verdampft dabei weitestgehend. Im vierten Schritt nimmt es über einen weiteren Wärmetauscher die Wärme der Umgebung auf und verdampft dabei vollständig. Während die Schritte einzeln beschrieben sind, finden sie in der Realität durchgängig parallel statt (ebd.).

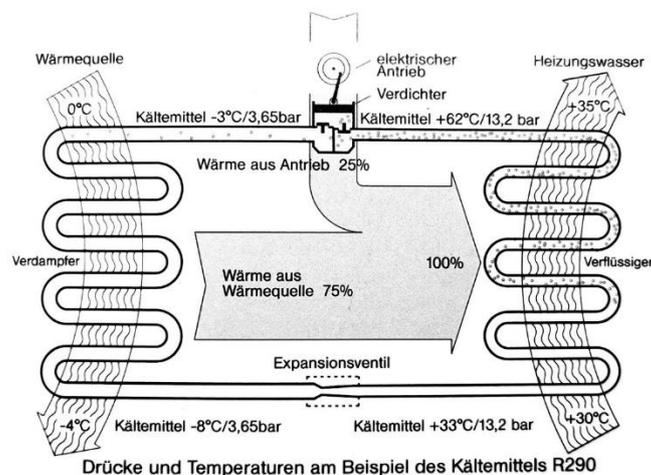


Abbildung 5 Schematischer Kreislauf des Wärmepumpenprozesses aus (Schulz & Westkämper, 2023)

Das Verhältnis von bereitgestellter Wärme auf der Sekundärseite Q_{ab} und aufgewendeter elektrischer Arbeit im Kompressor W_{el} beschreibt die Leistungszahl bzw. den COP (coefficient of performance).

$$\varepsilon = COP = \frac{Q_{ab}}{W_{el}} \quad (6)$$

Die Temperaturdifferenz, welche dabei überwunden wird, wird auch als Temperaturhub bezeichnet.

$$\int TdS = 0 = W_{el} + Q_{ab} + Q_{zu} = W_{el} + c_p * m * dT \text{ mit } dT = T_{II,warm} - T_{I,warm} \quad (7)$$

Theoretisch lässt sich ein maximal COP erreichen, welcher allein über den Temperaturhub bestimmt wird.

$$COP_{max} = \frac{T_{II,warm}}{T_{II,warm} - T_{I,warm}} \quad (8)$$

Jedoch handelt es sich um einen idealisierten Prozess und der reale Prozess erreicht wesentlich geringere COP-Werte. Setzt man den realen COP und den idealen COP_{max} ins Verhältnis beschreibt dies den Gütegrad η_{WP} einer Wärmepumpe für eine bestimmte Temperaturkonstellation.

$$\eta_{WP} = \frac{COP}{COP_{max}} \quad (9)$$

Datenblätter geben die Heizleistung \dot{Q} einer Wärmepumpe meist nur für bestimmte Temperaturhübe an (Schulz & Westkämper, 2023). Durch den Gütegrad lassen sich Rückschlüsse auf die Heizleistung für eine andere Temperaturkonstellation schließen.

$$\dot{Q}_{WP,-7/55} = \eta_{\varphi} * COP_{max,-7/55} * P_{el} \quad (10)$$

Mit der Annahme, dass die verrichtete Arbeit des Verdichters konstant bleibt, ergibt sich zudem ein vereinfachter Zusammenhang zwischen den Betriebspunkten allein über ihre Temperatur:

$$\dot{Q}_{WP,neu} = \frac{\dot{Q}_{WP,alt} * COP_{neu}}{COP_{alt}} = \frac{\frac{T_{II,neu}}{T_{II,neu} - T_{I,neu}}}{\frac{T_{II,alt}}{T_{II,alt} - T_{I,alt}}} \quad (11)$$

Wärmepumpen können, wie oben beschrieben auf andere Temperaturniveaus ausgelegt werden und damit die komplette Heizlast decken. Das ist der monovalente Betrieb. Aus Kostengründen werden Wärmepumpen meist etwas kleiner als notwendig dimensioniert und bivalent betrieben. Dies erfolgt entweder alternativ oder parallel. Im alternativ bivalenten Betrieb löst unterhalb der Umschalttemperatur T_U ein zweiter Wärmeerzeuger die Wärmepumpe komplett ab. Im parallel bivalenten Betrieb wird unterhalb der Einschalttemperatur T_E eine Zusatzheizung eingeschaltet, welche die Wärmepumpe bei abnehmender Leistung und Außentemperatur unterstützt. Oft ist dies ein elektrischer Heizstab. Damit kann das Heizsystem monoenergetisch betrieben werden und es ist kein weiterer Energieträger(-anschluss) notwendig. Der Punkt mit der Einschalt- bzw. Umschalttemperatur und der zugehörigen Heizleistung der Wärmepumpe wird Bivalenzpunkt genannt (Schmid, 2020; Schulz & Westkämper, 2023).

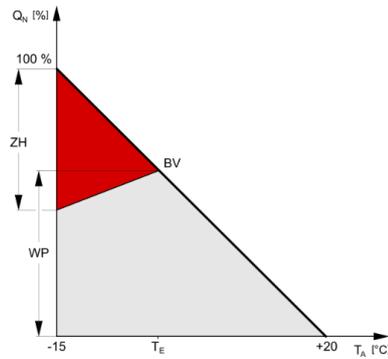
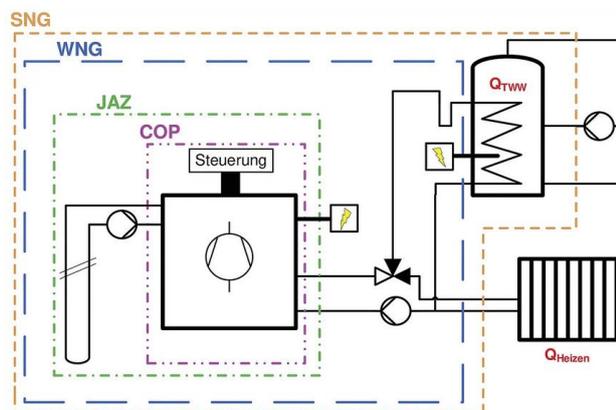


Abb. 5-3

BV Bivalenzpunkt ZH Zusatzheizung
 Q_N Heizlast T_A Außentemperatur
 WP Wärmepumpe T_E Einschaltung

Abbildung 6 Wärmepumpe im bivalenten parallelen Betrieb mit Zusatzheizung (SOLARFOCUS GmbH, 2021)

Um die Effizienz einer Wärmepumpe realistisch zu beurteilen, muss sie mindestens über eine Heizperiode betrachtet werden (SCOP – seasonal COP). Noch genauer ist die Jahresarbeitszahl JAZ, welche die gesamte Wärmemenge zum eingesetzten Strom über das Jahr beschreibt.



vereinfacht dargestellte Systemgrenzen einer Sole/Wasser-Wärmepumpe

COP = Coefficient of Performance WNG = Wärmenutzungsgrad

JAZ = Jahresarbeitszahl

SNG = Systemnutzungsgrad

Abbildung 7 Systemgrenzen eines Wärmepumpensystems (energie-experten.org, 2024)

Als regenerative Wärmequelle wird hauptsächlich Außenluft verwendet, aber auch Erdwärme, Grundwasser und Abwärme. (Fraunhofer ISE 2019) ermittelte in einer Feldstudie mit 29 Luft-Wärmepumpen eine JAZ zwischen 2,5 und 4,6.

Da konventionelle Kältemittel nicht zuletzt wegen ihrer Treibhausgas-ähnlichen Eigenschaften schädlich sind (GWP > 3000 ebd.) wurde die europäische F-Gase-Verordnung erlassen. Sie schreibt die Reduzierung des GWP durch Kältemittel vor, indem sie Sorten komplett verbietet (GWP > 2500 ab 2030) und nur noch rezykliertes Kältemittel (GWP > 750 ab 2032) zulässt (STIEBEL ELTRON 2024), was „natürliche“ Kältemittel wie Propan fördern soll (KÄLTE-KLIMA GmbH 2024).

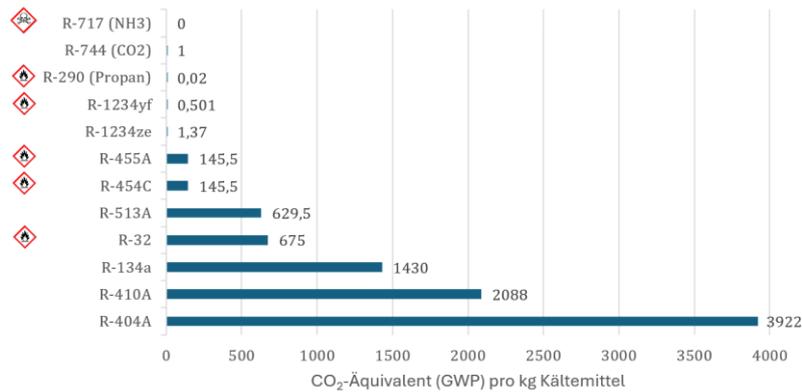


Abbildung 8 Übersicht Global Warming Potential von Kältemitteln (KÄLTE-KLIMA GmbH, 2024)

2.3.1.3 Fernwärme

Fernwärme steht für die Versorgung von Gebäuden mit Wärme über ein Heißwassernetz. Die Wärme wird zentral erzeugt und über einen Wärmetauscher (Übergabestation) lokal im Gebäude weitergegeben. Durch einen höheren Druck in der Leitung können primärseitig (Wärmenetz) Temperaturen von bis zu 135 °C bereitgestellt werden. Je nach Netzbetreiber muss über die Sekundärseite (Hausnetz) gewährleistet sein, dass sich die Primärseite auf eine bestimmte Temperatur abkühlt. Als Energiequelle kommen neben fossilen Brennstoffen auch biobasierte Brennstoffe, Abwärme oder in neuerer Zeit auch Wärmepumpen in Kaskadenschaltung zum Einsatz. Dies erschwert die einheitliche Beschreibung der ökonomischen und ökologischen Eigenschaften von Fernwärme. Die Berliner Energie und Wärme stellt alleine für ihre Heizkraftwerke in Berlin neun verschiedene Zertifikate bereit (BEW 2024).

2.3.1.4 Mehrschicht-Wasserwärmespeicher

Der Schichtspeicher ist darauf ausgelegt, erwärmtes Wasser auf unterschiedlichen Temperaturniveaus zu speichern. Aufgrund der unterschiedlichen Dichte bei unterschiedlichen Temperaturen sammelt sich das wärmere Wasser im oberen Bereich und das kältere Wasser im unteren Bereich. Durch den Dichteunterschied findet wenig Wärmeaustausch statt. Dies wird durch Ladelanzen, welche erhitztes Wasser in höhere Speicherbereiche leiten, und durch unterschiedliche Entnahmehöhen optimiert.

Dadurch eignen sich Schichtspeicher auch für die Integration mehrere Wärmeerzeuger, auch wenn diese auf unterschiedlichen Temperaturniveaus arbeiten (zum Beispiel Solarthermie und Heizkessel). Wird der Schichtspeicher am oberen Bereich mit einem zusätzlichen Wärmeüberträger ergänzt (Kombispeicher), kann darüber auch Trinkwarmwasser bereitgestellt werden. Der Wärmetauscher garantiert dabei eine hygienische Trennung.

2.3.2 Photovoltaik und Stromspeicher

2.3.2.1 Photovoltaik

Photovoltaik-Anlagen wandeln Sonnenlicht direkt in elektrische Energie um. Dafür nutzen sie den photovoltaischen Effekt, bei dem in Halbleiterkristallen durch Lichteinstrahlung elektrische Spannung entsteht. Die verfügbare Leistung ist stark von der Umgebungstemperatur und solaren Einstrahlung abhängig. Inzwischen setzen siliziumbasierte Module über 20 % der einstrahlenden Energie um (Schulz und Westkämper 2023).

Die nutzbare Strahlungsleistung der Sonne ist wiederum abhängig vom Wetter, der Jahres- sowie Tageszeit und wird auch durch die Orientierung der bestrahlten Fläche zur Sonne beeinflusst. Die höchste Einstrahlung lässt sich über eine südlich ausgerichtete um 30 Grad aufgestellte Modulfläche erreichen, doch sind auch Ausrichtungen gen Osten oder Westen möglich, ohne viel Leistung zu verlieren (ebd.).

In Deutschland erreicht die maximale Einstrahlung einen Wert von 1.000 W/m^2 . Die mittlere Globalstrahlung liegt bei $1086 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Damit würde eine PV-Anlage mit 20 m^2 Fläche maximal 4 kW Leistung bringen und im Jahr 4.344 kWh elektrische Energie bereitstellen. Das bedeutet jedoch nicht, dass diese von einem Haushalt mit einem Bedarf von $4 \text{ MWh}_{\text{el}}$ auch vollständig genutzt werden kann, da Lastspitzen eines Haushalts meistens abends und morgens auftreten und den Leistungsspitzen einer PV-Anlage zur Mittagszeit entgegenstehen (Weniger, 2015).

2.3.2.2 Stromspeicher und Wechselrichter

Neben den Modulen ist auch ein Wechselrichter notwendig, welcher die elektrische Energie von Gleichstrom in Netzstrom, also Wechselstrom bei 230 V umwandelt.

Überschüssigen Strom wird entweder vergütet in das Stromnetz eingespeist oder in Batterien zwischengespeichert. Als Batterien dienen sowohl ausrangierte LKW-Blei-Akkus als auch moderne Lithium Batterien. Für das oben genannte Beispiel lässt sich mit einer Speicherkapazität von $4 \text{ kWh}_{\text{el}}$ der Eigenverbrauchsanteil von 30% auf 60% steigern (ebd.).

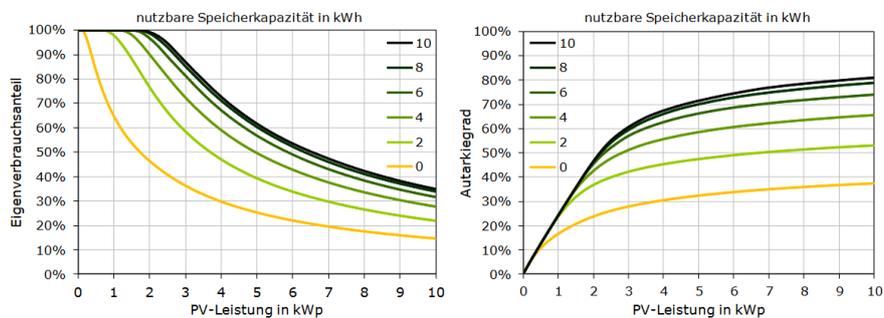


Abbildung 9 Einfluss der PV-Leistung und Speicherkapazität auf den jahresmittleren Eigenverbrauchsanteil (links) und Autarkiegrad (rechts) (Weniger, 2015)

2.3.3 Wärmeabgabe via Heizkörper

Konventionelle Heizkörper übertragen Wärme an den zu beheizenden Raum in Form von Wärmestrahlung und durch aufsteigende Warmluft. Je nachdem welche Wärmeübertragung dominiert, wird von Konvektoren oder Radiatoren gesprochen. Daneben existieren noch weitere Systeme, die entweder komplett auf Konvektion (Luftheizung) oder auf Wärmestrahlung (Flächenheizung) basieren (Schmid, 2020; Schulz & Westkämper, 2023).

Die Leistung eines Heizkörpers muss die Raum-Heizlast decken. Die Wärmeleistung wird nach der EN 442 bestimmt. Die Leistungsangaben der Heizkörper sind normiert. Das bedeutet, dass die Wärmeabgabe unter Normbedingungen zu ermitteln ist. Mit entsprechenden Gleichungen wird dann die Dimensionierung für andere Temperaturniveaus vorgenommen (Recknagel, Sprenger, Schramek 2007).

Die Heizkörper-Normleistung wird bei $75/65/20 \text{ }^\circ\text{C}$ ermittelt, also bei einer Vorlauftemperatur von $75 \text{ }^\circ\text{C}$, einer Rücklauftemperatur von $65 \text{ }^\circ\text{C}$ und einer Raumlufttemperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (EN 442).

Der Term (12) stellt die logarithmische Übertemperatur dar, also die Temperaturdifferenz zwischen mittlerer Heizkörpertemperatur und Raumlufttemperatur (Seifert 2021).

$$\Delta\vartheta_H = \Delta\vartheta_m = \frac{\vartheta_V - \vartheta_R}{\ln \frac{\vartheta_V - \vartheta_i}{\vartheta_R - \vartheta_i}} \quad \text{wenn } \frac{\vartheta_R - \vartheta_i}{\vartheta_V - \vartheta_i} < 0,7 \quad (12)$$

Je nach Temperaturverhältnis darf auch das arithmetische Mittel verwendet werden (Recknagel, Sprenger, Schramek, 2007; Schulz & Westkämper, 2023):

$$\Delta\vartheta_H = \Delta\vartheta_m = \frac{\vartheta_V + \vartheta_R}{2} - \vartheta_i \quad \text{wenn } \frac{\vartheta_R - \vartheta_i}{\vartheta_V - \vartheta_i} \geq 0,7 \quad (13)$$

Die 2. Heizkörpergleichung (14) beschreibt die Leistungsabgabe von den Heizflächen an die Raumluft. Setzt man die berechnete Heizlast in das Verhältnis zur normierten Heizleistung (15), lassen sich darüber verschiedene Parameter, wie der einzustellende Massenstrom oder mögliche Vor- und Rücklauftemperaturen ableiten.

$$\frac{\dot{Q}_1}{\dot{Q}_2} = \frac{A_1}{A_2} \cdot \frac{\left[\frac{t_{V1} - t_{R1}}{\ln \left(\frac{t_{V1} - t_{L1}}{t_{R1} - t_{L1}} \right)} \right]^n}{\left[\frac{t_{V2} - t_{R2}}{\ln \left(\frac{t_{V2} - t_{L2}}{t_{R2} - t_{L2}} \right)} \right]^n} = \frac{A_1}{A_2} \cdot \left[\frac{\Delta t_{In,1}}{\Delta t_{In,2}} \right]^n \quad (14)$$

$$\dot{Q}_{\text{Betrieb}} = \dot{Q}_{\text{Norm}} \cdot \frac{\left[\frac{t_{V,\text{Betrieb}} - t_{R,\text{Betrieb}}}{\ln \left(\frac{t_{V,\text{Betrieb}} - t_{L,\text{Betrieb}}}{t_{R,\text{Betrieb}} - t_{L,\text{Betrieb}} \right)} \right]^n}{\frac{75^\circ\text{C} - 65^\circ\text{C}}{\ln \left(\frac{75^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}}{65^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}} \right)}} = \dot{Q}_{\text{Norm}} \cdot \left[\frac{\Delta t_{In,\text{Betrieb}}}{49,8\text{K}} \right]^n \quad (15)$$

Ändern sich die Heizlasten im Bestand durch verringerte Wärmeverluste, sind die Heizkörper im Bestand überdimensioniert. Vereinfacht mit Gl. (13) lässt sich folgender Ansatz herleiten:

$$\frac{\dot{Q}_{\text{neu}}}{\dot{Q}_{\text{alt}}} = \frac{k_{\text{neu}} * (T_{VL,\text{neu}} - T_i)}{k_{\text{alt}} * (T_{VL,\text{alt}} - T_i)} \quad (16)$$

Unter der Annahme, dass k_{neu} gleich k_{alt} ist, ergibt sich für die neue Vorlauftemperatur:

$$T_{VL,\text{neu}} = \frac{\dot{Q}_{\text{neu}}}{\dot{Q}_{\text{alt}}} * (T_{VL,\text{alt}} - T_i) + T_i \quad (17)$$

2.4 Gebäudeautomation Oder Smart Home oder EMS?

So viele unterschiedliche Begriffe, wie es für Gebäudeautomation gibt, so viele unterschiedliche Auslegungen gibt es auch für diese Begriffe. Neben Gebäudeautomation lassen sich auch Smart Home oder Energy Management System (EMS) als Oberbegriffe verwenden. Spezifischer wäre, vor allem für die Zielgruppe Einfamilienhäuser (EFH), Home Energy Management System (HEMS) zu verwenden (Wisser, 2018). Um jedoch offener für weitere Untersuchungen mit dem Programmcode zu sein (Mehrfamilienhäuser, Nichtwohngebäude), wurde EMS verwendet, wird im Folgenden beibehalten und weiter ausgeführt, was es im Rahmen dieser Arbeit bedeutet:

Wie schon in den genannten Bezeichnungen enthalten, geht es um eine intelligente Regelung der Energieströme im Haus. Das Ziel ist ein möglichst kosten- und emissionsarmer Betrieb. Einen wesentlichen Faktor spielt dabei das Verhalten der Nutzenden und deren Bedürfnisse.

2.4.1 Nachtabsenkung

Die einfachste und vielleicht bekannteste Variante ist die Nachtabsenkung, bei der direkt am Wärmeversorger die Heizkurve verschoben wird, so dass eine niedrigere Raum-Solltemperatur erreicht wird. Ältere Systeme basieren auf Zeitschaltuhren, die an die Umwälzpumpe des Heizkreises gekoppelt sind (Hinz und Enseling 2018). Serverbasierte Systeme, mit Machine Learning ausgestattet, sind sogar in der Lage aus Messdaten Aktivitätsprofile zu erstellen, vorherzusagen und senken dementsprechend die Vorlauftemperatur während der Schlafenszeit (Bertko & Weber, 2017; Völkel & Lorbach, circa 2015).

2.4.2 Anwesenheit bzw. Abwesenheit

Vor allem in Nichtwohngebäuden wurden Zeitschaltuhren verwendet, sowohl um eine Nachtabsenkung in einem definierten Zeitraum zu ermöglichen als auch um die Betriebszeiten bzw. Öffnungszeiten des Gebäudes zu berücksichtigen.

Heutzutage lässt sich über lokale (Sensoren) als auch netzbasierte (WLAN) Systeme, die Anwesenheit der Bewohnenden erfassen und dementsprechend die genutzten Räume sogar einzeln temperieren (Bertko und Weber 2017).

Sobald das Wohngebäude zum Beispiel tagsüber wegen Lohnarbeit, Schule, Urlaub etc. leer steht, wird die Temperatur reduziert oder aber auch ein Aufheizen im Sommer zugelassen. Dies spielt vor allem bei klimatisierten Räumen und Lüftungsanlagen eine Rolle und kann wesentlich zu Energieeinsparungen beitragen.

2.4.3 Weitere Faktoren

Neben dem Verhalten der Nutzenden lassen sich auch weitere Faktoren von intelligenten EMS berücksichtigen. Je nach dem Grad der Vernetzung und/oder der Ausstattung mit Sensoren, fließen Klimadaten, Wettervorhersagen, Energiepreise, Stromsperrzeiten für die Wärmepumpe usw. mit ein (Wisser, 2018).

2.5 Kriterien der Nachhaltigkeit

Bereits 2001 wurde der Leitfaden Nachhaltiges Bauen veröffentlicht. In der aktuellen Version 2019 wird „Nachhaltigkeit [als] eines der wichtigsten Leitbilder der Zukunft“ gesehen (BBSR 2019). Unter gleichermaßen verhandelten ökologischen, ökonomischen und sozialen Aspekten soll „nachfolgenden Generationen eine intakte Umwelt und gleiche Lebenschancen“ (BBSR 2019) hinterlassen werden. Bezüglich globaler ungleicher Verteilung von bisheriger Ressourceninanspruchnahme und historischer Verantwortung dafür (Evans 2021), stellt sich die Frage, welche Generationen und wessen Lebenschancen gemeint sind. Nach (Brand und Wissen 2017) ist die Umstellung auf eine Green Economy kein Garant für eine globale Gerechtigkeit, da sie selbst bei einer sozial-ökologischen Transformation sozial-ökologische Kosten räumlich und sozial externalisiert. Demzufolge ist es ganz richtig einen „global ausgerichteten Bewertungsansatz“ zu verfolgen, so wie er zumindest auch in den ökologischen Kriterien des Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen (BNB) postuliert wird (BBSR 2019).

Darüber hinaus ist die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus eines Produkts bzw. eines Gebäudes sinnvoll, denn nicht nur die Nutzung bestimmt den Ressourcenverbrauch. Bereits in der Bereitstellung der Materialien (Produktion, Logistik) werden Ressourcen verbraucht, Emissionen freigesetzt. In der Planung werden Entscheidungen getroffen, die sich sowohl auf die Aufenthaltsqualität (Heiz-, Kühl-

und Lüftungskonzept) als auch die Kosten auswirken. Da im fortlaufenden Bauprozess die Möglichkeit sinkt, Änderungen vorzunehmen, sollte möglichst früh eine integrale Planung unter Berücksichtigung aller Nachhaltigkeitsaspekte stattfinden.

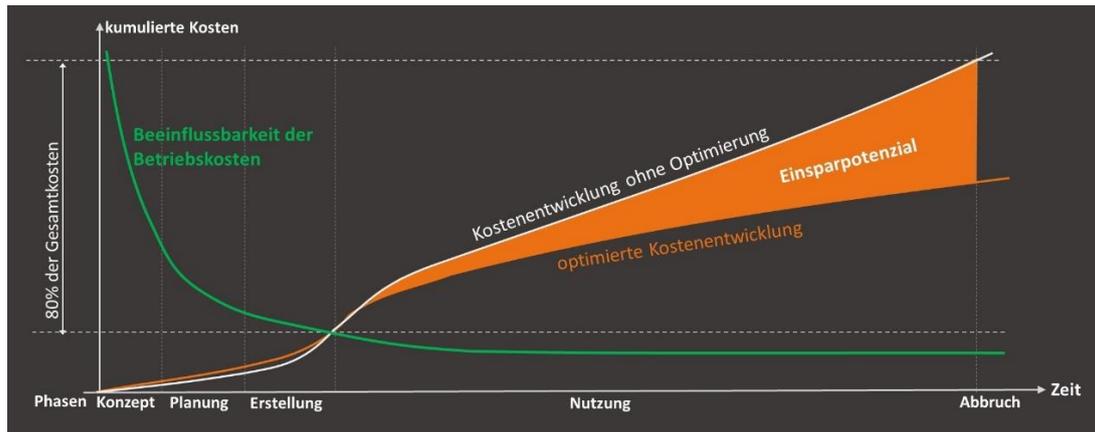


Abbildung 10 Beeinflussbarkeit der Betriebskosten im Planungsprozess (pure asset, 2024)

In der vorliegenden Untersuchung wird der Fokus auf Aspekte der Ökobilanzierung, Lebenszykluskosten, der Wirtschaftlichkeit sowie der Gesundheit, Behaglichkeit und Nutzerzufriedenheit gelegt. Allesamt als Qualitäten des nachhaltigen Bauens benannt (BBSR 2019).

2.5.1 Ökologisch

Nach dem BNB sind wesentliche ökologische Kriterien die Auswirkungen auf die Umwelt und Schonung der natürlichen Ressourcen sowie Erhalt der biologischen Diversität (BBSR, 2019).

Negative Umweltauswirkungen sind vor allem Emissionen, welche das Potential haben, die Umwelt langfristig zu schädigen. Dazu gehören das Globale Erwärmungspotential (GWP), Ozonschichtabbaupotential, Versauerungspotential, Eutrophierungspotential sowie diverse andere Einflüsse. Als natürliche Ressourcen werden fossile Energieträger, der Wasserhaushalt und die Flächennutzung betrachtet (ebd.).

Neben den verwendeten Energieträgern spielen auch die indirekten Emissionen der Produktion von Baustoffen für die Sanierungsmaßnahmen eine Rolle. Da die Baubranche noch weit entfernt vom einem Cradle to Cradle System ist, bei dem ausgediente Produkte bzw. Baumaterialien wieder dem Stoffstrom hinzugeführt werden, müssen bis zum Ende der Lebensdauer auch die Entsorgung, der Abriss und die mögliche Freisetzung von Schadstoffen betrachtet werden (cradle to grave).

Internationale Standards (DIN EN ISO 14040:2021-02; DIN EN ISO 14044:2021-02) regeln die Durchführung von Ökobilanzen, welche folgende Schritte beinhaltet:

- Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen
- Sachbilanz
- Wirkungsabschätzung
- Auswertung

Die Umweltauswirkungen werden über den gesamten Produkt-Lebenszyklus betrachtet, welcher sich fünf Hauptphasen unterteilen lässt:

- A. Ressourcengewinnung
- B. Produktion
- C. Lagerung und Verteilung
- D. Installation und Nutzung
- E. Rezyklierbarkeit bzw. Verwertbarkeit bis hin zum Deponieren

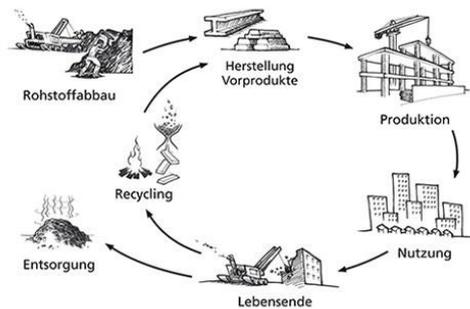


Abbildung 11 cradle-to-cradle als Ziel des Ökobilanz-Kreislaufs (Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, 2024)

2.5.2 Ökonomisch

Als ökonomische Qualitäten werden die Minimierung der Lebenszykluskosten, die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und der Erhalt vom Gebäudewert gesehen (BBSR 2019). Dabei setzen sich die Lebenszykluskosten aus den Herstellungskosten (vgl. DIN 276-1), den Baunutzungskosten (vergl. DIN 19860) und den Abrisskosten zusammen. Da in der vorliegenden Arbeit nur Bestandsgebäude betrachtet werden und davon ausgegangen wird, dass auch die über 100 Jahre alten Gebäude länger bestehen als der Betrachtungszeitraum, spielen vor allem Herstellungskosten (Investitionskosten für Sanierungsmaßnahmen) und Baunutzungskosten (Betrieb und Instandhaltung) für einen Vergleich unterschiedlicher Ausstattungs- und Betriebskonzepte eine Rolle.

2.5.2.1 Kapitalwert – net present value (NPV)

Für die Bestimmung der Lebenszykluskosten eignet sich die Kapitalwertmethode. Der Kapitalwert (NPV engl.: net present value) definiert sich aus der Summe aller getätigten Investitionen über einen definierten Betrachtungszeitraum, wobei der Barwert zukünftiger Investitionen (Verluste) und Vergütungen (Gewinne) auf den Startzeitpunkt des Betrachtungszeitraums abgezinst wird. Verluste und Gewinne werden zusammen als Geldfluss (CF engl. Cash Flow) bezeichnet.

$$NPV = -I_{t=0} + \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+i)^t} + \frac{RV_n}{(1+i)^n} \quad (18)$$

Die allgemeine Formel (18) muss dabei noch produktspezifisch differenziert werden, da für die Produkte und Betriebsmittel unterschiedliche Zinssätze (i) gelten.

Es werden folgende Fälle berücksichtigt:

1. Die Lebensdauer T_x eines Produktes x ist länger als die des Betrachtungszeitraums T : Dann enthält das Produkt x noch einen Restwert (RV engl. Residual Value), welcher am Ende zum NPV hinzuaddiert wird, jedoch mit einem verminderten Wert des gebundenen Kapitals.

$$RV_x = I_x * \left(1 - \frac{T}{T_x}\right) \quad (19)$$

2. Sollte der Betrachtungszeitraum länger als die Lebensdauer eines Produkts sein, sind Ersatzinvestitionen notwendig, die ebenfalls unter Berücksichtigung von Preissteigerungen r in den NPV mit einfließen. Der Restwert wird ebenfalls berücksichtigt.

$$I_{x,t} = \frac{-I_{x,0}}{(1 + r_x)^t} \quad (20)$$

3. Neben den Investitionskosten sind vor allem die Kosten während der Gebäudenutzung ($C_{m,x,t}$) relevant. Diese ergeben sich zum einen aus den Wartungs- und Instandhaltungskosten sowie aus den Kosten für die Betriebsmittel, also die Energiekosten ($C_{e,y}$). Beides fließt in den jährlichen CF mit ein, wobei diese noch zusätzlich mit den jeweiligen Preissteigerungsraten versehen werden.

$$CF_{m+e,t} = \sum_x -C_{m,x,t} + \sum_y \frac{-C_{e,y}}{(1 + r_y)^t} \quad (21)$$

$$CF_t = \sum_x I_{x,t} + CF_{m+e,t} \quad (22)$$

Die Kapitalwertmethode ist somit ein dynamisches Verfahren, welches die zeitliche Struktur der Zahlungsströme berücksichtigt. In umsatzorientierten Unternehmen wird ein positiver NPV angestrebt, also bei zu vergleichenden Szenarien der höchste Wert bevorzugt. Anders ist es bei einem Gebäude als Systemgrenze. Bis auf Energieplus-Häuser sind sie vor allem durch Verbrauch geprägt, woraus ein negativer NPV resultiert. Bei einem Vergleich ist also der geringste Betrag eines NPV zu bevorzugen.

2.5.2.2 Kostenfunktionen

Kostenfunktionen stellen einen linearen Zusammenhang zwischen der Skalierung eines Produktes (Leistung, Speicher-Kapazität, Materialstärke, ...) und den daraus resultierenden Kosten dar.

Die einfachste Variante wäre eine Funktion, welche die Steigung einer Geraden beschreibt, die durch zwei bekannte Dimension-Kosten-Paare als Punkte in einem Diagramm geht.

Eine Potenzfunktion (Gl. (23)) beschreibt allerdings wesentlich genauer die Degression der Kosten je Skalierungseinheit, welche bspw. bei Baumaßnahmen mit steigender Hüllfläche oder Leistung zu erwarten ist.

$$y(x) = m * x^n \quad (23)$$

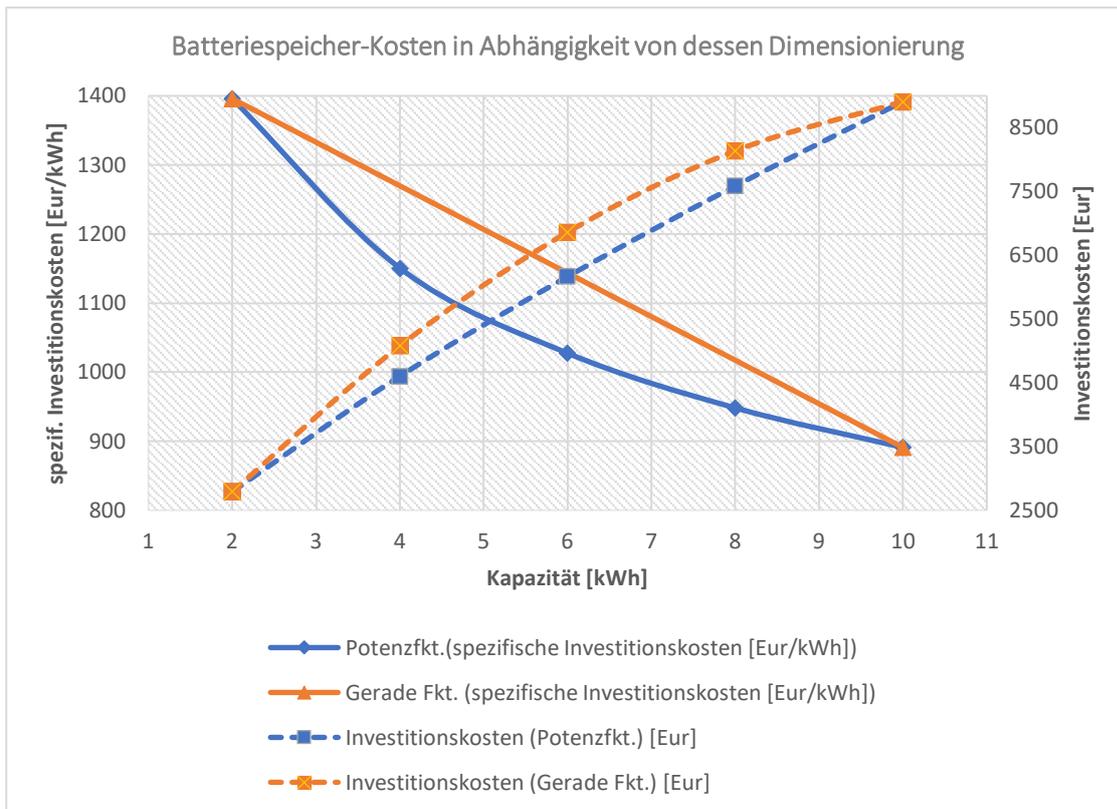


Abbildung 12 Beispiel-Diagramm Gegenüberstellung von Kostenfunktionen, eigene Darstellung

2.5.3 Sozial

Zu den sozialen Kriterien werden auch kulturelle und hygienische Ansprüche gezählt. Dazu gehören akustische, visuelle Qualitäten und die Beleuchtung. Weitere Aspekte sind die thermische Behaglichkeit und die Qualität der Raumluft. Temperaturasymmetrie und Zugluft sind Beispiele für unangenehme Situationen. Hinzu kommen noch bauphysikalisch geprägte Betrachtungen, wie die Ausbildung von Schwitzwasser oder sogar von Schimmel durch Wärmebrücken.

Diese Aspekte sind sehr von der individuellen Gebäudegeometrie abhängig. Bei der Betrachtung von Bestandsgebäuden mit Durchschnittswerten lassen sich Bewertungsgrößen nur pauschal ermitteln und sind zum Teil nicht oder nur mit Aufwand veränderlich. Da es in der vorliegenden Untersuchung vor allem um thermische Energieströme geht, wird kurz auf Zusammenhänge zur Behaglichkeit und dem Konzept der Übergradtemperaturstunden eingegangen.

Das Behaglichkeitsempfinden in einem Raum steht im Rahmen der Wärmephysiologie des menschlichen Körpers im Zusammenhang mit der Innenraumtemperatur und der Temperatur der umgebenden Oberflächen (Seifert 2019). Verschiedene Studien haben über Befragungen und Bestrahlungs-Modelle Ergebnisse geliefert, die einen bestimmten Prozentsatz von zu Zufriedenen unter bestimmten Bedingungen liefern. Daraus lässt sich ableiten, dass in einem Temperaturbereich von 18 °C bis 27 °C bei mäßiger Bewegung/Belastung und Bekleidung als angenehm empfunden wird. Die DIN EN 15251 gibt explizit Werte für die operative Raumtemperatur für Wohnräume an (ebd.).

Gebäude-/Raumtyp	Aktivität in W/m ²	Kategorie	Operative Temperatur ϑ_{op} in °C	
			Kühlperiode (Höchstwert)	Heizperiode (Mindestwert)
Wohngebäude: Wohnräume Schlafzimmer, Empfangs- raum, Küchen	70	A	25,5	21,0
		B	26,0	20,0
		C	27,0	18,0
Wohngebäude: andere Räume, Lagerräume, Flure	93	A	keine Angabe	18,0
		B	keine Angabe	16,0
		C	keine Angabe	14,0

Tabelle 1 Auszug aus der Tabelle für die empfohlene operative Raumtemperatur nach DIN EN 15251 (Seifert, 2019)

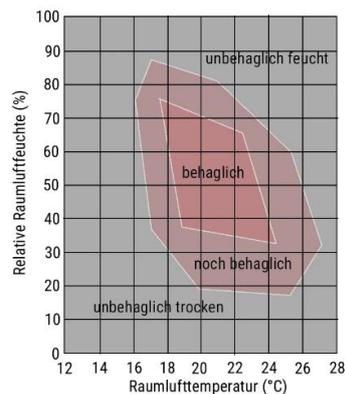


Abbildung 13 Empfundener Behaglichkeitsbereich T,x (Dominik Hochwarth, 2024)

Sowohl für Arbeitsplätze (ASR A3.5) als auch für Gebäude (Sommerlicher Wärmeschutz) gibt es Vorgaben, welche die Reduzierung übermäßiger Temperatureinwirkung vorschreiben. Der Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes ist nach (DIN 4108-2:2013-02) als Tabellenverfahren oder als thermische Gebäudesimulation möglich. Während ersteres pauschale Sonneneintragskennwerte vergleicht, wird über die Simulation der konkreten Wärmebelastung in Form der Übertemperaturgradstunden (Kh/a) ermittelt.

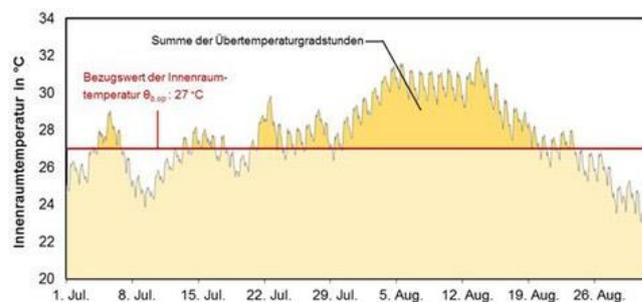


Abbildung 14 Beispiel-Plot einer Innenraumtemperatur-Simulation (Uwe Eichelmann, 2019)

2.6 Numerik

Folgend werden kurz die theoretischen Grundlagen zur numerischen Lösungsfindung umrissen. Im Wesentlichen dienen sie zum einen zur Erkundung des Konfigurationsraums für die Auslegung und zum anderen für die Simulation des Betriebs der ausgelegten Komponenten.

Mit Hilfe eines genetischen Algorithmus (GA) wird eine zielgerichtete Auswahl von Konfigurationen der Gebäudehülle und der Gebäudetechnik automatisiert (2.6.1). Die Auswahl findet innerhalb definierter Freiheitsgrade der (3.3 Datenbasis) statt. Die so ausgewählten Konfigurationen werden in einem numerisch modellierten Energiesystem bilanziert, unter der Maßgabe minimalen ökonomischen Aufwands (2.6.2).

2.6.1 Genetische Algorithmen

Darwin beschreibt in seiner Evolutionstheorie einen Mechanismus zur Weitergabe von phänotypischen Merkmalen aufgrund eines „Struggle for Existence“ (Tautz, 2024). Während seine Theorie missbräuchlich auf menschliche Gesellschaften übertragen („Sozialdarwinismus“) und aus dem Kontext gerissen wird (Bühl, 2009), bietet er für selektive Algorithmen eine gute Vorlage, um einen Zusammenhang zwischen Eingangsparametern und Selektion abzubilden (Deb et al., 2002).

Die Aufgabe genetischer (oder auch evolutionärer) Algorithmen ist es, Eingangsparameter so zu variieren, dass von ihnen abhängige Ergebnisse gegen eine oder mehrere Zielgrößen konvergieren. In Analogie zum Evolutionsmodell steht jeder Eingangsparameter für ein Gen und dessen Wert für eine Konfiguration des Gens. Alle Eingangsparameter zusammen ergeben die DNA. Jedes Individuum ist durch eine eigene DNA, also eine spezifische Konfiguration der Eingangsparameter, gekennzeichnet. Der Prozess eines genetischen Algorithmus lässt sich wie folgt beschreiben (Deb et al., 2002):

1. Elterngeneration bzw. Initialisierung
 - a. Zunächst wird eine Startpopulation (Elterngeneration od. 0. Generation) angelegt. Die „Gene“ werden bspw. mit Zufallswerten initialisiert.
2. Bewertung des Phänotyps bzw. der Angepasstheit
 - a. Je nach Anzahl der Zielgrößen werden die Ausgabewerte der Individuen der aktuellen Generation berechnet und ihre Performance bewertet (Fitness) – Nähe zu Maximum / Minimum
 - b. Im Folgenden werden die Individuen anhand ihrer Fitnesswerte sortiert. Dafür gibt es verschiedene Möglichkeiten.
3. Vererbende Individuen (Eltern) auswählen
 - a. Je nach Verfahren (Turnierauswahl, besserer Prozentsatz), werden anhand der Fitnesswerte die Individuen für die Generierung der Folgegeneration ausgewählt. Wie in Darwins Modell erfolgt eine Auslese der Besten (->Champions).
4. Folge-Generation
 - a. Je nach Art des genetischen Algorithmus werden die Champions in die nächste Generation übertragen oder „Nachkommen“ kreiert – ggf. auch Zwischenpopulationen, welche beide Generationen enthalten.
 - b. Um den Genpool, also die Eingangsparameter zu variieren, werden die Gene der vorherigen Generation entweder neu miteinander kombiniert, ohne ihren Wert zu verändern (Crossover) oder ihre Werte werden leicht verändert (Mutation).
5. Abbruch-Kriterium
 - a. Der Vorgang 2. bis 4. wird so oft wiederholt, bis ein Abbruch-Kriterium erreicht ist. Dies kann die Anzahl der Generationen, Rechenzeit oder ein definierter Konvergenzschwellenraum sein
 - b. Idealerweise enthält die letzte Generation die (Pareto-)optimalen Lösungen

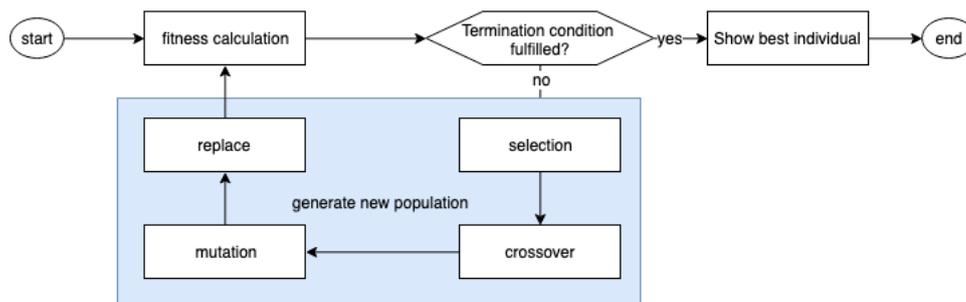


Abbildung 15 Ablaufplan eines genetischen Algorithmus (Christian Piazzi, 2019)

Neben der Festlegung der Anzahl der Individuen und der Anzahl der zu berechnenden Generationen, können auch mehrere Populationen zeitgleich und zunächst räumlich betrachtet werden. Dies ermöglicht spezifischere Lösungsräume schneller zu erreichen. Metaphorisch wird dann die gesamte Umwelt „Archipelago“ benannt, welches aus mehreren „Inseln“ besteht. Auch hier ist je nach gewähltem Algorithmus eine strikte Trennung (allopatrische Artbildung) bis zu einem kompletten Austausch der Champions alles möglich (Migration). Abbildung 16 stellt die gewählte Konfiguration schematisch dar.

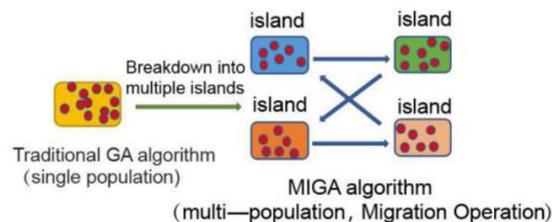


Abbildung 16 Migration des genetischen Algorithmus (Zhang et al., 2023)

Das Python-Modul PyGMO ist ein wissenschaftliches Tool zur parallelen Optimierung von verschiedenen Problemstellungen und hat Routinen implementiert, welche auf dem Ansatz eines genetischen Algorithmus aufbauen (Francesco Biscani et al., 2021).

2.6.2 Modellierung von Energiesystemen als Mixed Integer Linear Problem

Die numerische Modellierung von Energiesystemen steht vor zwei Herausforderungen: Zum einen braucht es eine Datenstruktur, welche die Komponenten des Energiesystems und ihre Interaktion physikalisch beschreibt (-> MTRESS - „Model Template for Renewable Energy Supply Systems“) und zum anderen braucht es ein Verfahren, welche ihre Interaktion simuliert und das Energiesystem bilanziert (-> OEMOF.SOLPH bzw. Mixed Integer Linear Problem).

2.6.2.1 OEMOF.SOLPH – Modellgenerierung für Energiesysteme

OEMOF.SOLPH ist ein python-open-source-package und Teil des „open energy modelling framework“ (oemof). (Schmeling et al., 2020) beschreibt es als „model generator for energy system modelling and optimisation“ (OEMOF.SOLPH) und es dient zur Simulation von Energieflüsse in gegebenen Bilanzgrenzen. Abstrakt besteht es aus einem Netz aus Knotenpunkten (Nodes), die in Komponenten und Busse unterteilt sind. Jede Komponente muss mindestens mit einem Bus verbunden sein. Diese

Verbindungen werden „Flows“ genannt. Zudem werden Komponenten in Senken (Sink), Quellen (Source) und Konverter (Converter) unterschieden.

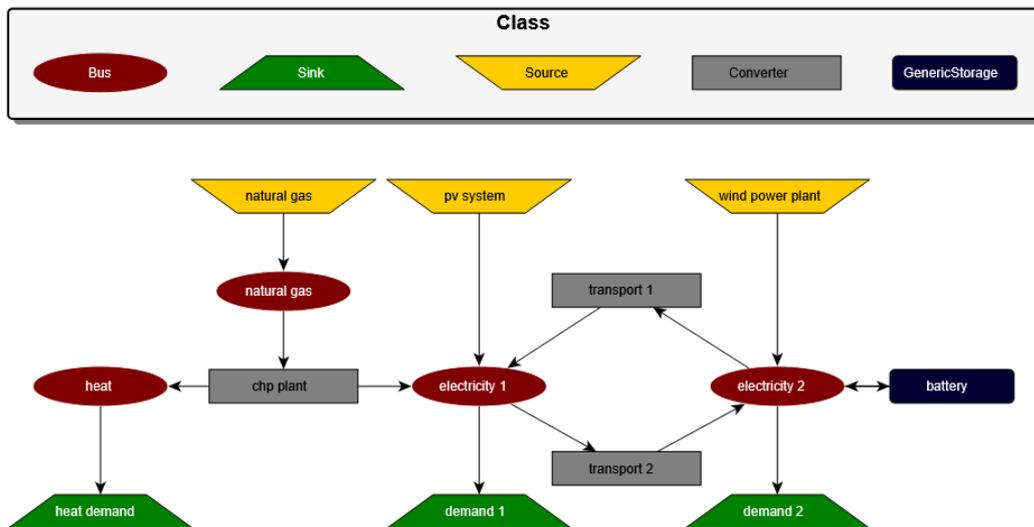


Abbildung 17 Beispielhaftes Energiesystem-Modell in oemof.solph (oemof-developer-group, 2024)

Ein- und ausgehende Ströme können über die „Flows“ mit Kosten, Vergütungen oder Limits beaufschlagt sein. Über Faktoren lassen sich Zusammenhänge zwischen eingehende und ausgehende Ströme herstellen. Im Beispiel oben (Abbildung 17) wandelt ein Kraftwerk mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWL bzw. CHP) als „Converter“ den Brennstoff aus der „Source“ Erdgas (natural gas) in Wärme und elektrischen Strom um und versorgt die jeweiligen „Demands“. Die Umsetzung, also der Wirkungsgrad ist im „Converter-Node“ hinterlegt, während die Kosten oder auch das Maximum für den Ressourcenbezug mit der Verbindung zum „natural gas-node“ festgelegt werden.

2.6.2.2 MTRESS - „Model Template for Renewable Energy Supply Systems“

MTRESS ist ein „Model Template for Renewable Energy Supply Systems“, welches für die Optimierung von Energiesystemen von Gebäuden über Quartiere bis hin zu Industrieanwendungen entwickelt wird. Die Software ist unter der MIT-Lizenz veröffentlicht und basiert auf OEMOF.SOLPH (Schönfeldt et al., 2024). Es hat bereits einige energietechnisch relevante Komponenten in einer objektorientierten Klassenstruktur implementiert. Die MTRESS-Komponenten bestehen aus den jeweils nötigen oemof-Komponenten (Node, Bus, Flow). Dabei wird in „Carrier“ (Energieträger), „Demands“ (Verbraucher) und „Technologies“ (u.a. Erzeuger, Speicher aber auch Netzanschlüsse) unterschieden. Diese werden in einer „Location“ (lokaler Bezugsraum) zusammengeführt und einem „Energiesystem“ hinzugefügt. Zwar können mehrere „Locations“ in einem Energiesystem existieren, aber für die Betrachtung eines Gebäudes mit Netzanschlüssen reicht eine „Location“ aus. Während der Programm-Laufzeit werden die ausgewählten Komponenten initialisiert, miteinander verbunden und zu einem oemof.solph-Modell transformiert (ebd.).

Besonders sind in MTRESS die Energieträger, da sie als eigenes Modell (objektorientiert: Klasse) abgebildet werden. Dadurch sind alle Technologien, die mit denselben Energieträgern interagieren, miteinander verbunden, wobei das Wärmenetz noch in einzelne Temperaturniveaus unterschieden wird. So lassen sich einzelne Ströme gut erfassen und mit Kosten oder in ihrer Übertragungsleistung limitieren. Die Netzanschlüsse werden ebenfalls modelliert und können sowohl als Quelle -> Netzbezug sowie auch als Senke -> Einspeisung dienen (ebd.).

Das 5RC-Modell wurde nicht nur als Berechnungsverfahren in Python implementiert (Hillen et al., 2024), sondern auch als Klasse (Thermal Building Model) in MTRESS-Struktur, sodass es sich als MTRESS-Komponente einem zu lösenden „Energiesystem“ hinzufügen lässt.

2.6.2.3 Mixed Integer Linear Problem und dessen Solver

Das Modell des Energiesystems in MTRESS bzw. dessen Integration in OEMOPH.SOLPH ist so konzipiert, dass es mit seiner numerischen Abbildung von Verbindungen aus Strömen und Umwandlungsfaktoren in eine Gleichungsmatrix transformierbar ist (MTRESS -> OEMOF.SOLPH). Mit dem Ziel, optimale Werte für die Variablen eines Ziels (Minimum bzw. Maximum einer linearen Zielfunktion) zu bestimmen, wird dies auch als Mixed Integer Linear Problem (MILP) bezeichnet (Robert E. Bixby, 2012). Dabei ist zu beachten, dass mit steigender Anzahl an Komponenten und Randbedingungen auch die Größe des Gleichungssystems zunimmt und dementsprechend auch die Rechenzeit, welche zur Lösung des Gleichungssystems notwendig ist.

Um das MILP zu lösen, gibt es verschiedene Lösungssoftware. Auch wenn GUROBI kommerziell vertrieben wird, ist es für akademische Zwecke frei verfügbar (Gurobi Optimization, 2024). Alternativ kann die frei verfügbare Variante CBC verwendet werden (John Forrest et al., 2024).

3 Methodik

In diesem Kapitel wird beschrieben, welche Herausforderungen sich aus der Zielsetzung ergeben (3.1). Anschließend werden die ausgewählten Bewertungskriterien erläutert (3.2) und die Datenbasis vorgestellt (3.3). Die Datenbasis ist sehr umfangreich und beinhaltet Angaben zu den verwendeten Last- und Nutzprofilen, den Klimadaten (3.3.1) und zu dem deutschen Gebäudebestand (3.3.2). Des Weiteren werden auch die Komponenten der Gebäudehülle (3.3.3), der technischen Gebäudeausstattung (3.3.4, 3.3.5) und des Gebäudebetriebs (3.3.6) beschrieben. Kap. 3.3.6 gibt einen zusammenfassenden Überblick der gewählten Parameter. Die verschiedenen Kombinationen aus Sanierungsstrategien, Regelungsstrategien und Baualtersklasse (bzw. repräsentativ Baujahr) werden als Szenarien in (3.5) dargestellt. Zuletzt wird in (3.6) die computergestützte numerische Optimierung erläutert.

3.1 Zielsetzung und Herausforderungen

Ziel ist es, eine Methode zu entwickeln, welche den Einfluss von energetischen Sanierungsmaßnahmen auf ein Energy Management System (EMS), bzw. auf dessen Wirkweise, aufzeigt. Dafür ist ein nachvollziehbares und reproduzierbares Verfahren angestrebt, welches verschiedene Sanierungsszenarien mit einem EMS anhand sozialer, ökologischer und ökonomischer Kriterien bewertet. Dafür müssen allgemeingültige anerkannte Kriterien bestimmt werden. Zudem ist ein EMS sehr sensitiv, da es zeitpunktoptimiert regelt: Je genauer die Zeitauflösung ist, desto wirksamer und realistischer lässt sich ein EMS abbilden und daraus dessen Einfluss ablesen. Daraus folgt, dass die Datenbasis (Nutz- und Lastprofile sowie Klima) ebenfalls passend detailliert sein muss.

Aus den vielen verschiedenen Sanierungsmöglichkeiten und ihren Dimensionierungs-Spannweiten ergeben sich eine Vielzahl an Maßnahmen, die sich nicht in einem gerechtfertigten Zeitraum kombinieren, berechnen und vergleichen lassen. Dies bedeutet zunächst eine Vorauswahl der Sanierungskategorien und anschließend ein Verfahren zu entwickeln, welches eine sinnvolle Dimensionierung automatisiert. Neben der Auswahl ist vor allem auch die Simulation des Gebäudebetriebs und damit die Berechnung der gewählten Kriterien notwendig. Dafür müssen die einzelnen Gebäudekomponenten numerisch modelliert sein und berechnet werden.

Zuletzt braucht es eine geeignete Darstellung der Zusammenhänge. Dafür müssen die Eingangs- und Ausgangsparameter sinnvoll gegenübergestellt und Bezüge zu Alternativen hergestellt werden, um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen.

Abbildung 18 stellt das beschriebene Vorgehen schematisch dar:

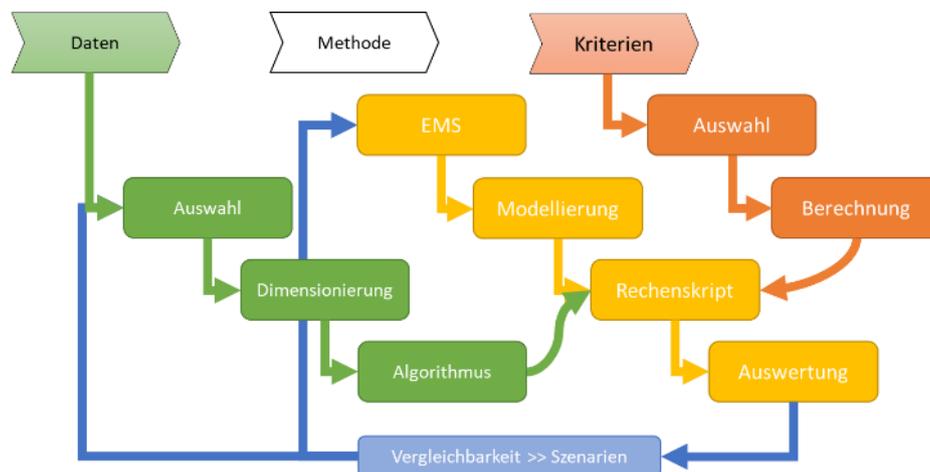


Abbildung 18 Schema des Vorgehens, eigene Darstellung

3.2 Ausgewählte Kriterien der Nachhaltigkeit als Key Performance Indikatoren

3.2.1 Ökologisch: CO₂-Emissionen (GWP)

Aufgrund der Schwierigkeit und des Umfangs alle Schadpotentiale und Ressourceninanspruchnahmen gängiger Baustoffe und Gebäudetechnik zu ermitteln, wird das Global Warming Potential (GWP) als zu reduzierendes Kriterium festgelegt. Daneben wird noch der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf (PENRT) bestimmt.

Mit energieträger-spezifischen Faktoren (f_{PE} , f_{CO_2}) wird der Endenergiebedarf in Primärenergie bzw. in CO₂-Emissionen umgerechnet. Die Baustoffe der Gebäudehülle werden ebenfalls mit einem CO₂-Faktor versehen.

3.2.2 Ökonomisch: Kapitalwert (NPV)

„Kosten“ lassen sich sehr unterschiedlich bewerten. Will man nur die jährlichen Ausgaben beziffern, ist die Summierung der Betriebskosten ausreichend. Will man jedoch auch die Rentabilität von Investitionen (und ggf. Kredite zu deren Finanzierung) überprüfen, sollten über einen definierten Zeitraum alle Ausgaben und Einnahmen unter der Berücksichtigung aller Faktoren (Zeit, Preissteigerung, Zinsen) betrachtet werden.

Wie bereits in (2.5.2 Ökonomisch) dargestellt, enthält die Kapitalwertmethode die Berechnung der Investitions- und Betriebskosten über einen definierten Zeitraum. In dem Rahmen werden auch die jährlichen Ausgaben (cash flow) bestimmt.

Die einzelnen Komponenten werden mit Investitions- und Instandhaltungskosten berücksichtigt - die Energieträger mit Bezugskosten und Vergütung.

Um in der Auswahl der Dimensionen flexibel zu bleiben (siehe 3.6.4), werden die Investitionskosten mithilfe von Kostenfunktionen bestimmt.

Während CO₂ bzw. GWP zinslos schädlich bleibt, fließt in den NPV zusätzlich komponenten- und energieträgerspezifisch Inflation und Preissteigerung mit ein.

3.2.3 Sozial: Übertemperaturgradstunden

Mit dem verwendeten Gebäudemodell ist es kaum möglich, Behaglichkeitskriterien zu berechnen. Für die Bilanzierung ist der Luftwechsel in Anlehnung an eine Fensterlüftung vorbestimmt und es werden keine Lüftungs- und Klimaanlage sowie Sommerlicher Wärmeschutz betrachtet. Dies kann bei hoher solarer Einstrahlung und hohem Dämmwert zu einer Überhitzung des Gebäudeinneren führen.

Zusätzlich ist es über das Energy Management System theoretisch möglich, dass das Gebäude zusätzlich aufgeheizt wird. Dies ist aber nur sinnvoll, solange es für die Bewohnenden im behaglichen Bereich bleibt.

Hierfür ist das Kriterium der Übertemperaturgradstunden geeignet, vgl. Kapitel (2.5.3 Sozial) Die Grenzwerte sind in (3.4.3 Regelung der Innenraumtemperatur – Komponenten der Gebäudeautomation) beschrieben. Aufgrund der fehlenden Komponenten wie Kühlung oder Sonnenschutz kann demzufolge nur eine vergleichende Aussage über die Auswirkungen der verschiedenen Sanierungsmaßnahmen getroffen werden.

3.3 Datenbasis / Input

Die Bilanzierung eines thermischen Gebäudemodells mit einer Vielzahl an numerischen Modellen erfordert eine solide Datenbasis. Im Folgenden werden die Eingabeparameter für den untersuchten Haushalt, die Gebäudedatenbank und die Klimadaten beschrieben sowie die einzelnen Komponenten der Gebäudehülle und -technik.

3.3.1 Zeitbasierte Daten, Nutz- und Last-Profile, Haushalt

Um die gesuchte Detailschärfe zu erhalten, wurde sich für eine einstündige Auflösung entschieden. Dies entspricht dem kleinsten gemeinsamen Zeitschritt der verfügbaren Daten.

3.3.1.1 Haushalt – Lastprofile

Schwierig ist die Berücksichtigung individueller Lebensumstände, da diese sehr divers sind: Stadt – Land (urbane – rurale Infrastruktur), kinderreich – kinderfrei, jung – alt sind nur einige Dualismen, welche zu sehr unterschiedlichen Haushaltsprofilen führen.

Aufgrund der Angabe der durchschnittlichen Nutzfläche von Einfamilienhäusern über 100 m² in (TABULA WebTool 2017) wird von einer Belegung mit vier Personen ausgegangen.

In einem ersten Testlauf wurden Nutzungsprofile aus einem Wochen- und Urlaubsplan erstellt. Dabei wurde ersichtlich, dass die Simulation eines Energy Management Systems darauf basieren kann, aber die Auflösung noch zu grob ist. Stattdessen werden Last- und Anwesenheitsprofile mit dem „Load Profile Generator“ erstellt (Pflugradt 2016). Dabei handelt es sich um ein Tool, welches aus sehr detaillierten Angaben über das Verhalten der Haushaltsmitglieder (agentenbasiert) die Bedarfe eines Haushaltes minutengenau generiert (synthetische Lastprofile) und gibt viele Standardeinstellungen für Verhaltensmuster vor (Abbildung 19). Die Standardeinstellungen beruhen auf geschlechtsspezifischen Stereotypen (ebd.). Um diese nicht zu reproduzieren, wird angenommen, dass die generierten Profile sich im Mittelfeld zwischen weniger und mehr verbrauchendem Verhalten befinden. Je nach Lebensrealität können diese jedoch stark variieren, weshalb Profile mit mittlerem Verbrauch als exemplarisches Beispiel gewählt wurden.

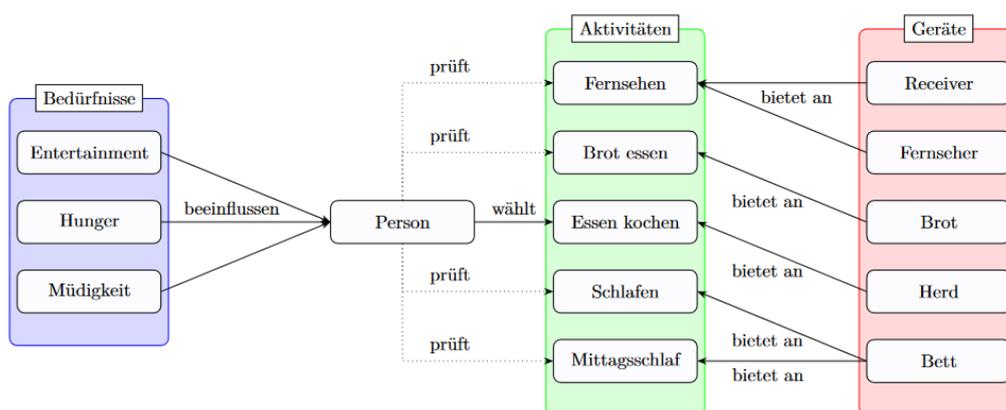


Abbildung 19 Schema der Agenten-Modellierung im Load-Profile-Generator (Pflugradt, 2016)

Mit einem eigenen Python-Skript werden diese Profile auf eine stundengenaue Auflösung gemittelt und an die Voraussetzungen von MTRESS angepasst. Daraus ergeben sich folgende Profile für jede Stunde über ein Jahr:

- BodyActivityLow -> Anzahl der schlafenden Personen
- OutsideActivity -> Anzahl der abwesenden Personen
- ElectricityNeed -> Strombedarf des Haushalts
- DHW -> Trinkwarmwasser-Bedarf des Haushalts

Während Strom- und Trinkwarmwasser-Bedarf in allen Untersuchungen Eingang finden, werden die personenbezogenen Aktivitätsprofile nur bei der Verwendung eines Energy Management Systems berücksichtigt (siehe Kap. 3.4.3 Regelung der Innenraumtemperatur – Komponenten der Gebäudeautomation).

3.3.1.2 *Klima und Standort*

Neben den internen Einflüssen der Bewohnenden müssen vor allem valide Daten für die Ermittlung des Heizwärmebedarfs für jeden Zeitschritt verfügbar sein.

Die äußeren klimatischen Einflüsse werden über Testreferenzjahre (TRJ engl. TRY) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) berücksichtigt (BBSR DWD 2017). Sie beinhalten in stundengenauer Schärfe die Außenlufttemperatur sowie die solare Einstrahlung. Die Außenlufttemperatur bestimmt die Transmissions- und Lüftungswärmeverluste für den Heizwärmebedarf, die solare Einstrahlung bestimmt die solaren Wärmegewinne im Gebäudeinneren und den Stromertrag durch eine PV-Anlage. Idealerweise sind im 5RC Thermal Building Model Package bereits einige Wetterdaten als Testreferenzjahre für verschiedene Standorte hinterlegt.

Aufgrund der gesetzlichen Vorgabe (EnEV 2008, GEG 2024) für den Klimareferenzstandort von Energieausweisen wird der Standort Potsdam gewählt. Somit ist theoretisch auch eine Vergleichbarkeit der in dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse mit den Kennwerten der Energieausweise realer Gebäude möglich.

Allerdings verwendet das Photovoltaik-Modell in MTRESS eine andere Zeitreihe für solare Einstrahlung, welche aber im MTRESS Package hinterlegt ist (Schönfeldt et al., 2024). Durch ein internes Skript lassen sich die Daten jedoch an gewählte Geo-Koordinaten anpassen. Diese wurden ebenfalls für den Standort Potsdam eingestellt.

3.3.2 Gebäudebestand - Europäische Gebäudedatenbank TABULA

Projektbeteiligte aus verschiedenen europäischen Ländern haben im Rahmen der Forschungsprojekte TABULA und EPISCOPE eine sehr detaillierte Datenbank für den europäischen Gebäudebestand angelegt (Loga 2015a). Die Datenbank TABULA steht auch als Online-Anwendung zur Verfügung (TABULA WebTool 2017).

Die wesentlichen Merkmale sind die Region, die Baualtersklasse und der Gebäudetyp. Die Baualtersklasse beschreibt den Zeitraum, in dem die Baujahre der enthaltenen Gebäudedaten liegen. Für die Region Deutschland gibt es ein Dutzend Baualtersklassen. Die Gebäudetypen werden u.a. in Einfamilien- (EFH bzw. SFH), Mehrfamilienhäuser (MFH) sowie Reihenhäuser unterschieden.

Zusätzlich sind diese jeweils in drei verschiedene Modernisierungszustände (no, usual, advanced) dargestellt. Dazu gehört vor allem eine Aufschlüsselung der Gebäudehüllflächen – also Materialschichten und deren physikalischen Eigenschaften. Daneben sind auch für die jeweiligen Baualtersklassen typischen Gebäudetechnik-Konfigurationen hinterlegt, mit denen sich der durchschnittliche Verbrauch im Online-Tool (TABULA WebTool 2017) berechnen lässt. Somit gibt es auch eine Vergleichsgröße für die Ergebnisse des eigenen Modells.

Da das verwendete numerische 5RC-Gebäudemodell auf dieser Datenbank aufbaut, liegt es nahe, diese ebenfalls zu verwenden (Hillen et al. 2024).

3.3.3 Komponenten der Gebäudehülle

Die Gebäudehülle besteht in der Datenbank (*TABULA WebTool*, 2017) aus Außenwand, Bodenplatte und Dach sowie Fenster und Türen. Für alle Hüllkomponenten sind die Flächenmaße und deren Wärmedurchgang (U-Wert) hinterlegt. Die transparenten Flächen sind zudem nach ihrer Ausrichtung unterteilt und mit einem Wärmedurchlassgrad (g-Wert) definiert.

Da es um Sanierungsmaßnahmen geht, wurden für jede Hüllflächenart ökologische und ökonomische Parameter ermittelt sowie die Dimensionierung durch bautechnische Bedingungen begrenzt.

Die energetische Modernisierung der opaken Flächen wird in Form einer zusätzlichen Dämmung betrachtet. Ihre Qualität variiert anhand der Bezugsgröße Schichtdicke in cm. Daraus resultieren für jedes Hüllflächenelement ein neuer *U-Wert* und insgesamt ein neuer Transmissionswärmeverlust (siehe 2.1.1 Komponenten der Gebäudehülle).

Anders verhält es sich bei den transparenten Bauelementen (Fenstern), da hier keine Bezugsgröße, wie je cm Dämmstärke, vorliegt. Stattdessen gibt es stufenweise Verbesserungen der Bauteileigenschaften, also der *U- und g-Werte (SHGC)*. Deshalb werden die Fenster in unsaniert, GEG-Standard, 2fach WSV, 3fach WSV (entspricht ungefähr dem Passivhaus – Standard) unterteilt.

3.3.3.1 Ökologische Parameter

Die Emissionswerte der Komponenten basieren auf Angaben in der ÖKOBAUDAT (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen 2023), einer Datenbank zur Erfassung der ökologischen Lebenszykluskosten nach (DIN EN ISO 14044:2021-02). Dabei wird davon ausgegangen, dass:

1. Emissionen je Bezugsgröße unwesentlich durch eine größere Dimensionierung der Bezugsgröße beeinflusst werden
2. Die verfügbaren Daten sich nur auf konkrete Produkte beziehen und nur als Orientierung dienen
3. Es keine Veränderung der Lebenszyklusprozesse gibt, welche Auswirkungen auf die Emissionen haben
4. Nicht vorhergesagt werden kann, was am Lebensende mit einem Produkt passiert und deshalb Kategorie D nicht in die Bilanzierung der Emissionen mit eingeht

In der ÖKOBAUDAT sind wohl Datenblätter für Dämmstoffe als auch für Fenster bzw. Türen hinterlegt. Es wurden verschiedene Dämmstoff-Werkstoffe wie XPS, Mineralwolle und Holzbasiert betrachtet. Dabei sind die Werte sehr schwankend und ggf. Kleber sowie Putz nicht berücksichtigt (Deutsche Rockwool Mineralwoll GmbH & Co. OHG, 2024; FMI Fachverband Mineralwolleindustrie e.V., 2023; GUTEX Holzfaserplattenwerk H. Henselmann GmbH + Co KG, 2020; Industrieverband Hartschaum e.V., 2022; thinkstep, 2019). Deshalb wird für die Dämmstoffe allgemein ein Emissionswert von 200 g/m³ angesetzt.

Für die in der IWU-Studie benannten Kategorien der Fenster (Hinz, 2015; Koch, 2021) wurde sich an analoge Konfigurationen in der ÖKOBAUDAT orientiert. Doch auch hier sind die Angaben und die Berücksichtigungen der einzelnen Phasen des Lebenszyklus (ohne Rezyklieren D) sehr unterschiedlich und liegen zwischen 100 und 200 g/m² (Hörmann KG Brockhagen, 2020; QKE - Qualitätsverband Kunststoffherzeugnisse e.V., 2022; Rubner Türen GmbH, 2022; TMP Fenster + Türen, 2022). Da auch hier der Einbau, welcher u.a. mit Bauschaum erfolgt, nicht berücksichtigt ist, wird der höhere Wert von 200 g/m² angenommen.

3.3.3.2 Ökonomische Parameter

In der Studie (Hinz, 2015) wurden verschiedene Sanierungsmaßnahmen katalogisiert und mit Kostenfunktionen versehen. Im anschließenden Werkstattbericht (Koch, 2021) wurde eine Methode präsentiert, wie diese Kostenfunktionen auf das Preisniveau für das Jahr 2020 adaptiert wurden:

Zum einen wurden für die einzelnen Sanierungsmaßnahmen die beteiligten Gewerke und ihr Anteil an der Sanierungsmaßnahme (bezogen auf 100%) bestimmt. Dann wurde für die jeweiligen Gewerke der Preissteigerungsfaktor BPI_{Gewerk} ermittelt. Aus der Summe der Produkte von Gewerk-Anteil und Preissteigerung ergibt sich dann der gewichtete Faktor $BPI_{Komp.}$, um den die Kostenfunktion erhöht wird.

$$BPI_{Komp.}[-] = \sum_{\text{Gewerk}} \text{Anteil}_{\text{Gewerk,Komp.}}[\%] * BPI_{\text{Gewerk}}[-] \quad (24)$$

Es wird davon ausgegangen, dass die Degression mit zunehmender Größe über den Zeitraum bis zum Jahr 2024 unverändert bleibt. Entsprechend wurde sich an der beschriebenen Methode orientiert und Kostenfunktionen für die einzelnen Sanierungsmaßnahmen für das Jahr 2024 ermittelt.

Allerdings basieren die Funktionen auf katalogisierten Maßnahmen aus der Praxis, welche teilweise konkreter beschrieben sind, als es die Gebäudehüllelemente in TABULA zulassen (Hinz, 2015; Loga, 2015a). Hier wurden Annahmen für vorwiegende Elemente bzw. Maßnahmen getroffen oder Mittelwerte gebildet (siehe Anhang).

3.3.3.3 Freiheitsgrade und Temperatur-Parameter

Die Dämmstärken der Gebäudehülle werden linear dimensioniert und durch einen Minimal- sowie Maximalwert beschränkt. Die Qualität der Fenster wird in Sanierungsstufen betrachtet. Auf dieser Spannweite bewegt sich die Variation des genetischen Algorithmus.

Alle Hüllflächen können auch ohne Sanierungsmaßnahme betrachtet werden. Dementsprechend beginnt der Datensatz für die numerische Verarbeitung bei einem unteren Grenzwert von „null“. Der obere Grenzwert wird je nach Lage der Hüllflächenelemente festgelegt. Während große Dämmstärken auf dem Dach(-boden) und an der Außenwand möglich sind, ist der Fußbodenaufbau meist limitierter. Da aus der TABULA Datenbank nicht ersichtlich ist, ob und wieviel unterkellert ist, wird nur der zusätzliche Fußbodenaufbau (Zwischenraum) betrachtet und eine maximale Dämmstärke von 10 cm festgelegt. Die maximale zusätzliche Dämmstärke für die Außenwand beträgt 30 cm und für das Dach / die oberste Geschossdecke 20 cm (siehe Tabelle 3 Übersicht der festgelegten Parameter).

3.3.4 Komponenten der Gebäudetechnik

3.3.4.1 Ökologische Parameter

Die Ökobaudat stellt viele Daten für ökologische Kosten von Werkstoffen und Baumaterialien zur Verfügung. Für komplexere Konstruktionen, wie technische Gebäudeausrüstung, fehlen jedoch meist verwendbare Angaben oder sind sehr produktspezifisch hinterlegt, sodass Rückschlüsse auf andere Produkte / Kategorien nicht verifizierbar sind (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023).

Unter den zusätzlichen Annahmen, dass:

1. eine Investition in eine neue Heizanlage erforderlich ist, um das Gebäude bewohnbar zu erhalten,
2. der GWP-Aufwand für den Herstellungsprozess der unterschiedlichen Wärmeerzeuger ähnlich ist,

wurde für die Gebäudetechnik kein CO₂-Wert hinterlegt.

Kritisch bleibt zu hinterfragen, wie es sich mit den für eine Heizanlage nicht notwendigen Komponenten (PV-Anlage + Akku) und dem Kältemittel der Wärmepumpe verhält. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass eine Umstellung auf natürliche Kältemittel mit wesentlich geringerem GWP stattfindet (2.3.1 Wärmebereitstellung und -speicher).

3.3.4.2 *Ökonomische Parameter*

Neben dem Mindestwert, ab dem eine Technologie überhaupt marktüblich ist, ist auch die Dimensionierung an sich ausschlaggebend für die resultierenden Kosten. Meist nehmen die Kosten je betrachteter Einheit mit größerer Dimensionierung ab (Skaleneffekt). Um diesem gerecht zu werden, werden ebenfalls Kostenfunktionen erstellt, die den Zusammenhang zwischen Investitionskosten und Dimensionierung abbilden.

Das BKI (Verlagsgesellschaft Rudolf Müller & Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern, 2023) liefert Angaben zu Kosten verschiedener Wärmeerzeuger, PV-Anlagen und Speicher. In (Schulz & Westkämper, 2023) werden Anlagenkonfigurationen vor allem mit (Luft-)Wärmepumpen, ebenfalls basierend auf Kostenfunktionen, mit Kosten vorgestellt.

3.3.4.3 *Freiheitsgrade und Temperatur-Parameter*

Die Leistung bzw. Kapazität der technischen Gebäudeausstattung (TGA) wird ebenfalls linear dimensioniert und durch einen Minimal- sowie Maximalwert beschränkt. Auch auf dieser Spannweite bewegt sich die Variation des genetischen Algorithmus.

Bei der Gebäudetechnik wird die Leistung (zum Bsp. die der Wärmeerzeuger in Watt) bzw. die Kapazität (Wärmespeicher in Liter, PV-Batterie in Wattstunden) variiert.

Im Gegensatz zu den Dämmstoffen wird bei der TGA technologiespezifisch ein Mindestwert angesetzt, die der vom genetischen Algorithmus gewählte Parameterwert übertreffen muss. Für jede Konfiguration, in der dies nicht der Fall ist, wird die jeweilige Anlagenkomponente nicht im numerischen Modell (MTRESS) abgebildet und damit auch nicht in der späteren Betriebs-Optimierung berücksichtigt.

Zum Beispiel wäre ein Gas-Brennwertkessel mit nur 1 kW Leistung sehr unrealistisch. Deshalb wird bei dem Erstellen des energietechnischen Modells in MTRESS der Kessel erst hinzugefügt, wenn der genetische Algorithmus eine Dimensionierung der Leistung von ≥ 5 kW wählt.

3.3.4.4 *Wärmebereitstellung*

3.3.4.4.1 Allgemein

Die untersuchten Wärmeerzeuger Gas-Kessel, Gas-Brennwertkessel und Wärmepumpe erfüllen alle Temperaturniveaus. Sie können Trinkwasser von 10°C auf 60°C erwärmen sowie auch Vorlauftemperaturen von 35°C bis zu 70°C bereitstellen.

3.3.4.4.2 Wärmepumpe

Als Besonderheit der Luft-Wärmepumpe ist hervorzuheben, dass sie als Wärmequelle die Umgebungsluft verwendet und damit ihre Effizienz (COP) mit dem Verhältnis der Außentemperatur zur Zieltemperatur variiert. Um die Wärmepumpe möglichst detailliert abzubilden, wird der theoretische COP für jede Stunde des Jahres im Voraus (vor der Betriebsoptimierung) berechnet.

Zusätzlich wird die bivalente monoenergetische Wärmepumpe durch einen elektrischen Heizstab ergänzt. Dessen Heizleistung ergibt sich aus der Differenz der nominalen Heizlast und der Heizleistung der Wärmepumpe bei nominaler Außentemperatur (vergl. Abbildung 6 in 2.3.1 Wärmebereitstellung und -speicher). Der gewählte Bivalenzpunkt liegt bei einer Außentemperatur von -7°C . Da die Kostenfunktion für LWP-5/35 vorliegt, werden die Kosten leistungsgerecht mit einem Temperatur-Verhältnis-Faktor aufgerechnet (Schulz & Westkämper, 2023).

3.3.4.5 Wärmespeicher

In MTRESS ist als Modell ein sogenannter Schichtspeicher verfügbar. Dieser speichert Wärme bei Temperaturen von 15 bis 70°C . In der folgenden Implementierung findet eine Speicherung nur auf den Temperaturniveaus des Trinkwarmwassers und des Heizkreis-Vorlaufs statt. Auch hier wäre eine detailliertere Betrachtung möglich. Sehr detailliert wäre eine skalierte Auftrennung des Speichers in 5 Kelvin Schritten. Oder eine Speicherung bei 40°C , um der Wärmepumpe einen niedrigeren Temperaturhub zu ermöglichen. Allerdings scheidet diese Option aus, da dies eine erhöhte Anzahl der Knoten voraussetzt und die Rechenzeit wesentlich erhöht.

Das Speichervolumen wird in Deziliter angegeben, jedoch in 10-Liter Schritten variiert. Als Mindestvolumen sind 20 Liter und als Maximalvolumen 500 Liter festgelegt. Auch die Option ohne Speicher wird betrachtet.

3.3.4.6 Photovoltaik

Die Leistung der Photovoltaikanlage wird nicht anhand der verfügbaren Dachfläche berechnet, sondern davon unabhängig. Zum einen ist eine Auslesung der Ausrichtungen der Dachflächen noch nicht im Gebäudemodell integriert. Zum anderen handelt es sich um generische Gebäudedaten, also Durchschnittswerte des erfassten Gebäudebestands.

Da die Einfamilienhäuser aller Gebäudealtersklassen im Durchschnitt eine Dachfläche von über 100 m^2 haben (Ballarini et al., 2014), wird die PV-Anlage zwischen 500 bis 10.000 Watt peak variiert. Auch keine PV-Anlage ist möglich. Bei einer durchschnittlichen Modulgröße von $1,5\text{ m}^2$ mit einer Leistung von 300 Wp sind dies 200 Wp/m^2 . Somit wären bei dem Maximalwert von 10 kWp maximal 50 m^2 der Dachfläche belegt.

3.3.4.7 Elektrischer Speicher

Unterschiedliche Quellen (BKI) (Schulz & Westkämper, 2023) geben für elektrische Speichersysteme durchschnittlich Kosten von 1050 Eur/kWh an. Die Speicherkapazität befindet sich zwischen 0 und 10 kWh und wird in $0,1\text{ kWh}$ variiert.

3.3.5 Energieträger

3.3.5.1 Ökologische Parameter

Das GWP der Energieträger wird nach aktuellen Bilanzierungsvorschriften (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen 2024b) ermittelt.

Da in Deutschland gerade viel in den Ausbau Erneuerbarer Energien investiert wird, wäre eine Reduzierung der CO₂-Faktoren über die kommenden Jahre möglich, aber ist in dieser Arbeit nicht vorgesehen.

Dennoch wird für Fernwärme der CO₂-Faktor für Erneuerbare Brennstoffe angenommen, da viele Energieversorgungsunternehmen inzwischen auf biobasierte Rohstoffe setzen und sich mit niedrigen CO₂-Zertifikaten präsentieren (Institut für Energietechnik der TU Dresden, 2023, 2024; Stadtwerke München, 2024; TÜV NORD Umweltschutz, 2022).

3.3.5.2 Ökonomische Parameter

Die Energieträger gehen mit aktuellen statistischen Preisen in die Kapitalwert-Berechnung mit ein und werden mit einem spezifischen Preissteigerungsfaktor pro Jahr versehen (BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., 2024).

Für einen Referenzzeitraum von 2014 bis 2024 ergeben sich für die Energieträger folgende Werte (ebd.):

Steigerung % p.a. seit 2014	Erdgas	Heizöl	Strom	Fernwärme
	9.4	3.8	4.3	8.1

Tabelle 2 Übersicht der Preissteigerungsfaktoren der Energieträger

Eingespeister Strom aus einer PV-Anlage wird nach dem aktuellen EEG-Fördersatz für Teileinspeisung (Überschusseinspeisung) und Anlagenleistungen unter 10 kWp mit 8 ct/kWh vergütet (Bundesnetzagentur 2023). Es wird davon ausgegangen, dass eine Teileinspeisung stattfindet, da im Verhältnis zu den Netzstrombezugskosten der Eigenverbrauch günstiger ist.

Gerade für lokale Niedertemperatur-Wärmenetze (Low-Ex) wäre eine Vergütung von Wärme interessant, wird hier aber ausgeschlossen, da das bisherige numerische Modell nur eine generische Annäherung beinhaltet.

3.3.5.3 Freiheitsgrade und Temperatur-Parameter

3.3.5.3.1 Fernwärme

Je nach Energieversorgungsunternehmen (EVU) und Leitungsbeschaffenheit unterliegt das Fernwärmenetz weiteren Restriktionen. Zum einen ist oft eine Mindesttemperaturdifferenz zwischen der primärseitigen Vor- und Rücklauftemperatur vorgegeben. Zum anderen liegen die Temperaturen der Fernwärmeleitungen zwischen 50 und 135 °C. Diese hängen wiederum auch von der Heizsaison und der Außentemperatur ab (BEW Berliner Energie und Wärme AG, 2024) In der vorliegenden Untersuchung wird das Fernwärmenetz als einfacher adiabater Wärmetauscher betrachtet. Dabei werden nur die Anschlussleistung (in Watt) und der Wärmestrom (Wh) auf der Sekundärseite betrachtet. Es wird angenommen, dass die so dimensionierten Übergabestationen die Bedingungen der EVU erfüllen.

Ein weiteres Problem bringt die Gestaltung von Fernwärmelieferverträgen für Privathaushalte mit (BEW, 2024). Diese unterteilen in Grundpreis – Kosten der Anschlussleistung (BP) in Abh. vom Leistungsbereich und Arbeitspreis – Kosten je gelieferte Wärmeeinheit (AP). Um den spezifischen Gesamtpreis (GP) zu ermitteln, würde man nun in der Realität nach Jahresabschluss den Grundpreis auf die bezogene Wärmemenge Q_{ges} verteilen und zum Arbeitspreis addieren (Gl. (27)).

$$GP \left[\frac{\text{Eur}}{\text{Wh}} \right] = AP \left[\frac{\text{Eur}}{\text{Wh}} \right] + \frac{BP(Q_{Station})}{Q_{ges}} \left[\frac{\text{Eur}}{\text{Wh}} \right] \quad (25)$$

Bei der numerischen Optimierung des Betriebs würde aber der reine Arbeitspreis der Fernwärme gegenüber einem durchschnittlichen Strompreis wesentlich günstiger sein und stets vom Solver bevorzugt werden (Abbildung 20). Deshalb wird bei einer Konfiguration mit Fernwärmeanschluss für die Berechnung des spezifischen Gesamtpreises zunächst angenommen, dass der gesamte Wärmebezug über den Fernwärmeanschluss erfolgt. Dementsprechend wird im Voraus (PreProcessing 3.6.2) der zu erwartende Gesamtwärmebedarf Q_{approx} ermittelt und unter Berücksichtigung der konfigurierten Leistung ein spezifischer Gesamtpreis berechnet (analog Gl. (27) $Q_{ges} = Q_{approx}$), welcher dem Solver für die Betriebsoptimierung übergeben wird. Anschließend werden im PostProcessing (3.6.3) die realen Kosten berechnet.

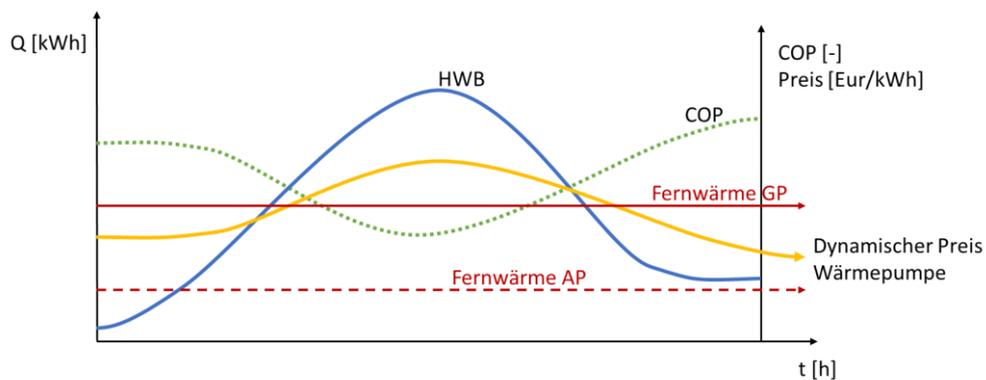


Abbildung 20 Diagramm zur Veranschaulichung der Herausforderung Energieträgerkosten (Fernwärme, Wärmepumpe) in die numerische Optimierung zu transformieren, eigene Darstellung

3.3.6 Zusammenfassung Festlegung Parameter

Ausgewählte Kostenfunktionen der Komponenten der Gebäudehülle und der Wärmebereitstellung sind als Diagramm im Anhang dargestellt. In der folgenden Tabelle 1 sind die wichtigsten Parameter für numerische Modellierung angegeben.

Ausgewählte Kriterien	Betriebs- optimierung	Auslegungs- optimierung	Auswertung			
	Betriebskosten	NPV, GWP	NPV, GWP, Übertemperaturgradstunden			
Betrachtungszeitraum	Simulation h		Kapitalwertberechnung a			
Simulation	8760		20			
Kostenrechnung	allgem. Zinssatz		Kostensteigerung			
	1.060		1.027			
Klima	Standort			Norm- Außentemp. °C		
	Potsdam	52.395833, 13.061389		-14 °C		
Komponenten der Gebäudehülle						
opake Flächen	Dämmstärke in cm		Wärmeleitfähigkeit in W/mK	spezif. GWP CO2äq/m²		
	Mindestwert	Maximalwert				
Wärmedämmverbundsystem (WDVS), Vollkosten	0	30	0.035	200		
Kellerdecke unterseitig WLG 035	0	10	0.035	200		
Dach Mittelwert gängiger Varianten	0	20	0.035	200		
Fenster Level	Level	U-Wert W/m²K	spezif. GWP CO2äq g/m²	Energiedurch- lassgrad (g)		
Bestandsfenster	0	*	-	*		
2 WSV(nur EFH) [1.3, 0.6]	1	1.30	200	0.60		
2 WSV zu 3 WSV (nur EFH) [1.0, 0.5]	2	1.00	200	0.50		
2 WSV zu PH (nur EFH) [0.75, 0.45]	3	0.75	200	0.45		
Tür Level						
Bestandstür	0	*	-			
Haustür, EFH, Vollkosten	1	1.20	100			
	* Werte dynamisch aus Gebäude-Datenbank					
Komponenten der Gebäudetechnik						
	nominale Leistung W					
	Mindestwert	Maximalwert	Energieträger	Wirkungsgrad		
Gas Kessel Alt NTEA	3000	30000	Gas	0.6		
Gas_Brennwerttherme BKI+DNH	5000	30000	Gas	1.06	Bivalenztemp.	
Luft-Wärmepumpe	5000	30000	Strom	COP(dT)	-7 °C	
Fernwärme-Übergabestation	5000	30000	Fernwärme	1		
					Neigung	Ausrichtung
Photovoltaik	500	10000	Strom	**	35°	Süd
	Kapazität (dt bzw. Wh)					
Warmwasser-Schichtspeicher	200	5000	Warmwasser			
Akku Speichersystem	1000	10000	Strom	0.98		
	** Werte aus dem MTRESS-Modul					
Energieträger						
	Arbeitspreis Eur/kWh	Vergütung	spezif. GWP CO2äq kg/kWh	Kostenstei- gerungsfaktor		
elektrischer Strom	0.4175	0.0803	0.56	0.038		
Erdgas	0.1141	0	0.24	0.062		
Fernwärme	0.1032	0	0.06	0.061		

Tabelle 3 Übersicht der festgelegten Parameter

3.4 Gebäudebetrieb

Für die dynamische Betrachtung eines Gebäudes als thermischer Speicher, gekoppelt mit Anlagentechnik und einem Haushalt, müssen vor allem Temperaturniveaus für den Gebäudebetrieb festgelegt werden. Dies ist Voraussetzung für die Berechnung der Wärmeströme (Temperaturdifferenzen) und ihre numerische Abbildung (Hillen et al., 2024).

Zudem können sich Temperaturniveaus durch eine Veränderung der Heizlast und durch eine Raumtemperaturregelung verändern. Dies lässt wiederum einen Effekt auf die Effizienz der Wärmepumpe erwarten.

3.4.1 Trinkwarmwasser

Es werden keine separaten Trinkwarmwasser-Systeme, wie elektrische Durchlauferhitzer oder Frischwasserstationen, berücksichtigt. Dadurch ist die Trinkwarmwasser – Versorgung über den Heiz-Wärmeerzeuger zu gewährleisten.

Dies begründet sich zum einen in der angestrebten Reduzierung der Variation der Komponenten, zwecks Minimierung des numerischen Rechenaufwands. Zum anderen ist diese Art der Versorgung nach (Loga, 2015b) eine der am häufigsten gewählten Bereitstellungsarten für Einfamilienhäuser in Deutschland. Dementsprechend hat aus hygienischen Gründen eine Trinkwarmwasserversorgung bei einer Temperatur von 60°C zu erfolgen. Als Kaltwasser-Temperaturniveau wird 10 °C angenommen.

3.4.2 Heizkreis, Wärmeabgabe und Wärmebedarf

Alle Wärmeerzeuger werden so modelliert, dass sie in der Lage sind, Wärme bei bis zu 70 °C bereitzustellen. Dies entspricht der gewählten nominalen Heizkreis-Vorlauftemperatur.

Im Rahmen der Betrachtung einer energetisch modernisierten Gebäudehülle reduziert sich die Heizlast. Ist die reduzierte Heizlast im modernisierten Gebäude wesentlich geringer als die vorherige Heizlast des unsanierten Gebäudes, ist auch eine Reduzierung der Vorlauftemperatur möglich, da die original installierten Heizkörper bei gleichbleibender Übertragungsfläche nun weniger Heizleistung übertragen müssen.

Nach Gl. (17) in Kap. 2.3.3 bestimmt das Verhältnis der alten und der neuen Heizlast annäherungsweise die neue Vorlauftemperatur. Dies wird in der numerischen Abbildung stufenweise berücksichtigt (Kap. 3.6.2), sodass sich das bereitzustellende Temperaturniveau für den Heizkreis senkt.

Das folgende Diagramm (Abbildung 21) zeigt den Einfluss der Vorlauftemperatur auf den Wirkungsgrad von Brennwertkesseln und auf den COP von Wärmepumpen.

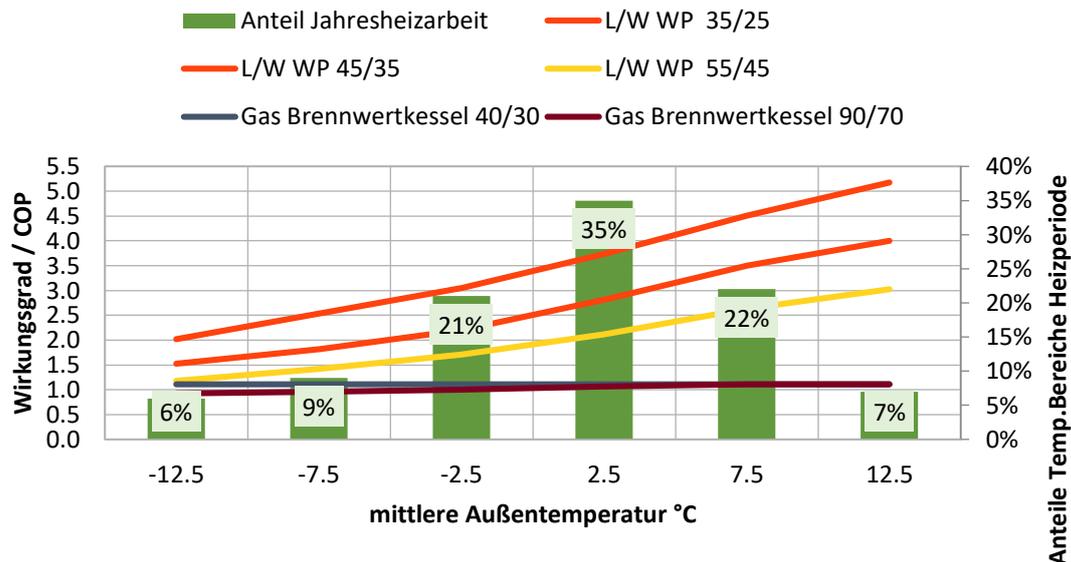


Abbildung 21 Diagramm Einfluss der Vorlauftemperatur auf den Wirkungsgrad von Brennwertkesseln und auf den COP von Wärmepumpen eigene Darstellung mit Werten aus (Schulz & Westkämper, 2023; Viessmann, 2019)

Da in modernen Anlagen die Heizkurve direkt am Wärmeerzeuger eingestellt werden kann, werden für eine Variation der Vorlauftemperatur etc. keine weiteren ökologischen oder ökonomischen Parameter angenommen.

Eine weitere Option wäre der Austausch der alten Heizkörper. Vor allem wenn dies aufgrund von Mängeln erforderlich ist. Allerdings wird dies in den folgenden Untersuchungen nicht weiter betrachtet und dementsprechend auch nicht bepreist. Dies würde sonst ein weiteres Szenario ergeben.

Zur Bestimmung des Heizwärmebedarfs wird die Außentemperatur als Zeitreihe herangezogen (Kap. 3.3.1). Aus den vorgegebenen Innenraumtemperaturen wird dann der Heizwärmebedarf für jeden Zeitschritt nach dem 5RC-Modell berechnet (siehe auch Kap. 3.6.2).

3.4.3 Regelung der Innenraumtemperatur – Komponenten der Gebäudeautomation

3.4.3.1 Ökologische Parameter

Für die Regelung der Innenraumtemperatur werden keine Emissionen angenommen. Allerdings wäre dies vor allem bei umfangreichen Smart Home Energy Management Systemen, welche mit dem „Internet of Things“ verknüpft sind, eine berechtigte Fragestellung (Höfner & Frick, 2019).

3.4.3.2 Ökonomische Parameter

Wird die Anlagentechnik um eine (smarte) Gebäudeautomation ergänzt, wird nötige Infrastruktur mit Investitionskosten und einer Lebensdauer von 20 Jahren erfasst.

Der finanzielle Aufwand für eine Nachtabenkung wird mit 2.000 Euro angenommen und für ein Energy Management System zur Regelung der Innenraumtemperatur auf Basis von Nachtabenkung und Aktivität der Nutzenden auf 3.000 Euro geschätzt (Bertko & Weber, 2017; Völkel & Lorbach, circa 2015; Wisser, 2018).

Dabei ist das Energy Management System nicht vergleichbar mit einem vollautomatisierten Smart Home System, welches sogar raumweise und abhängig von der Fensteröffnung regelt, da dessen Kosten viel höher sind (Bertko & Weber, 2017).

3.4.3.3 *Freiheitsgrade und Temperatur-Parameter*

Als nominaler Wert für die Innenraumtemperatur gilt 20 °C - durchgehend für das Basis- und das Referenzmodell.

Davon abweichend werden für zeit- und aktivitätsbasierte Regelungen eine Minimal- und eine Maximaltemperatur festgelegt.

Allerdings sind ältere Gebäude gegenüber niedrigeren Innenraumtemperaturen empfindlich, da sie an kritischen Wärmebrücken zu Tauwasser und Schimmel führen können (DIN 4108-2:2013-02). Deshalb wird die Minimaltemperatur lediglich von 20 °C auf 16 °C reduziert. Diese Temperatur muss mindestens im Gebäude erreicht werden, wenn alle Bewohnenden schlafen oder außer Haus sind.

Dabei wird für die Nachtstunden angenommen, dass die automatisierte Nachtabsenkung durch den Einfluss der Nutzenden überschrieben werden kann, jedoch nur, wenn die Wachphase länger als einen Zeitschritt von einer Stunde andauert (3.6.2 PreProcessing – Vorbereitende Routinen).

Da das Aufheizen des Gebäudes möglich ist, wird für die Innenraumtemperatur eine Maximaltemperatur von 28 °C bei Anwesenheit entsprechend dem Aktivitätsprofil festgelegt. Innenraumtemperaturen, welche sich oberhalb dieses Grenzwerts befinden fließen in die Berechnung des Kühlbedarfs bzw. der Übertemperaturgradstunden (4.1.2 Bewertung thermische Behaglichkeit).

3.5 Szenarien

Aus den vorangegangenen Parametern lassen sich Szenarien in drei Dimensionen entwickeln:

1. Gebäudeautomation – Regelung der Innenraumtemperatur
2. Gebäudealtersklasse – Baujahr
3. Betrachtete Sanierungskategorien

Davon unabhängig gelten über alle Szenarien hinweg die Grenzwerte bzw. Freiheitsgrade der Gebäudehülle und -technik.

3.5.1 Gebäudeautomation – Betriebsstrategien zur Regelung der Innenraumtemperatur

Wie am Anfang des Kapitels angedeutet, bedarf es vergleichbarer Modelle, um die Auswirkungen von Energy Management Systemen sichtbar zu machen. Im Folgenden werden vier Regelungsstrategien - BASIC, REF, NTR und EMS - der Gebäudeautomation vorgestellt

3.5.1.1 BASIC

Als Bezugsobjekte werden *je Baualtersklasse* zwei Basis-Varianten angenommen. Beide Gebäude verfügen über die gleiche konventionelle Anlagentechnik, welche aus einem Gas-Heizkessel mit Warmwasserspeicher besteht. Die erste Variante entspricht der business-as-usual-Variante (C. J. Hancock, 2022). Die zweite Variante wird zusätzlich mit Instandhaltungskosten betrachtet, welche sich aus der Differenz der Kostenfunktionen der Gesamtkosten und der energiebedingten Mehrkosten ergeben (Hinz, 2015).

Daraus ergeben sich die ersten beiden Vergleichsdatensätze und werden im folgenden Basis-Szenario oder BASIC genannt.

3.5.1.2 REF

Zumeist lohnen sich aus ökonomischer Sicht neben der reinen Instandhaltung, auch energetische Maßnahmen. So können Kosten für Baustelleneinrichtung oder Gerüst gespart werden. Zum Beispiel ist es wirtschaftlicher bei einem neuen Putz auch gleich eine zusätzliche Dämmschicht zu installieren, da dies die Gerüstkosten für beide Maßnahmen verbindet und zusätzlich Wärmeverluste reduziert.

Deshalb wird ab diesem Szenario der genetische Algorithmus angewendet, welcher je nach gewähltem Umfang der dritten Dimension (Sanierungskategorien) Freiheitsgrade variiert (im Rahmen der Sanierungskonfiguration). Es werden über tausend Varianten berechnet und dabei wird Generation für Generation die Reduzierung der Kosten und der Emissionen angestrebt.

Der (ökonomisch) optimale Betrieb wird OHNE Energy Management System und OHNE thermisches Gebäudemodell bestimmt. Zwar wird der Heizwärmebedarf über das 5RC-Modell berechnet, aber dies geschieht im Vorhinein und wird nur als fixe Heizlast für jeden Zeitschritt dem MTRESS-Modell bzw. dem MILP-Solver übergeben.

Die Verhaltensprofile (schlafend, abwesend) der Haushaltsmitglieder werden nicht berücksichtigt und dementsprechend findet auch keine schrittweise Überprüfung der optimalen Innenraumtemperatur statt.

Der resultierende Datensatz bildet für die gewählten Zielgrößen idealerweise eine Pareto-Kurve aus. Dies ist das Referenz-Szenario (REF).

3.5.1.3 NTR

Im Laufe der Modellierung hat sich die Frage ergeben, inwieweit auch schon eine Nachtabenkung Einfluss auf den Energieverbrauch hat und ob dieses Szenario nicht ein besseres Vergleichs-Szenario darstellt, da die Absenkung der Innenraumtemperatur bei neu installierte Wärmeanlagen Stand der Technik ist.

Aus diesen Gründen wird ein zum Referenzmodell analoges Modell MIT Nachtabenkung berechnet. Jedoch findet auch hier keine Berücksichtigung des Gebäudes als thermischer Speicher statt. Der Heizwärmebedarfs wird ebenfalls im Vorhinein für jeden Zeitschritt berechnet. Lediglich die Solltemperatur wird in den Nachtstunden auf 16 °C gesenkt, sodass ein reduzierter Heizwärmebedarf vorliegt.

Analog erfolgt die zielgerichtete Auswahl mit dem genetischen Algorithmus, sodass ein weiterer Datensatz mit Pareto-Kurve berechnet wird.

3.5.1.4 EMS

Schließlich erfolgt die Betrachtung des Gebäudes als thermischer Speicher (gekoppelt mit dem EMS). Im Gegensatz zu den anderen Betriebsstrategien werden im Vorhinein lediglich die zulässigen Innenraumtemperaturen anhand der Aktivitätsprofile bestimmt. Dabei wird sowohl der Status schlafend für die Nachtabenkung als auch Abwesenheit berücksichtigt.

Mit dem SRC-Modell im MTRESS-Modell berechnet nun der Solver selbst während der Betriebsoptimierung für jeden Zeitschritt die optimale Innenraumtemperatur im Rahmen der zuvor ermittelten Grenzen. Und damit einhergehend den Heizwärmebedarf. Dieser Vorgang simuliert das Energy Management System.

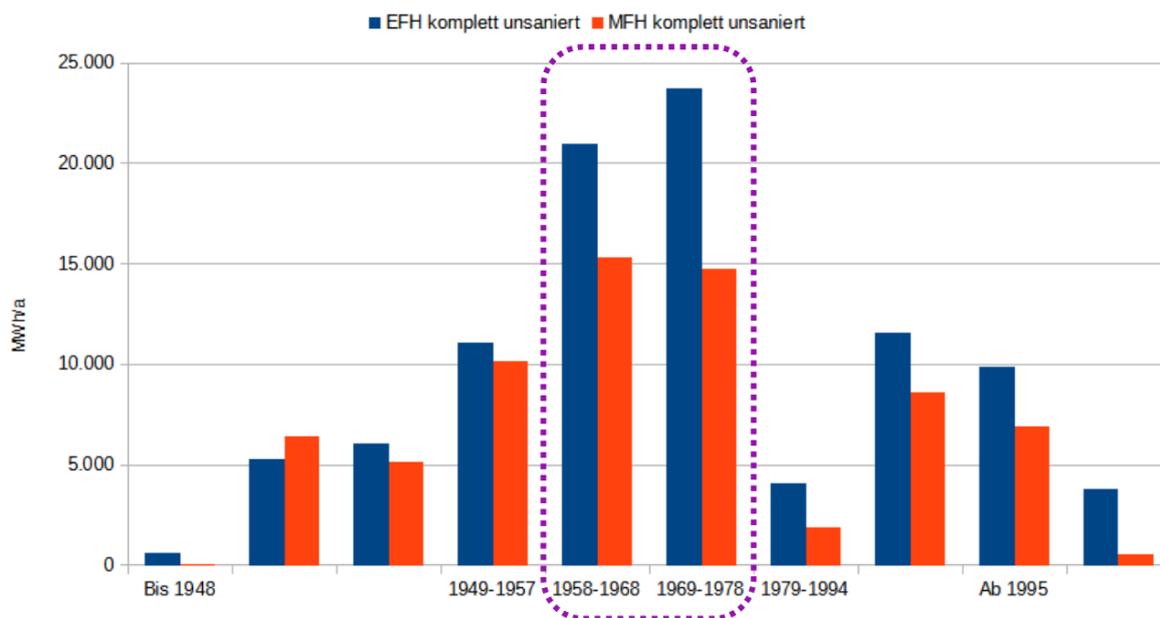
Entsprechend der Vergleichbarkeit gelten ansonsten für den genetischen Algorithmus dieselben Parameter wie bei den zuvor beschriebenen Varianten.

Das Resultat ist ein weiterer Datensatz, welchem zusätzlich noch der Kühlbedarf und die Übertemperaturstunden aus dem SRC-Modell hinzugefügt wird.

3.5.2 Baualtersklasse – Baujahr

Als erstes wurde sich für die Berechnung eines EFH in der Baualtersklasse 1958 – 1965 entschieden, da es in dieser Klasse den größten Sanierungsrückstau bzw. die größten Wärmeverluste insgesamt gibt (Loga, 2015b; *TABULA WebTool*, 2017). Vereinfacht wird diese mit dem Baujahr 1960 beschrieben.

Heizenergiebedarf nach unsaniertem Gebäudetyp und Baualtersklasse



Eigene Darstellung nach Daten aus (Loga, 2015b; TABULA WebTool, 2017)

Als weitere interessante Baualtersklasse wird 1984 – 1994 gesehen, da diese zum Zeitpunkt der Untersuchung (2024) mindestens 30 Jahre alte Gebäude beschreibt. Dies ist für viele Gebäudekomponenten die approximierte Lebensdauer, bevor sie saniert oder ersetzt werden müssen (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023). Nach § 72 GEG 2024 müssen unter bestimmten Bedingungen mit gasförmigen oder flüssigen Brennstoffen beschickte Heizkessel sogar außer Betrieb genommen werden. Die Beschreibung erfolgt mit dem Baujahr 1990.

Die Auswahl der Gebäudealtersklasse 2002 – 2009 begründet sich in der Diskussion um die optimale Dämmstärke (Jochum, 2016). Da diese Generation mindestens nach der EnEV 2002 gebaut sein muss, verfügt sie über eine wesentlich bessere Gebäudehülle. Daraus resultiert die Frage, ob diese Gebäudealtersklasse überhaupt noch eine stärkere Dämmung benötigt sowie die Frage, wieviel Potential ein zusätzliches Energy Management System in dieser Konstellation hat und welche Rolle dabei eine neue TGA einnimmt. Vereinfacht wird die Generation mit dem Baujahr 2005 beschrieben.

Die folgende Tabelle stellt die untersuchten Baualtersklassen aus TABULA dar sowie das gewählte Baujahr und die zu der Zeit geltenden Gesetze bzw. Verordnungen:

BAK TABULA	1958 – 1965	1984 - 1994	2002 - 2009
Baujahr	1960	1990	2005
Verordnungen	-	EnEG 1976 - WSchV 1977 – 1995 HeizAnIV 1978 – 1998	EnEV 2002 – 2014

Tabelle 4 Übersicht Varianten der betrachteten Baualtersklassen aus TABULA QUELLE

3.5.3 Sanierungsstrategien

Allgemein lassen sich die Sanierungsmaßnahmen in Maßnahmen an der Gebäudehülle (zur Reduktion der Transmissionswärmeverluste) und in Maßnahmen an der technischen Gebäudeausstattung (TGA) unterteilen. Die digitale Komponente der TGA, die Gebäudeautomation, wird wie zuvor beschrieben als eigene Dimension (Betriebsstrategie) berücksichtigt.

Für eine differenzierte Analyse der Einflüsse der einzelnen Komponenten sowohl in der Auswertung als auch während dem Debugging des Programm-Codes hat sich herausgestellt, dass zunächst eine separate Betrachtung der Sanierungsmaßnahmen sinnvoll ist. Da sich jedoch die Maßnahmen an der Gebäudehülle und die Maßnahmen an der Gebäudetechnik gegenseitig beeinflussen, werden diese in einem dritten Konfigurationsraum zusammen betrachtet.

1. Szenarien, in denen nur die Gebäudehülle saniert werden darf, die Gebäudetechnik entspricht der des BASIC-Szenarios
2. Szenarien in denen nur die TGA saniert werden darf, die Gebäudehülle entspricht der des BASIC-Szenarios
3. Szenarien in denen Gebäudehülle und TGA gemeinsam saniert werden dürfen

3.5.4 Zusammenfassung der Szenarien

In der folgenden Tabelle sind die drei Dimensionen in einzelne Szenarien zusammengefasst dargestellt:

REGELUNG	Betrachtete Sanierungsmaßnahmen											
	Hülle				Technik				Hülle+Technik			
1960	BASIC	REF	NTR	EMS	BASIC	REF	NTR	EMS	BASIC	REF	NTR	EMS
1990												
2005												

Tabelle 5 Übersicht der Szenarien

3.6 Computergestützte Optimierung – Auswahl, Berechnung, Feedback-Loop

Die Implementierung eines Skriptes zur computergestützten Optimierung erfolgt in der Programmiersprache Python. Dies liegt an den verfügbaren Modellen für Energiesysteme und für das thermischen Gebäudemodell (TBM), aber auch an den Qualitäten von Open-Source: Die Module lassen sich beliebig erweitern und kombinieren.

Die computergestützte Optimierung lässt sich in vier Schritte unterteilen:

1. **PreProcessing:**
Die vom genetischen Algorithmus ausgewählten Konfigurationen werden mit einem eigenen Python-Skript in ein objektorientiertes Modell (3.6.1 Modellierung des Gebäude-Energiesystems auf Basis von MTRESS) übertragen. Dabei werden weitere Randbedingungen festgelegt bzw. im Vorhinein berechnet (3.6.2 PreProcessing – Vorbereitende Routinen; vgl. 2.4 Gebäudeautomation).
2. **Optimization:**
Das so erstellte Energiesystem wird unter der Bedingung des bestmöglichen Betriebs simuliert. Bestmöglich bedeutet, dass möglichst geringe Betriebskosten über den betrachteten Zeitraum der Simulation von einem Jahr anfallen.
3. **PostProcessing:**
In einem nachgeschalteten Rechengang werden spezifische Kennwerte der betrachteten Konfiguration, wie deren Kapitalwert und deren Emissionen, ermittelt (3.6.3 PostProcessing).
4. **FeedbackLoop:**
Die Konfigurationen werden anhand ihres Rangs bewertet. Das bedeutet, sie werden nach den gewählten Kriterien (NPV, GWP) sortiert. Angestrebt ist dabei einen möglichst geringer Wert. Hierbei schließt sich der Kreis zum anfangs erwähnten Genetischen Algorithmus, denn diese Performance – Überprüfung findet innerhalb des GA statt (-> Fitness). Konfigurationen mit besonders niedrigen Werten fließen bevorzugt in die Dimensionierung der Konfigurationen folgender Generationen mit ein, was somit zu einer zielgerichteten Auswahl führt.

3.6.1 Modellierung des Gebäude-Energiesystems auf Basis von MTRESS

Im Rahmen der Arbeit wurde für die Berechnung von Gebäude-Energiesystemen DLR-intern ein Skript auf Basis von MTRESS ausführlich erarbeitet und durch relevante Module ergänzt.

Das Skript beinhaltet zum einen die Integration der Kostenfunktionen für die einzelnen Sanierungsmaßnahmen, zum anderen die Modellierung einzelner Komponenten der Gebäudetechnik.

3.6.1.1 MTRESS & SRC-Modell

3.6.1.1.1 MTRESS

Zu den verwendeten Klassen der öffentlichen MTRESS-Version gehören:

Carrier	Technologies	Demands	Grids
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ElectricityCarrier ▪ GasCarrier ▪ HeatCarrier 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ SRC ▪ GenericHeater ▪ GasHeater ▪ HeatPump ▪ Photovoltaics ▪ MultiLayeredHeatStorage ▪ Battery 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ElectricityDemand ▪ FixedHeatDemand 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ElectricityGrid ▪ GasGrid ▪ HeatGridConnection

Tabella 6 Übersicht der verwendeten MTRESS-Klassen

Netzanschlüsse (Grids), wie Gas und Strom, werden als Quellen mit einem Bezugspreis betrachtet und die synthetischen Lastprofile (Demands) des Haushalts aus dem LPG (Strom, Warmwasser) werden als Senken modelliert.

Da der Solver nur den Betrieb optimiert, werden auch nur die Kosten und die Vergütung für die Energieträger berücksichtigt. Das Ergebnis ist also der kostengünstigste Betrieb unabhängig von den Investitionskosten.

3.6.1.1.2 5RC– Thermal Building Model

Das 5RC – Thermal Building Model ist ebenfalls als MTRESS-Komponente implementiert. Durch Eingabeparameter in TABULA-Datenbank-Syntax (Ballarini et al., 2014) werden 5RC-Modelle des jeweiligen Gebäudetyps generiert. Um möglichst Fehlerquellen auszuschließen, werden die Standardwerte beibehalten (SFH, unsaniert, Standard-Nutzfläche). Nur die gewünschte Gebäudealtersklasse wird durch ein konkretes darin enthaltendes Baujahr aufgerufen (siehe 3.5.2 Baualtersklasse – Baujahr).

Wie schon in (3.4.3 Regelung der Innenraumtemperatur – Komponenten der Gebäudeautomation) beschrieben, werden dem numerischen Modell (Objekt) untere sowie obere Grenzen für die Innenraumtemperatur übergeben. Das Klima wird anhand der TRY-Daten des DWD initialisiert (3.3.1 Zeitbasierte Daten, Nutz- und Last-Profil, Haushalt). Daraus resultieren entsprechend der normierten Rechenvorschrift (DIN EN ISO 13790) für jeden Zeitschritt ein Heizwärmebedarf oder ein Kühlbedarf. Letzterer kann im Modell sogar als Abwärme für weitere Prozess behandelt werden, wird jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

3.6.1.2 Modell der Wärmepumpe

Aufgrund der Verknüpfung aller Temperaturniveaus eignete sich das bisherige Wärmepumpen-Modell in MTRESS nicht für die Modellierung in einem Gebäude-Energiesystem. Überschneidungen der einzelnen Temperaturniveaus von Wärmepumpe, Wärmetauscher und Bedarfen führten zu einem unregelmäßigen Wärme-Austausch. Außerdem ist die Berechnung des COP (und damit der Umwandlungsfaktoren) des bisherige Wärmepumpenmodell nicht stundengenau und wurde deshalb durch ein eigenes Modell ersetzt. Diese Art der Modellierung hat den Vorteil, dass keine umfangreiche Modellierung von Wärmetauscher und Anschluss der Primärseite an das Wärmenetz-Modell notwendig ist. Folgende Angaben beschreiben das numerische Modell (vergl. Abbildung 22):

1. der COP am Bivalenzpunkt wird bestimmt, denn der gewählte Bivalenzpunkt darf sich vom Standard-Bivalenzpunkt der genormten Leistungsangabe unterscheiden
 - a. daraus resultiert eine Leistung am Bivalenzpunkt
2. Ein Heizstab mit der Leistung aus der Differenz der Heizlast bei Norm-Außentemperatur und der Heizleistung der Wärmepumpe bei Norm-Außentemperatur wird eingerichtet (monoenergetischer bivalenter Betrieb)
3. Für jeden Zeitschritt, also jede Außentemperatur und für jede Zieltemperatur wird der COP berechnet sowie die maximal verfügbare Leistung
 - a. die Primärseite wird dabei als einzelner Wärme-Zustrom betrachtet, der in seiner Wärmeleistung limitiert ist
 - b. die Sekundärseite ist jedoch in Eingangsstrom (Rücklauf) und Ausgangsstrom (Vorlauf) unterteilt
 - c. das Verhältnis der Sekundärseite zur Primärseite ist über den COP bestimmt
 - d. und das Verhältnis der Ströme auf der Sekundärseite sind über ihr Temperaturniveau zueinander bestimmt

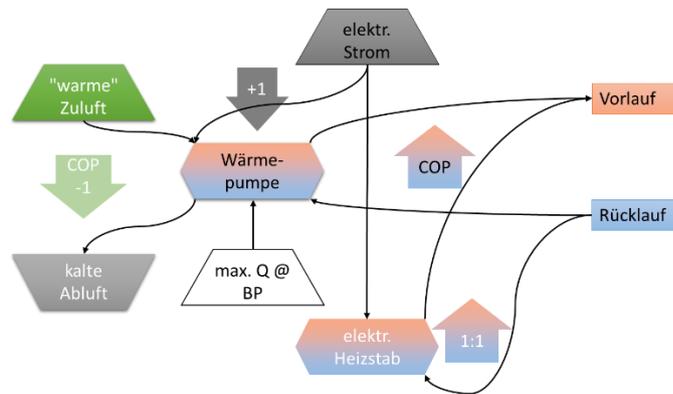


Abbildung 22 Schema des Wärmepumpenmodells für MTRESS, eigene Darstellung

3.6.2 PreProcessing – Vorbereitende Routinen

Ein eigenes Modul bzw. Klasse mit vielen Hilfsfunktionen ist dafür zuständig, die Eigenschaften der Komponenten aus XLS- und INI-Dateien auszulesen und in ein MTRESS konformes Energiesystem zu transformieren.

Neben der Verwendung der bereits beschriebenen Python-Module wurde für jede betrachtete Komponente eine Klasse für die Kostenermittlung zur Ermittlung der Performance Indikatoren (KPI) für den GA angelegt (siehe Anhang). Diese stellen auch das numerische Gerüst für die Kostenfunktionen.

3.6.2.1 Reduzierung der Vorlauftemperatur über die verringerte Heizlast

Entsprechend der Ausführungen zur Wärmeabgabe (3.4.2 Heizkreis, Wärmeabgabe) wird in der numerischen Umsetzung die Vorlauftemperatur stufenweise reduziert.

Dafür wird bei der Initialisierung des Gebäudemodells mit den Werten aus TABULA die Heizlast berechnet und hinterlegt (als Objekteigenschaft). Im Rahmen des genetischen Algorithmus werden für jede Sanierungsvariante die Bauteileigenschaften des Gebäudemodells überschrieben und eine neue Heizlast für den sanierten Fall ermittelt. Aus dem Verhältnis der neuen und der alten Heizlast wird eine arithmetische Vorlauftemperatur berechnet. Liegt diese unterhalb einer definierten Temperaturstufe (vergl. Tabelle 7), wird diese Temperaturstufe als neue Vorlauftemperatur verwendet. Die Vorlauftemperatur des unsanierten Bestandsgebäudes ist dabei auch abhängig von dem Alter des Gebäudes.

Vorlauftemperatur °C	70	60	50	40
bis Baujahr	1980	2000	2010	heute

Tabelle 7 Übersicht der Vorlauftemperaturstufen im numerischen Energiesystemmodell

3.6.2.2 Bestimmung der minimalen Innenraumtemperatur und des Heizwärmebedarfs

Die Minimaltemperaturen werden mit einer EMS-Konfiguration bestimmt (vgl. 3.4.3 Regelung der Innenraumtemperatur – Komponenten der Gebäudeautomation)

Bei dem Szenario mit Nachtabsenkung wird anhand der Minimalwerte für die Innenraumtemperatur der Heizwärmebedarf bereits vorausberechnet und als feste Zeitreihe im MTRESS-Modell initialisiert („FixedHeatDemand“).

Demgegenüber findet im Szenario mit aktivitätsgesteuerten Minimaltemperaturen eine Initialisierung des 5RC-Gebäudemodells mit variablen Innenraumtemperaturen statt, welche erst während des MILP-Lösungsprozesses betriebsoptimiert festgelegt werden.

3.6.3 PostProcessing

3.6.3.1 KPIs - Performance Indikatoren

3.6.3.1.1 Kosten

Während der MILP-Solver die Betriebs-Optimierung vornimmt, um die Betriebskosten möglichst gering zu halten, werden im Postprocessing auch die Investitionskosten der jeweiligen Sanierungsmaßnahmen ermittelt. Zusammen resultiert daraus der Kapitalwert (NPV). Weiterhin werden noch der „cash flow“ und der Kapitalwert der Investitionen berechnet.

Die Betriebskosten werden anhand der final aufsummierten Verbrauchswerte (Endenergieträger) und anhand der Wartungskosten der berücksichtigten Komponenten ermittelt.

3.6.3.1.2 GWP

Die CO₂-Emissionen setzen sich aus dem GWP der installierten Produkte, verteilt über deren Lebensdauer, und aus dem GWP der verwendeten Energieträger zusammen.

3.6.3.1.3 Übertemperaturgradstunden

Analog zu (3.2.3 Sozial: Übertemperaturgradstunden) werden die Übertemperaturgradstunden aus dem Kühlbedarf für jeden Zeitschritt aus dem Gebäudemodell berechnet.

3.6.3.2 weitere Kennwerte

Neben dem Kühlbedarf werden auch alle weiteren Energie- und Stoffströme des berechneten Gebäudeenergiemodells aufsummiert und gespeichert. Von besonderer Relevanz sind dabei die Werte, welche den Anteil der einzelnen Technologien bzw. Energieträger an der Deckung der Energiebedarfe beschreiben. Denn allein durch die Auswertung der Anlagendimensionierung lassen sich keine validen Rückschlüsse auf die Verwendung der Technologien ziehen.

Zur Überprüfung der Plausibilität der Ergebnisse werden noch weitere Kennwerte (bspw. Hüllflächenspezifischer Transmissionswärmeverlust H_T' , Auslegungsparameter der Wärmepumpe) für jede Konfiguration berechnet.

3.6.4 Genetischer Algorithmus – optimierende Auswahl durch Feedbackloop

Die verschiedenen Sanierungsmaßnahmen, ihre Kostenfunktionen und Eigenschaften sowie die möglichen Regelungsarten der Innenraumtemperatur ergeben einen sehr großen Lösungsraum. Trotz der jeweiligen festgelegten Randbedingungen verbleibt eine Vielzahl an Konfigurationen. Um zielgerichtet wirtschaftliche und emissionsarme Konfigurationen zu bestimmen, eignen sich genetische Algorithmen hervorragend.

Da sich auf zwei zu optimierende Zielgrößen festgelegt wurde (3.2 Ausgewählte Kriterien der Nachhaltigkeit als Key Performance Indikatoren), wird der Non-dominated Sorting GA (NSGA2) verwendet (Francesco Biscani et al., 2021). Seine wesentlichen Prinzipien (kritika_da, 29 Jul, 2024) sind zusammengefasst (vergl. Abbildung 22):

1. die Mehrzieloptimierung:
 - Finden einer Reihe von Lösungen, die die besten Kompromisse zwischen den Zielen darstellen
 - Jede Lösung ist nur besser in einem Ziel mit der Konsequenz sich in einem anderen Ziel zu verschlechtern -> Pareto-Front
2. die nicht-dominiert Sortierung:
 - jede Lösung wird überprüft, von wie vielen anderen Lösungen sie dominiert wird und wie viele andere Lösungen sie dominiert
 - nicht dominierte Lösungen werden in einer Gruppe (Pareto-Front) zusammengefasst und bei der Generierung der Folge-Generation verwendet
 - Lösungen, die nur einmal dominiert werden, werden in einer weiteren Gruppe zusammengefasst usw.
3. die Distanzberechnung:
 - die Distanz zwischen Lösungen einer Gruppe wird ermittelt (normalisierte Differenz der Zielwerte benachbarter Lösungen)
 - Randlösungen und Lösungen mit hoher Distanz werden bevorzugt, dies verhindert eine Anhäufung ähnlicher Lösungen und sorgt für eine breite Verteilung der Lösungen über den Zielraum

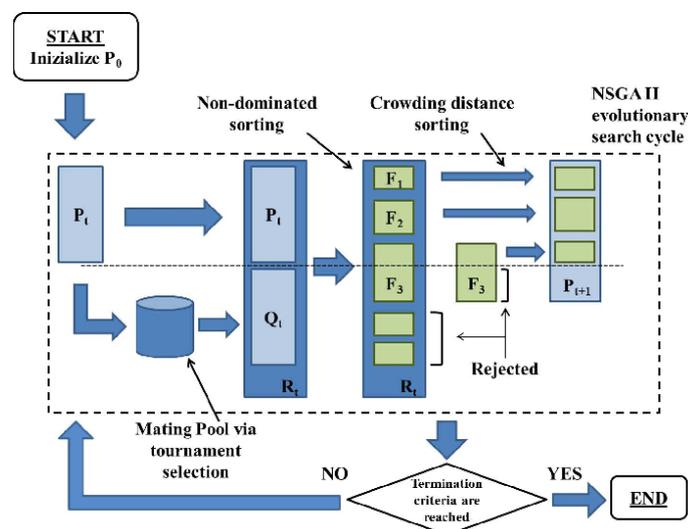


Abbildung 23 Mögliches Ablaufschema einer NSGA2 basierten Suchfunktion (Acampora et al., 2013)

Überträgt man entsprechend (2.6.1 Genetische Algorithmen) den NSGA2 auf ein Gebäudemodell, ist jedes Gebäude ein Individuum, jede zu variierende Größe ein Gen und jede Dimensionierung eine Geninformation. Die spezifischen Dimensionierungen der einzelnen Komponenten sind dann wiederum eine DNA.

Theoretisch würde für die Ausbildung einer Pareto-Front auch nur die Betrachtung der ersten Generation mit sehr vielen Individuen und einer Population ausreichen, da so bereits eine Datenpunktwolke mit Pareto-Front entsteht. Um aber schneller eine weite Streuung entlang der gesuchten Pareto-Front zu erhalten, ist die Verwendung von Archipelago-Systemen mit mehreren Generationen zeitlich effizienter (Francesco Biscani et al., 2021). Zudem wurde ein Austausch zwischen den Islands eingestellt (Migration).

3.6.4.1 *Boundaries*

Jedes Gebäudehüllelement und jede Technologie tragen mit ihrem jeweiligen Dimensionierungswert als ein Gen zur DNA des Gebäudes bei. Der NSGA2 setzt und mutiert die Eingangsparameter entsprechend den zuvor beschriebenen Freiheitsgraden. Zudem sind auch boolesche Variationen möglich (verbaut/ nicht verbaut) – wovon aber aus Debugging-Gründen wieder Abstand genommen wurde.

3.6.4.2 *Fitness*

Die Aufgabe der Fitness-Funktion ist es nun, die Performance-Indikatoren der berechneten Gebäude (optimierter Gebäudebetrieb) zu ermitteln und zu bewerten.

Aus den resultierenden Energieströmen (Energy Flows) und den gewählten Dimensionen (spezifische DNA) werden im PostProcessing u.a. die Gesamtkosten (Investition, Betrieb, Vergütung) und die Gesamtemissionen (GWP) ermittelt.

Sind alle Individuen einer Generation berechnet, werden die Gebäudekonfigurationen nach nicht-dominiert sortiert und der Abstand ihrer Konfigurationen zueinander bestimmt.

Über Zwischengenerationen erfolgt die Entwicklung der Pareto-Front. Als Abbruch-Kriterium wurde eine zu erreichende Anzahl an zu berechnenden Generationen von 24 festgelegt. Mit vier Populationen à 25 Individuen ergibt das 2400 Individuen bzw. berechnete Konfigurationen und es wird angenommen, dass diese ausreichen, um eine stabile Pareto-Kurve auszubilden.

Zwar werden für jedes Individuum noch weitere Kennwerte ermittelt, diese gehen aber in die Bewertung der Fitness (ergo Auslese der Champions) nicht mit ein.

3.6.4.3 *Penalties – Bestrafungen*

Um bestimmte Ergebnisse oder Konfigurationen zu bevorzugen bzw. auszuschließen, werden sogenannte „Penalties“ eingesetzt. Bevor der optimale Gebäudebetrieb berechnet wird, findet eine Überprüfung der Heizleistung des gesamten Energiesystems statt. Befindet sich diese unter der Hälfte der Heizlast, wird die Optimierung abgebrochen und aus der Fitness-Funktion hohe Werte für die Performance-Indikatoren / Zielgrößen zurückgegeben.

Ebenso wird mit Lösungen aus der Betriebsoptimierung verfahren, welche einen nicht gedeckten Heizwärmebedarf enthalten. So werden unrealistische Konfigurationen minimiert bzw. ausgeschlossen.

4 Ergebnisse

Als erstes wird in Kapitel 4.1 kurz auf das Vorgehen zur Visualisierung der Ergebnisse eingegangen. Da vielseitige Aspekte der Gebäudesanierung dargestellt werden, werden noch einmal die Zielgrößen aufgegriffen, der Begriff der Pareto-Kurve erläutert und wie die Optima der einzelnen Szenarien bzw. Modelle ermittelt werden. Anschließend werden die Ergebnisse der Auslegungsoptimierung verschiedener Sanierungsstrategien unter Berücksichtigung der Regelungsstrategien für ein beispielhaftes Einfamilienhaus mit dem Baujahr 1960 präsentiert (Kap. 4.2). Dabei wird auf die wechselseitigen Auswirkungen der jeweiligen Strategien eingegangen und es werden auch die Optima der Nachhaltigkeitskriterien verglichen. Eine Zusammenfassung ist in Kapitel 4.3 zu finden. In Kapitel 4.4 wurden die Sanierungsstrategien Gebäudetechnik und Gebäudehülle separat über die Baujahre 1960, 1990 und 2005 verglichen. Dabei wird auch auf den Einfluss eines Energy Management Systems eingegangen. Aufgrund der detaillierten Simulation der Wärmepumpe wird diese zudem separat betrachtet und mögliche Zusammenhänge bei der optimierenden Auswahl von Gebäudekomponenten sowie bei einer Innenraumtemperaturregelung erörtert (Kapitel 4.5). Zuletzt wird auf den Einfluss der gewählten CO₂-Faktoren für den Gas-Brennwertkessel eingegangen und beispielhaft eine Konfiguration mit Biogas den anderen Wärmesystemen gegenübergestellt (Kapitel 4.6). Zudem wird untersucht, ob und welchen Einfluss eine CO₂-Bepreisung hat. Diverse Gründe haben dazu geführt, dass einige Berechnungen nicht durchgeführt werden konnten. Die in diesem Kapitel ausgewertete Szenarien der Sanierungs- und Betriebsoptimierung sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

	Hülle			Technik			Hülle+Technik		
	REF	NTR	EMS	REF	NTR	EMS	REF	NTR	EMS
1960									
1990									
2005									

nicht berechnete Konfiguration	unzureichend berechnete Konfiguration
berechnete Konfiguration auf Basis alter MTRESS Version	berechnete Konfiguration auf Basis neuer MTRESS Version -> ./..._c

Tabelle 8 Übersicht der berechneten Szenarien der Sanierungs- und Betriebsoptimierung

4.1 Visualisierung und Vergleichbarkeit

Die Ergebnisse werden unter Berücksichtigung der folgenden Fragen verglichen:

- Welchen Lösungsraum bilden die einzelnen Sanierungsstrategien aus? Was ist die emissionsärmste bzw. die kostengünstigste Lösung? Welche Dimensionierungen dominieren an den markanten Stellen?
- Welche Pareto-Kurve entwickelt sich zwischen der emissionsärmste bzw. die kostengünstigste Lösung aus? Wie verschiebt sich die Pareto-Kurve über die Betriebsstrategien hinweg?
- Welchen Einfluss haben eine kostenoptimierte Innenraumtemperaturregelung und die jeweiligen Sanierungsmaßnahmen auf die Überhitzung des Gebäudes?
- Welchen Einfluss hat die Gebäudealtersklasse auf die vorzunehmenden Maßnahmen und die resultierenden Kosten und Emissionen?

4.1.1 Zielgrößen, Gewichtung und Visualisierung

4.1.1.1 Zielgrößen

Strebt man die Reduzierung mehrerer Zielgrößen an, stellt sich die Frage, wie man ihr Verhältnis zueinander gewichtet bzw. welcher Vektor als optimal gilt. Die Betriebsoptimierung orientiert sich nur an den Betriebskosten, doch diese sind wiederum nur ein Bestandteil der Gesamtkosten. Zur Vereinfachung wurde festgelegt, die Dimensionierung der Gebäudekomponenten nur in Richtung zweier Größen (hier Emissionen und Kosten) zu optimieren und die Dritte (Übertemperaturgradstunden) im Nachgang zu bewerten.

Allerdings variiert die Standard-Nutzfläche über die Gebäudealtersklassen in der Gebäudedatenbank (Loga, 2015b; TABULA WebTool, 2017). Um dennoch eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen, werden die Ergebnisse der Zielgrößen bei dem Vergleich über die Baujahre hinweg (Kap. 4.4) auf die Nutzfläche bezogen.

4.1.1.2 Pareto

Trägt man die Emissionen (GWP) der einzelnen Konfigurationen über den zugehörigen über die Jahre des Betrachtungszeitraum verteilten Kapitalwert (NPV p.a.) in einem x-y-Diagramm auf, ergibt sich aus der Vielzahl an Datenpunkten eine Datenpunktwolke. Diese Wolke ist sowohl durch einen Mindestaufwand an Kosten, also einem Maximalwert auf der x-Achse, als auch durch einen Mindestaufwand an Emissionen, also einem Minimalwert auf der y-Achse begrenzt.

Zwischen den beiden Punkten mit den jeweiligen Minimalwerten liegen am Rand der Wolke weitere Punkte (Pareto-Bereich), welche idealerweise einen klaren Rand (Pareto-Kurve engl. „Pareto-Front“) zu den beiden Achsen und deren Schnittpunkt bilden. Verbindet man die dazwischen liegenden Datenpunkte zu einer Linie, ergibt sich daraus eine sogenannte Pareto-Kurve.

Punkte auf dieser Pareto-Kurve (vergl. schwarze Linie in Abbildung 22) stellen optimale Konfigurationen dar, wobei sich die Wichtung von einem Kriterium auf das andere verschiebt (v.l.n.r. Kosten -> Emissionen). Das bedeutet, dass kein Punkt in einem Wert besser sein kann als der vorherige Punkt, ohne nicht in einem anderen Wert schlechter als der vorherige Punkt zu sein.

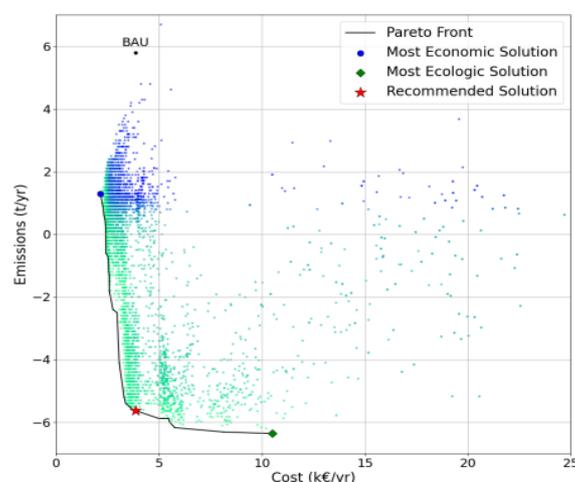


Abbildung 24 Beispiel einer Pareto- Kurve (Hancock et al. 2023)

4.1.1.3 Gewichtung Optimum

(Hancock et al. 2023) definiert das Optimum an dem Punkt, wo die Kosten des business-as-usual-Modells (BAU in Abbildung 22) den Kosten des Punktes auf der Pareto-Kurve entsprechen (roter Stern Abbildung 22). Die möglichen Einsparungen an CO₂-Emissionen entsprechen der Differenz der CO₂-Emissionen des BAU-Modells und der Pareto-Front-Konfiguration.

Der in dieser Arbeit gewählte Ansatz resultiert aus der Definition der euklidischen Distanz. Im zweidimensionalen Raum entspricht das der Bestimmung der Hypotenuse über den Satz des Pythagoras, aber bleibt in der numerischen Umsetzung für mehr Bewertungskriterien offen. Der Referenzpunkt setzt sich aus den jeweiligen Minimalwerten (GWP_{min} in [kg/a]; NPV_{min} in [Eur/a]) zusammen und es wird der Datensatz n mit der geringsten Distanz d_n als Optimum gewertet (Gl. (26)).

$$d_n = \sqrt{(GWP_n - GWP_{min})^2 + (NPV_n - NPV_{min})^2} \quad (26)$$

Side-Fact: Ähnlich wählt auch der genetische Algorithmus seine Champions aus (3.6.4.2 Fitness).

Der zuerst vorgestellte Ansatz von (C. Hancock et al., 2023) setzt voraus, dass Hausbesitzende bereit sind, ihre Immobilie so zu sanieren, dass sich nur ihre CO₂-Emissionen reduzieren, während ihre jährlichen Kosten unverändert bleiben.

Der zweite Ansatz ist rein mathematisch gewählt und kann sowohl höhere als auch geringere Kosten bedeuten. Da sich jedoch die Zahlenwerte der Emissionen und der Kosten nicht gleichsetzen lassen und auch in unterschiedlichen Zahlenräumen bewegen, kann es zu Verzerrungen zu Gunsten von Kategorien mit größeren Zahlenräumen kommen. Deshalb wird zusätzlich die euklidische Distanz normalisiert:

$$d_n = \sqrt{\left(\frac{GWP_n - GWP_{min}}{GWP_{max} - GWP_{min}}\right)^2 + \left(\frac{NPV_n - NPV_{min}}{NPV_{max} - NPV_{min}}\right)^2} \quad (27)$$

4.1.1.4 Gegenüberstellung Minima und Optima

Um die Bandbreite des Lösungsraums darzustellen, wird für jedes Szenario die kostengünstigste und die emissionsärmste Konfiguration dem „euklidischen Optimum“ gegenübergestellt. Die Anteile im Kreisdiagramm zeigen den Anteil der jeweiligen Komponente, während der Durchmesser des Kreises den relativen Kapitalwert zu den anderen Datenpunkten darstellt. Zusätzlich wird der Kreis mit einem weiteren Kreis hinterlegt, dessen Durchmesser für das GWP und dessen Einfärbung für die Übertemperaturgradstunden steht (vergl. Abbildung 31 und Abbildung 42). In den x-y-Diagrammen zur Visualisierung der Pareto-Kurven wird zudem auf die einzelnen Komponenten der Sanierungsmaßnahme eingegangen, indem sie entweder über die Form der Marker unterschieden werden oder ihre Dimension durch die Einfärbung widerspiegelt wird.

4.1.2 Bewertung thermische Behaglichkeit

Die thermische Behaglichkeit wird in Form der Übertemperaturgradstunden bewertet. Wie in (2.5.3 Sozial) beschrieben, sind dies Stunden multipliziert mit der Temperaturdifferenz aus Innenraumtemperatur und der von ihr überschrittenen Maximaltemperatur.

Allerdings ist das thermische Gebäudemodell nicht für die Berechnung derselben oder der Bestimmung des sommerlichen Wärmeschutzes gedacht. Stattdessen wird je Zeitschritt ein Wärmestrom nach außen berechnet (Kühlbedarf), der notwendig ist, damit die Innenraumtemperatur die Maximaltemperatur nicht überschreitet (1. Hauptsatz der Thermodynamik). Annäherungsweise wird für die Bestimmung der Übertemperaturgradstunden die Temperaturdifferenz ΔT ermittelt, die

sich aus dem abzuleitenden Wärmestrom \dot{Q} und den Stoffeigenschaften für Luft ($c_{p,Luft}, \rho_{Luft}$) ergibt. Es wird angenommen, dass im Kühlbedarfsfall die Wärmeabgabe über die Gebäudehülle nach außen und die Veränderung der Wärmekapazität vernachlässigbar ist. Der Wärmeaustausch erfolgt nur über den Luftwechsel n des Luftvolumens $V_{Gebäude}$ im Gebäude. Zudem entsteht der Kühlbedarf nur, wenn das Gebäude „geladen“ ist (siehe Kapazität des 5RC-Modells: 2.1 Thermisches Gebäudemodell).

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}}{c_{p,Luft} * \rho_{Luft} * V_{Gebäude} * n} \in [K] \quad (28)$$

Bei Sanierungsstrategien mit Veränderung der Gebäudehülle erfolgt ein quantitativer Vergleich der Übertemperaturgradstunden. Nach der DIN 4108-2 (DIN 4108-2:2013-02) sind für die Klimaregionen Deutschlands auch verschiedene Grenztemperaturen festgelegt. Für den Referenzstandort Potsdam gilt 26°C. Es wurde sich jedoch für eine Maximaltemperatur von 28 °C entschieden, da es sich um Bestands-Wohngebäude handelt.

4.2 Zusammenhänge Auslegungsoptimierung und Regelungsstrategien bzw. EMS mit Bj. 1960

4.2.1 Auslegung der Gebäudetechnik

4.2.1.1 Übersicht

Abbildung 25 zeigt die gesamten bereinigten Datenpunkte für ein Gebäude mit der entsprechenden Gebäudealtersklasse für das Baujahr 1960. Die verschiedenen Regelungsstrategien (REF, NTR, EMS) werden anhand der Symbolform unterschieden und sind je nach Übertempergradstunden eingefärbt (vergl. Rechte Farbskala). Das Global Warming Potential (GWP) ist auf y-Achse aufgetragen und der durchschnittliche Kapitalwert (NPV p.a.) auf der x-Achse.

Im Verhältnis zu dem Basis-Modell ohne energetische Modernisierung (BASIC) zeigt sich eine deutliche Reduzierung der CO₂-Emissionen der Datenpunktwolke auf ca. 12 tCO₂/a bis unter 2 tCO₂. Die kostengünstigsten Varianten liegen bei den verschiedenen Sanierungsmodellen mit ca. 8500 Eur/a zwischen den Werten des Basis-Szenario (linker/rechter Stern ohne/mit Instandhaltungskosten).

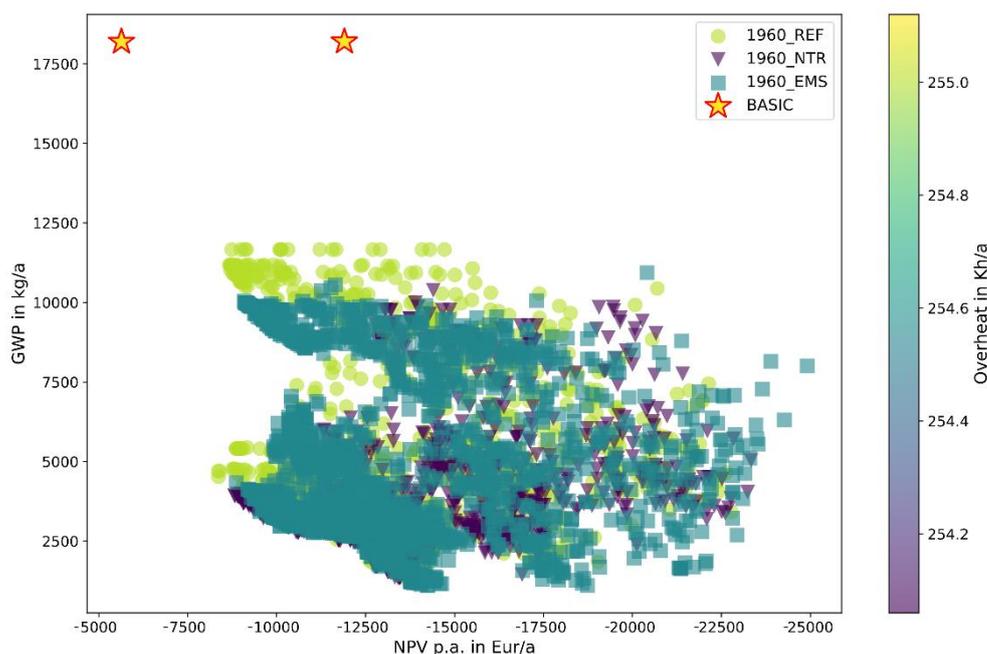


Abbildung 25 Übersicht Diagramm Regelungsstrategien und Modernisierung der Gebäudetechnik für Bj.1960

4.2.1.2 REF

In der folgenden Grafik (Abbildung 26) sind nur die Datenpunkte des Referenzmodells (REF) abgebildet. Zudem werden die verschiedenen Wärmeerzeuger-Technologien gegenübergestellt. Je nachdem welche Technologie hauptsächlich die Wärme bereitstellt, wird sie mit der Form des Datenpunkts (Kreis = Wärmepumpe, Dreieck = Fernwärme, Quadrat = Brennwärtsessel) hervorgehoben. Die Einfärbung stellt die Peakleistung (Wp) einer Photovoltaikanlage (PV) dar.

Die kostengünstigsten Varianten liegen unter 8500 Eur/a und die emissionsärmsten Varianten liegen unter 2 tCO₂/a. Die Übertemperaturgradstunden liegen bei allen Datenpunkten bei 255 Kh/a.

Auffällig hebt sich der Brennwert-Kessel von den anderen beiden Wärmeerzeuger-Technologien ab (vergl. Anhäufung der Quadrate im oberen Diagrammbereich). Während sich die Datenpunkte mit dominierender Brennwert-Kessel-Nutzung im Bereich von 9 bis 12 tCO₂ liegen, divergieren vor allem die Datenpunkte mit bevorzugter Fernwärme-Nutzung unter 6 bis 3 tCO₂/a. Die Konfigurationen mit Wärmepumpe sind weit gestreut berechnet worden, konzentrieren sich aber im Pareto-Bereich (Konfigurationen nahe des Achsenschnittpunkts) vor allem im emissionsarmen Bereich (unter 3 tCO₂/a).

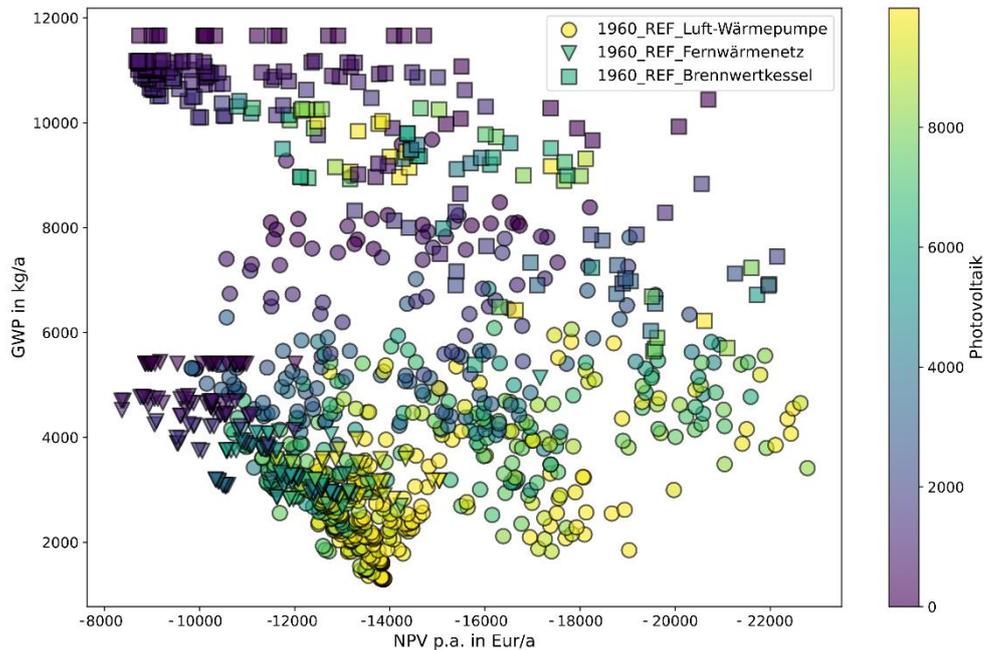


Abbildung 26 Referenzmodell und Modernisierung der Gebäudetechnik Bj.1960 – Differenzierung der Wärmeerzeuger

4.2.1.3 NTR

Fügt man der vorherigen Grafik noch die Datenpunkte des Modells mit Nachtabsenkung (NTR) hinzu (Abbildung 27), ist zum einen anhand der Einfärbung zu erkennen, dass die Nachtabsenkung einen minimalen Einfluss auf die Übertemperaturgradstunden hat (1Kh/a). Zum anderen verschieben bzw. stauchen sich die Datenpunkte in einen emissionsärmeren Bereich. Die Datenpunkte der bevorzugten Brennwert-Kessel-Nutzung liegen nun zwischen 7 und 10 tCO₂, allerdings mit wesentlich höheren Kosten. Es wird vermutet, dass hier vom Algorithmus noch nicht der ganze Lösungsraum erfasst und berechnet worden ist. Die Datenpunkte der bevorzugten Nutzung von Fernwärme oder Wärmepumpe überlagern sich stark im Pareto-Bereich („violetter Streifen“).

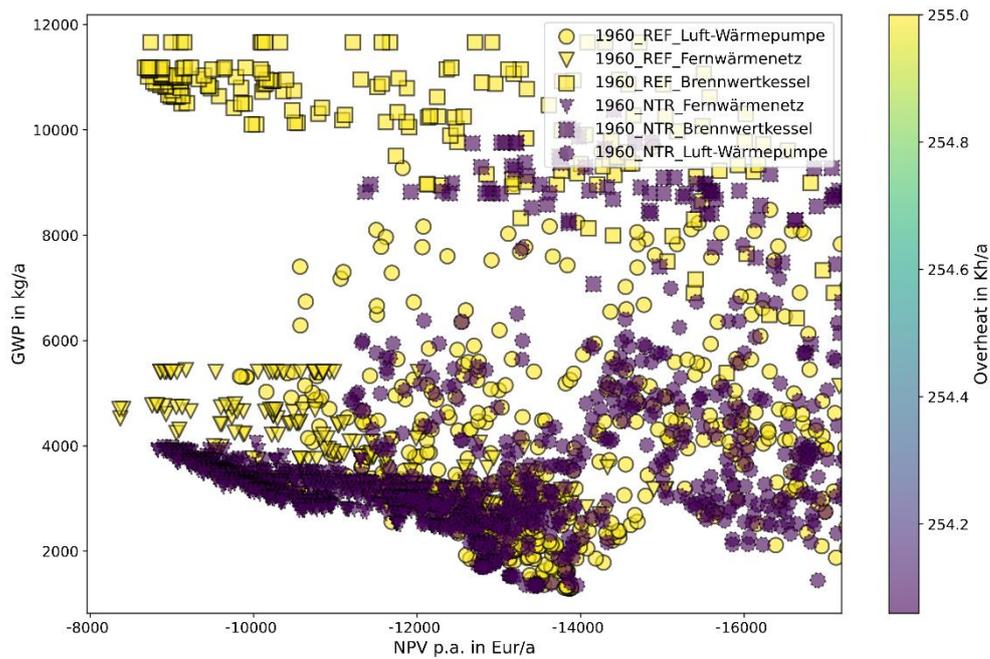


Abbildung 27 REF, NTR und Modernisierung der Gebäudetechnik Bj.1960 – Differenzierung der Wärmeerzeuger

In Abbildung 28 ist der Pareto-Bereich vergrößert dargestellt und die Marker je nach dominierenden Wärmeerzeuger geformt und eingefärbt (PV-Leistung). Die eher violette kürzer gestrichelte Linie stellt die Pareto-Kurve des Referenzmodells dar, wohingegen die rötlichere länger gestrichelte Linie die Pareto-Kurve der optimalen Konfigurationen des Modells mit Nachtabsenkung darstellt. Es ist vor allem eine Reduzierung der CO₂-Emissionen durch Nachtabsenkung bei der Fernwärme-Nutzung zu erkennen (vergl. Dreiecke mit durchgehendem Rand (REF) und gepunktetem Rand (NTR)). Allerdings fallen die bisher generierten Datenpunkte des NTR nicht ganz so kostengünstig wie das REF-Modell aus. Die Datenpunkte der bevorzugten Wärmepumpen-Nutzung streuen wie zuvor sehr stark.

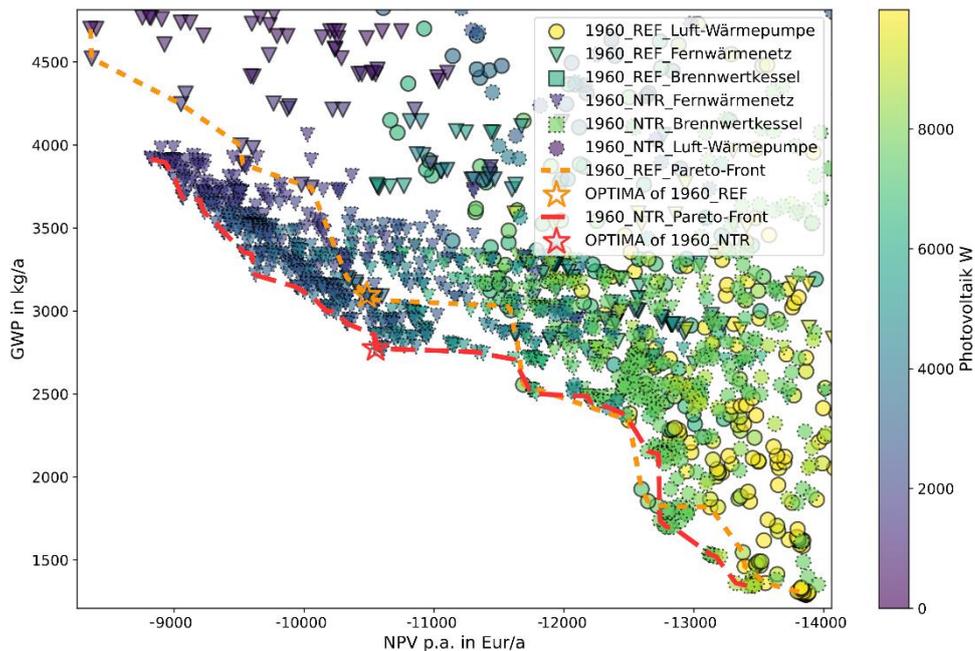


Abbildung 28 REF, NTR und Modernisierung der Gebäudetechnik Bj.1960 – Differenzierung der Wärmeerzeuger mit Fokus auf den Pareto-Bereich

4.2.1.4 EMS

Da sich die Datenpunkte der Regelungsstrategie mit Energy Management System (EMS) im Bereich der Brennwerttechnologie ähnlich verhalten, wird gleich auf den Pareto-Bereich eingegangen (siehe Abbildung 29). Anhand der Farbcodierung ist zu erkennen, dass sich die Übertemperaturgradstunden mit 254,5 Kh/a zwischen den anderen beiden Regelungsstrategien befinden (vergl. Abbildung 25).

Auch scheint das Energy-Management-System kaum noch Einfluss auf die Reduzierung der CO₂-Emissionen bei der bevorzugten Nutzung von Fernwärme zu haben. Lediglich die Kombination mit Wärmepumpen trägt zu einer weiteren Reduzierung des GWP bei (Werte unter 1,5 tCO₂/a) – verbunden mit etwas höheren Kosten.

4.2.1.5 Vergleich der Pareto-Kurven

Anhand der Pareto-Kurven (violette/rote gestrichelte Linien Abbildung 29), zeigt sich eine leichte Verbesserung durch EMS/NTR im günstigeren Kapitalwertbereich (9500 bis 11500 Eur/a) bzw. im Bereich zwischen 2,5 bis 4,0 tCO₂/a. Der Einfluss liegt bei ca. 200 Eur/a weniger Kapitalaufwand und ca. 250 kgCO₂/a.

Weitere Maßnahmen zur Senkung der Emissionen sind möglich, scheinen aber kaum noch durch EMS/NTR beeinflusst zu sein, da sich die Kurven mit zunehmender Reduzierung der Emissionen überschneiden. Schließlich bringen nur noch hohe Investitionskosten geringfügige Reduzierungen der Emissionen (vergl. Übersichts-Diagramm Abbildung 25).

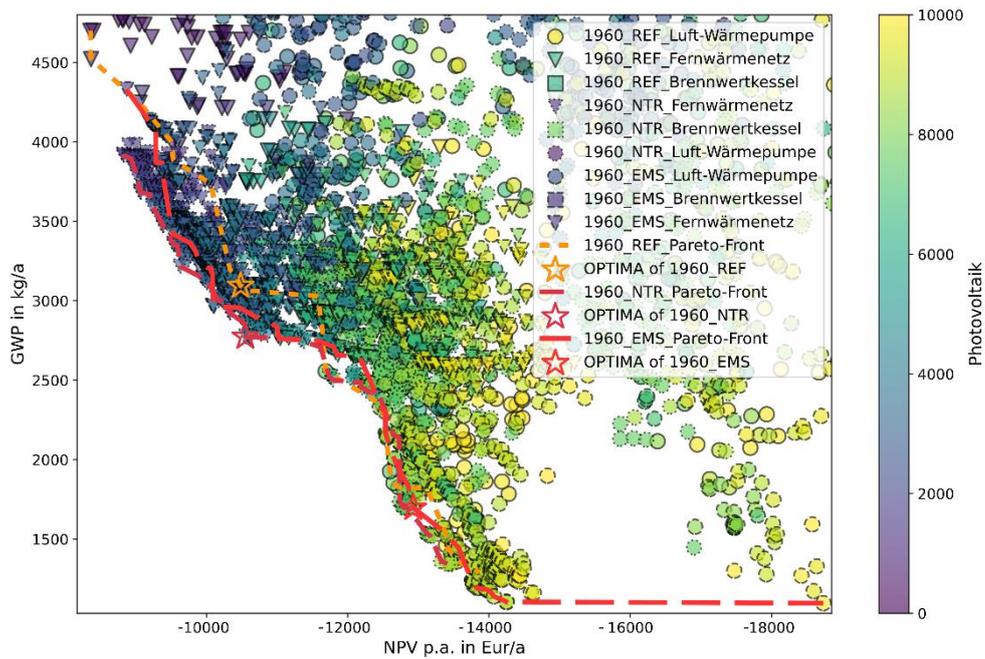
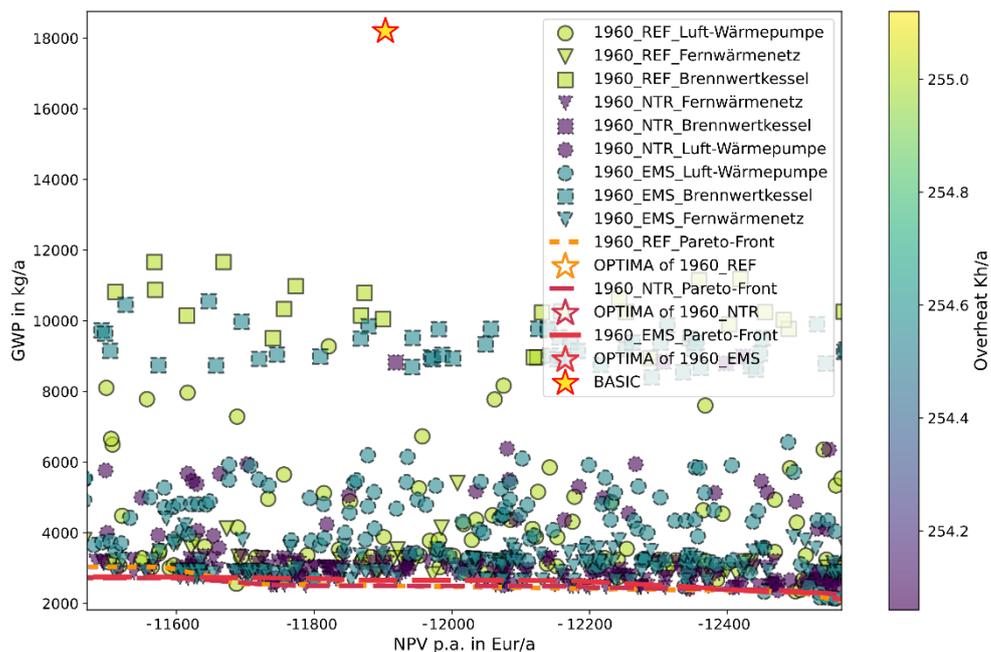


Abbildung 29 REF, NTR, EMS und Modernisierung der Gebäudetechnik Bj.1960 – Differenzierung der Wärmeerzeuger mit Fokus auf den Pareto-Bereich

Fokussiert man sich auf den Kurvenbereich, der den gleichen Kapitalwert aufweist (Abbildung 30), wie das Basis-Modell mit Instandhaltungskosten (Stern bei ca. 11900 Eur/a NPV p.a.), liegen die Einsparmöglichkeiten durch einen Austausch des Wärmeerzeugers bei ca. 15 tCO₂. Das EMS hat dabei einen geringeren verbessernden Einfluss als das NTR.



Die folgenden Kreisdiagramme (Abbildung 31) zeigen die optimalen Anlagenkonfigurationen der drei Regelungsstrategien (von oben nach unten) unter den Aspekten der kostengünstigsten, der emissionsärmsten und der euklidisch mittleren Variante (v.l.n.r.). Das jeweilige Kreisdiagramm im Vordergrund stellt in seiner Größe das Verhältnis des Kapitalwerts zum Maximalwert der dargestellten Konfigurationen dar und in seiner Unterteilung die Dimensionen (in Watt bzw. Deziliter oder Wattstunden) der verwendeten Gebäudetechnik. Der jeweilige Kreis im Hintergrund stellt in seiner Größe das Verhältnis des Global Warming Potentials und mit seiner Einfärbung das Verhältnis der Übertemperaturgradstunden zum jeweiligen Maximalwert der dargestellten Konfigurationen dar.

Während sich die Konfigurationen der einzelnen Optima von REF und NTR ähneln, sticht das EMS hervor: In der günstigsten Variante basiert es nur auf einem Fernwärmeanschluss und einer kleinen PV-Anlage (1,6 kWp). Im mittleren (euklidischen) Punkt enthält der Datenpunkt eine leistungsgerechte Konfiguration mit Wärmepumpe (13,8 kW) mit Photovoltaik-Anlage und elektrischem sowie Wärmespeicher. Der emissionsärmste Punkt enthält u.a. eine sehr unrealistische Kombination aus überdimensioniertem Fernwärmeanschluss (19 kW) und Wärmepumpe (30 kW).

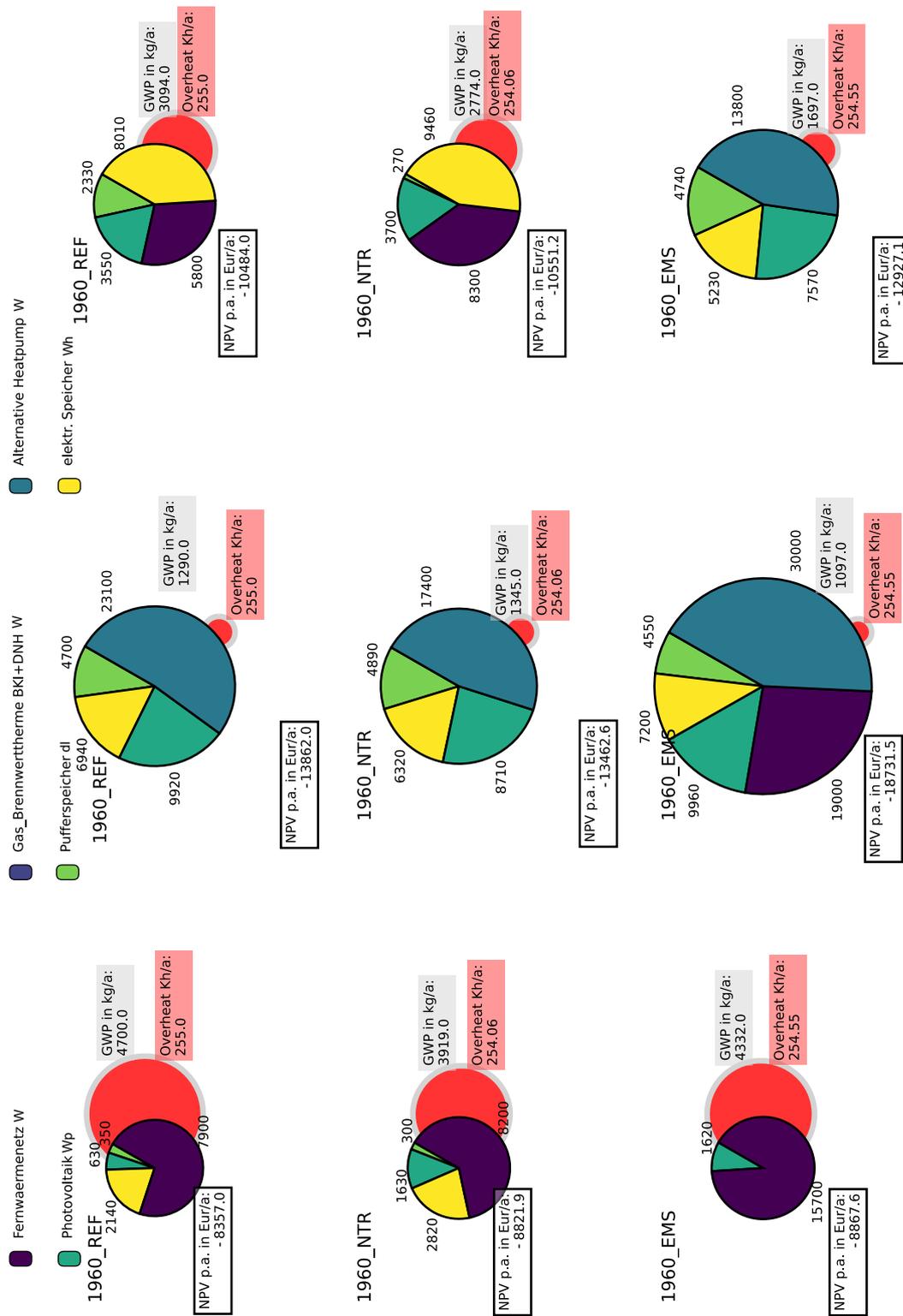


Abbildung 31 Gegenüberstellung Optima der Betriebsstrategien bei Modernisierung der Gebäudetechnik für Bj.1960

4.2.2 Auslegung der Gebäudehülle

4.2.2.1 Übersicht

Betrachtet man die drei Regelungsstrategien nur in Kombination mit der energetischen Modernisierung der Gebäudehülle, ergibt sich ebenfalls eine überlagernde Datenpunktwolke (Abbildung 32). Der Pareto-optimale Bereich erstreckt sich von rund 15,5 tCO₂/a GWP mit einem durchschnittlichen NPV über 9000 Eur/a bis hin zu einem minimalen GWP von unter 10,5 tCO₂/a bei einem NPV p.a. um 16000 Eur/a.

Der dazwischen liegende Pareto-Bereich ist damit mindestens 3 bis fast 8 tCO₂/a emissionsärmer als das Basis-Modell (BASIC). Die minimalen durchschnittlichen Ausgaben liegen mit 9000 Eur/a zwischen denen der Basis-Modelle (6000 bzw. 12000 Eur/a).

Im mittleren Bereich (12000 Eur/a NPV p.a.) ist ein kleiner Spalt zu erkennen (geringe Anzahl an Markern), der auf einen Kostensprung für emissionsärmere Konfigurationen hinweist.

Zudem sind durch die Einfärbung der Datenpunkte die Übertemperaturgradstunden ablesbar. Mit Reduzierung der CO₂-Emissionen, welche in diesem Szenario mit einer verbesserten Gebäudehülle gleichgesetzt werden können, steigen die Übertemperaturgradstunden von 225 Kh/a auf fast das Doppelte mit 425 Kh/a an. Im Verhältnis dazu stehen die Basis-Modelle mit 255 Kh/a, woraus sich schließen lässt, dass moderate Sanierungsmaßnahmen im Bereich über 12 tCO₂/a GWP zunächst eine Reduzierung der Übertemperaturgradstunden erwirken.

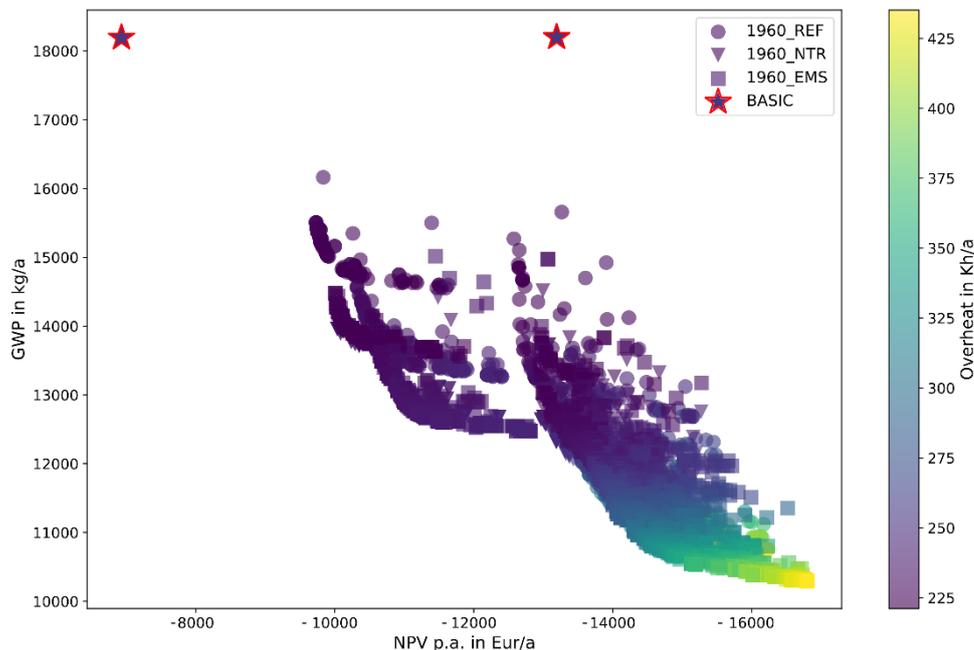


Abbildung 32 Übersicht Diagramm Regelungsstrategien in Abhängigkeit der Modernisierung der Gebäudehülle Bj.1960

4.2.2.2 REF

Im folgenden Diagramm (Abbildung 33) sind nur die Datenpunkte des Referenzmodells abgebildet. Die Datenpunkte sind zudem nach dominierender (höchster Auslegungswert) Sanierungskategorie unterteilt und nach Anzahl der Übertemperaturgradstunden eingefärbt (Formen der Marker). Da die Werte zur Bestimmung der Dominanz nicht normiert sind, werden die Sanierungskategorien Fenster

und Türen leichter dominiert. Aus der fehlenden Einfärbung und dem Fehlen in der Datenpunktwolke lässt sich ablesen, dass es in der Datenpunktwolke keine Lösungen gibt, die eine Sanierungsstrategie beinhaltet, welche nur auf die Modernisierung von Fenstern (oder Türen) abzielt.

Im kostengünstigen Bereich (NPV p.a. < 12500 Eur/a) liegen vor allem Konfigurationen mit dominierender Außenwand-Dämmung (Kreismarker), welches mit der günstigen Kostenfunktion dieses Gebäudeelements harmonisiert (siehe Anhang).

Diese Konfigurationen ziehen sich entlang der Pareto-Kurve in den emissionsärmeren und dafür teureren Bereich und werden ab dem Knickpunkt (NPV p.a. > 12500 Eur/a) zunehmend häufiger durch Konfigurationen mit dominierender Dachsanierung abgelöst (quadrat. Marker). Vereinzelt treten auch Konfigurationen mit dominierender Sanierung der Kellerdecke auf. Letzteres könnte aber an geringen Dimensionen in mehreren Sanierungsmaßnahmen liegen.

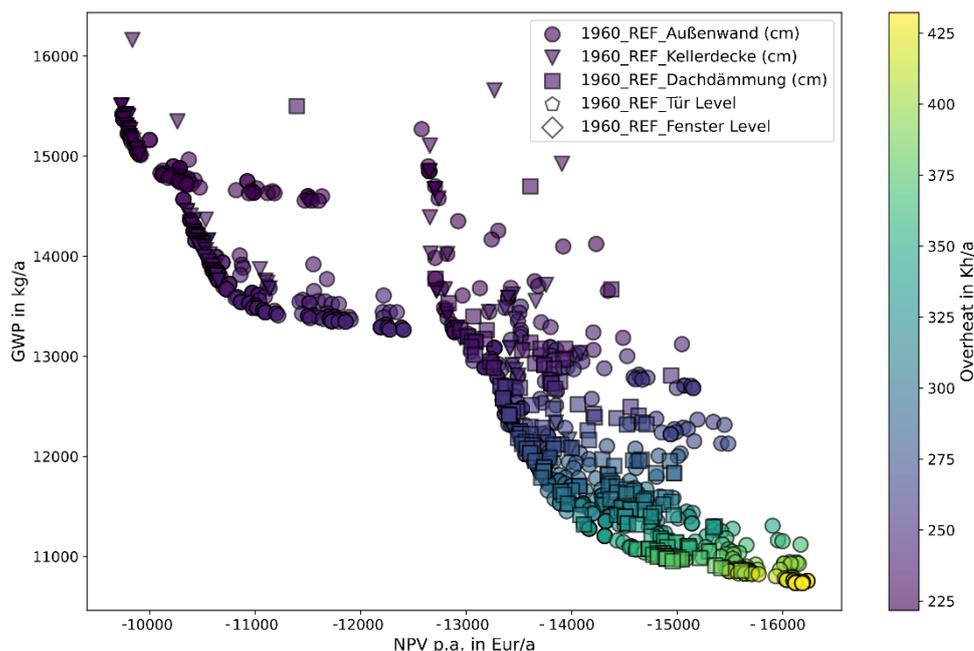


Abbildung 33 Diagramm Referenzmodell in Abhängigkeit der Modernisierung der Gebäudehülle Bj.1960 – Differenzierung der Gebäudehüllflächen

Vergleicht man nur die am meisten dominierten Konfigurationen (Boden, Fenster, Tür), zeigt sich im folgenden Diagramm (Abbildung 34), dass aus kostenperspektive zunächst Maßnahmen am Fenster zu bevorzugen sind: Die (gelbe) Einfärbung repräsentiert das (beste) Fenster Level der Konfiguration des jeweiligen Datenpunkts. Da diese Konfigurationen einen sehr flachen Verlauf der GWP-Reduzierung aufweisen und dann entlang der Pareto-Kurve Konfigurationen mit Dämmung der Bodenplatte dominieren (Runde Marker), lässt sich darauf schließen, dass die vorherigen Konfigurationen mit Fenstersanierung durch zusätzliche Maßnahmen an der Kellerdecke ergänzt und nicht abgewechselt werden (vergl. Datenpunkte im vorherigen Diagramm Abbildung 33).

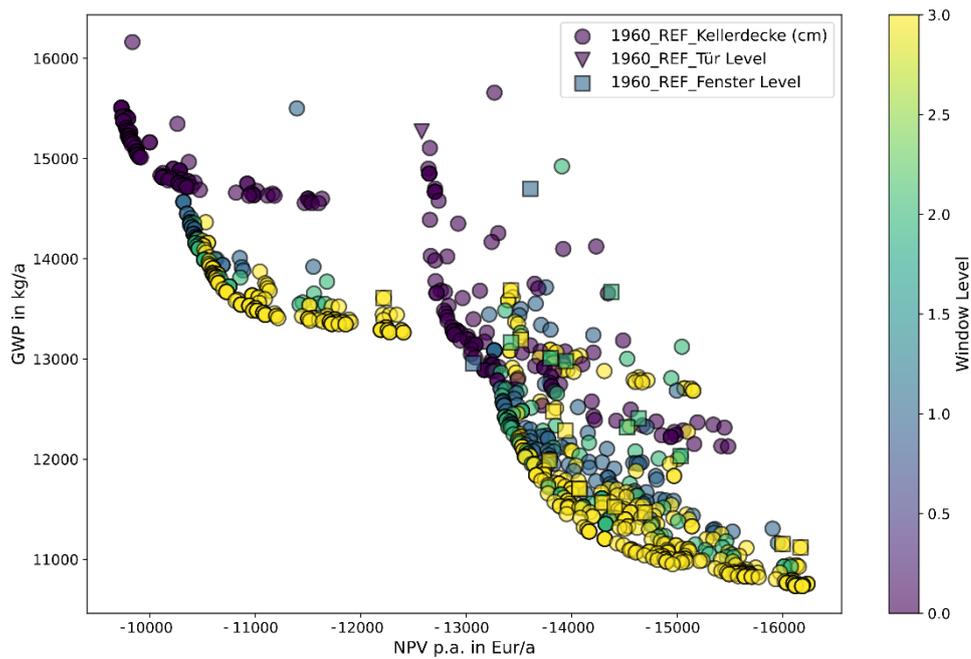


Abbildung 34 Vergleich der dominierten Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle inkl. Fenster Level im Referenzmodell 1960

4.2.2.3 NTR

In (Abbildung 35) überlagern die Datenpunkte des Modells mit Nachtabsenkung (NTR) das Referenzmodell (REF). Die Sanierungsmaßnahmen des NTR zeigen ähnliche Konfigurationen wie die des REF. Auffällig sind die Ausreißer des NTR im kostengünstigen Bereich (9000 Eur/a NPV p.a.). Hier scheint der genetische Algorithmus noch nicht den ganzen Lösungsraum erschlossen zu haben, da sich bereits ein kongruenter Verlauf der Pareto-Bereiche von NTR und REF abzeichnet, aber im NTR noch nicht so weit ausgeprägt ist.

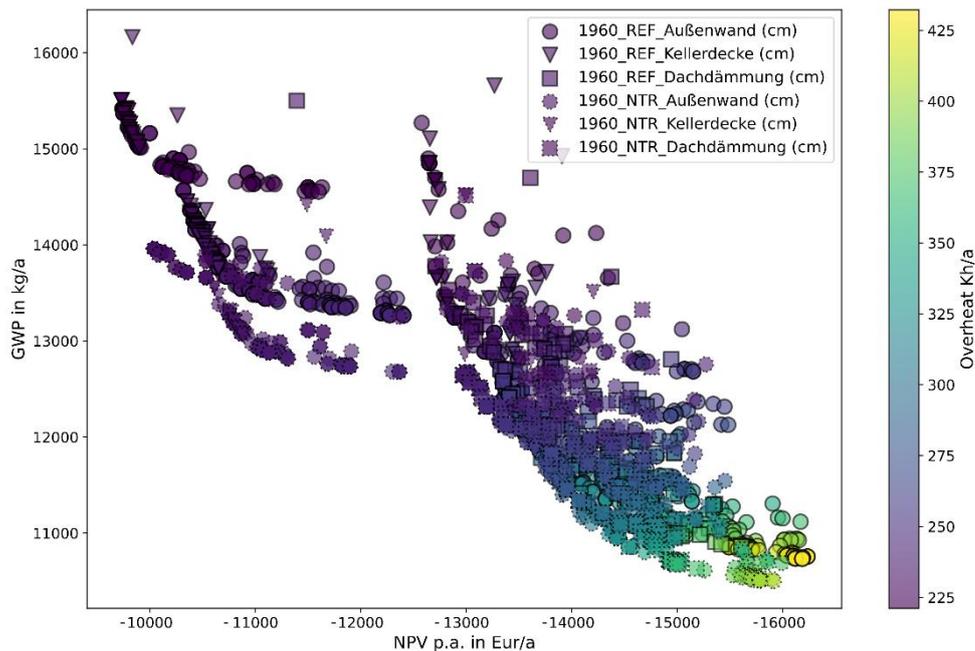


Abbildung 35 Vergleich aller Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle im Modell Nachtabsenkung und Referenzmodell Bj. 1960

4.2.2.4 EMS

Im folgenden Diagramm (Abbildung 36) ist das EMS-Modell dem Referenzmodell gegenübergestellt. Zusätzlich sind die Pareto-Kurven eingezeichnet. Die Konfigurationen der Modernisierung der Gebäudehülle mit EMS zeigen Eigenschaften ähnlich dem des Referenzmodells. Die Pareto-Kurve des EMS-Modells ist ebenfalls kongruent zum REF, aber scheint in einen etwas emissionsärmeren und kostenhöheren Bereich zu driften. Unter der Annahme das es sich um dieselben Konfigurationen entlang der Pareto-Kurven handelt, hätte ein EMS eine Reduktion der CO₂-Emissionen um 0,5 bis 1 tCO₂/a mit einer Kostensteigerung von unter 500 Eur/a zur Folge.

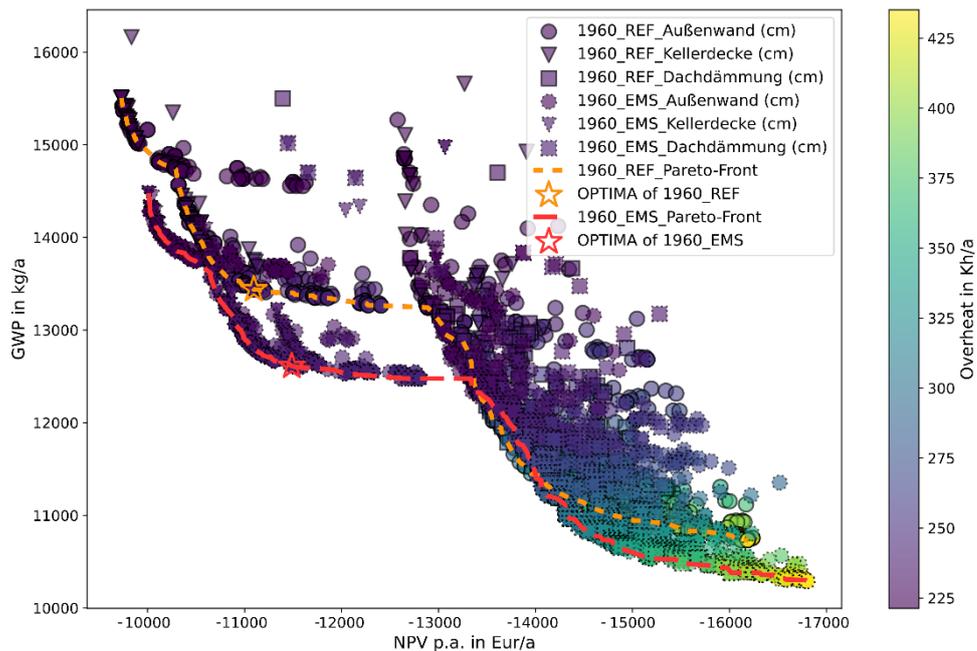


Abbildung 36 Vergleich aller Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle im Energy Management System Modell und Referenzmodell Bj. 1960

Schaut man sich den emissionsärmeren Bereich genauer an (GWP < 11 tCO₂/a), ist auf der Pareto-Kurve zu erkennen (Abbildung 37), dass sich die Konfigurationen mit dominierenden Sanierungsmaßnahmen an Außenwand (Kreismarker) und Dach (quadrat. Marker) abwechseln, doch vor allem am Ende der Pareto-Kurven konzentrieren sich Maßnahmen an der Außenwand, was anhand der teureren Kostenfunktion der Dachsanierung nicht erwartet wurde (siehe Anhang).

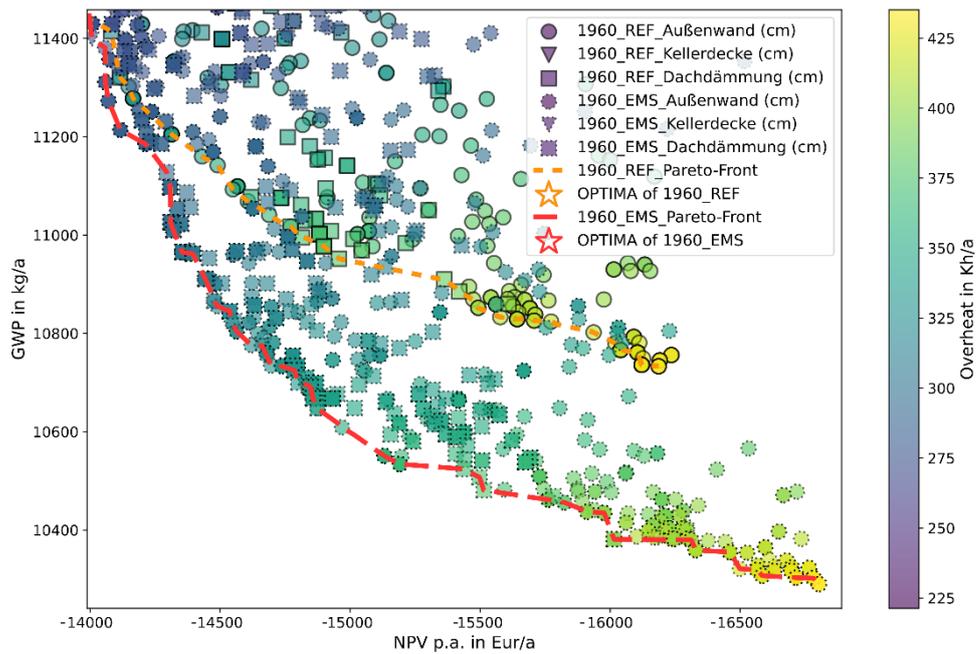


Abbildung 37 Vergleich aller Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle im Energy Management System Modell und Referenzmodell Bj. 1960 – mit Fokus auf den emissionsärmeren Bereich

Das andere Ende der Pareto-Kurven ist in (Abbildung 38) dargestellt. Hier ist die Kongruenz der Pareto-Kurven besonders deutlich zu erkennen (vergl. auch die mittleren Optima (Sterne auf den Kurven)). Dominierende Maßnahmen an der Kellerdecke und an der Außenwand wechseln sich an. Die Übertemperaturgradstunden liegen im sehr niedrigen Bereich (< 250 Kh/a).

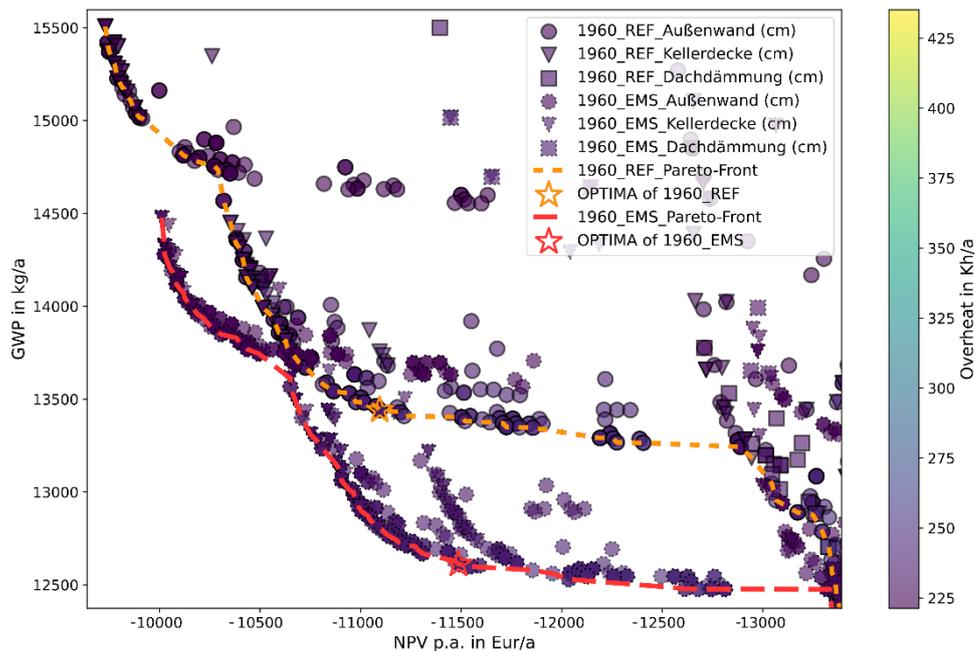


Abbildung 38 Vergleich aller Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle im Energy Management System Modell und Referenzmodell Bj. 1960 – mit Fokus auf den kostengünstigen Bereich

4.2.2.5 Vergleich der Pareto-Kurven

Im folgenden Diagramm (Abbildung 39) werden alle Regelungsstrategien in Bezug auf die Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle gemeinsam betrachtet. Auch wenn die Datenpunkte sich stark überlagern, ist aus den geplotteten Pareto-Kurven (rote gestrichelte Linien) zu schließen, dass vor allem im kostengünstigen Bereich (9000 – 13000 Eur/a NPV), die Regelungsstrategien einen Einfluss auf den Gebäudebetrieb haben. Der Einfluss liegt in diesem Bereich bei ca. 0,5 - 1 tCO₂/a reduziertem GWP. Das EMS Modell hat in dem berechneten Lösungsraum die emissionsärmsten Konfigurationen aufzuweisen, unterscheidet sich aber in der Pareto-Kurve nicht wesentlich vom Modell mit Nachtabsenkung.

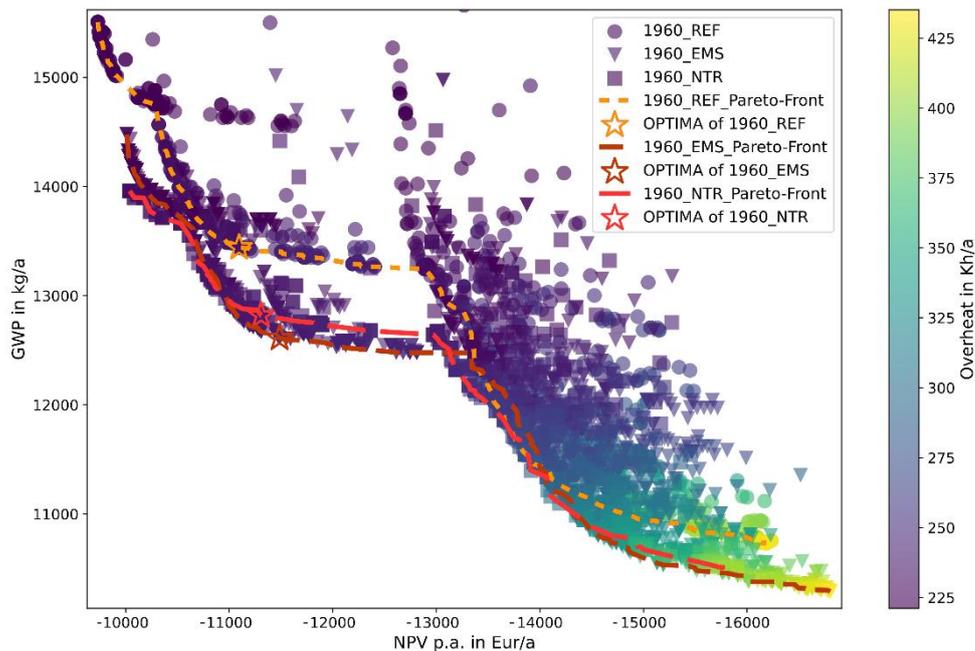


Abbildung 39 Alle Betriebsstrategien in Abhängigkeit der Sanierung der Gebäudehülle 1960 mit Pareto-Kurven im Vergleich

Zudem ist auch ein Einfluss auf die Übertemperaturgradstunden erkennbar. Im folgenden Diagramm-Ausschnitt sind die Pareto-Kurven der drei Regelungsstrategien im emissionsarmen und stark überhitzten Bereich gegenübergestellt (Abbildung 40). Die Datenpunkte auf der Pareto-Kurve des Referenzmodells sind bereits gelblich eingefärbt, was für Übertemperaturgradstunden um die 425 Kh/a steht, während die Marker der temperaturgeregelten Modelle noch im grünen Bereich liegen, was auf der Farb-Skala einem Wert um die 375 Kh/a entspricht.

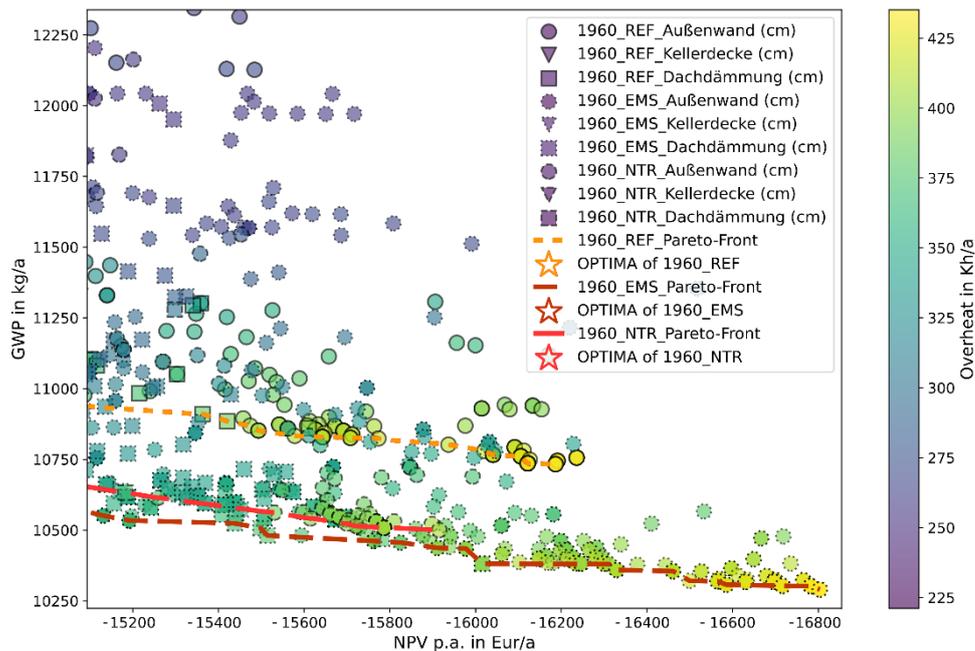


Abbildung 40 Alle Betriebsstrategien in Abhängigkeit der Sanierung der Gebäudehülle 1960 mit Pareto-Kurven im Vergleich – Vergrößerung der überhitzten Konfigurationen

Besonders bemerkenswert ist zum einen der Bereich des durchschnittlichen Kapitalwerts zwischen 11000 und 12000 Eur/a, da hier die Datenlage relativ gering ausfällt, und zum anderen der Bereich 12000 und 13500 Eur/a, da sich dort die Pareto-Kurven so sehr überlagern, dass abschnittsweise sogar das Referenzmodell die besseren Konfigurationen aufweist (vergl. vorherige Diagramme u.a. Abbildung 39).

Eine mögliche Erklärung für den „Kostensprung“ geben die Konfigurationen der Datenpunkte links und rechts vom leeren Bereich (vergrößert in Abbildung 41): Während im günstigeren Bereich vor allem Fenster im Passivhaus-Standard bevorzugt werden (gelbe Marker) und die Dämmung der Außenwand dominiert (runde Marker), werden im teureren Bereich Maßnahmen ohne Fenstertausch bevorzugt (lila Marker) und es dominieren zusätzliche Maßnahmen am Dach (quadratische Marker).

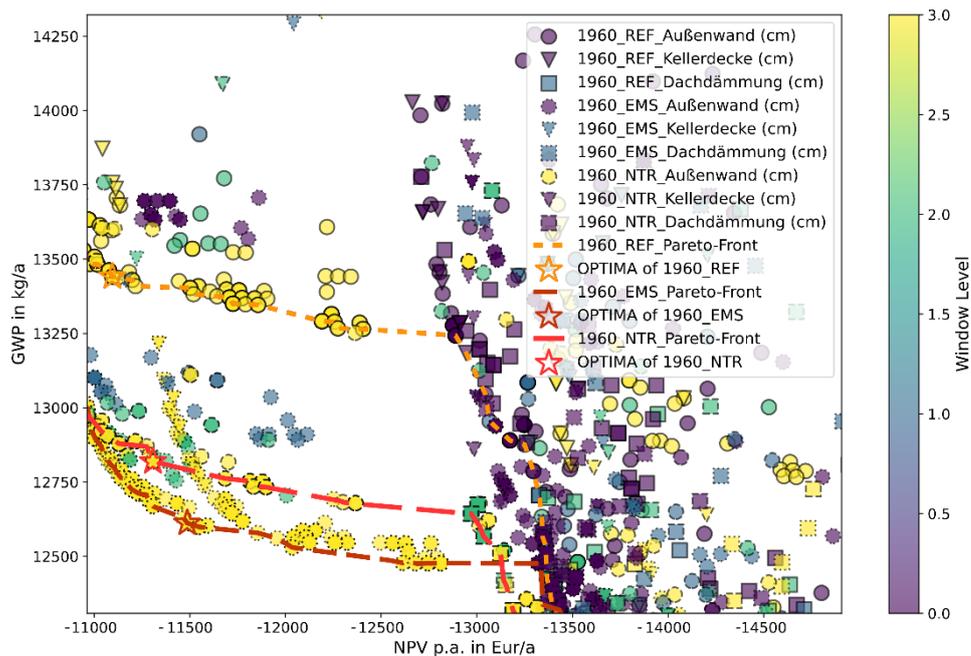


Abbildung 41 Betriebsstrategien in Abhängigkeit der Sanierung der Gebäudehülle 1960 mit Pareto-Kurven im Vergleich – Fokus Kostensprung

Für die Annäherung der Pareto-Kurven im mittleren Bereich lässt sich zumindest über die Gebäudehüllelemente und ihren Einfluss auf GWP und Temperatur kein Zusammenhang finden.

Im Folgenden werden die Optima der jeweiligen Regelungsstrategien im Zusammenspiel mit einer Sanierung der Gebäudehülle vorgestellt (Abbildung 42). Dieses Mal zeigen die Kreisdiagramme den Umfang der Sanierungsmaßnahmen der drei Regelungsstrategien (von oben nach unten) unter den Aspekten der kostengünstigsten, der emissionsärmsten und der euklidisch mittleren Variante (v.l.n.r.). Das jeweilige Kreisdiagramm im Vordergrund stellt in seiner Größe das Verhältnis des Kapitalwerts zum Maximalwert der dargestellten Konfigurationen dar und in seiner Unterteilung die Dimensionen (in cm Dämmstärke bzw. Qualität (Level)) der verwendeten Gebäudetechnik. Der jeweilige Kreis im Hintergrund stellt in seiner Größe das Verhältnis des Global Warming Potentials und mit seiner Einfärbung das Verhältnis der Übertemperaturgradstunden zum jeweiligen Maximalwert der dargestellten Konfigurationen dar.

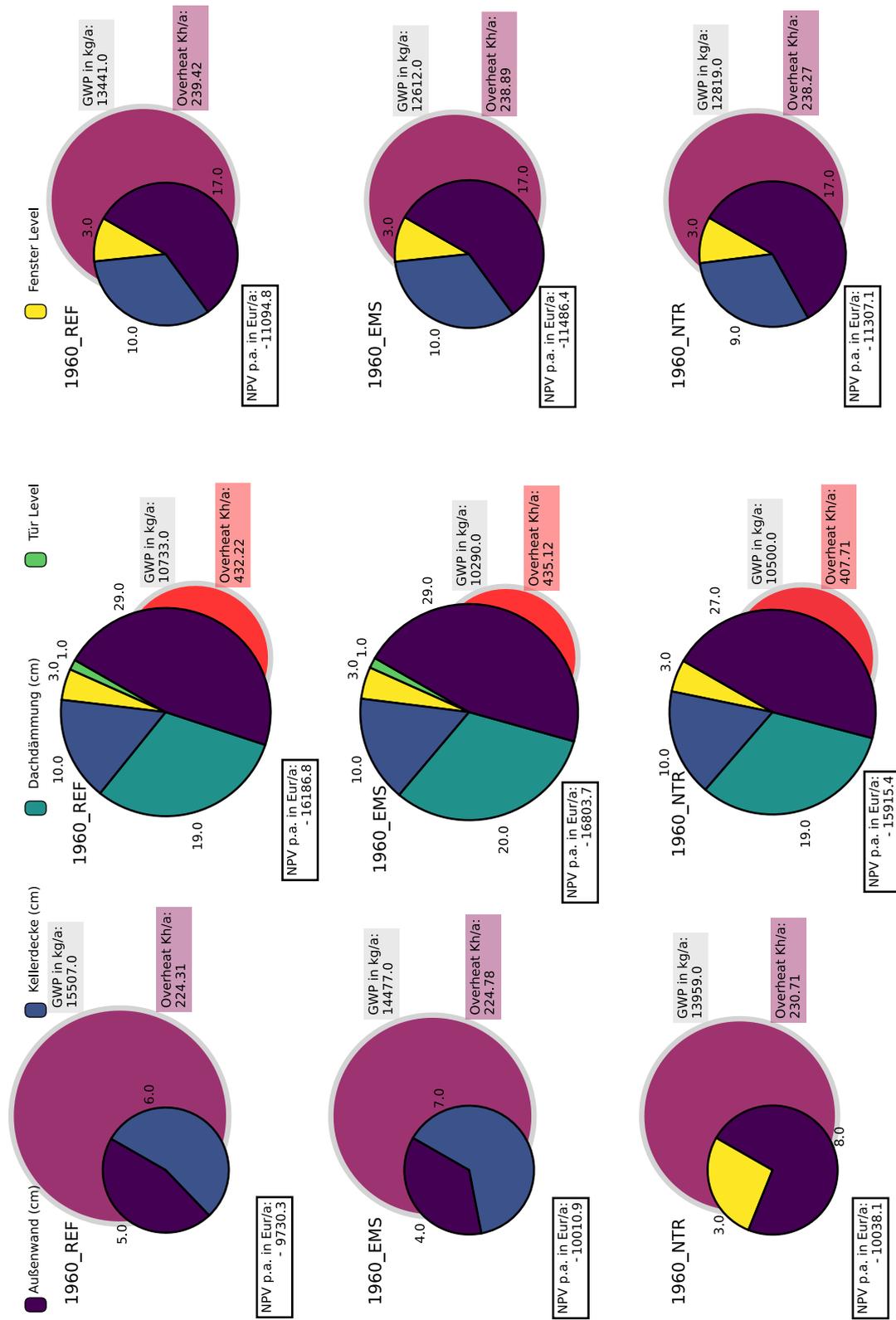


Abbildung 42 Gegenüberstellung Optima der Betriebsstrategien bei Modernisierung der Gebäudehülle für Bj.1960

4.2.3 Kombinierte Auslegung der Gebäudetechnik und -hülle

4.2.3.1 Übersicht

Während der Auswertung der berechneten Datensätze stellte sich heraus, dass bei der kombinierten Betrachtung der Modernisierungen von Gebäudetechnik und -hülle, der genetische Algorithmus wesentlich mehr Datenpunkte generieren muss, um eine deutliche Pareto-Kurve auszubilden. Wie schon in den Diagrammen zuvor ist in der folgenden Abbildung 43 noch deutlicher eine Abgrenzung der Datenpunktwolken gegenüber der x-Achse (NPV p.a. durchschnittlicher Kapitalwert) zu erkennen, was bedeutet, dass die Kosten der Konfigurationen sehr weit streuen, wohingegen die Emissionen in einem sehr niedrigen optimalen Bereich liegen.

Dennoch lässt sich anhand der korrigierten Werte in Abbildung 43 abschätzen, dass sich die CO₂-Emissionen maximal auf 1 tCO₂/a bei einem durchschnittlichen Kapitalwert von mindestens 17000 Euro/a reduzieren lassen. Der optimale Kapitalwert-Bereich liegt mit vereinzelt Datenpunkten bei über 11000 Eur/a und damit im günstigeren Bereich als das Basis-Modell mit Instandhaltungskosten (BASIC: roter Stern).

Aus der Färbung der Marker lässt sich zudem entnehmen, dass im pareto-optimalen Bereich die Übertemperaturgradstunden zwischen 220 und 240 Kh/a betragen (siehe Konzentration der violetten Datenpunkte) und damit geringer ausfallen als der Wert des Basis-Modelles (255 Kh/a). Zwar treten höhere Übertemperaturgradstunden mit bis zu 380 Kh/a auf, diese liegen aber eher im Bereich mit hohen Ausgaben und scheinen anhand ihrer Streuung nicht wesentlich mit der CO₂-Reduzierung zu korrelieren.

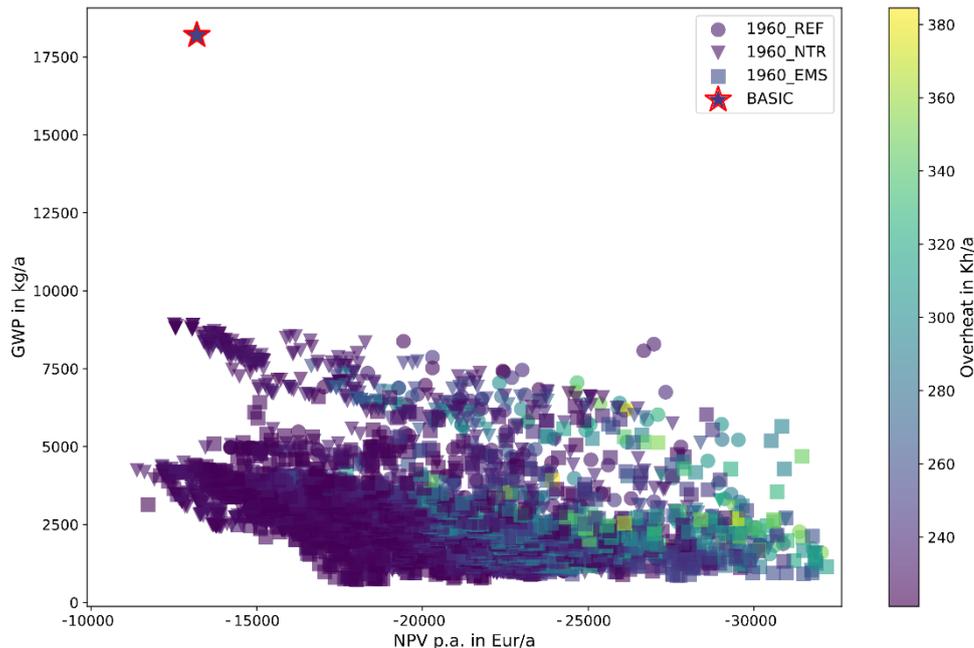


Abbildung 43 Übersicht Diagramm Regelungsstrategien und Modernisierung der Gebäudetechnik sowie -hülle für Bj.1960

4.2.3.2 REF

Um sowohl die Maßnahmen an der Gebäudehülle als auch bei den Wärmeerzeugern in einem Diagramm darzustellen, wird in der Darstellung des Referenzmodells (Abbildung 44) nach Art der

Wärmeerzeugung unterschieden (Form der Marker) und statt der Übertemperaturgradstunden werden die Transmissionswärmeverluste (HT') anhand der Farb-Skala verdeutlicht.

Auffällig ist, dass alle Datenpunkte eine wesentlich bessere Gebäudehülle ($HT' < 1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$) aufweisen als das Basis-Modell ($HT' = 1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$). Die resultierende Differenz der Transmissionswärmeverluste entspricht immerhin der Bandbreite, in der sich auch die Transmissionswärmeverluste der Datenpunkte des Referenzmodells bewegen ($0,7$ bis $1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$). Da durch das gewählte Auswahlverfahren (GA) und die gesetzten Randbedingungen (Dämmstärke = 0 cm) auch Konfigurationen ohne eine Verbesserung an der Gebäudehülle möglich sind, fehlen hier eindeutig Datenpunkte mit Transmissionswärmeverlusten im Bereich zwischen $1,3$ und $1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$. Es scheinen noch nicht alle Sanierungsvarianten im kostengünstigen Bereich ermittelt worden zu sein.

Aus der dominanten grünen Färbung der Datenpunkte entlang der Pareto-Kurve lässt sich ableiten, dass es bei kombinierten energetischen Modernisierungen der Gebäudehülle und -technik eine optimale Reduzierung der Transmissionswärmeverluste gibt, die

1. nicht der maximal möglichen Dämmstärke entsprechen muss (vergl. stärker gedämmte Konfigurationen (lila-blaue Marker im teureren und emissionsstärkeren Bereich))
2. zumindest für das Baujahr 1960 bei ca. $1,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ absolutem bzw. um $0,65 \text{ W/m}^2\text{K}$ reduziertem Transmissionswärmeverlust liegt.

Die Hervorhebung (Form der Marker) der dominierenden Wärmeerzeuger fällt ähnlich aus, wie bei der Untersuchung der alleinigen Modernisierung der Gebäudetechnik (Abbildung 26 in 4.2.1 Auslegung der Gebäudetechnik). Die Konfigurationen mit Brennwertkessel treten in den Hintergrund und die Konfigurationen mit Fernwärme sowie mit Wärmepumpe liegen entlang der Pareto-Kurve (rote gestrichelte Linie), wobei die Konfigurationen mit Fernwärme höhere Emissionen und niedrigere Kosten verursachen als die Konfigurationen mit Wärmepumpe (Abbildung 44).

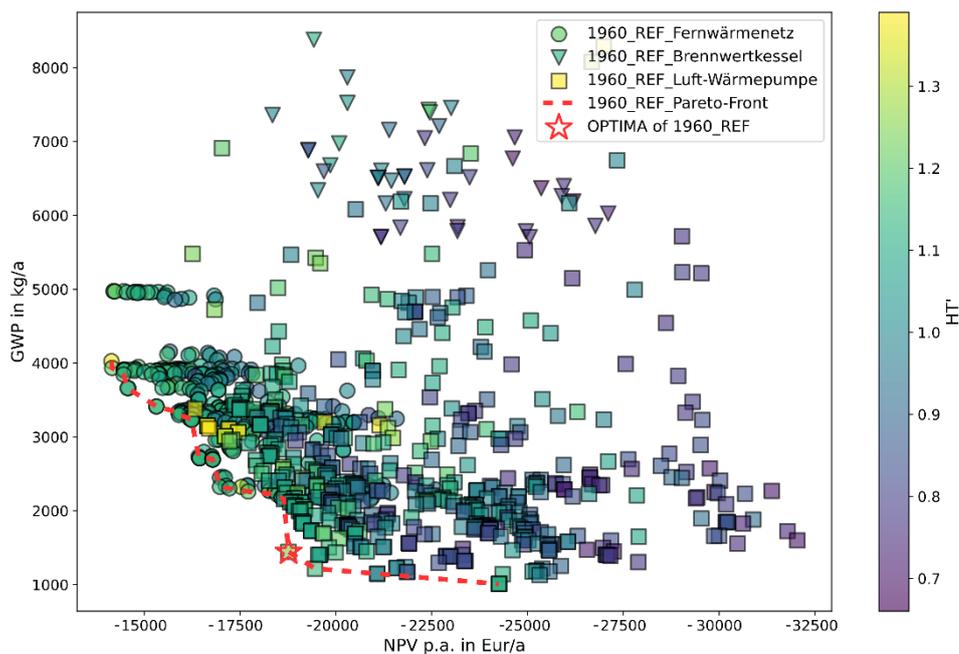


Abbildung 44 Referenzmodell und Modernisierung der Gebäudetechnik sowie -hülle Bj.1960 – Differenzierung der Wärmeerzeuger und Visualisierung der Transmissionswärmeverluste

4.2.3.3 NTR

Fügt man der vorherigen Grafik das Modell mit Nachtabsenkung (NTR) hinzu (Abbildung 45), ist sowohl eine ökonomische als auch ökologische Verbesserung zu erkennen. Die Datenpunktwolke des NTR hat bis zu ca. 2000 Eur/a günstigere bzw. um ca. 1 tCO₂/a emissionsärmere Konfigurationen.

Zusätzlich treten kostengünstige Konfigurationen mit Brennwertkessel auf (NPV p.a. im Bereich 13000 Eur/a). Allerdings können die Emissionen der Konfigurationen mit Brennwertkessel (7 bis 9 tCO₂/a) nicht mit dem niedrigen GWP der Fernwärme- bzw. Wärmepumpenkonfiguration konkurrieren (2,5 bis 4 tCO₂/a).

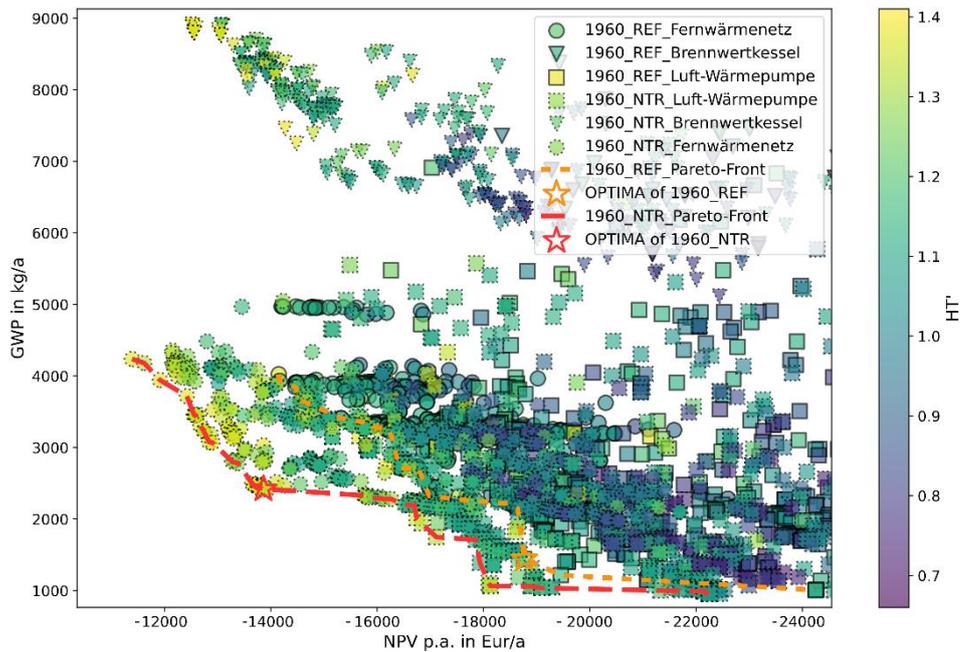


Abbildung 45 REF, NTR und Modernisierung der Gebäudetechnik sowie -hülle Bj.1960 – Differenzierung der Wärmeerzeuger und Visualisierung der Transmissionswärmeverluste

4.2.3.4 EMS

In der nächsten Grafik sind die Datenpunkte eines zweifachen Durchlaufs des genetischen Algorithmus für eine Konfiguration mit EMS dargestellt (siehe Abbildung 46). Auch hier verhalten sich die Datenpunkte wie in den vorherigen Sanierungskonstellationen. Allerdings fallen wesentlich mehr Konfigurationen mit Brennwertkessel auf (quadrat. Marker), als im REF oder NTR. Der Pareto-Bereich hat eher vereinzelte Datenpunkte mit der Wärmebereitstellung durch Fernwärme bzw. Wärmepumpe.

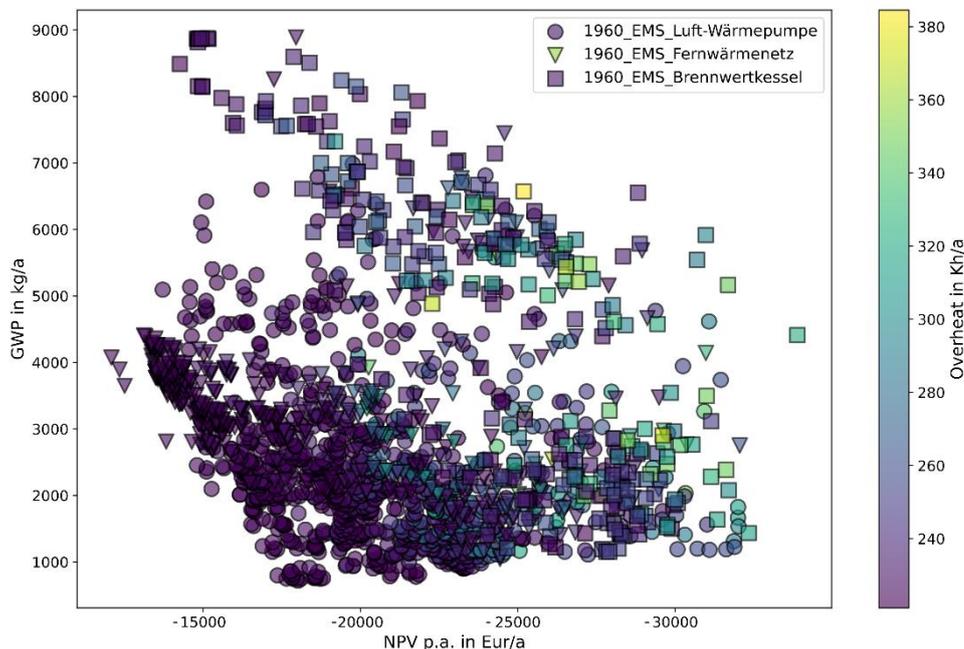


Abbildung 46 EMS-Modell und Modernisierung der Gebäudetechnik sowie -hülle Bj.1960 – Differenzierung der Wärmeerzeuger

4.2.3.5 Vergleich der Pareto-Kurven

In (Abbildung 47) sind die Pareto-Kurven der drei Regelungsstrategien mit den jeweils dominierenden Wärmequellen (Kreis: Fernwärmenetz, Dreieck: Wärmepumpe), ihrem optimalen Mittelwert (Sterne) und ihren spezifischen Transmissionswärmeverlusten (Farbskala) dargestellt.

Beide Strategien mit Temperaturregelung (NTR, EMS) liegen in einem optimaleren Bereich als das Referenzmodell (REF). Bei der Dominanz der Wärmebereitstellung entlang der Pareto-Kurven lässt sich kein Unterschied feststellen. In allen drei Varianten wechselt bei der Wärmebereitstellung die Wärmepumpe die Fernwärme im GWP-Bereich bei 2,3 tCO₂/a ab. Allerdings schneiden sich hier die Kurven der Modelle mit Nachtabsenkung und mit Energy Management System. Während die alleinige Nachtabsenkung (NTR mittlere Strichlänge) im kostengünstigeren Bereich mit Fernwärme-Konfigurationen die günstigeren Datenpunkte enthält, hat die Regelungsstrategie mit zusätzlicher Abwesenheitskontrolle die günstigeren Datenpunkte im emissionsarmen Bereich mit Wärmepumpen-Konfigurationen. Insgesamt lässt sich der durchschnittliche Einfluss durch die Temperaturregelungen auf eine Einsparung der Emissionen um 1 bis 2 tCO₂/a und des NPV p.a. um ca. 2000 Eur/a schätzen. Für den kostengünstigen emissionsarmen Bereich deutet sich an, dass sich die Pareto-Kurven annähern und deshalb der Einfluss der Temperaturregelungen abnimmt.

Die Farbcodierung zeigt zudem, dass der pareto-optimale Bereich im Referenzmodell Konfigurationen mit größer dimensionierten Maßnahmen an der Gebäudehülle enthalten muss als die Konfigurationen mit Temperaturregelung, da die blau-violetten Datenpunkte (REF) für wesentlich geringere Transmissionswärmeverluste stehen (1,0 bis 1,2 W/m²K) als die gelb-grünen Datenpunkte (NTR, EMS: 1,2 bis 1,4 W/m²K). Daraus folgt, dass trotz schlechterer Gebäudehülle bzw. weniger Maßnahmen an der Gebäudehülle Systeme zur Regelung der Innenraumtemperatur einen Einfluss auf das GWP und den NPV haben und den Sanierungsaufwand reduzieren können.

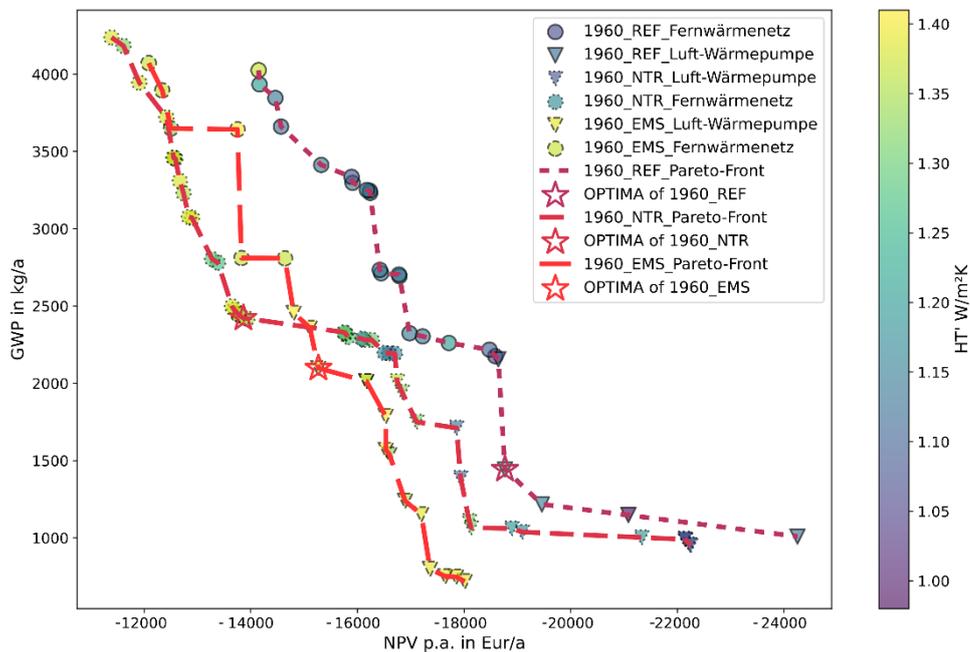


Abbildung 47 Vergleich der Pareto-Kurven der Regelungsstrategien und Modernisierungen der Gebäudetechnik sowie -hülle Bj.1960 – Differenzierung der Wärmeerzeuger und Visualisierung der Transmissionswärmeverluste

4.2.4 Vergleich der verschiedenen Sanierungsstrategien in Kombination mit den Betriebsstrategien für Bj. 1960

Abbildung 48 stellt die Datenpunktwolken der verschiedenen Sanierungsstrategien aus Kap. 4.2.1 bis 4.2.3 den Basis-Modellen gegenüber. Die roten Sterne beschreiben die Basis-Szenarien ohne energetische Sanierung. Der linke rote Stern beschreibt das Szenario, bei dem der Status-Quo beibehalten wird. Der normierte Kapitalwert beträgt ca. 7.000 Eur/a und die Emissionen belaufen sich auf ca. 18 tCO₂/a. Der rechte rote Stern berücksichtigt erhöhte Kosten durch notwendige Instandhaltungsmaßnahmen dar, womit der durchschnittliche Kapitalwert bei ca. 13.000 Eur/a liegt.

Die Sanierungsstrategien sind zudem mit den Betriebsstrategien ohne Temperaturregelung (REF) und mit Energy Management System (EMS) dargestellt. Die Maßnahmen der verschiedenen Sanierungsgruppen tragen gegenüber dem Basis-Modell wesentlich zu einer Reduzierung der CO₂-Emissionen bei:

Werden nur Elemente der Gebäudehülle modernisiert („Envelope“ Abbildung 48), betragen die Emissionen nur noch 15 tCO₂/a und weniger. Der durchschnittliche Kapitalwert liegt ungefähr zwischen den beiden Szenarien des Basis-Modells.

Durch die Modernisierung der Gebäudetechnik („Technologies“ Abbildung 48) können sogar Emissionswerte unter 5 tCO₂/a erreicht werden, ohne dass der Kapitalwert besonders vom Basismodell abweicht.

Überraschenderweise stellt sich eine Erhöhung der Kosten dar, wenn die Sanierungskategorien Gebäudetechnik und -hülle („Env+Tech“ Abbildung 48) kombiniert werden, ohne dass es signifikante Verbesserungen der CO₂-Emissionen gibt. Auf der einen Seite lässt sich dieser Zusammenhang damit erklären, dass mehrere gleichzeitige Sanierungsmaßnahmen zu mehr Kosten führen und dass eine Senkung des Wärmebedarfs durch eine Modernisierung der Gebäudehülle auch den Einfluss durch eine effizientere Anlagentechnik senkt. Andererseits müsste es auch Datenpunkte geben, welche keine Maßnahmen an der Gebäudehülle enthalten und sich mit den Daten der Sanierungsstrategie aus Kap. 4.2.1 decken. Ursache könnte hier die zu geringe Datenlage sein (vergl. EMS Kapitel 4.2.3).

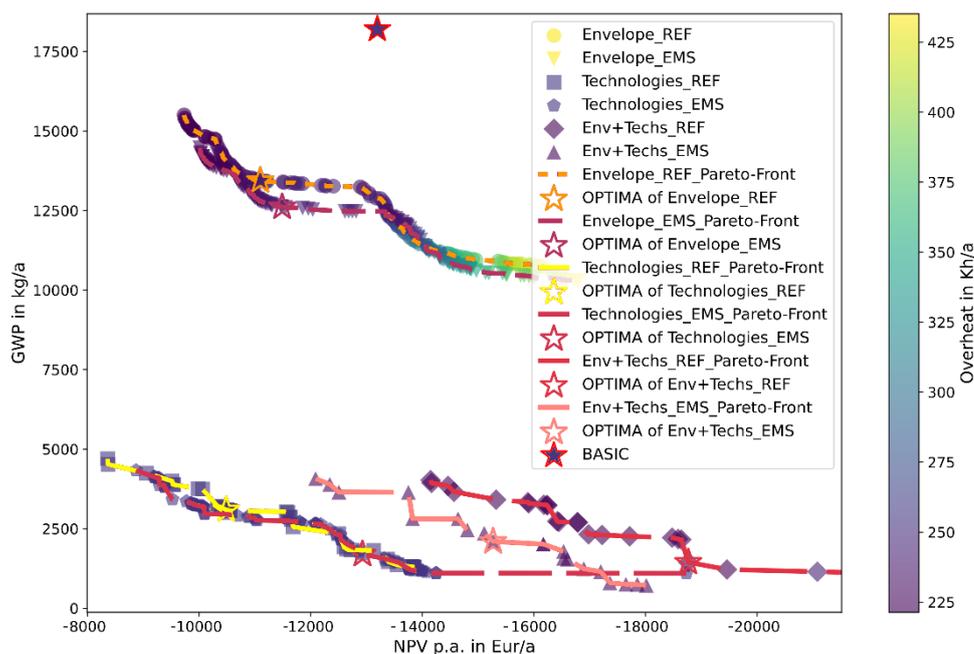


Abbildung 48 Gegenüberstellung der Referenz- und EMS-Modelle aller Sanierungsstrategien Bj.1960

Vertauscht man die Achsen des durchschnittlichen Kapitalwerts (NPV p.a.) und der Übertemperaturgradstunden („Overheat“), ergibt sich Abbildung 49. In dieser bestätigt sich, dass die Senkung der Innenraumtemperatur zu einer Reduzierung der Übertemperaturgradstunden beiträgt:

Die beiden senkrechten Streifen auf der rechten Seite bilden das Modell ohne Sanierung der Gebäudehülle ab (nur Gebäudetechnik „Technologies“), wo der Einfluss verschwindend gering ist.

Die Sanierungsstrategie mit kombinierten Maßnahmen an Gebäudetechnik und -hülle („Env+Tech“) erreicht sowohl das Minimum der Gebäudetechnik-Strategie im GWP (ca. 1 tCO₂/a) als auch das Minimum der Gebäudehülle-Strategie in den Übertemperaturgradstunden (ca. 221 Kh/a). Interessant dabei ist, dass dem genetischen Algorithmus nur das GWP und der NPV als Performance Indikator zugewiesen wurde und dennoch eine Verbesserung der Innenraumtemperatur-Qualität um mindestens 30 Kh/a erreicht wird. Allerdings zeigen die vorwiegend grün gefärbten Marker, dass dies mit wesentlich höherem, teilweise doppelten, Kapitalwert-Verlust verbunden ist.

Wird jedoch einzig die Gebäudehülle saniert („Envelope“), welches die beiden oberen Kurven abbilden, zeigt sich zum einen, dass sich die Konfiguration mit EMS (Dreiecke mit Spitze nach unten) in einen emissionsärmeren Bereich verschiebt – im Verhältnis zu den Konfigurationen des REF (runde Marker). Mit zunehmender Dämmung der Gebäudehülle, welches sich in der Zunahme der Übertemperaturgradstunden und der heller werdenden Einfärbung widerspiegelt, nähern sich die Kurven an. Dennoch kann mit Einsparungen von bis zu 1 tCO₂/a gerechnet werden.

Zum anderen zeigt sich ein bipolares Verhalten der Übertemperaturgradstunden mit einem optimalen Kapitalwert als Wendepunkt. Zunächst tragen Investitionen in die energetische Aufwertung der Gebäudehülle zu einer Reduzierung des GWP von 16 tCO₂/a auf 14 tCO₂/a und der Übertemperaturgradstunden von 235 Kh/a auf 222 Kh/a bei (Es wird zudem sichtbar, dass Konfigurationen in Richtung des Basis-Modells mit geringfügigeren Sanierungsmaßnahmen fehlen). Anschließend führt eine weitere Verbesserung der Gebäudehülle nur noch geringfügig zu einer Reduzierung der CO₂-Emissionen, während die Übertemperaturgradstunden sogar weit über den ursprünglichen Wert des Basis-Modells (255 Kh/a) hinausgehen. Die HT'-Werte liegen in diesem Wendepunkt laut Ergebnismatrix zwischen 1,1 und 1,3 W/m²K, was den Ausführungen in Kap. 4.2.3 entspricht. HT' scheint aber nicht das einzige Merkmal zu sein, da ein weiterer Blick in die Ergebnisse zeigt, dass auch andere Datenpunkte Transmissionswärmeverluste in diesem Bereich aufweisen.

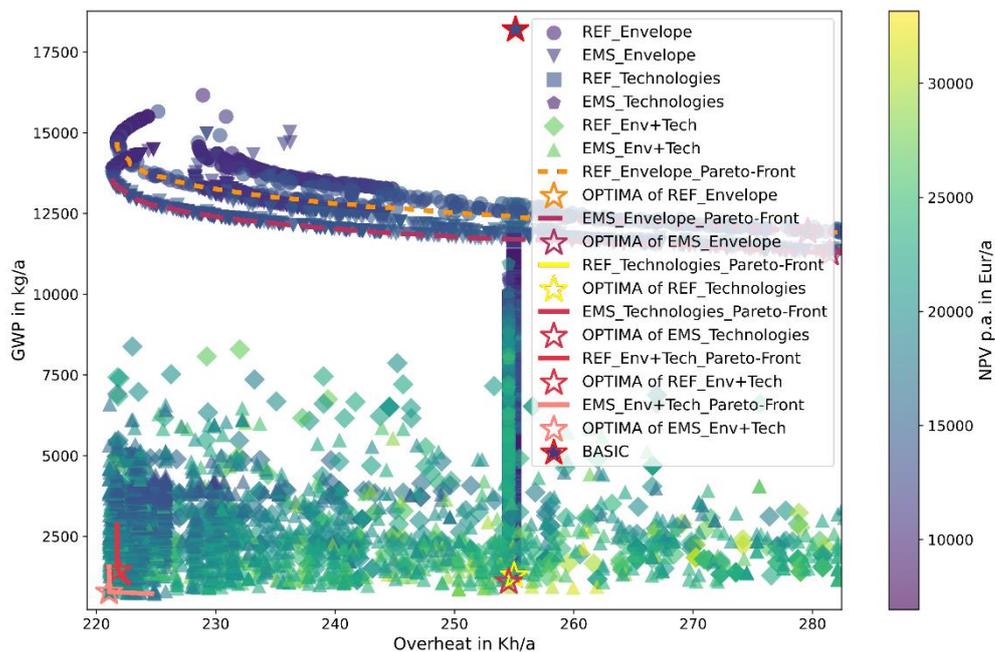


Abbildung 49 Gegenüberstellung der Referenz- und EMS-Modelle aller Sanierungsstrategien Bj.1960 – vertauschte Achsen NPV<->Overheat

Differenziert man die Sanierungsvarianten der Gebäudehülle in dominierende Position der Dämmung (Markerform) und der gewählten energetischen Qualität der Fenster („Window Level“ Farbmarkierung), zeigt sich in Abbildung 50 deutlich, dass das Niveau der Fenster ausschlaggebend für die maximal mögliche Senkung der Übertemperaturgradstunden ist. Während der Passivhausstandard

(„Window Level“ 3 -> gelb) nur eine Reduzierung auf 231 Kh/a zulässt, sind es bei den Originalfenstern (also ohne Austausch -> „Window Level“ 0 -> lila) 221 Kh/a.

Vergleicht man dies mit den Eingangsparametern der Fenstermodelle (3.3.6 Zusammenfassung Festlegung Parameter), scheint dies zunächst widersprüchlich, da mit zunehmendem energetischem Niveau der Fenster (lila -> gelb) der Energieeintragskennwert g vom Originalwert der Gebäudealtersklasse über 0,6 auf 0,45 sinkt. Vergleicht man jedoch parallel die Reduzierung des U-Werts vom Original-Gebäude (GAK-typisch 2,9 – 5,0 W/m²K (Ballarini et al., 2014; Loga, 2015b) über 1,3 auf 0,75 W/m²K, so hat die Reduktion der Wärmeübertragung einen größeren Quotienten und damit einen größeren Einfluss, als die Reduzierung des Wärmeeintrags durch solare Einstrahlung.

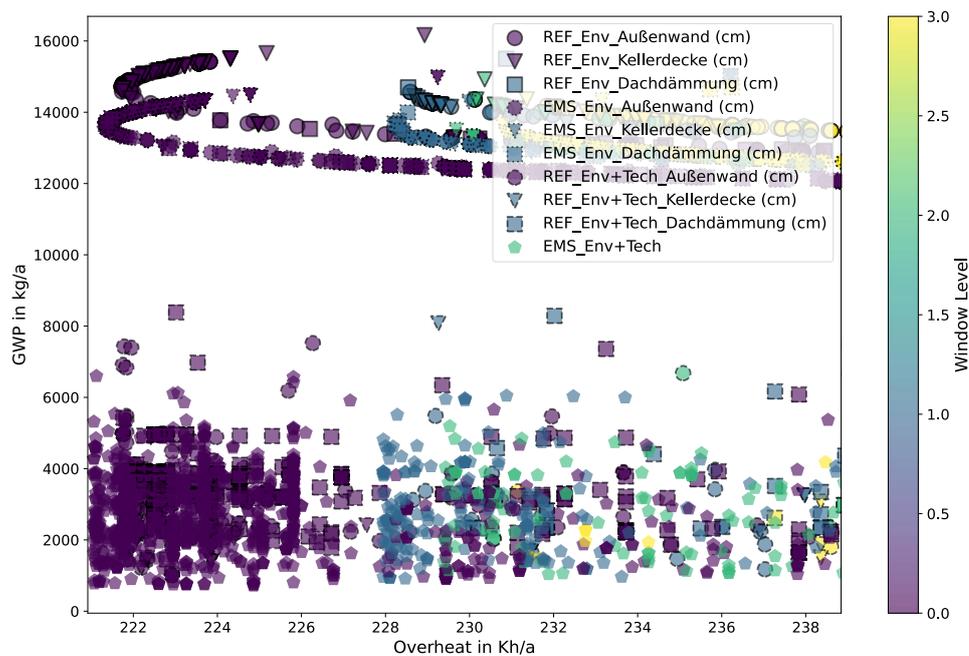


Abbildung 50 Gegenüberstellung verschiedener Sanierungsstrategien an der Gebäudehülle mit REF und EMS in Bezug auf die Übertemperaturgradstunden und Einfluss des Qualitätsniveau der Fenster Bj.1960

4.3 Zusammenfassung Gegenüberstellung Regelungsstrategien

In Abbildung 48 sind bereits nur die Datenpunkte der Pareto-Kurven der einzelnen Sanierungsstrategien mit der konstanten (REF) bzw. mit der geregelten (EMS) Innenraumtemperatur gegenübergestellt. Für die Sanierungsstrategie mit ausschließlich Maßnahmen an der Gebäudetechnik („Technologies“) hat die Innenraumtemperaturregelung (Quadrat: REF -> Pentagon: EMS) keinen wesentlichen pareto-optimierenden Einfluss, da die Kurven dicht beieinander liegen (vergl. Kap. 4.2.1).

Bei Maßnahmen ausschließlich an der Gebäudehülle („Envelope“) fällt der Einfluss höher aus (Kreis: REF -> Dreieck: EMS). Wie schon in Kap. 4.2.2 beschrieben, ist die Kongruenz der Pareto-Kurven sehr deutlich, was auf eine Verschiebung in einen zwar emissionsärmeren, aber auch teureren Bereich hindeutet. Vor allem im kostengünstigeren Bereich (Konfigurationen mit geringer zusätzlicher Dämmung der Außenwand, der Kellerdecke und mit Austausch der Fenster siehe Kap. 4.2.2) ist eine stärkere Reduktion der Emissionen durch ein EMS zu erwarten.

Wird die Auswahl der gemeinsamen Maßnahmen an Gebäudetechnik und -hülle optimiert („Env+Tech“), ist der Einfluss eines EMS am deutlichsten zu erkennen (Raute: REF -> Dreieck: EMS), da die Pareto-Kurven sichtbar auseinander liegen. In Kap. 4.2.3 wurde bereits dargestellt, dass dies bessere GWP- und NPV-Werte trotz einer weniger gedämmten Gebäudehülle ermöglicht. Bei einer gut abgestimmten Auslegung lässt sich eine Reduzierung der CO₂-Emissionen um 0,5 bis 1 tCO₂/a, also mindestens 10 % des GWP der Sanierungsstrategie mit Gebäudehülle und -technik erreichen. Beim Kapitalwert ist mit 500-1000 Eur/a Einsparung zu rechnen, was ca. 6 % des mittleren NPV p.a. der Sanierungsstrategie mit Gebäudehülle und -technik entspricht. Bezieht man dies wiederum auf die Investitionskosten des Energy Management Systems, welche mit 3000 Euro angenommen wurden, rentiert sich die Investition in ein EMS im optimalen Fall bereits nach drei Jahren.

Zudem hat die Verwendung eines EMS einen Einfluss auf die Übertemperaturgradstunden. Über die optimalen Konfigurationen entlang des pareto-optimalen Bereichs ist der Einfluss eher gering, aber steigt bei umfangreichen Maßnahmen an der Gebäudehülle, welche eine Aufheizung des Gebäudeinneren begünstigen.

4.4 Gegenüberstellung der Baujahre 1960, 1990 und 2005

4.4.1 Auslegungsoptimierung der Gebäudetechnik

Abbildung 51 stellt die Datenpunkte der Pareto-Kurven der Gebäudetechnik-Sanierungsstrategie für EMS über die drei verschiedenen Baujahre 1960, 1990 und 2005 dar. Statt der absoluten Werte für GWP und NPV p.a., sind diese zusätzlich auf die Nutzfläche bezogen und auf der x- bzw. y-Achse dargestellt. Da die Sanierung der Gebäudetechnik keinen relevanten Einfluss auf die Übertemperaturgradstunden hat, sind die Marker farblich in Abhängigkeit von der Photovoltaik Dimensionierung eingefärbt.

Zunächst wird deutlich, dass für Gebäude einer jüngeren Baualtersklasse ein geringerer finanzieller Aufwand zur Senkung der CO₂-Emissionen notwendig ist. 25 kgCO₂/m²a lassen sich bei einem ca. 20 Jahre alten Gebäude (Bj. 2005) schon mit einem Kapitalwert-Verlust von unter 50 Eur/m²a erreichen. Bei einem 35 Jahre alten Gebäude (Bj.1990) sind dies gerade noch weniger als 60 Eur/m²a und für ein rund 65 Jahre altes Gebäude (Bj. 1960) sind dies über 80 €/m²a.

Über die Pareto-Kurven hinweg, von kostengünstig zu emissionsarm, verändert sich auch die dominierende Konfiguration der Sanierungsmaßnahmen. Ähnlich, wie schon in Kap. 4.2.1 beschrieben, liegen vor allem Konfigurationen mit Fernwärme (Kreis-Marker) sowie ohne bis wenig installierter PV-Leistung im kostengünstigen Bereich und werden im Mittelfeld in Richtung geringerem GWP von Konfigurationen mit Wärmepumpe (Dreieck-Marker) sowie zunehmender PV-Leistung abgelöst.

Auffällig ist dabei, dass sich der Bereich, in dem Konfigurationen mit Fernwärme von Konfigurationen mit Wärmepumpe abgelöst werden, über die Baujahre jünger werdend in einen emissionsärmeren Bereich, verschiebt. Während Gebäude von 1960 mit Fernwärme minimal einen GWP von 22 kg/m²a erreichen, sind in neueren Gebäuden von 1990 bzw. 2005 mit Fernwärme Emissionen von unter 15 bzw. unter 10 kg/m²a möglich. Allerdings sagen die Datenpunkte aufgrund der numerischen Auswertungsroutine nur eine Dominanz der jeweiligen Technologie aus. Dahinter können sich auch kombinierte Anlagensysteme verbergen. Ein Vergleich mit den generierten Datensätzen bestätigt jedoch, dass es sich um getrennte Systeme handelt (1990 EMS).

Überraschend ist zudem, dass in der jüngsten Gebäudealtersklasse (Bj. 2005) die Datenpunkte des EMS-Modells (günstigste Kurve mit gepunkteten Markern) weniger günstig ausfallen als die Datenpunkte des Referenzmodells (günstigste Kurve mit durchgehendem Rand). Dies ist insofern nachvollziehbar, da bspw. ein Gebäude mit 100 m² Nutzfläche einen jährlichen Kapitalwert von durchschnittlichen 6000 Eur/a aufweisen würde und mit EMS 360 Eur/a einsparen würde (6 % NPV p.a. vergl. Kap. 4.3). Allerdings fließen die Investitionskosten für das EMS bei einmaligem Ersatz im Betrachtungszeitraum und mit Berücksichtigung des Preissteigerungsfaktors ebenfalls mit über 400 Eur/a in den NPV p.a. mit ein.

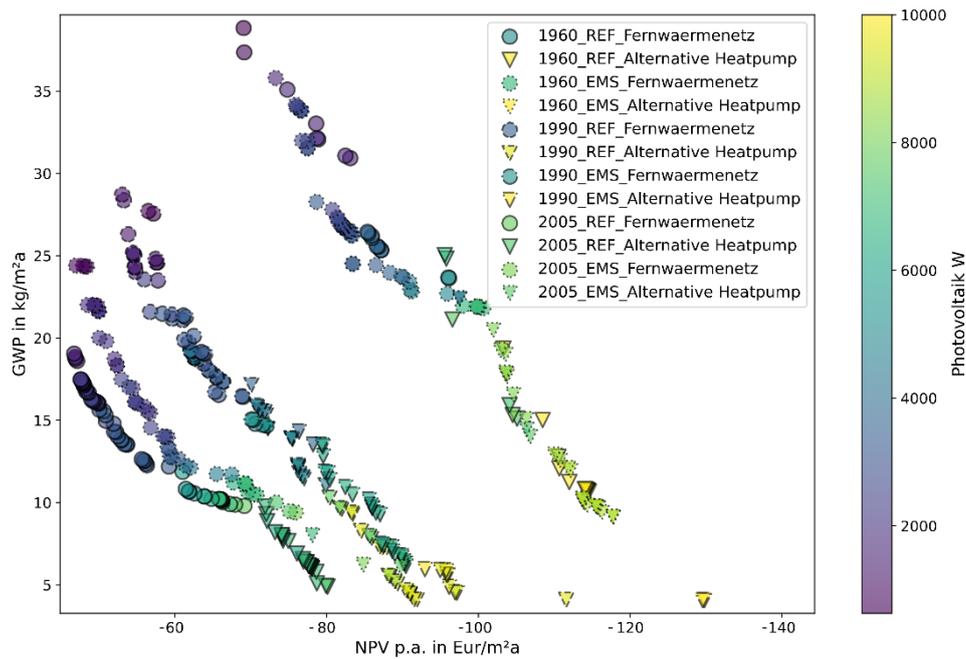


Abbildung 51 Gegenüberstellung der Pareto-Kurven der EMS der jeweiligen Baujahre 1960, 1990 und 2005 – Differenzierung der Gebäudetechnik

4.4.2 Auslegungsoptimierung der Gebäudehülle

Abbildung 52 stellt die Pareto-Bereiche der Referenzmodelle sowie EMS-Modelle der Modernisierung der Gebäudehülle für die Baujahre 1990 und 2005 dar. Während sich die Datenpunkte der Baujahre 1990 und 2005 mehr annähern, als dies bei dem Baujahr 1990 der Fall ist, überlagern sich die Datenpunkte wiederum weniger (vergl. Abbildung 36). Allerdings ist bei den Szenarien mit Baujahr 2005 kaum noch ein Einfluss des EMS erkennbar. Dennoch streuen die Daten etwas mehr und liegen immer noch erkennbar unter dem REF.

Zudem ist eine deutlichere Aufteilung der dominierenden Sanierungsstrategie erkennbar. Im kostengünstigen Bereich dominiert die Maßnahme an der Kellerdecke, während im emissionsärmeren Bereich die Maßnahme an der Außenwand dominiert. Im mittleren Bereich dominieren eher Maßnahmen am Dach.

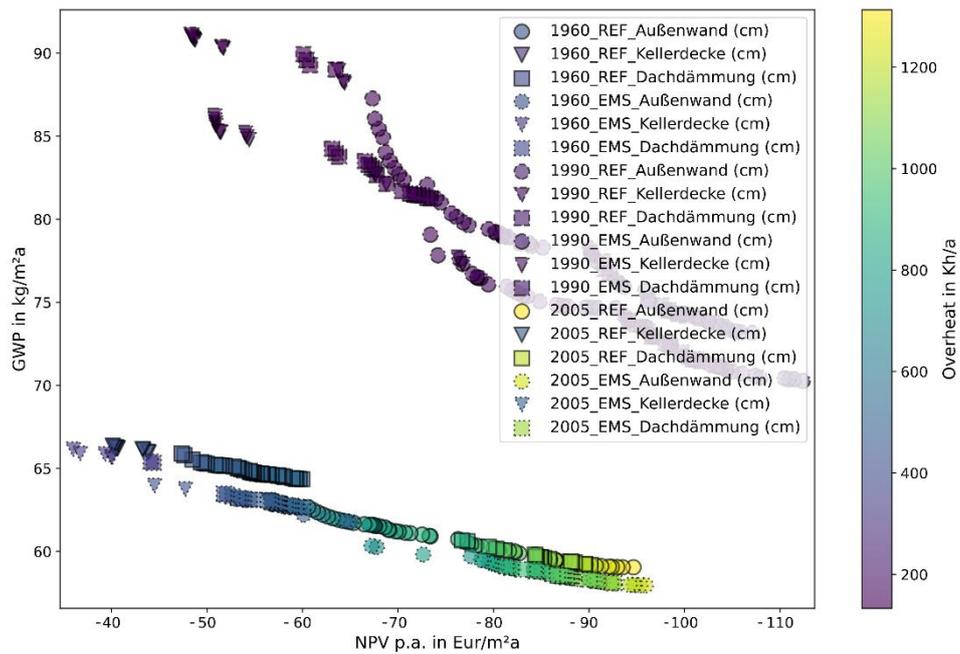


Abbildung 52 Gegenüberstellung der Pareto-Kurven der REF und EMS bei Modernisierung der Gebäudehülle der jeweiligen Baujahre 1960, 1990 und 2005

4.5 Darstellung der Wärmepumpe und deren Einfluss auf die Ergebnisse

Abbildung 53 zeigt im kostengünstigen Abschnitt den Zusammenhang zwischen NPV und dem GWP in Abhängigkeit von der Leistungsauslegung der (Luft-)Wärmepumpe für das Referenzmodell Bj.1990. Zusätzlich sind noch die dominierenden Techniken unterteilt (Markerform), welche direkt oder indirekt mit der Wärmepumpe im Zusammenhang stehen.

Die lila gefärbten Marker zeigen an, dass Konfigurationen mit Wärmepumpe unter 1 tCO₂/a möglich sind, dabei liegt der durchschnittliche Kapitalwert-Verlust über 12000 Eur/a. Die Marker im untersten Bereich der y-Achse zeigen die Konfigurationen mit geringstem Kapitalwert-Verlust. Ihre türkise Färbung steht für Emissionen um die 4 tCO₂/a.

Die nominale Leistung der Wärmepumpe reicht von unter 10 kW bis 28 kW, wobei sich die meisten Konfigurationen im Bereich zwischen 15 und 29 kW sowie 26 kW konzentrieren und damit deutlich über der normierten Heizlast von 12 kW liegen. Der erste Bereich lässt sich noch mit einer Verschiebung der Aufheizung des Speichers in wärmeren Außentemperaturphasen und unter Berücksichtigung des zusätzlichen Trinkwarmwasserbedarfs erklären, wobei durch die Gleichzeitigkeit die Heizlast zunimmt. Dahingegen ist die doppelte Heizleistung der Wärmepumpe nicht nachvollziehbar. Diese Werte scheinen vor allem aufgrund des minimalen GWP vom Genetischen Algorithmus gewählt zu werden. Kompensiert werden die hohen Kosten im niedrigen Kapitalwert-Verlust-Bereich vor allem durch eine PV-Anlage (ca. 3 kW und einem kleinen Warmwasser-Speicher).

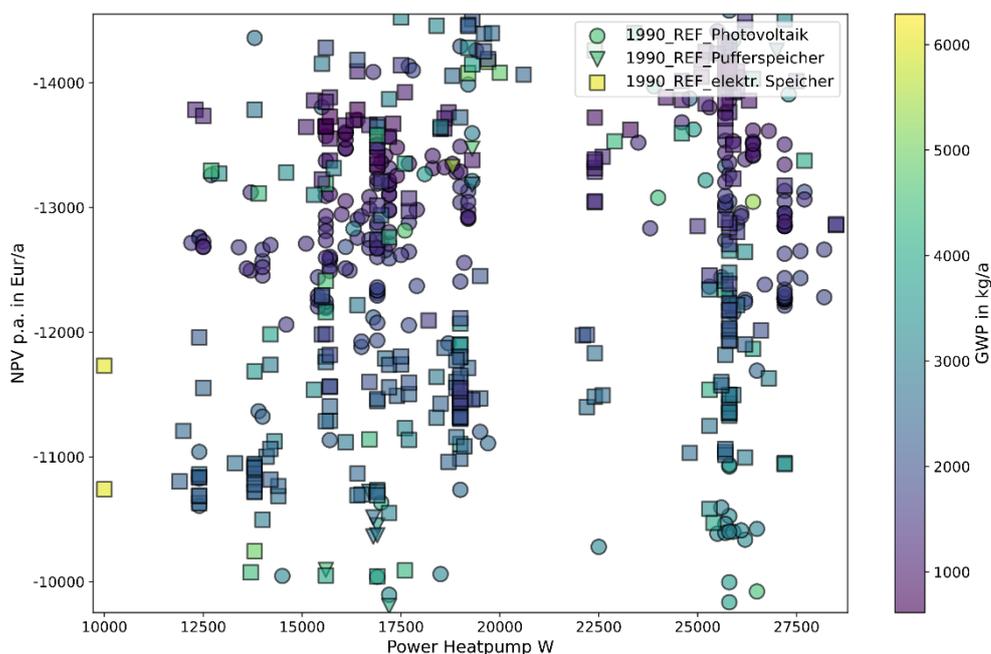


Abbildung 53 NPV und GWP in Abhängigkeit verschiedener Wärmepumpen-Konfigurationen der Gebäudetechnik-Sanierung Bj.1990

Stellt man das Referenz-Modell (Kreise) dem Modell mit Nachtabsenkung (Quadrate) und EMS (Dreiecke) gegenüber (Abbildung 54), zeigt sich eine Verschiebung der algorithmisch bevorzugten Wärmepumpen-Leistung von durchschnittlich 16 kW (türkise Marker) auf 10 kW (blau-violette Marker).

Während der finanzielle Aufwand mit 12000 bis 13000 Eur/a relativ hoch bleibt, um einen Emissionsbereich von 1 tCO₂/a zu erreichen, sind etwas günstigere Konfigurationen unter 10000 Eur/a NPV p.a. möglich.

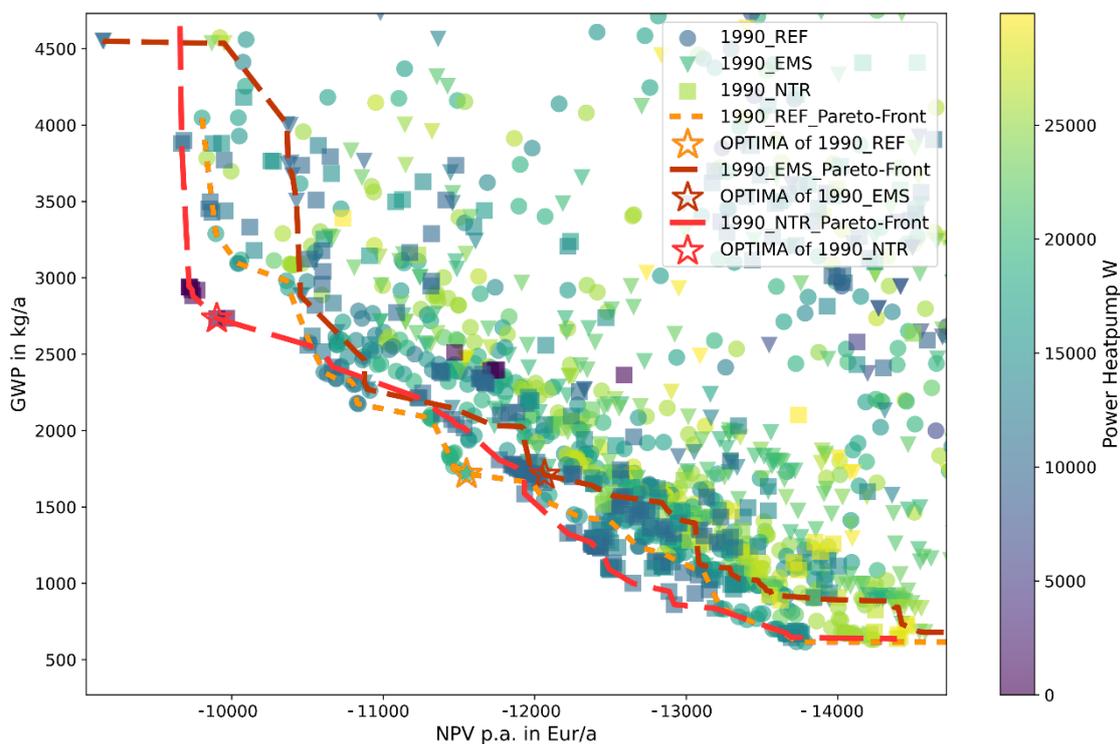


Abbildung 54 Gegenüberstellung GWP und NPV für REF, NTR und EMS in Bezug auf die Wärmepumpen-Dimensionierung Bj.1990

Abbildung 55 zeigt repräsentativ die einzelnen Optima der Wärmepumpen-Konfigurationen für das Baujahr 1990 mit den drei Regelungsstrategien. Von links nach rechts sind der günstigste Kapitalwert (NPV p.a.), die geringsten Emissionen (GWP) und der optimale Mittelwert dargestellt – von oben nach unten die jeweiligen Regelungsstrategien. Die günstigste Konfiguration setzt eher auf kleine PV-Anlagen (2-3 kWp) und Speicher.

Die emissionsärmsten Varianten schaffen mit hohem technischem Aufwand und somit hohen Investitionen sogar die Emissionen auf rund 0,6 tCO₂/a zu reduzieren, was sich in einem hohen negativen Kapitalwert von 14000 bis 16000 Eur/a niederschlägt. Die Wärmepumpe ist dabei stark überdimensioniert (doppelte Heizleistung s.o.) und wird sogar von Fernwärme unterstützt. Die Konfigurationen im euklidischen Bereich fallen dahingegen moderater aus und setzen sich bei allen drei Regelungsstrategien aus Konfigurationen mit elektrischem sowie Wärme-Speicher und Photovoltaik zusammen.

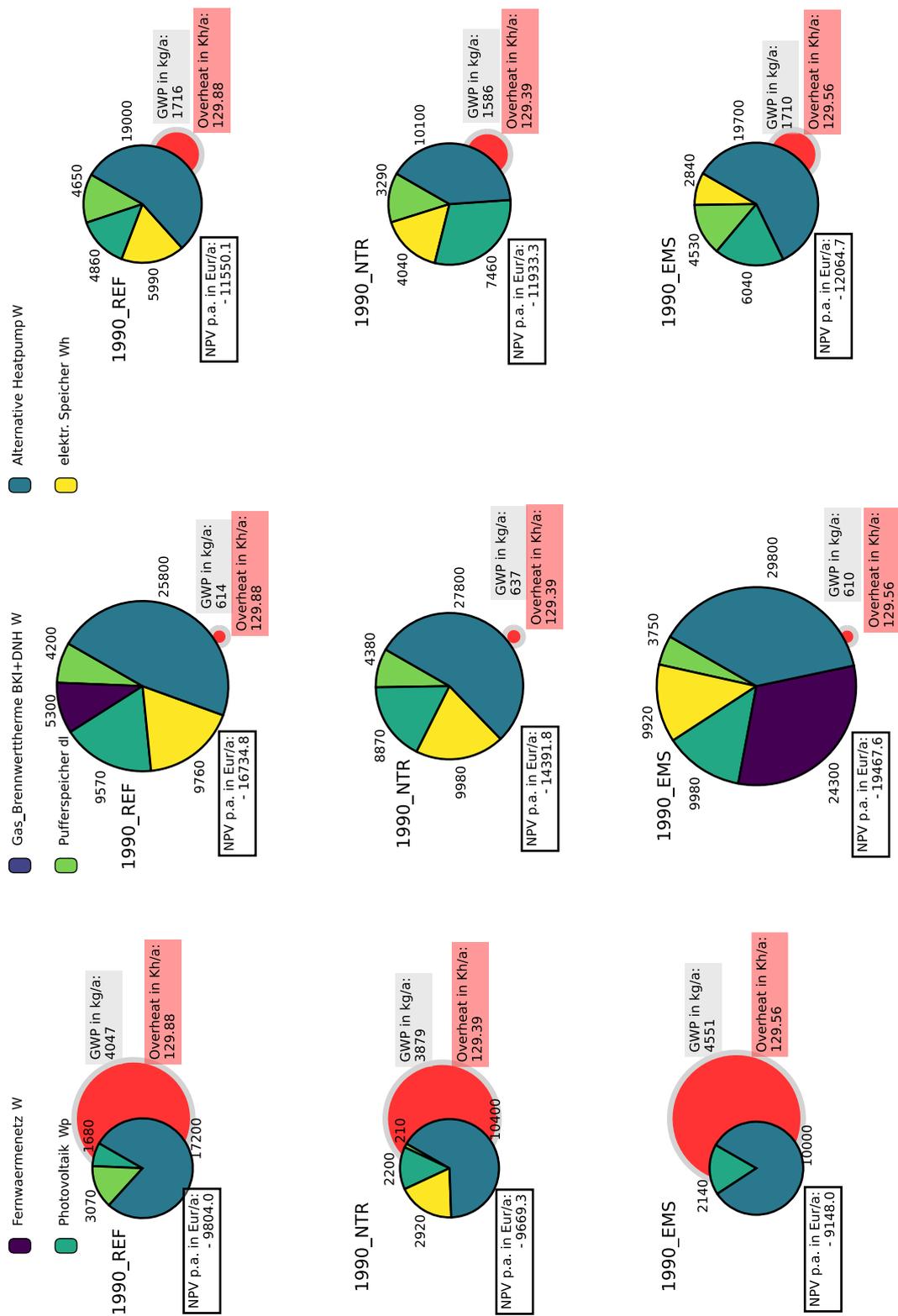


Abbildung 55 Gegenüberstellung der Optima GWP und NPV für REF und NTR in Bezug auf die Wärmepumpen-Dimensionierung Bj.1990

4.6 Sensitive Betrachtungen zu Emissionsfaktor Gas und CO₂-Bepreisung

In den vorangegangenen Untersuchungen wurde stets mit einem CO₂-Faktor von 240 g CO₂äq je kWh Erdgas gerechnet. Berücksichtigt man stattdessen einen CO₂-Faktor für Biogas in Höhe von 140 g CO₂äq je kWh Biogas, ist im Diagramm (Abbildung 56) für das Baujahr 1960 mit EMS und optimierte Auslegung der Gebäudetechnik eine deutliche Reduzierung der Emissionen, um rund 1/3 zu erkennen. Die gelben Dreiecke stellen Konfigurationen mit Erdgas dar und die lila Dreiecke ihr Pendant mit Biogas.

Die Konfigurationen mit biogas-betriebenen Brennwertkessel überlagern sich mit den Konfigurationen mit dominierender Wärmepumpen-Dimensionierung (4 bis 6 t CO₂/a), schaffen es jedoch nicht mit dem Fernwärmenetz und mit der Wärmepumpe Konfiguration bezüglich des GWP zu konkurrieren (< 4 tCO₂).

Allerdings wirft dies neue Fragestellungen für Gebiete ohne Fernwärmenetz auf: Wie verteilen sich die Konfigurationen von Brennwertkessel und Wärmepumpe entlang der Pareto-Kurve? Gibt es pareto-optimale Auslegungen, welche den Betrieb beider Wärmeerzeuger vereint? Oder: worauf sollte bei der Planung zukünftiger Wärmenetze geachtet werden (kommunale Wärmeplanung)?

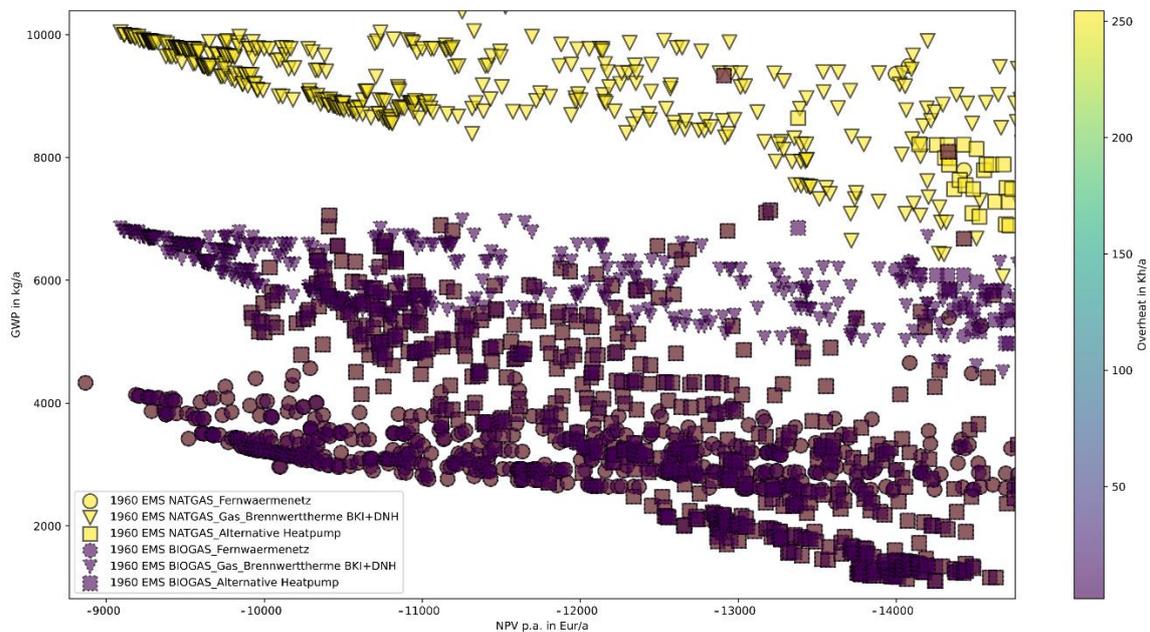


Abbildung 56 Sensitive Betrachtung des CO₂-Faktors für Erdgas und Biogas anhand der Modernisierung Brennwertkessel

Legt man den bisher ermittelten Daten eine Bepreisung der CO₂-Emissionen auf, ist mit einem divergieren der dominierenden anlagenspezifischen Punktwolken zu rechnen. Im oberen Diagramm würden sich die Datenpunktwolken in Abhängigkeit von ihrem GWP-Wert in einen teureren Bereich verschieben. Dies würde sich am stärksten bei Konfigurationen mit Brennwert-Kessel zeigen.

Um den Einfluss der CO₂-Bepreisung besser darzustellen, wurde der zu erwartende durchschnittliche NPV p.a. für die Konfigurationen der drei Wärmeerzeugerarten über eine Reihe von CO₂-Preisen aufgetragen (Abbildung 57). Die optimale Brennwert-Kessel-Konfiguration überschreitet ab ca. 0,75 Eur/kgCO₂ den NPV p.a. der günstigsten Wärmepumpen-Konfiguration. Damit eine Fernwärme-

Konfiguration den durchschnittlichen Kapitalwert der Wärmepumpen-Konfiguration überschreitet, wäre hypothetisch eine Bepreisung von 3,00 Eur/kgCO₂ notwendig.

Stellt man diese Werte den aktuellen Vorgaben des Bundesemissionshandelsgesetzes (BEHG, 2023/22.12.2023) gegenüber, sind die Vorgaben noch weit entfernt davon, einen politisch regelnden Einfluss auf die Anlagenauswahl zu haben. Zum Beispiel legt das BEHG für das Jahr 2025 einen Preis von 55 Eur/tCO₂ fest. Dies entspricht 0,055 Eur/kgCO₂. Allein dieser Wert beträgt 7% des Schnittpunkts von Brennwertkessel- und Wärmepumpen-Konfiguration. Bedenkt man, dass die zusätzlichen CO₂-Kosten auf die Endverbraucher umgelagert werden und deshalb bereits in der Statistik für Brennstoff-Preise und damit in die vorliegenden Simulationen eingegangen sind, reduziert sich der Einfluss auf ca. 10 Eur/tCO₂ (Differenz zum erfassten Jahr 2024 mit einer Vorgabe von 45 Eur/tCO₂). Dies entspricht einem marginalen Einfluss von 1,3 %, welcher noch unter dem des berücksichtigten Preissteigerungsfaktors liegt (6,2 %).

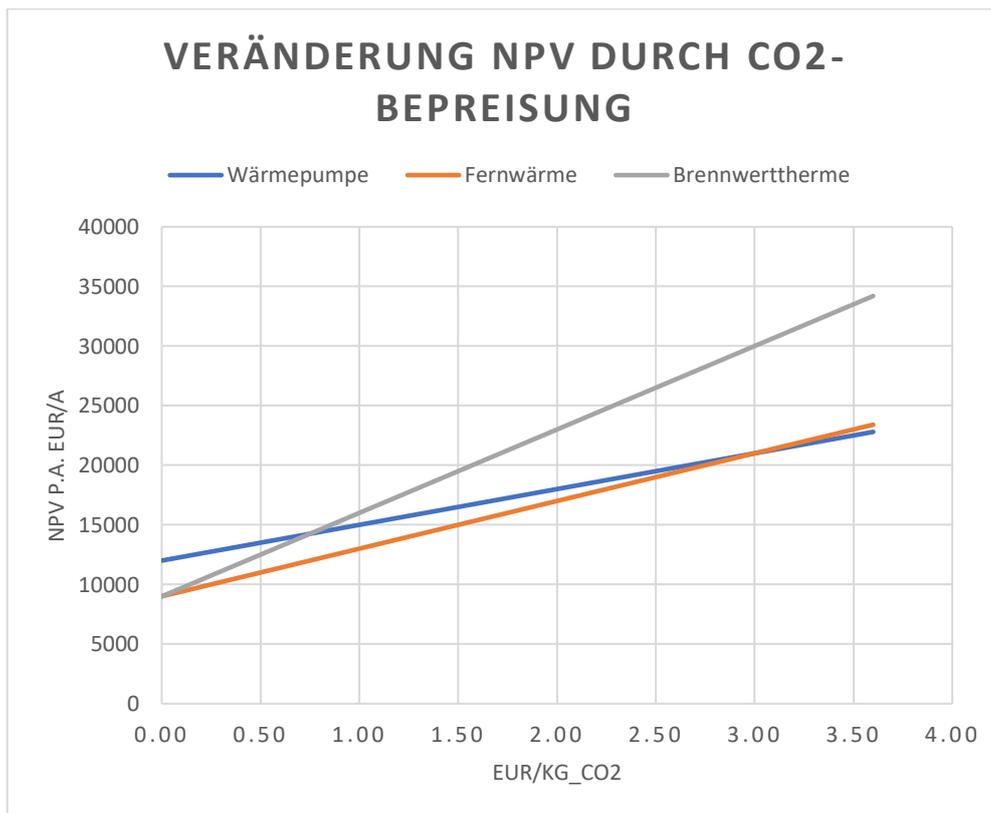


Abbildung 57 Diagramm Beispiel für Veränderung des NPV in Abhängigkeit von CO₂-Bepreisung – Differenzierung der Modernisierung der Gebäudetechnik für Bj.1960

5 Diskussion

5.1 Bewertung der numerischen Modellierung

5.1.1.1 Modellierung des Energiesystems

MTRESS ist ein geeignetes Tool, um Energiesysteme so zu modellieren, dass mithilfe eines MILP-Solvers der optimale Betrieb bilanziert wird. Jedoch ist das Python-Package noch recht allgemein gehalten und für abstraktere Netze, wie Quartiere oder Industrie ausgelegt. Dementsprechend war ein hoher Arbeitsaufwand nötig, um die Komponenten eines Gebäudeenergiesystems in ein MTRESS-Modell zu transferieren. Außerdem befindet sich MTRESS noch in der Entwicklung, sodass dies nicht frei von Fehlern ist und Aktualisierungen stattfinden, die Änderungen bzw. Anpassungen am eigenen Code erfordern. Insgesamt werden aber nachvollziehbare Ergebnisse berechnet. Diese orientieren sich jedoch an einem optimalen Betrieb, welcher in der Realität stark von den Bewohnenden beeinflusst werden kann.

5.1.1.2 Thermal-Building-Model

Das Thermal-Building-Model wurde genutzt, um Wärmeströme in den und aus dem jeweiligen Gebäudetyp zu simulieren. Durch die Integration in MTRESS konnte es sogar als Komponente mit zu optimierenden Innenraumtemperaturen genutzt werden und so ein EMS simuliert werden. Allerdings wurde nicht genauer auf den sommerlichen Wärmeschutz und auf verschiedene Arten der Lüftung eingegangen. Zum einen ist das Thermal-Building-Model ein Ein-Zonen-Model und nicht für die räumlich-spezifische Bestimmung des Sonneneintrags gedacht, zum anderen ist bisher im Thermal-Building-Model nur ein konstanter Lüftungsstrom hinterlegt. Diesen zu variieren und Lüftungstechnik zu berücksichtigen, hätte den Umfang der Untersuchungen stark erweitert.

5.1.1.3 Weitere Technologien und Grenzen der Rechenzeit

Ähnlich verhält es sich mit dem Umfang der untersuchten Maßnahmen: Auf der einen Seite wäre es wünschenswert gewesen, weitere Anlagenkomponenten (u.a. regenerative Energietechnik und Speichertechnologien) zu berücksichtigen. Auf der anderen Seite haben sowohl die internen Energienetzdiagramme als auch die langen Rechenzeiten gezeigt, dass GUROBI als Solver mit der Vielzahl an Optionen an die Grenzen vertretbaren Aufwands stößt.

Dabei wurde das numerische Modell des Energy-Management-Systems schon stark vereinfacht. Zumindest für die Nachtabsenkung wurden die Heizlasten im Voraus berechnet. Die optionale Temperaturspreizung im Thermal-Building-Model musste jedoch während der Optimierung berücksichtigt werden, so dass eine Reduzierung des Rechenaufwands im PreProcessing nicht möglich ist.

Die Vereinfachung des Energy-Management-Systems ist ggf. auch die Ursache für den dessen geringeren Einfluss als in der Einleitung angekündigt (Kap. 1 bzw. (Klitzke, 2024)). Smarte Home Energy Systeme berücksichtigen eben nicht nur gebäudeübergreifend Aktivitätsprofile, sondern können auch raumweise und abhängig von der (Fenster-)Lüftung die Innenraumtemperatur regeln (Q (Bertko & Weber, 2017; Wisser, 2018)).

5.1.1.4 Optimierte Dimensionierung durch den genetischen Algorithmus?

Die Aufgabe des genetischen Algorithmus war es, Modernisierungsmaßnahmen der Gebäudehülle und -technik so zu wählen, dass die resultierenden Ergebnisse möglichst emissionsarm und kostengünstig sind. Jedoch zeigt die Auswertung der Ergebnisse (Kap. 4.2; 4.3; 0), dass sich die Pareto-Kurve, also die optimalen Konfigurationen, vor allem entlang der x-Achse (NPV p.a.) ausgeprägt hat und damit vor allem emissionsarme Konfigurationen berechnet wurden, wohingegen kostengünstigere Konfigurationen (zum Bsp. ohne Maßnahmen an der Gebäudehülle) unberücksichtigt blieben. Numerisch betrachtet sind die Datenpunkte der Sanierungsstrategie „Austausch der Gebäudetechnik“

Teil der Sanierungsstrategie „Gebäudetechnik und -hülle“, da beiden Strategien dieselben Energiesystemkomponenten zugrunde liegen und erstere Sanierungsstrategie stets mit Maßnahmen an der Gebäudehülle mit dem Wert „null“ betrachtet werden könnte. Dennoch enthält der Lösungsdatensatz der Sanierungsstrategie „Gebäudetechnik und -hülle“ keine Konfigurationen, bei dem alle Maßnahmen an der Gebäudehüll mit „null“ initialisiert wurden. Werden jedoch beide Lösungsdatensätze als eine Datenpunktwolke betrachtet, zeigt sich, dass eine weitere Verschiebung der Pareto-Kurve in den kostengünstigeren Bereich möglich sein muss.

Zum einen kann dies an unzureichend generierten Lösungsdatensätzen liegen. In (Kap. 3.6.4) wurde der Umfang der berechneten Konfigurationen auf 2400 festgelegt. In der Auswertung mussten jedoch bis zu 50 % der Konfigurationen aussortiert werden, weil sie entweder durch zeitliche Limitierung nicht berechnet wurden oder unverhältnismäßige Konfigurationen (unzureichende Heizleistung) enthielten auch wenn diese im Vorfeld „bestraft“ wurden (siehe „Penalties“ Kap. 3.6.4).

Zum anderen spielen auch die gewählten Parameter des genetischen Algorithmus und der gewählte Algorithmus selbst eine Rolle bei der ausreichenden Auswahl der Eingangsparameter für das Energiesystem. Zum Beispiel haben die Anzahl der „Islands“ sowie die Generierung der nächsten Generation einen Einfluss auf den Konfigurationsraum (Francesco Biscani et al., 2021; kritika_das, 29 Jul, 2024).

Auch wenn dementsprechend noch viele Möglichkeiten bestehen, das Auswahlverfahren zu optimieren, hat der genetische Algorithmus die Aufgabe erfüllt, einen möglichst breiten Konfigurationsraum zu definieren und lieferte auswertbare Ergebnisse.

5.1.2 Wärmepumpe und Senkung der Vorlauftemperatur

Das Wärmepumpenmodell wirft noch einige Fragen auf, die hier nicht alle im Detail erläutert werden. Auffällig sind zum Beispiel die vielen Datenpunkte, welche Wärmepumpen mit hohen Heizleistungen beinhalten. Dies könnte entweder an der Berücksichtigung von Spitzenlasten liegen, für die eine Wärmepumpe ungeeignet ist, da Spitzenlasten meist dann auftreten, wenn die Wärmepumpe am wenigsten Umweltenergie zur Verfügung hat. Auf der anderen Seite wäre es auch möglich, dass der integrierte Heizstab mit direktem Stromverbrauch einen zu negativen Effekt auf die CO₂-Bilanz der Konfiguration hat. Da der genetische Algorithmus in Richtung beider Performance-Indikatoren (NPV und GWP) optimiert, stellen für ihn so Ergebnisse mit überdimensionierten Wärmepumpen immer noch einen, wenn auch extremen, Lösungsraum dar.

Dennoch liefert das Wärmepumpenmodell als monoenergetische bivalente Luft-Wärmepumpe valide Ergebnisse. Dies zeigen die Konfigurationen mit konventionellen moderaten Dimensionen, welche mit der simulierten Heizlast übereinstimmen.

Inwieweit die stündliche Auflösung des COP der Wärmepumpe zu einer Erhöhung der Rechenzeit beiträgt, lässt sich schwer beurteilen, da das letzte DLR-interne MTRESS-Update mit einem detaillierteren Warmwasserspeicher zu einer wesentlichen Erhöhung der Rechenzeit beigetragen hat.

5.1.3 Temperatur

Da im PostProcessing nur Jahreswerte ausgegeben werden, ist es schwierig nachzuvollziehen, wie sich die verschiedenen variablen Temperaturen über das Jahr verhalten. Eine Auflösung der Zeitreihen verschiedener Parameter könnte mehr Aufschluss über die Wirkweise der bisherigen Regelungsstrategien geben.

5.2 Kritische Betrachtungen

5.2.1 der Ergebnisse

Festzuhalten ist, dass Gebäude in der Realität in ihren Formen so komplex sind, dass aus den Ergebnissen keine konkreten Sanierungsmaßnahmen abgelesen werden können. Aber die Ergebnisse zeigen Tendenzen auf, die für zukünftige Planungen eine Rolle spielen könnten. Außerdem lassen sie einen Einfluss der temperatursteuernden Regelungsstrategien erkennen, der allerdings stark abhängig von den gewählten Sanierungsmaßnahmen abhängt.

Es wird sichtbar, dass Gebäudenetze bzw. Fernwärmenetze mit niedrigen CO₂-Zertifikaten einen Emissions-Vorteil gegenüber Einzelfeuerungsanlagen wie Brennwärkesseln haben, sowie einen Kosten-Vorteil gegenüber Wärmepumpen.

Die sich verändernden Konfigurationen über die Baujahre hinweg erscheinen logisch. Neuere Gebäude in der Datenbank haben bereits eine bessere Gebäudehülle mit weniger Transmissionswärmeverlusten, weshalb sich die Pareto-Kurve sowohl geringeren Kosten als auch Emissionen annähert.

So zeigt zum Beispiel die Untersuchung der Fenster, dass unter Aspekten des NPV und GWP eine Auswahl der besseren Variante mit besserem U- und g-Wert sinnvoll ist. Dabei ist jedoch nicht der Sommerliche Wärmeschutz zu vernachlässigen.

Außerdem zeigen die Ergebnisse, dass eine Sanierung der Außenwand in Kombination mit der Dämmung der Kellerdecke und einer Nachtabsenkung bereits einen wesentlichen Einfluss auf die Emissionen haben, ohne viel Investitionskosten zu verursachen. Dies ist insofern nachvollziehbar, da die Kostenfunktionen für Maßnahmen am Dach wesentlich teurer sind (siehe Anhang).

Allgemein decken sich die ermittelten Ergebnisse ungefähr mit dem Schlusswort aus (Hinz & Enseling, 2018): Der durchschnittliche Verbrauch lässt sich um den Faktor 10 „in energietechnisch modernisierten Gebäuden wirtschaftlich und gesellschaftspolitisch [...] reduzieren“. Bezieht man sich auf die Ergebnisse für Bj.1960, ist eine mögliche Reduzierung der Emissionen auf 10 % (1,8 tCO₂/a) nachgewiesen. Für die Kosten lässt sich das nicht bestätigen.

Zudem können die berechneten Konfigurationen einen Einfluss von bis zu 10 % durch eine gebäudeweite Innenraumtemperaturregelung erreichen, was zumindest der Hälfte der präsentierten 20 % Einfluss der Regelungstechnik entspricht (siehe Kap.1 Einleitung und (Klitzke, 2024)). Da jedoch die Rechenmodelle und Annahmen der Quelle nicht bekannt sind, ist ein Vergleich nur schwer möglich.

5.2.2 der Methodik

Die Kostenfunktionen der Gebäudehülle basieren auf einem alten Datensatz (Hinz, 2015) und wurden in dieser Arbeit bereits in zweiter Folge mit Preissteigerungsfaktoren von 2021 auf 2024 umgerechnet (vergl. Kostenfunktionen in 3.3.3). Es empfiehlt sich die Verwendung neuerer Kostendaten, da sich in den letzten Jahren nicht zuletzt durch diverse Krisen die Kosten verändert haben. Davon unabhängig ist aber die Methode der Kostenevaluation und deren Anpassung weiterhin anwendbar.

Das Thema dieser Arbeit bringt die Notwendigkeit der Berücksichtigung vieler Eingangsparameter mit. Dementsprechend hätte eine Reduzierung der Modelle ggf. zu schnelleren Ergebnissen mit gleichem Aussagegehalt geführt. Zum Beispiel stellt sich die Frage, ob für eine erste Untersuchung nicht auch abstrakte Parameter wie die Variation des spezifischen Transmissionswärmeverlusts und ein Wärmepumpenmodell mit JAZ statt COP ausreichend sind. Demgegenüber steht die Detailschärfe. Auch wenn bereits Vereinfachungen vorgenommen wurden, sind in den Untersuchungen Tendenzen

bezüglich unterschiedlicher Maßnahmen an der Gebäudehülle und der Gebäudetechnik herausgearbeitet worden.

Hier stellt sich wiederum die Frage, an wen sich die Ergebnisse adressieren: Sind Eigenheimbesitzende oder doch eher Unternehmen angesprochen oder sogar politische Entscheidungsgremien bezüglich Fördermittel? Fördermittel sind nicht Gegenstand der Untersuchungen und fließen deshalb nur kurz in den Ausblick mit ein.

Letztendlich wird hier ein möglicher Ansatz aufgezeigt, wie die energetische Modernisierung des deutschen (oder auch europäischen) Gebäudebestands simuliert und optimale Maßnahmen gefunden werden können. Dieser Ansatz ist ausbaufähig, zeigt aber deutlich Tendenzen, wie mit dem Sanierungsrückstand von Einfamilienhäusern der Gebäudealtersklasse mit den höchsten Emissionen verfahren werden sollte. Außerdem ist der Ansatz auf alle Gebäude der Datenbank des Forschungsprojekts TABULA/EPISCOPE übertragbar – und damit sowohl auf Mehrfamilienhäuser als auch auf andere europäische Länder (Ballarini et al., 2014; Loga, 2015b).

6 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde der Einfluss von Energy Management Systemen in Form von Innenraumtemperaturregelung bei Einfamilienhäusern unter Berücksichtigung verschiedener Sanierungsstrategien berechnet und nachgewiesen. Es wurden gängige Arten der Wärmebereitstellung und der energetischen Modernisierung der Gebäudehülle mit einem genetischen Algorithmus dimensioniert, mit dem Ziel möglichst emissionsarme und kostengünstige Konfigurationen zu erreichen. Dabei wurden auch Maßnahmen zur Senkung der Vorlauftemperatur berücksichtigt und ein Wärmepumpenmodell mit stundengenauer Auflösung integriert sowie die Überhitzung der Gebäude in Übertemperaturgradstunden betrachtet.

Die Ergebnisse der pareto-optimalen Varianten der Modernisierung der Gebäudetechnik unterstreichen deutlich, dass der moderne Brennwertkessel, selbst mit Biogas, keine Alternative mehr zur Fernwärme mit biogenen Brennstoffen ist. Nur auf der Kostenebene sind Konfigurationen mit Wärmepumpe teuer als Konfigurationen mit Brennwertkessel. Umso nachvollziehbarer ist es, dass die Bundesregierung den Ausbau kommunaler Wärmenetze vorantreibt. Dagegen zeigt die sensitive Untersuchung der CO₂-Bepreisung, dass die steigenden CO₂-Kosten einen geringen Anteil an den jährlichen Gesamtkosten haben (1 %), so dass dies keinen regulierenden Effekt auf die Auswahl der Gebäudetechnik haben sollte. Anders verhält es sich mit den Fördermitteln, welche aktuell für einen „Heizungstausch“ bereitgestellt werden (BEG 2024). Je nach Ausgangssituation werden bis zu 70 % der Kosten einer Wärmepumpenanlage bezuschusst (ebd.). Dies ist auch notwendig, damit eine Wärmepumpen-Konfiguration mit anderen Wärmeerzeugern konkurrieren kann und wird als effektive Maßnahme zur CO₂-Reduktion im Gebäudesektor eingeschätzt (Haufe, 2024).

Zudem hat sich im kostengünstigen Konfigurationsbereich der Maßnahmen an der Gebäudehülle gezeigt, dass die Integration einer aktivitätsbasierten Regelung der Innenraumtemperatur zusätzlich zur Einsparung von Emissionen und Kosten beiträgt. Dabei müssen die Gebäude der Gebäudealtersklasse 1960 nicht erst den Passivhaus-Standard erreichen, sondern es reicht eine durchschnittliche Reduktion des spezifischen Transmissionswärmeverlusts um 0,65 W/m²K, wobei die Sanierung von Fenstern zu bevorzugen ist.

Bei der Berücksichtigung von Modernisierungsmaßnahmen sowohl an der Gebäudehülle als auch an der Gebäudetechnik wurde für über 60 Jahre alte Gebäude gezeigt, dass Energy Management den höchsten Einfluss sowohl bereits bei der Planung (Umfang der Sanierungsmaßnahmen) als auch bei dem Gebäudebetrieb haben. Insgesamt ist der Einfluss auf die Reduktion der CO₂-Emissionen größer als auf die Kosten (durchschnittlicher Kapitalwert).

Um jedoch zu emissionsärmeren Sanierungen zu motivieren, ist eventuell mehr als nur eine pauschale Förderung nach BEG 2024 nötig. Es wurde gezeigt, dass vor allem der unsanierte Gebäudebestand mit Baujahr zwischen 1958 bis 1978 den höchsten Anteil am deutschen Heizwärmebedarf der Einfamilienhäuser hat. Ggf. bedarf es zum einen einer speziellen Adressierung und Aufklärung. Zum anderen ist die Definition der Worst-Performing-Building Klasse (BEG 2024) mit 5 % Förderbonus, unter Umständen nicht ausreichend, um zu einem klimaneutralen 2035 beizutragen.

Auf der numerischen bzw. modellierten Ebene hat sich gezeigt, dass das bisherige Modell ein umfangreiches Tool ist, was noch viel Potenzial für weitere Entwicklung und Untersuchungen bietet. Es wäre möglich sowohl regenerative Energiesysteme als auch Lüftungssysteme zu integrieren sowie (ökologische) Baustoffe differenzierter zu betrachten. Zudem wäre auch die Untersuchung des Einflusses der bauphysikalischen Eigenschaften von Baustoffen auf die Gebäudemasse und damit auf die Wärmespeicherfähigkeit und auf die Regelungsstrategien interessant.

Literaturverzeichnis

DIN 4108-2:2013-02: DIN 4108-2:2013-02 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz.

DIN EN ISO 14040:2021-02: DIN EN ISO 14040:2021-02 + A1:2020 Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen.

DIN EN ISO 14044:2021-02: DIN EN ISO 14044:2021-02 Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020.

DIN EN ISO 13790, 2008-09: Energieeffizienz von Gebäuden - Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung (ISO 13790:2008); Deutsche Fassung.

2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (2013). 2013 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC 2013). Manchester, 13.10.2013 - 16.10.2013: IEEE.

TABULA WebTool (2017). Online verfügbar unter webtool.building-typology.eu, zuletzt geprüft am 14.11.2024.

ASR A3.5, 2022: ASR A3.5 Raumtemperatur Technische Regel für Arbeitsstätten. Online verfügbar unter <https://www.baua.de/DE/Angebote/Regelwerk/ASR/ASR-A3-5>.

www.ubakus.de (2024). Online verfügbar unter www.ubakus.de, zuletzt geprüft am Juli 2024.

Acampora, Giovanni; Kaymak, Uzay; Loia, Vincenzo; Vitiello, Autilia (2013): Applying NSGA-II for Solving the Ontology Alignment Problem. In: 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. 2013 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC 2013). Manchester, 13.10.2013 - 16.10.2013: IEEE, S. 1098–1103.

Ballarini, Ilaria; Corgnati, Stefano Paolo; Corrado, Vincenzo (2014): Use of reference buildings to assess the energy saving potentials of the residential building stock: The experience of TABULA project. In: *Energy Policy* 68, S. 273–284. DOI: 10.1016/j.enpol.2014.01.027.

BauNetz (2024): Sonnenschutz: Sonnenschutzgläser. Hg. v. BauNetz. Online verfügbar unter www.baunetzwissen.de, zuletzt aktualisiert am 08.12.2024.

BBSR (2019): Leitfaden Nachhaltiges Bauen. Zukunftsfähiges Planen, Bauen und Betreiben von Gebäuden. Unter Mitarbeit von Stadt und Raumforschung (BBSR) Im Bundesinstitut für Bau. Hg. v. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI). Online verfügbar unter https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/publikationen/BBSR_LFNB_D_190125.pdf.

BBSR DWD (2017): Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse. Online verfügbar unter https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2013/testreferenzjahre/try-handbuch.pdf?__blob=publicationFile&v=, zuletzt geprüft am 14.11.2024.

BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2024): *Energiewirtschaftliche Entwicklung in Deutschland 1. Quartal 2024 IINX5EY*. Hg. v. BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (Ausgabe: I/2024). Online verfügbar unter <https://www.bdew.de/service/anwendungshilfen/quartalsberichte/>.

BEHG (2023): Gesetz über einen nationalen Zertifikatehandel für Brennstoffemissionen (Brennstoffemissionshandelsgesetz - BEHG). BEHG, vom 22.12.2023.

Bertko, Chris; Weber, Tobias (2017): Home, Smart Home. Der praktische Einstieg in die Hausautomation. Inkl. Marktüberblick: AVM, Belkin, Fibaro, Gigaset, HomeMatic, SCHWAIGER u.v.m. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.

BEW (2024): Pflichtveröffentlichungen zur Fernwärme. Hg. v. Berliner Energie und Wärme, zuletzt geprüft am 08.11.2024.

BEW Berliner Energie und Wärme AG (2024): Technische Anschlussbedingungen (TAB) für den Anschluss an Wärmenetze. Hg. v. BEW Berliner Energie und Wärme AG. Online verfügbar unter <https://www.bew.berlin/binaries/content/assets/website/warme/fernwarme/technische-anschlussbedingungen-tab.pdf>.

Brand, Ulrich; Wissen, Markus (2017): Imperiale Lebensweise. Zur Ausbeutung von Mensch und Natur im globalen Kapitalismus. München: oekom verlag. Online verfügbar unter <https://www.perlen-taucher.de/buch/ulrich-brand-markus-wissen/imperiale-lebensweise.html>.

Bühl, Achim (2009): Auf dem Weg zur biomächtigen Gesellschaft? Chancen und Risiken der Gentechnik. 1. Aufl. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften (VS Research).

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2024): Mi, 15.05.2024 11:30 - 13:00 Vor Ort: Raum D Dieses Event findet in Präsenz in Berlin statt Dieses Event ist kostenfrei iCal Wärmepumpe als Teil des digitalisierten Gebäudes – Herausforderungen und Chancen in der Umsetzung. EUMB Pöschk GmbH & Co. KG. Ludwig Erhard Haus, 15.05.2024.

Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (2023): ÖKOBAUDAT Informationsportal Nachhaltiges Bauen. Online verfügbar unter <https://oekobaudat.de/>.

Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (2024): Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden. Gebäudeenergiegesetz - GEG Anlage 7 (zu § 48). Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/geg/anlage_7.html, zuletzt geprüft am 08.11.2024.

Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (2024): Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden* (Gebäudeenergiegesetz - GEG) Anlage 9 (zu § 85 Absatz 6) Umrechnung in Treibhausgasemissionen. Gebäudeenergiegesetz - GEG Anlage 9 (zu § 85 Absatz 6). Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/geg/anlage_9.html, zuletzt geprüft am 14.11.2024.

Bundesnetzagentur (2023): EEG-Förderung und -Fördersätze. Fördersätze – Einspeisevergütung, vom § 21 Abs. 1, § 53 Abs. 1 EEG. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/ErneuerbareEnergien/EEG_Foerderung/start.html, zuletzt geprüft am 14.11.2024.

Christian Piazzi (2019): Grundlagen Genetische Algorithmen. Online verfügbar unter <https://www.modius-techblog.de/grundlagen-genetische-algorithmen/>, zuletzt geprüft am 08.12.2024.

CLAGE (2023): Fachinformation und Praxistipps für die Energieberatung. Online verfügbar unter <https://www.clage.com/de/Mediacenter/f9d1152547c0bde01830b7e8bd60024c/CLAGE-Fachinfo-Energieberatende.pdf>, zuletzt geprüft am 08.11.2024.

Deb, K.; Pratap, A.; Agarwal, S.; Meyarivan, T. (2002): A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. In: *IEEE Trans. Evol. Computat.* 6 (2), S. 182–197. DOI: 10.1109/4235.996017.

Deutsche Rockwool Mineralwoll GmbH & Co. OHG (2024): ROCKWOOL Steinwolle-Dämmstoffe im mittleren Rohdichtebereich. Unter Mitarbeit von Daxner & Merl GmbH. Hg. v. Institut Bauen und Umwelt e. V.

Dominik Hochwarth (2024): Was ist die optimale Raumtemperatur?, zuletzt aktualisiert am 03.11.2024, zuletzt geprüft am 10.11.2024.

energie-experten.org (2024): Jahresarbeitszahl von Wärmepumpen: Kennzahlen & Berechnung. Online verfügbar unter <https://www.energie-experten.org/heizung/waermepumpe/leistung/jahresarbeitszahl>, zuletzt aktualisiert am 21.10.2024, zuletzt geprüft am 08.11.2024.

EPPA - European PVC Window Profiles and Related Building Products Association (2022): Kunststofffenster mit 3-Scheiben-Isolierglas. Unter Mitarbeit von Institut Bauen und Umwelt e. V. Hg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung.

Evans, Simon (2021): Analysis: Which countries are historically responsible for climate change? Hg. v. Carbon Brief. Online verfügbar unter <https://www.carbonbrief.org/analysis-which-countries-are-historically-responsible-for-climate-change/>, zuletzt aktualisiert am 05.10.2021, zuletzt geprüft am 11.11.2024.

FMI Fachverband Mineralwolleindustrie e.V. (2023): Mineralwolle-Dämmstoff im mittleren Rohdichtebereich. Unter Mitarbeit von Institut Bauen und Umwelt e. V. und Daxner & Merl GmbH. Hg. v. Institut Bauen und Umwelt e. V.

Francesco Biscani; Dario Izzo; Wenzel Jakob; Giacomo Acciarini; Marcus Märtens; michiboo et al. (2021): esa/pagmo2: pagmo 2.17.0: Zenodo.

Fraunhofer ISE (2019): Wärmepumpen in Bestandsgebäuden: Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt "WPsmart im Bestand" (Abschlussbericht).

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP (2024): Ökobilanzierung. Eine Methodik für den gesamten Lebensweg.

goClimate (2024): Emissionen im Gebäudesektor: Klimaschutz für Gebäude.

Gurobi Optimization (2024): Gurobi Optimizer version 11.0.3 build v11.0.3rc0 (win64 - Windows 11.0 (22631.2)). Version 11.0.3 build v11.0.3rc0 (win64 - Windows 11.0 (22631.2)): Gurobi Optimization. Online verfügbar unter <https://www.gurobi.com/>, zuletzt geprüft am 14.11.2024.

GUTEX Holzfaserplattenwerk H. Henselmann GmbH + Co KG (2020): Holzfaserdämmplatten. Unter Mitarbeit von Sphera Solutions GmbH. Hg. v. Institut Bauen und Umwelt e. V.

Hancock, Cody; Klement, Peter; Schmeling, Lucas; Hanke, Benedikt; Maydell, Karsten von (2023): Optimization of the refurbishment of German single family homes based on construction era. DOI: 10.36227/techrxiv.23040857.v1.

Hancock, Cody; Klement, Peter; Schmeling, Lucas; Hanke, Benedikt; Maydell, Karsten von (2023): Optimization of the refurbishment of German single family homes based on construction era.

Hancock, Cody James (2022): Optimization of Building Envelope and Energy System.

Haufe (2024): CO₂-Reduktion im Gebäudesektor: Greenwashing oder auf Kurs? Klimaschutzbericht. Unter Mitarbeit von Online Redaktion.

Hillen, Maximilian; Schönfeldt, Patrik; Groesdonk, Philip; Hoffschmidt, Bernhard (2024): Integration of a Europe-wide public building database with retrofit strategies and a thermal inertia model into an open-source optimization framework. In: *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 1363 (1), S. 12013. DOI: 10.1088/1755-1315/1363/1/012013.

- Hilpert, S.; Kaldemeyer, C.; Krien, U.; Günther, S.; Wingenbach, C.; Plessmann, G. (2018): The Open Energy Modelling Framework (oemof) - A new approach to facilitate open science in energy system modelling. In: *Energy Strategy Reviews* 22, S. 16–25. DOI: 10.1016/j.esr.2018.07.001.
- Hilpert, Simon; Günther, Stephan; Kaldemeyer, Cord; Krien, Uwe; Plessmann, Guido; Wiese, Frauke; Wingenbach, Clemens (2017): Addressing Energy System Modelling Challenges: The Contribution of the Open Energy Modelling Framework (oemof).
- Hinz, Eberhard (2015): Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten. Endbericht. Unter Mitarbeit von Eberhard Hinz, Institut Wohnen und Umwelt. Hg. v. Institut Wohnen und Umwelt. Darmstadt (ISBN-Nr.: 978-3-941140-50-9).
- Hinz, Eberhard; Enseling, Andreas (2018): Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit in der Gebäudemodernisierung. Unvereinbarer Widerspruch oder eine Frage der Sichtweise? Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Höfner, Anja; Frick, Vivian (Hg.) (2019): Was Bits und Bäume verbindet. Digitalisierung nachhaltig gestalten : Bits & Bäume, die Konferenz für Digitalisierung und Nachhaltigkeit, Technische Universität Berlin im November 2018. Gesellschaft für Ökologische Kommunikation mbH. München: oekom verlag. Online verfügbar unter http://www.content-select.com/index.php?id=bib_view&ean=9783962386368.
- Hörmann KG Brockhagen (2020): Door - Hörmann KG Brockhagen - Industrial sectional doors in polyurethane. Unter Mitarbeit von ift Rosenheim GmbH. Hg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR).
- Industrieverband Hartschaum e.V., I. V.H. (2022): EPS-Hartschaum (grau, Rohdichte 15 kg/m³). Unter Mitarbeit von Sphera Solutions GmbH. Hg. v. Institut Bauen und Umwelt e. V.
- Institut für Energietechnik der TU Dresden (2023): CO2 Zertifikat. Hg. v. Vattenfall Wärme Berlin AG.
- Institut für Energietechnik der TU Dresden (2024): CO2 Zertifikat. Hg. v. BEW Berliner Energie und Wärme AG.
- Jochum, Patrick (2016): Einfluss von Erntefaktor und Dämmindex auf die aus gesamtenergetischer Sicht maximal sinnvolle Dämmdicke. In: *Bauphysik* 38 (5), S. 285–292. DOI: 10.1002/bapi.201610034.
- Jochum, Patrick (2016): Einfluss von Erntefaktor und Dämmindex auf die aus gesamtenergetischer Sicht maximal sinnvolle Dämmdicke. In: *Bauphysik* 38 (5), S. 285–292. DOI: 10.1002/bapi.201610034.
- John Forrest; Ted Ralphs; Stefan Vigerske; Haroldo Gambini Santos; Lou Hafer; Bjarni Kristjansson et al. (2024): coin-or/Cbc: Release releases/2.10.12: Zenodo.
- KÄLTE-KLIMA GmbH (2024): Die neue F-Gase-Verordnung. Online verfügbar unter https://www.kaelte-klima-gmbh.de/_news/99.htm.
- Klein, Oliver; Schlenger, Jörg (2018): Raumconditionierung. Basel: Birkhäuser (Basics Haustechnik).
- Klitzke, Lars (2024): Wärmepumpe als Teil des digitalisierten Gebäudes – Praxisperspektiven aus Sicht der Planer. EUMB Pöschk GmbH & Co. KG. Ludwig-Erhard-Haus, 15.05.2024.
- Koch, Thilo (2021): Anpassung der Kostenfunktionen energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten auf das Preisniveau 2020. Werkstattbericht. Unter Mitarbeit von Thilo Koch, Samuel Achenbach, André Müller. Hg. v. Institut Wohnen und Umwelt. Darmstadt.
- Kreidelmeyer, Sven: Strompreisprognose.

Krien, Uwe; Schönfeldt, Patrik; Launer, Jann; Hilpert, Simon; Kaldemeyer, Cord; Pleßmann, Guido (2020): oemof.solph—A model generator for linear and mixed-integer linear optimisation of energy systems. In: *Software Impacts* 6, S. 100028. DOI: 10.1016/j.simpa.2020.100028.

kritika_das (29 Jul, 2024): Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm 2 (NSGA-II), zuletzt aktualisiert am 29 Jul, 2024, zuletzt geprüft am 08.12.2024.

Loga, Tobias (2015): Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden ; erarbeitet im Rahmen der EU-Projekte TABULA - "Typology approach for building stock energy assessment", EPISCOPE - "Energy performance indicator tracking schemes for the continuous optimisation of refurbishment processes in European housing stocks". 2., erw. Aufl. Darmstadt: IWU. Online verfügbar unter http://www.building-typology.eu/downloads/public/docs/brochure/DE_TABULA_TypologyBrochure_IWU.pdf.

Loga, Tobias (2015): Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden ; erarbeitet im Rahmen der EU-Projekte TABULA - "Typology approach for building stock energy assessment", EPISCOPE - "Energy performance indicator tracking schemes for the continuous optimisation of refurbishment processes in European housing stocks". 2., erw. Aufl. Darmstadt: IWU. Online verfügbar unter http://www.building-typology.eu/downloads/public/docs/brochure/DE_TABULA_TypologyBrochure_IWU.pdf.

Marion Wingenbach; geb. Christ: Integration sozial-ökologischer Faktoren in die Energiesystemmodellierung.

NABU et. al. (2020): Gemeinsamer Aufruf: Den ganzen Lebenszyklus beim Bauen in den Blick nehmen.

oemof-developer-group (2024): User's guide. Add components to the energy system. Hg. v. oemof-developer-group. Online verfügbar unter <https://oemof-solph.readthedocs.io/en/stable/user-guide.html#add-components-to-the-energy-system>.

Öko-Institut e.V. (2024): Energiewende in Deutschland: Definition, Ziele und Geschichte. Energiewende und Klimaschutz – heute und in Zukunft.

Pflugradt, Noah Daniel (2016): Modellierung von Wasser- und Energieverbräuchen in Haushalten. Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz, Institut für Mechanik und Thermodynamik, Chemnitz, 2016. Dissertation. Technischen Universität Chemnitz, Chemnitz. Institut für Mechanik und Thermodynamik. Online verfügbar unter <https://loadprofilegenerator.de/>.

Phil R., www.dein-heizungsbauer.de: Heizung einbauen: Kosten für Installation und Inbetriebnahme.

Pieper, Henrik; Ommen, Torben; Elmegaard, Brian; Volkova, Anna; Markussen, Wiebke Brix (2020): Optimal Design and Dispatch of Electrically Driven Heat Pumps and Chillers for a New Development Area. In: *Environmental and Climate Technologies* 24 (3), S. 470–482. DOI: 10.2478/rtuct-2020-0117.

pure asset (2024): Beeinflussbarkeit der Betriebskosten im Planungsprozess. Online verfügbar unter <https://www.pure-asset.de/wp-content/uploads/2020/08/Graph-Beeinflussung-Optimierung3-1.jpg>.

QKE - Qualitätsverband Kunststoffherzeugnisse e.V. (2022): Kunststofffenster mit 2-Scheiben-Isolierglas. Unter Mitarbeit von Institut Bauen und Umwelt e. V. Hg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung.

Recknagel, Sprenger, Schramek (2007): Heizflächenauslegung bei Heizkörperheizungen. Online verfügbar unter http://www.bosy-online.de/hydraulischer_abgleich/heizflaechenauslegung_recknagel.pdf, zuletzt geprüft am 08.11.2024.

Rexroth, Susanne (Hg.) (2014): Wärmedämmung von Gebäuden. Zeitgemäß und wandlungsfähig. Berlin: VDE-Verl. (Das Gebäude).

Robert E. Bixby (2012): A Brief History of Linear and Mixed-Integer Programming Computation. Hg. v. Documenta Mathematica · Extra Volume ISMP (2012) (Documenta Mathematica · Extra Volume ISMP (2012)).

Rubner Türen GmbH (2022): Door - Rubner Türen GmbH - Wood front door. Unter Mitarbeit von ift Rosenheim GmbH. Hg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung.

Schmeling, Lucas; Schönfeldt, Patrik; Klement, Peter; Wehkamp, Steffen; Hanke, Benedikt; Agert, Carsten (2020): Development of a Decision-Making Framework for Distributed Energy Systems in a German District. In: *Energies* 13 (3), S. 552. DOI: 10.3390/en13030552.

Schmid, Christoph (2020): Heizung/Lüftung/Elektrizität. Energietechnik im Gebäude. Unter Mitarbeit von Thomas Baumgartner, Christof Bucher, Jürg Nipkow, Christian Vogt und Jobst Willers. 6. Auflage. Zürich: vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich (Bau & Energie).

Schönfeldt, Patrik; Schlüters, Sunke; Upadhaya, Ajay; Oltmanns, Keno (2024): Model Template for Residential Energy Supply Systems (MTRESS): Zenodo.

Schulz, Marion; Westkämper, Hubert (2023): Das neue Heizen. Effizient, nachhaltig, ressourcenschonend - aktuelle Standards und Trends bei Wärmeerzeugung und Warmwasserbereitung. 2. Auflage. Rastede: ökobuch.

Schütz, Thomas; Schiffer, Lutz; Harb, Hassan; Fuchs, Marcus; Müller, Dirk (2017): Optimal design of energy conversion units and envelopes for residential building retrofits using a comprehensive MILP model. In: *Applied Energy* 185, S. 1–15. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.10.049.

Seifert, Joachim (2019): Grundlagen der Wärmephyiologie. Theoretische Grundlagen, stationäre und instationäre Modelle. Unter Mitarbeit von Lars Schinke und Maximilian Beyer. 1. Auflage. Augsburg: Recknagel (Recknagel edition).

Seifert, Joachim (2021): Flächenheiz- und Flächenkühlssysteme. Grundlagen – Wärmephyiologie – Auslegung – Systemintegration. Unter Mitarbeit von Lars Schinke. Wiesbaden: Springer Vieweg (Springer eBook Collection).

SOLARFOCUS GmbH (2021): Planungsunterlage Luftwärmepumpe. Online verfügbar unter https://www.solarfocus.com/prospekte/planungsunterlagen/de/planungsunterlagen_vam-pair_05_2021.pdf, zuletzt geprüft am 09.11.2024.

Stadwerke München (2024): Fernwärme Kennzahlen Gebäudeenergiegesetz (GEG). Hg. v. Stadwerke München.

STIEBEL ELTRON (2024): Kältemittel in Wärmepumpen. Umstieg von synthetischen auf natürliche Kältemittel. Unter Mitarbeit von STIEBEL ELTRON GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter https://www.stiebel-eltron.ch/de/home/produkte-loesungen/erneuerbare_energien/waerme-pumpe/faq-planung/kaeltemittel.html, zuletzt aktualisiert am unbekannt, zuletzt geprüft am 10.11.2024.

Stromnetz Berlin GmbH (2018): Standardlastprofile. Online verfügbar unter <https://www.stromnetz.berlin/files/globalassets/dokumente/netz-nutzen/lastprofile/informationen-standardlastprofile-2023.pdf>, zuletzt aktualisiert am 04.09.2018, zuletzt geprüft am 08.11.2024.

Tautz, Diethard (2024): Evolutionstheorie auf dem Prüfstand. Hg. v. www.spektrum.de. Online verfügbar unter <https://www.spektrum.de/news/charles-darwin-evolutionstheorie-auf-dem-pruefstand/1860808>, zuletzt aktualisiert am 08.12.2024.

thinkstep (2019): Holzwolle-Leichtbauplatte. Hg. v. thinkstep.

TMP Fenster + Türen (2022): Fenster und Fenstertüren aus Kunststoff. Umweltproduktdeklaration (EPD). Unter Mitarbeit von ift Rosenheim GmbH. Hg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung.

TÜV NORD Umweltschutz (2022): BESCHEINIGUNG für das Fernwärmenetz der Stadtwerke Schwerin GmbH (SWS). Hg. v. Stadtwerke Schwerin GmbH (SWS).

Uwe Eichelmann (2019): Übertemperatur-gradstunden. Hg. v. TU Dresden.

Verlagsgesellschaft Rudolf Müller; Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern (2023): BKI Baupreise kompakt Altbau 2024. Statistische Baupreise für Positionen mit Kurztexten. Stuttgart: BKI (BKI Kostenplanung). Online verfügbar unter <https://permalink.obvsg.at/AC17041879>.

Viessmann (2019): Hybrid-Geräte Gas-Hybrid-Kompaktgeräte Wärmepumpen für Hybridbetrieb, 1,2 bis 19,5 kW. Planungsanleitung. 5.4 Leistungsdiagramme Außeneinheit 10 kW, 230 V. Hg. v. Viessmann.

Völkel, Frank; Lorbach, Ingrid (circa 2015): Smart Home. Bausteine für Ihr intelligentes Zuhause. Freiburg, München: Haufe Gruppe (/Haufe Fachbuch, 06763).

Wehmann und Schultz (2024): Treibhausgas-Projektionen 2024 – Ergebnisse kompakt. Unter Mitarbeit von Fachgebiet V1.2 „Strategien und Szenarien zu Klimaschutz und Energie“. Hg. v. Umweltbundesamt. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (ISSN 1862-4359).

Weniger, Johannes (2015): Dezentrale Solarstromspeicher für die Energiewende. Unter Mitarbeit von Joseph Bergner, Tjarko Tjaden und Volker Quaschnig. 1st ed. Berlin: BWV Berliner Wissenschafts-Verlag. Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=4347309>.

Wisser, Karolin (2018): Gebäudeautomation in Wohngebäuden (Smart Home). Eine Analyse der Akzeptanz. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=5598646>.

Zhang, Zhiyang; Wu, Bo; Wu, Linyan; Liu, Weixing; Liu, Lei; Li, Ningyu; Cui, Lin (2023): Optimization of the Bionic Wing Shape of Tidal Turbines Using Multi-Island Genetic Algorithm. In: *Machines* 11 (1). DOI: 10.3390/machines11010043.