Rita Streblow, Katrin Ansorge

GEBÄUDE ENERGIEWENDE

Gebäude-Energiewende Arbeitspapier 7

Genetischer Algorithmus zur kombinatorischen Optimierung von Gebäudehülle und Anlagentechnik

Optimale Sanierungspakete für Ein- und Zweifamilienhäuser

Impressum

Autorinnen:

Dr.-Ing. Rita Streblow, RWTH Aachen | E.ON Energieforschungszentrum, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik

Katrin Ansorge, RWTH Aachen | E.ON Energieforschungszentrum, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik

Als Forschungspartner kooperieren

Projektleitung:

Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), Berlin
Potsdamer Str. 105, 10785 Berlin
www.ioew.de

Kooperationspartner:

Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg (BTU CS)
Postfach 101344, 03013 Cottbus
www.b-tu.de

RWTH Aachen | E.ON Energieforschungszentrum, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik
Mathieustraße 10, 52074 Aachen
www.eonerc.rwth-aachen.de

Zitiervorschlag

Rita Streblow, Katrin Ansorge (2017): Genetischer Algorithmus zur kombinatorischen Optimierung von Gebäudehülle und Anlagentechnik, Gebäude-Energiewende, Arbeitspapier 7, Berlin.

Der vorliegende Beitrag entstand im Forschungsprojekt „Gebäude-Energiewende – Systemische Transformation der Wärmeversorgung von Wohngebäuden“. Das Projekt ist Teil des vom deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Schwerpunktprogramms „Umwelt- und gesellschaftsverträgliche Transformation des Energiesystems" der Sozial-ökologische Forschung (SÖF; Förderkennzeichen 03EK3521). Für nähere Informationen zum Projekt siehe www.gebaeude-energiewende.de.

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium für Bildung und Forschung

FONA Sozial-ökologische Forschung BMBF

Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg

RWTH AACHEN UNIVERSITY

INSTITUT FÜR ÖKOLOGISCHE WIRTSCHAFTSFORSCHUNG

Zusammenfassung

Das durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekt „Gebäude-Energiewende“ befasst sich u.a. mit der Bestimmung optimaler Sanierungsoptionen für Ein- und Zweifamilienhäusern sowie kleinen Mehrfamilienhäusern. Im vorliegenden Arbeitspapier wird der hierfür im Rahmen des Projektes entwickelte genetische Optimierungsalgorithmus näher erläutert.

Ausgehend von den unterschiedlichsten Kombinationsmöglichkeiten von Maßnahmen an der Gebäudehülle sowie der Anlagentechnik gelangt die genetische Optimierung über eine zufällig gewählte Menge von Sanierungsoptionen durch das wiederholte Verändern, Kombinieren und Auswählen von Lösungen zu einer Menge an optimalen Lösungen. Eine optimale Lösung ist eine Sanierungsoption, die im gestellten Optimierungsproblem den Endenergiebedarf mit niedrigen Investitionen sowie geringen verbrauchs- und betriebsgebundenen Kosten unter Einhaltung der Randbedingungen maximal verringert. Als Randbedingung müssen die Heizlast und der Trinkwarmwasserbedarf des Gebäudes gedeckt sein. Es findet eine dynamische Berechnung in Stundenschritten statt, die eine detaillierte Auflösung von Speichereffekten und sich ändernden Systemeffizienzen in unterschiedlichen Betriebspunkten ermöglicht.

Die Heizlastberechnung beruht auf einem vereinfachten Gebäudemodell nach ISO 13790. Für die Trinkwarmwasserprofile und elektrischen Lastprofile für die internen Gewinne werden die europäischen Lastprofile des Annex 42 verwendet. Die Anlagentechnik wird entsprechend der Heizlastberechnung dimensioniert. Die Größe des Speichers ist ein Parameter der Optimierung. Die Beschreibung der Anlagentechnik beruht auf Kennlinienmodellen mit Herstellerdaten. Die Ergebnisse der Optimierungsberechnungen werden in einer Pareto Front dargestellt. Mit der Darstellung der Pareto Lösung werden dem Nutzer die Lösungen aufgezeigt, bei denen eine Verbesserung eines Zielfunktionswertes nur noch durch Verschlechterung eines anderen erreicht werden kann. Man erhält somit die Menge optimaler Kompromisse. Eine individuelle Gewichtung ist im Anschluss möglich.

Der Optimierungsalgorithmus bildet den Rechenkern für den im Rahmen dieses Projektes entwickelten Online Sanierungscheck.

Inhaltsverzeichnis

Impressum **2**

Zusammenfassung **3**

Inhaltsverzeichnis **4**

Abbildungsverzeichnis **5**

Tabellenverzeichnis **5**

Abkürzungsverzeichnis **5**

1 Einleitung **7**

2 Optimierung von Gebäudeenergiesystemen **8**

3 Genetischer Algorithmus **9**

4 Methodisches Vorgehen **10**

4.1 Gebäudemodell 10

4.2 Anlagentechnik 12

4.3 Kosten 18

5 Programmaufbau **21**

6 Anwendung **22**

7 Zusammenfassung **24**

8 Literaturverzeichnis **26**

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Funktionsweise eines evolutionären Algorithmus 10
Abb. 2: Kennlinien für Luft-Wasser Wärmepumpe 15
Abb. 3: Kennlinien für Sole-Wasser Wärmepumpe 15
Abb. 4: Kennlinien für Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen 16
Abb. 5: Programmablauf 22
Abb. 6: Heizungstechnik der Sanierungspakete 23
Abb. 7: Sanierungspakete 24

Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1: Betrachtete Sanierungsoptionen an der Gebäudehülle und der zugehörige Binärcode 9
Tab. 4-1: Betrachtete Sanierungsoptionen an der Gebäudehülle 12
Tab. 4-2: Modellierung Anlagentechnik 13
Tab. 4-3: Kesselkoeffizienten nach VDI 2067-40 [VDI 2013] 14
Tab. 4-4: Erzeugeraufwandszahlen 16
Tab. 4-5: Technische Daten Photovoltaik 17
Tab. 4-6: Kosten Dämmmaßnahmen [Salecki 2017] 18
Tab. 4-7: Kosten Anlagentechnik 19
Tab. 4-8: Energiepreise 20
Tab. 4-9: Primärenergiefaktoren 21

Abkürzungsverzeichnis

A, B, E, F	Konstanten
G	Globale Bestrahlungsstärke, W/m²
I	Strom, A
I_{MPP}	Strom bei maximaler Leistung, A
I_{SC}	Kurzschlussstrom, A

k1	Wärmeverlustbeiwert
K_i	Strom Temperatur Koeffizient, %/°C
K_v	Spannungs-Temperatur Koeffizient, %/°C
N_{CT}	Nominale Zellbetriebstemperatur, °C
P	Leistung, W
q_B	Bereitschaftswärmeabgabe
T_a	Umgebungstemperatur [°C]
T_m	Mittlere Modultemperatur [°C]
V_{MPP}	Spannung bei maximaler Leistung, V
V_{OC}	Leerlaufspannung, V
η	Wirkungsgrad
η_0	Optischer Wirkungsgrad
η_{100}	Kesselwirkungsgrad bei Volllast [-]
ϕ_n	Nennwärmeleistung [kW]
$\eta_{K,n}$	Nennwirkungsgrad
ν	Nutzungsgrad

1 Einleitung

Der Beitrag der Haushalte am Gesamtendenergieverbrauch in Deutschland beträgt 25%, wovon rund 75% zur Bereitstellung der Raumwärme benötigt werden [UBA 2013]. Die Gebäudebranche besitzt demnach ein hohes Einsparpotential bezüglich des Energieverbrauchs und der CO2-Emissionen. Durch die Verknappung der fossilen Primärenergieträger und dem Klimaschutz ist es sowohl aus ökologischen als auch aus wirtschaftlichen Gründen sinnvoll die natürlichen Ressourcen der Erde zu schonen. Vor allem im Hinblick auf die angestrebte Energiewende kann die Baubranche einen entscheidenden Beitrag zum Erreichen der festgesetzten Ziele leisten und die Energieeffizienz unter Einbindung regenerativer Energien vorantreiben.

Im Bereich der Neubauten sinkt durch politische Vorgaben der Energiebedarf kontinuierlich, so dass „Nullemissionshäuser“ in absehbarer Zeit Standard sein werden. Wegen der niedrigen Neubauraten nimmt die energetische Sanierung des Gebäudebestands jedoch eine wichtigere Rolle ein. Das Umrüsten der bestehenden Gebäude auf eine nachhaltige Wärmeversorgung kann in der Baubranche den größten Beitrag zur Senkung des Energiebedarfs leisten.

Zur Reduktion des Energieverbrauchs kommen sowohl bauliche als auch technische Maßnahmen in Frage. Aktuell konzentriert sich die Branche der energetischen Gebäudesanierung hauptsächlich auf die Dämmung der Gebäudehülle. Dabei wird oft vernachlässigt, dass nur eine Kombination aus bauphysikalischen und anlagentechnischen Maßnahmen zur optimalen Lösung führen kann.

Im Vorhaben „Gebäude-Energiewende“ wird ein kombinatorischer Optimierungsansatz für Maßnahmen an der Gebäudehülle und der Anlagentechnik entwickelt. Die Betrachtungen beziehen sich auf Ein- und Zweifamilienhäuser sowie kleine Mehrfamilienhäuser. Die Zielgrößen der Optimierung werden variiert und der Einfluss auf die optimalen Sanierungspakete untersucht. Im Fokus der Auswahl stehen die Interessen des privaten Hausbesitzers. Der entwickelte Algorithmus macht keinen Abgleich mit einer Berechnung nach Energieeinsparverordnung, so dass für die ermittelten Maßnahmen nicht immer die gesetzlichen Mindestanforderungen eingehalten werden und im Nachgang die Ergebnisse weitergehend gefiltert werden müssen.

Der Optimierungsalgorithmus ist in Form eines genetischen Algorithmus in Python programmiert. Da die Ermittlung der Abhängigkeit zwischen Anlageneffizienz und Heizwärmebedarf durch statische Ansätze nicht immer detailliert möglich ist, wird das Gebäude- und Anlagenverhalten über vereinfachte dynamische Betrachtungen beschrieben.

Der Optimierungsalgorithmus wird in ein Onlineberatungstool integriert. Es ist von daher zu beachten, dass der Algorithmus mit einer minimalen Anzahl an Eingabedaten auskommt. Anhand der vom Nutzer eingegebenen Gebäudedaten berechnet der Optimierungsalgorithmus die besten Kombinationen aus anlagentechnischen und bauphysikalischen Sanierungsmaßnahmen. Dem Nutzer wird anschließend ein Portfolio an optimalen Maßnahmenkombinationen angezeigt.

Die Schnittstelle zwischen Webapplikation und Algorithmus bildet eine MySQL Datenbank. Hier werden die Ein- und Ausgabedaten abgespeichert und alle Parameter der Berechnung sind hier hinterlegt.

Mit Hilfe des Onlineberatungstools soll eine erste Einschätzung der potenziell sinnvollen Maßnahmen an einem Haus ermöglicht werden.

2 Optimierung von Gebäudeenergiesystemen

Aufgrund der unterschiedlichen Optionen von Sanierungsmaßnahmen, kann deren Kombination als Optimierungsproblem aufgefasst und mit dem Ziel minimaler Kosten und/oder maximaler Einsparungen optimiert werden. Dafür müssen das Gebäude und die Komponenten der Energieversorgung modelliert und zu einem Gesamtsystem kombiniert werden. Durch Vorgabe von verschiedenen Randbedingungen können auch unterschiedliche Szenarien untersucht werden.

In den letzten Jahren hat die Anzahl der Veröffentlichungen zur Optimierung von Gebäudeenergiesystemen stark zugenommen. Während sich die Anzahl der wissenschaftlichen Arbeiten in den 1990er Jahren noch ziemlich in Grenzen hielt, ist ab 2000 ein deutlicher Anstieg zu vermerken. Evins [Evins 2013] hat alle relevanten Veröffentlichungen, die zwischen 1990 und 2012 erschienen sind, erfasst und miteinander verglichen. Die 74 analysierten Veröffentlichungen wurden in verschiedene Bereiche der Gebäudeoptimierung eingeteilt. Betrachtet wurden Optimierungskonzepte für die Gebäudehülle und -form, für die Anlagentechnik und für die Nutzung erneuerbarer Energien. Außerdem wurden die Arbeiten nach ihren Zielgrößen unterteilt. Als Hauptzielgrößen wurden der Energieverbrauch, die wirtschaftlichen Kosten und der Komfort definiert.

Der Energieverbrauch wurde mit Abstand in den meisten Fällen als Zielgröße definiert. An zweiter Stelle folgen die wirtschaftlichen Kosten. Hierbei werden je nach Arbeit die Investitionskosten und die Betriebskosten berücksichtigt. Bei der Zielgröße Komfort wurden unter anderen Parameter wie Tageslicht, optische Eigenschaften und Feuchtigkeit betrachtet.

Rund die Hälfte der von Evins betrachteten Arbeiten dienen der Optimierung eines Systems bezüglich einer einzigen Zielgröße. Eine zunehmende Anzahl an Arbeiten verwendet jedoch eine multikriterielle Optimierung nach Pareto. Die weighted-sum Methode zur Gewichtung unterschiedlicher Zielgrößen wurde hingegen nur in wenigen Arbeiten genutzt und spielt daher lediglich eine untergeordnete Rolle.

Fast 40% der betrachteten Arbeiten beziehen sich auf die Optimierung der Gebäudehülle. Die Gebäudeform, die Anlagentechnik und die Nutzung erneuerbarer Energien wurden jeweils in rund 20% der Fälle betrachtet.

In den wenigsten Arbeiten gehen sowohl die Gebäudehülle als auch die Anlagentechnik in die Optimierung mit ein. Meistens werden diese beiden Bereiche getrennt betrachtet. Um optimale Lösungen bezüglich der Kosten- und Energieeinsparungen zu ermitteln, ist jedoch eine gemeinsame Betrachtung aus bauphysikalischen und anlagentechnischen Maßnahmen notwendig. Deshalb führt der im Rahmen dieses Projektes entwickelte Optimierungsalgorithmus beide Bereiche zusammen.

Als Optimierungsverfahren kommen zumeist evolutionäre Algorithmen zum Einsatz. In der Klasse der evolutionären Algorithmen sind wiederum die genetischen Algorithmen am weitesten verbreitet.

Für die Simulation des Gebäudeenergiesystemverhaltens kommen grundsätzlich zwei Arten in Frage: statische und dynamische Simulationen. Bei statischen Simulationen wird der Heizenergiebedarf für ein Jahr mithilfe von Heizgradtagen berechnet [Schuler 1997]. Die Innentemperatur wird als konstant angenommen. Wegen der geringen Zeitauflösung können Temperaturverläufe nicht berücksichtigt werden. Durch vereinfachte Annahmen kann es bei der Berechnung des Heizwärmebedarfs zu starken Abweichungen von der Realität kommen. Deshalb sind statische Ansätze für detaillierte Betrachtungen nicht immer geeignet.

Dynamische Simulationen besitzen eine sehr hohe Zeitauflösung. Dadurch können zeitabhängige Vorgänge detailliert beschrieben werden. Temperaturverläufe und Wärmeströme können unter Berücksichtigung meteorologischer Daten und der thermischen Masse des Gebäudes sehr präzise simuliert werden [van Treeck 1998]. Der Heizwärmebedarf kann dadurch unter Berücksichtigung der Randbedingungen für beliebige Zeitintervalle genauer ermittelt werden. Aus diesem Grund wird für den Algorithmus ein dynamischer

Ansatz verwendet, wobei Unsicherheiten aus Wetterrandbedingungen, Nutzerverhalten und vereinfachter Modellierung erhalten bleiben.

Viele Optimierungsalgorithmen sind so ausgelegt, dass nur eine optimale Lösung ermittelt wird. Allerdings führen oft mehrere Lösungen zu einem vergleichbaren Ergebnis. Deshalb soll das entwickelte Optimierungsprogramm für jedes System ein Portfolio an optimalen Maßnahmenkombinationen anzeigen, statt nur die beste Lösung zu ermitteln.

3 Genetischer Algorithmus

Durch die Verbreitung leistungsstarker Rechenkapazitäten hat in den letzten Jahren die Verwendung von genetischen Algorithmen als Suchverfahren in Optimierungsproblemen stark zugenommen. Genetische Algorithmen gehören zu den heuristischen Verfahren. Gegenüber exakten Verfahren versuchen heuristische Verfahren anhand plausibler Prinzipien möglichst gute Lösungen zu finden. Bei den genetischen Algorithmen werden die Evolutionsmechanismen aus der Natur auf stochastische iterative Verbesserungsschritte übertragen.

Das Grundprinzip besteht darin zuerst eine Menge (Population) von Problemlösungen (Individuen) zu generieren. Durch Kombination (Crossover) oder zufallsgesteuerte Veränderung (Mutation) werden aus den vorhandenen Lösungen (Eltern) neue Lösungen (Kinder) erzeugt. Auf Basis einer Bewertung nach einem oder mehreren Kriterien wird eine Rangfolge der Problemlösungen (Individuen) erstellt, nach der die Individuen für die neue Generation ausgewählt werden. Die anderen Individuen werden verworfen. Mit der neuen Generation beginnt der Vorgang von vorn. Er wird solange wiederholt, bis entweder die maximale Anzahl an Generationen erreicht ist oder bis ein anderes Abschlusskriterium erreicht wird (z. B. Mindestqualität des besten Individuums, keine Änderung der Individuenqualität über längeren Zeitraum, maximale Rechenzeit).

Jedes Individuum setzt sich aus einem Binärstrang (Gen) zusammen, der unterschiedliche Optionen von Sanierungsmaßnahmen verschlüsselt und miteinander verbindet. Tab. 3-1 zeigt das Prinzip zur Kodierung am Beispiel einer Außenwanddämmung. Über einen zweistelligen Binärcode können insgesamt vier unterschiedliche Ausprägungsformen (Allel) betrachtet werden. Gewählt wurden hier die Beibehaltung des Ausgangszustands gefolgt von drei unterschiedlichen Dämmstärken.

Tab. 3-1: Betrachtete Sanierungsoptionen an der Gebäudehülle und der zugehörige Binärcode

Binärcode	Ausführung Außenwanddämmung
00	Bestand
01	0,08 m
11	0,12 m
10	0,2 m

Für die Programmierung des genetischen Algorithmus wird das Python-Framework DEAP [Fortin 2014] verwendet. Dieses Framework übernimmt die Generierung einer Anfangspopulation sowie das Kreuzen und Mutieren von Lösungen für nachfolgende Generationen. Die Auswahl der Lösungen, die sich aus Optionen an Maßnahmen für die Gebäudehülle und die Anlagentechnik zusammensetzen, wird sowohl energetisch als

auch ökonomisch bewertet. Mit der Festlegung verschiedener Zielfunktionen liegt ein Mehrkriterienoptimierungsproblem vor. Mehrkriterienprobleme treten immer wieder im Alltag auf. So ist man immer wieder bestrebt ein hochwertiges Produkt zu einem möglichst niedrigen Preis zu erwerben, was sich direkt auf die hier vorhandene Problemstellung der optimalen Gebäudesanierung übertragen lässt. Für die multikriterielle Optimierung wird der NSGA II (Nondominated Sorting Genetic Algorithm) Algorithmus verwendet. Der Algorithmus bewertet die Verteilung der Lösungen auf der Pareto-Front.

Eine Lösung ist bezüglich der Zielfunktionen pareto-optimal, wenn es keine Lösung gibt, die für alle Zielfunktionen mindestens gleich gute Werte und für mindestens eine Zielfunktion sogar einen besseren Wert liefert. Die so definierten Lösungen bilden dann die Paretofront. Für diese pareto-optimalen Lösungen muss der Anwender noch entscheiden, welche dieser Lösungen ausgewählt werden sollte.

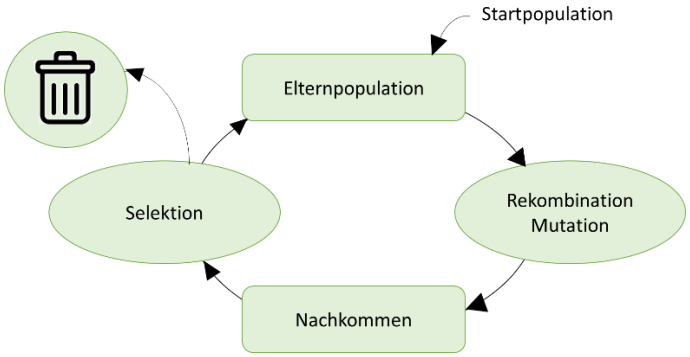

Abb. 1: Funktionsweise eines evolutionären Algorithmus

4 Methodisches Vorgehen

Mittels Zeitschritt-Simulationen des Gebäudeenergiesystems unter ortsabhängigen Wetterrandbedingungen können die optimalen Sanierungsmaßnahmen bestimmt werden. Dabei wird die Installation unterschiedlicher Dämmmaßnahmen in unterschiedlichen Ausführungen, der Austausch des Energieerzeugers, eine Größenvariation des thermischen Speichers sowie die Installation von Photovoltaik oder Solarthermie betrachtet.

4.1 Gebäudemodell

Zur Berücksichtigung der thermischen Interaktion zwischen Gebäudehülle und Anlagentechnik und dem daraus resultierenden Energiebedarf wird das thermische Gebäudeverhalten mit einer zeitlichen Auflösung in Stundenschritten mittels eines vereinfachten Gebäudemodells nach ISO 13790 [ISO 2008] beschrieben. Das Modell vereinfacht die Gebäudegeometrie und Semantik des realen Objektes und überführt es in ein thermisches Netzwerk bestehend aus Widerständen und Kapazitäten. Lauster et al. [Lauster 2014] konnten zeigen, dass das vereinfachte Gebäudemodell für energietechnische Fragestellungen auf Gesamtgebäudeebene geeignet ist mit einer ausreichenden Auflösung der entsprechenden Effekte und kurzen Rechenzeiten. Als dynamisches Verfahren modelliert es die Wärmetransmission, den Wärmestrom aufgrund von Lüftung, die Wärmespeicherfähigkeit sowie die inneren solaren Wärmeeinträge in das Gebäude.

Da das Gebäudemodell auf Grund seiner Vereinfachungen nur eine reduzierte Anzahl an Parametern benötigt, verringert sich auch der Aufwand und der Bedarf an Eingangsgrößen für die Parametrierung. Als weitere

Vereinfachung wird auf statistische Untersuchungen zum Gebäudebestand zurückgegriffen. Dies passiert einmal zur Berechnung einzelner Bauteilflächen nach [IWU 2005] sowie zur Festlegung der Bauteilaufbauten in Abhängigkeit des Baujahres unter Verwendung von [BMVBS 2009]

Als Eingangsgrößen benötigt das Tool:

- Standort des Gebäudes

  Auf Basis des Standortes wird die geographische Lage bestimmt und die TRY Wetterregion zugeordnet, für die der entsprechende Wetterdatensatz gewählt wird.

- Baujahr

  Festlegung der Bauteilaufbauten

- Dachkonstruktion

  Festlegung des Gebäudegrundrisses

- Keller vorhanden

  Festlegung des Gebäudegrundrisses

- Beheizte Grundfläche

  Bestimmung der Bauteilflächen nach dem Flächenschätzverfahren

- Anzahl Stockwerke

  Bestimmung der Bauteilflächen nach dem Flächenschätzverfahren

- Geschosshöhe

  Bestimmung der Bauteilflächen nach dem Flächenschätzverfahren

- Anzahl Bewohner

  Festlegung der internen Lasten und des Trinkwarmwasserzapfprofils

Für die Berechnung der internen Lasten werden Informationen über Nutzeranwesenheit und den Betrieb elektrischer Geräte benötigt. Der Algorithmus nutzt ein Anwesenheitsprofil nach dem Standard SIA 2024 [SIA 2006]. Für jede Person wird dabei eine konvektive Wärmeabgabe von 70 W angesetzt. Als elektrisches Lastprofil wird das europäische Standardlastprofil nach Annex 42 verwendet. Es wird die Annahme getroffen, dass 60 % der elektrischen Leistung in Wärme umgewandelt werden.

Vom Annex 42 wird ebenfalls das Trinkwarmwasserprofil verwendet.

Tab. 4-1: Betrachtete Sanierungsoptionen an der Gebäudehülle

Option	Dach	Oberste Geschossdecke	Außenwand	Fenster	Kellerdecke
1	Bestand	Bestand	Bestand	Bestand	Bestand
2	0,16 m	0,12 m	0,08 m	2-fach	0,04 m
3	0,16 + 0,06 m	0,16 m	0,12 m	3-fach	0,08 m
4	0,16 + 0,12 m	0,24 m	0,2 m		0,1 m

4.2 Anlagentechnik

Für die Anlagentechnik sind vereinfachte Kennlinienmodelle basierend auf Herstellerdaten und Normansätzen hinterlegt. Tab. 4-2 gibt eine Übersicht über die berücksichtigte Anlagentechnik und die Quellen zur Beschreibung des Betriebsverhaltens.

Tab. 4-2: Modellierung Anlagentechnik

Anlagentechnik	Spezifizierung Anlagentechnik	Modellierung
Kessel	Standardkessel, Niedertemperaturkessel, Brennwertkessel, Pelletkessel, Festbrennstoffkessel, Holzvergaserkessel	VDI 2067-40 [VDI 2013]
Wärmepumpe	Luft-Wasser Wärmepumpe mit Elektroheizstab oder Gasbrennwertkessel, Sole-Wasser Wärmepumpe mit Kollektor oder Erdsonde	Herstellerdaten mit Berechnung der Jahresarbeitszahl nach VDI nach VDI 4650-1 [VDI 2014]
KWK		Kennlinie nach Annex 54 [Entchev 2014]
Fernwärme		Erzeugeraufwandszahl
Elektro	Nachtspeicherheizung, Stromdirektheizung	Erzeugeraufwandszahl

Der Kesselwirkungsgrad bei Volllast berechnet sich nach VDI 2067-40 [VDI 2013] wie folgt:

$$\eta_{100} = (A + B \times \log\left(\frac{\phi_n}{1\ kW}\right))$$

Die Bereitschaftswärmeabgabe nach:

$$\phi_{B,0} = q_B = E \times (\frac{\phi_n}{1\ kW}^{F}$$

Die Konstanten A, B, E und F werden in Abhängigkeit von der Art des Wärmeerzeugers entsprechend VDI 2067-40 [VDI 2013] gewählt.

Tab. 4-3: Kesselkoeffizienten nach VDI 2067-40 [VDI 2013]

Kesseltyp	Baujahr	A	B	E	F
Standardkessel	Vor 1978	80	2	9	-0,28
	1978 bis 1986	82	2	7,5	-0,31
	1987 bis 1994	84	2	7,5	-0,31
	Nach 1994	85	2	8,5	-0,4
Gebläsekessel	Vor 1987	84	1,5	7	-0,37
	1987 bis 1994	86	1,5	7	-0,37
	Nach 1994	88,5	1,5	4,25	-0,4
Brennwertkessel	Vor 1987	89	1	7	-0,37
	1987 bis 1994	91	1	7	-0,37
	Nach 1994	92	1	4	-0,4
Feststoffkessel	Vor 1978	78	2	12,5	-0,28
	1978 bis 1994	80	2	10,5	-0,28
	Nach 1994	81	2	8	-0,28

Zur Berücksichtigung des Teillastverhaltens wird eine Nutzungsgradkennlinie nach VDI 2067-40 als Funktion des Brennerlaufzeitgrades ρ_B, des Nennwirkungsgrads $\eta_{K,n}$ sowie der Bereitschaftswärmeabgabe q_B gebildet.

$$\nu = \left(1 - \frac{q_B}{1 - q_B} \times \eta_{K,n}\right) - \left(1 - \frac{\eta_{K,n}}{1 - q_B}\right) \times \rho_B - \left(\frac{1}{\rho_B} - 1\right) \times q_B$$

Die Kennlinien der Luft-Wasser und Sole-Wasser Wärmepumpe werden aus Herstellerdaten abgeleitet. Die Heizleistungskurve ist beispielhaft für zwei unterschiedliche Leistungsgrößen gezeigt, die entsprechend der Heizlast des Gebäudes gewählt werden.

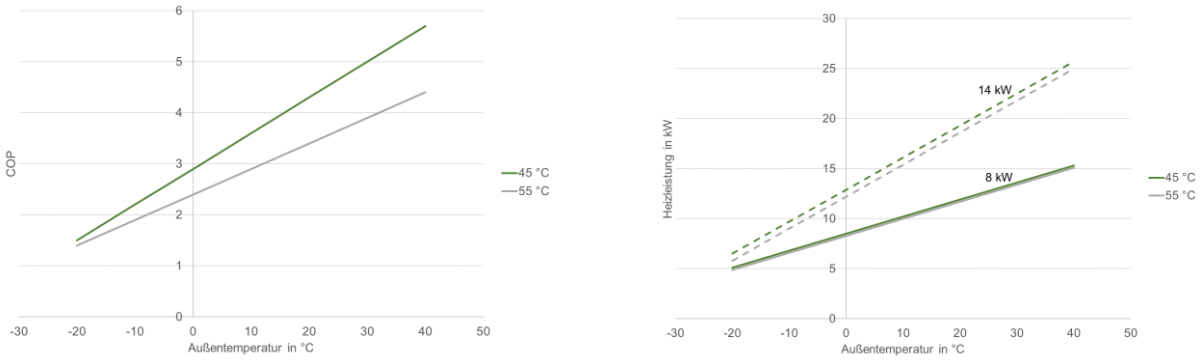

Abb. 2: Kennlinien für Luft-Wasser Wärmepumpe

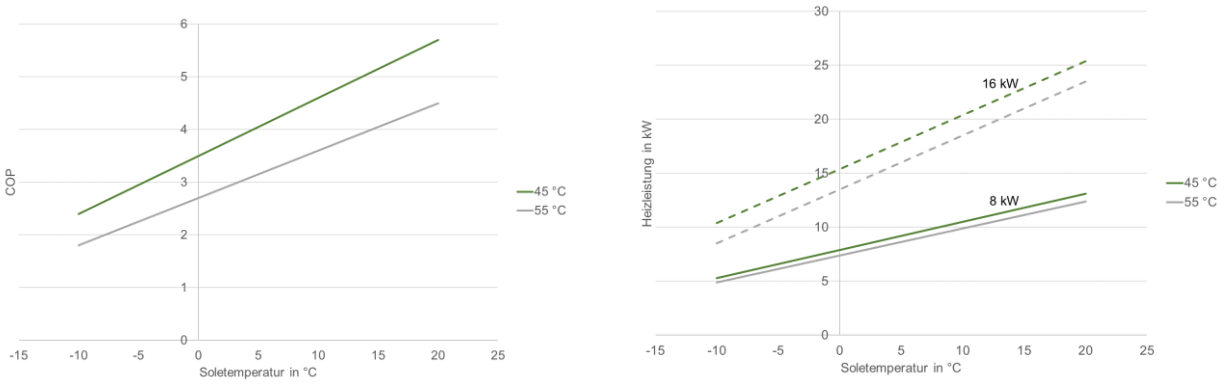

Abb. 3: Kennlinien für Sole-Wasser Wärmepumpe

Die Gesamteffizienz der Wärmepumpentechnik hängt von den Randbedingungen des Betriebs ab. Zur Berücksichtigung der Randbedingungen wird die Jahresarbeitszahl nach VDI 4650-1 [VDI 2013] bestimmt.

Für Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen wird eine Kennlinie nach Annex 54 [Entchev 2014] festgelegt.

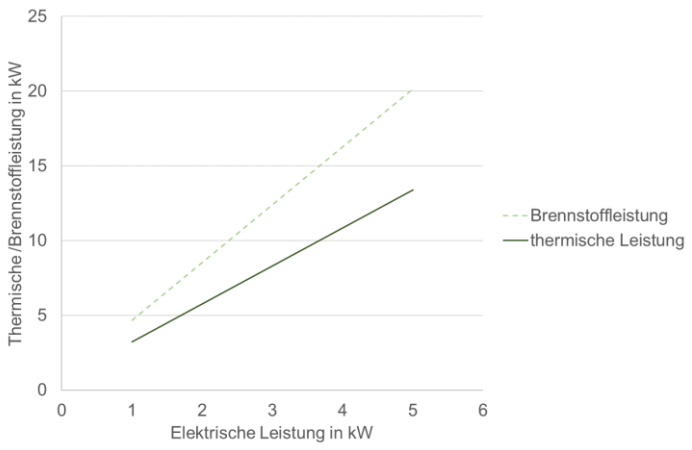

Abb. 4: Kennlinien für Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen

Nach BMVBS werden folgende Erzeugeraufwandszahlen angesetzt:

Tab. 4-4: Erzeugeraufwandszahlen

Bezeichnung	Baualtersklasse	Erzeugeraufwandszahl
Fernwärmeübergabestation	alle	1,02
Elektro-Nachtspeicherheizung	Bis 1994	1,12
	Ab 1995	1,05
Elektro-Direktheizung	alle	1,02

Die Leistung der Systeme wird jeweils zur Deckung des über das Gebäudemodell ermittelten Heizwärmebedarfs und des Energiebedarfs für die Trinkwarmwasserversorgung ausgelegt. Alle Heizsysteme können zusätzlich durch eine Solarthermie-Anlage unterstützt werden. Für die verschiedenen Systeme muss der Warmwasserspeicher unterschiedlich dimensioniert werden. Die Speichergröße kann für jedes System zwischen festgelegten Grenzwerten variiert werden. Dabei wird unterschieden zwischen Trinkwarmwasserspeichern und Pufferspeichern, die sowohl als Heizwasser- und Trinkwarmwasserspeicher genutzt werden.

Für Wärmepumpensysteme und Mikro KWK wird ein Pufferspeicher vorgesehen. Die anderen Systeme haben nur einen Trinkwarmwasserspeicher. Bei dezentraler Warmwasserbereitung wird kein Trinkwarmwasser berücksichtigt.

Die Leistung der Photovoltaik ist abhängig von der solaren Einstrahlung, der Umgebungstemperatur und den Kenndaten der Module. Die Berechnung erfolgt nach den folgenden Gleichungen [Masters 2004]:

$$T_M = T_a + G\left(\frac{N_{CT} - 20}{0{,}8}\right)$$

$$I = G[I_{SC} + K_i(T_M - 25)]$$

$$V = V_{OC} - K_v(T_M - 25)]$$

$$P_{PV}(G) = N \times FF \times V \times I$$

$$FF = \frac{V_{MPP} \times I_{MPP}}{V_{OC} \times I_{SC}}$$

Die charakteristischen Daten sind aus Herstellerdaten abgeleitet.

Tab. 4-5: Technische Daten Photovoltaik

Kenngröße	
K_V in %/K	-0,31
K_i in %/K	0,04
N_{CT} in °C	47,0
I_{SC} in A	8,91
V_{OC} in V	38,6
I_{MPP} in A	6,79
V_{MPP} in V	27,8
Wirkungsgrad Wechselrichter in %	95,0

Anhand der Strahlungsdaten aus dem TRY-Wetterdatensatz und über die Ermittlung des stündlichen Sonnenstands kann die auf die Solarkollektoren einfallende direkte und diffuse Strahlungsenergie berechnet werden. Unter Berücksichtigung der optischen und thermischen Verluste ergibt sich die Leistung der Solarkollektoren aus der Kollektorkennlinie [EN 2006]:

$$\eta = \eta_0 - k1\frac{T_m - T_a}{\mathrm{G}}$$

Der optische Wirkungsgrad η_0 wird mit 80 % angesetzt und der Wärmeverlustbeiwert k1 zu 3,7 W/(m²K).

Ab einem Heizwärmebedarf von 70 W/(m²K) wird das ermittelte Sanierungspaket noch einmal mit einer ergänzten kontrollierten Wohnungslüftung berechnet. Für diese wird ein Wärmerückgewinnungsgrad von 80 %.

4.3 Kosten

Die Investitionen für die bauphysikalischen Maßnahmen sind Mittelwerte aus Kostenberechnungen für die innerhalb des Projektes entwickelten 7 Prototypengebäuden (vgl. [Dunkelberg 2016] und [Salecki 2017]), die den Bereich Einfamilienhaus bis kleines Mehrfamilienhaus abdecken. Eine Zusammenstellung gibt Tab. 4-6.

Tab. 4-6: Kosten Dämmmaßnahmen [Salecki 2017]

Bauteil	Material	Dämmstärke	Kosten
Außenwand	EPS	0,08 m	105 €/m²
		0,12 m	113 €/m²
		0,2 m	129 €/m²
Dach Zwischen-+ Untersparren-dämmung	Mineralwolle	0,16 m	66 €/m²
		0,16 + 0,06 m	81 €/m²
		0,16 + 0,12 m	91 €/m²
Oberste Geschossdecke	Mineralwolle	0,12 m	32 €/m²
		0,16 m	41 €/m²
		0,24 m	61 €/m²
Kellerdecke	PUR	0,04 m	53 €/m²
		0,08 m	62 €/m²
		0,1 m	66 €/m²
Fenster	Kunststoff	2fach Wärmeschutzver-	312 €/m²
		3fach Wärmeschutzver-	328 €/m²

Die Investitionen für die Anlagentechnik beruhen auf gemittelten Kosten aus Herstellerpreislisten. Für diese werden lineare Kostenfunktionen der Form y = ax + b in Abhängigkeit der Leistung des Erzeugers gebildet. Für Solarthermie und Photovoltaik ist der Bezug die Aperturfläche. Die Wartungskosten werden prozentual von der Anschaffungsinvestition nach VDI 2067-1 [VDI 2000] angesetzt.

Tab. 4-7: Kosten Anlagentechnik

Erzeuger	a	b	Wartungskosten
Gasbrennwert	61,17 €/kW	4.794 €	3 %
Ölbrennwert	151,88 €/kW	5.436,40 €	3 %
Luft-Wasser WP mit Heizstab	588,07 €/kW	7.460,60 €	2,5 %
Luft-Wasser WP mit Gasbrennwertkessel	588,07 €/kW	10.025,60 €	5 %
Sole Wasser WP mit Kollektor	318,58 €/kW	16.373 €	2,5 % + 124,95 €/a
Sole-Wasser WP mit Sonde	318,58 €/kW	21.728 €	2,5 % + 285,60 €/a
Gaswärmepumpe	162,99 €/kW	14.797 €	4,5 %
Stromdirekt	85 €/m²		
Nachtspeicherheizung	167,68 €/kW	295,30 €	
KWK	501 €/kW	23.942 €	8 %
Holzpelletheizkessel	177,14 €/kW	16.469 €	6 %
Holzfestbrennstoffkessel	99,64 €/kW	9.401 €	6 %
Holzvergaserheizkessel	199,62 €/kW	8.705,90 €	6 %
Speicher	1,12 €/Liter	806,46 €	
Solarthermie	366,59 €/m²	3.094 €	1,5 %
Photovoltaik	212,74 €/m²	2.869,09	
Wohnungslüftung	60 €/m²		150 €/a

Für die Verbrauchskosten werden folgende Energiepreise angesetzt:

Tab. 4-8: Energiepreise

Energieträger	€/kWh
Strom	0,28
Strom HT	0,25
Strom NT	0,2
Gas	0,066
Öl	0,058
Pellet	0,047
Holzhack	0,028
Fernwärme	0,09
Einspeisevergütung KWK	0,0903
Einspeisevergütung PV	0,124

Die Primärenergiefaktoren der einzelnen Energieträger sind Tab. 4-9 zu entnehmen.

Tab. 4-9: Primärenergiefaktoren

Energieträger	PEF
Strom	1,8
Gas	1,1
Öl	1,1
Holz	0,2
Pellet	0,2
Fernwärme niedriger PEF	0,17
Fernwärme hoher PEF	0,7
Verdrängungsstrommix	2,8

5 Programmaufbau

Die verwendete Programmiersprache ist eine objektorientierte Programmiersprache. Hierbei wird die Architektur der Software an den Strukturen des realen Problems ausgerichtet. Es wird ein Modell aufgebaut, das die Informationen der auftretenden Objekte und deren Abstraktionen enthält. Eine Klasse ist der Bauplan für die Objekte. Entsprechend der Fragestellung geben die Klassen die betrachteten bauphysikalischen und anlagentechnischen Elemente wieder, wie Außenwand, Erzeuger und Solarthermie. Während der Laufzeit werden entsprechend der Nutzereingaben und der in der Optimierung gewählten Sanierungsoptionen die unterschiedlichen Ausprägungen (Instanzen) einer Klasse als Objekte gebildet. Die Objekte tauschen ihre Informationen untereinander aus und interagieren wie das reale Gebäudeenergiesystem, woraus sich die energetischen und ökonomischen Kenngrößen Heiz-, End- und Primärenergiebedarf sowie Investition, verbrauchs- und betriebsbedingte Kosten ergeben. Aus den Größen werden die Zielgrößen der Optimierung bestimmt und bewertet.

Abb. 5 zeigt den gesamten Programmablauf mit Anschluss an den webbasierten Sanierungsratgeber.

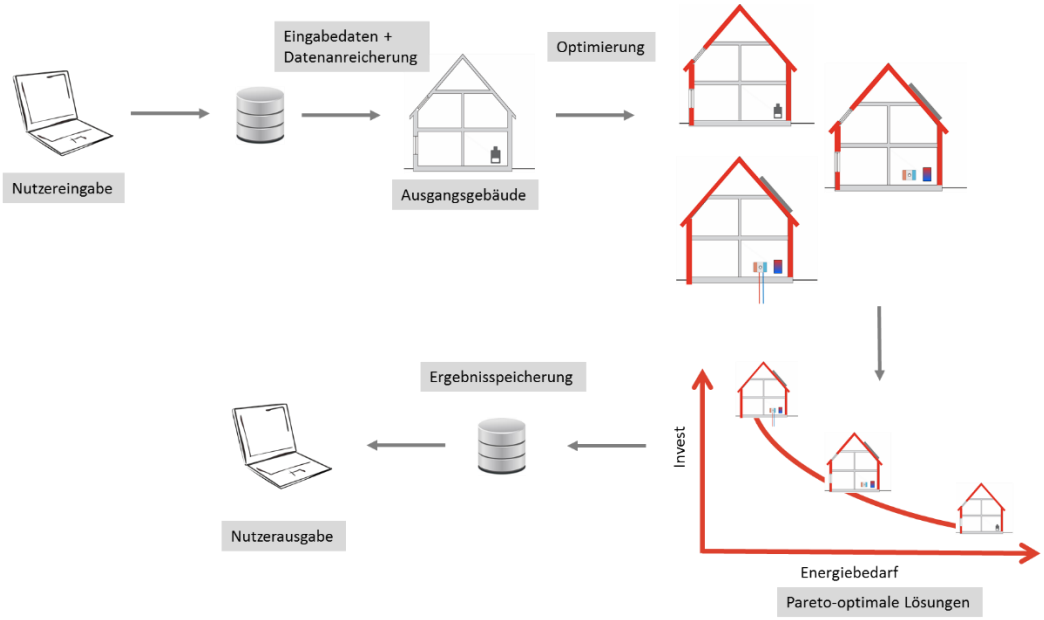

Abb. 5: Programmablauf

6 Anwendung

Für die beispielhafte Darstellung der Ergebnisse einer Optimierung wird ein prototypisches Einfamilienhaus betrachtet. Das Gebäude entspricht dem Einfamilienhaus-Typ 2 der im Rahmen dieses Projektes erstellten Gebäudesteckbriefe mit einer Zusammenfassung der Optimierungsergebnisse für unterschiedliche Gebäudeprototypen. [Ansorge 2017]. Das Einfamilienhaus stammt aus der Baualtersklasse 1969 bis 1978. Es ist freistehend mit einer beheizten Wohnfläche von 155 m², die ein ausgebautes Dachgeschoss umfasst.

Zur Bestimmung optimaler Sanierungsoptionen können die verschiedenen energetischen und ökonomischen Kenngrößen Heiz-, End- und Primärenergiebedarf sowie Investition, verbrauchs- und betriebsbedingte Kosten oder daraus abgeleitete Größen als Zielgrößen der Optimierung betrachtet werden. Abb. 6 zeigt die Ergebnisse einer Optimierung mit den Zielgrößen Endenergie, Invest sowie Summe aus verbrauchs- und betriebsbedingten Kosten.

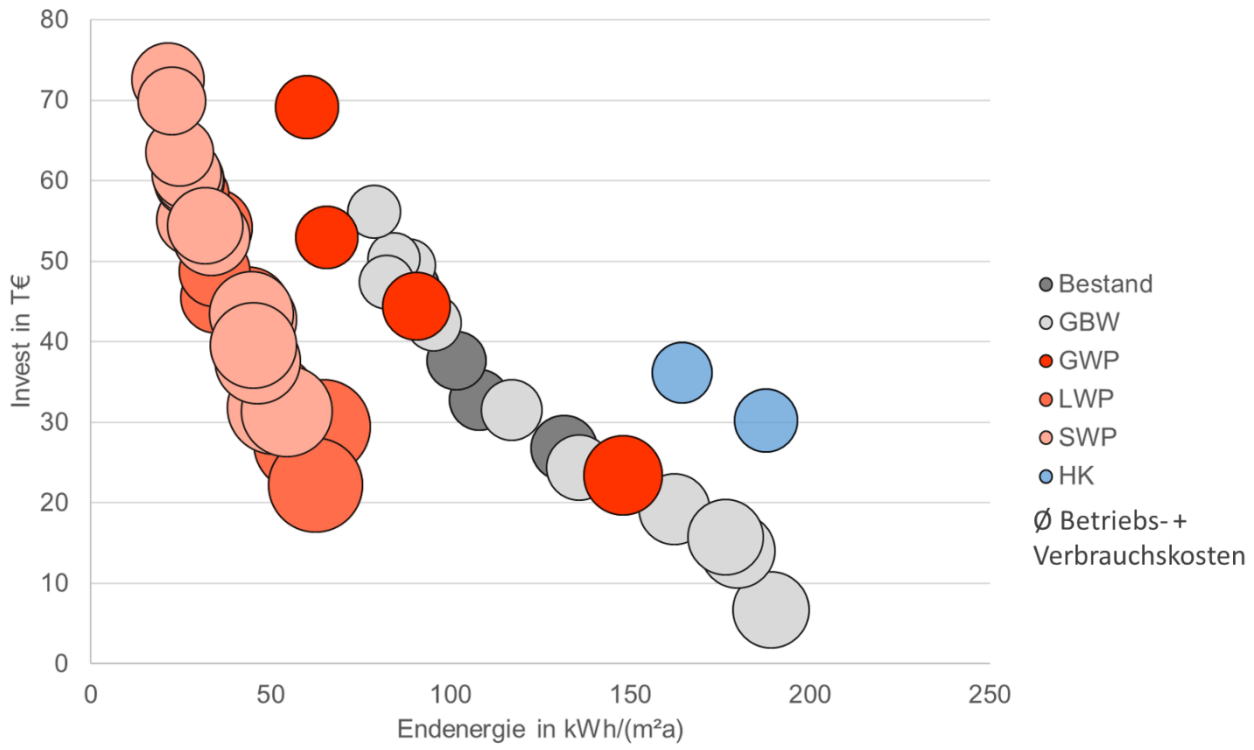

Abb. 6: Heizungstechnik der Sanierungspakete (GBW – Gasbrennwert, GWP – Gaswärmepumpe, LWP – Luft-Wasser-Wärmepumpe, SWP – Sole-Wasser-Wärmepumpe, Holzfeststoffbrennstoffkessel)

Die beiden Zielgrößen Endenergie und Invest sind auf den beiden Achsen dargestellt. Die einzelnen Sanierungsoptionen sind durch die Kreise widergegeben. Die farbliche Markierung der Kreise unterscheidet die unterschiedlichen Erzeugersysteme. Der Durchmesser der Kreise ist äquivalent zur Summe aus verbrauchs- und betriebsgebundenen Kosten. Diese Darstellung reduziert die Lösungsebene die aus den drei Zielgrößen aufgespannt wird auf eine zweidimensionale Darstellung. Jede durch einen Kreis repräsentierte Sanierungsoption umfasst auch unterschiedliche Maßnahmen an der Gebäudehülle. Diese sind hier nicht dargestellt und werden detailliert in Abb. 7 erläutert. Prinzipiell nehmen mit sinkendem Endenergiebedarf die Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle zu. Der Technologiewechsel zwischen Heizkessel zu Wärmepumpensystem in einem Sprung in der Reduktion des Endenergiebedarfs zu erkennen.

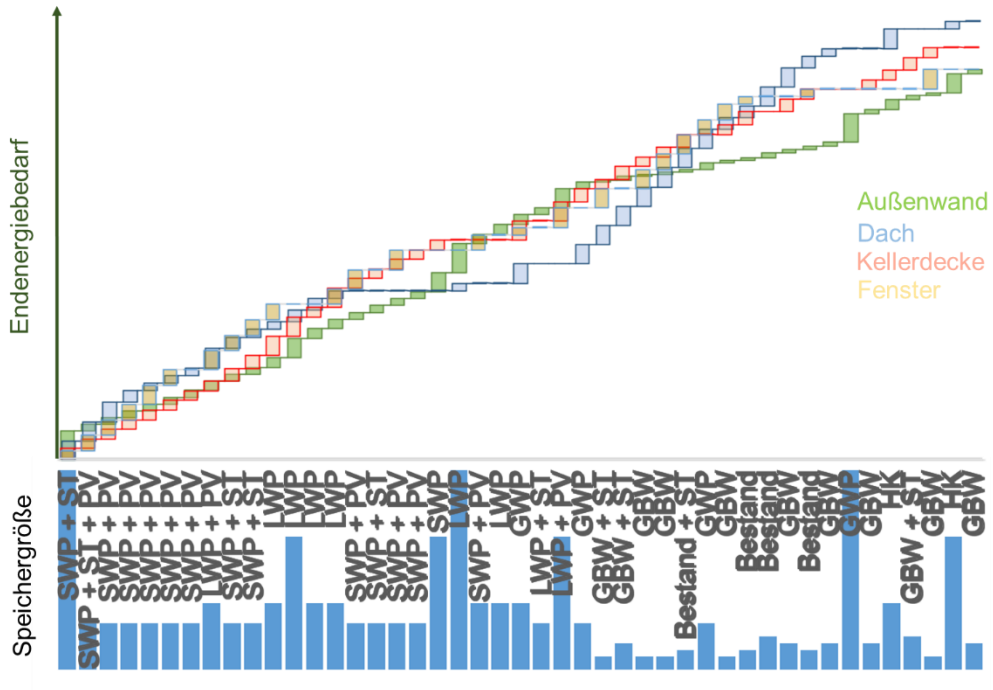

Abb. 7: Sanierungspakete (GBW – Gasbrennwert, GWP – Gaswärmepumpe, LWP – Luft-Wasser-Wärmepumpe, SWP – Sole-Wasser-Wärmepumpe, Holzfeststoffbrennstoffkessel, ST – Solarthermie, PV – Photovoltaik)

In Abb. 7 erfolgt die Aufschlüsselung der einzelnen Optionen an der Gebäudehülle in Form eines Wasserfalldiagramms. Die Sanierungsoptionen sind von rechts nach links mit steigendem Endenergiebedarf angeordnet. Damit entspricht die Anordnung der in Abb. 6. Auf der Abzisse sind die Erzeugersysteme aufgetragen. Über jedem Erzeugersystem sind die Maßnahmen an der Gebäudehülle aufgetragen, die farblich voneinander getrennt sind. Die Balkenhöhe ist bei den Dämmmaßnahmen proportional zur Dämmdicke. Bei einem Strich verbleibt das Bauteil somit in seinem Urzustand. Bei den Fenstern ist die Balkenhöhe proportional zum U-Wert. Somit entsprechen flache Balken bei den Fenstern geringen Transmissionswärmeverlusten, wohingegen dies für die anderen Bauteile durch hohe Balken und damit große Dämmstärken gegeben ist. Die Balken unterhalb der Abzisse sind in ihrer Höhe proportional zur Speichergröße. Das gesamte Sanierungspaket kann aus dem Diagramm somit jeweils horizontal abgelesen werden. Das Diagramm spiegelt die Interaktion zwischen Gebäudehülle und Anlagentechnik wider. So ist beispielsweise zu erkennen, dass ein Technologiewechsel und die Ergänzung von Solarthermie oder Photovoltaik zu verringerten Dämmmaßnahmen bei trotzdem sinkenden Endenergiebedarf führen kann.

7 Zusammenfassung

In Deutschland wird der wesentliche Anteil des Endenergieverbrauchs im Wohnungssektor für die Beheizung von Wohngebäuden eingesetzt, so dass diesem Bereich ein hoher Stellenwert vor dem Hintergrund notwendiger Minderungen des Energieverbrauchs und der Schadstoff-Emissionen zukommt. Bei der energetischen Optimierung von Wohngebäuden konkurrieren unterschiedliche bauliche und technische Maßnahmen um das zur Verfügung stehende Kapital. Mittels eines genetischen Optimierungsalgorithmus in der

Programmiersprache Python werden optimale Sanierungspakete für anlagentechnische Sanierungsmaßnahmen und bauphysikalische Lösungen hinsichtlich ihrer Kosten und ihres Einsparpotenzials ermittelt. Auf Grund einer dynamischen Betrachtungsweise kann das gesamte Energiesysteme mit seiner Interaktion und Speichereffekten abgebildet. Die Ergebnisse der Optimierungsberechnungen werden in einer Pareto Front dargestellt, so dass der Nutzer die Gewichtung der Zielgrößen aus dem Lösungsportfolio selbst vornehmen kann.

Der entwickelte Algorithmus dient zum einen als Rechenkern eines im Rahmen des Projektes entwickelten Online Sanierungschecks. Zum anderen kann der Algorithmus eigenständig für unterschiedlichste Szenarien- und Trendanalysen der regulatorischen und wirtschaftlichen Randbedingungen, wie Änderung von Primärenergiefaktoren und Kostenentwicklungen genutzt werden.

8 Literaturverzeichnis

[Ansorge 2017] Ansorge, K.; Streblow, R.: Gebäudesteckbriefe, Gebäude-Energiewende, Arbeitspapier 6, 2017 Berlin

[BMVBS 2009] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Wohngebäudebestand vom 30. Juli 2009. Berlin

[Dunkelberg 2016] Dunkelberg, E.; Weiß, J.: Ökologische Bewertung energetischer Sanierungsoptionen, Gebäude-Energiewende, Arbeitspapier 4, 2016, Berlin

[EN 2006] DIN EN 12975 Blatt 2: Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile - Kollektoren - Teil 2: Prüfverfahren, Beuth Verlag, 2006

[Entchev 2014] Entchev, E.; Tzscheutschler, P.: Integration of Microgeneration and Related Technologies in Building, Final Report Annex 54, 2014

[Evins 2013] Evins, R.: A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 22, S. 230–245, 2013 DOI: 10.1016/j.rser.2013.02.004

[Fortin 2014] Fortin, F.-A.; De Rainville, F.-M.; Gardner, M.-A; Parizeau, M. and Gagné, C.: DEAP: Evolutionary algorithms made easy, Journal of Machine Learning Research, vol. 13, pp. 2171–2175, jul 2012

[IWU 2005] IWU: Entwicklung eines vereinfachten, statistisch abgesicherten Verfahrens zur Erhebung von Gebäudedaten für die Erstellung des Energieprofils von Gebäuden, 2005, pp. I-27 bis I-29

[Lauster 2014] Lauster, M., Teichmann, J., Fuchs, M., Streblow, R., & Mueller, D. Low order thermal network models for dynamic simulations of buildings on city district scale. Building and Environment 73, 2014, pp.223–231. doi:10.1016/j.buildenv.2013.12.016

[Masters 2004] Masters, G. M.: Renewable and efficient electric power systems. JonWiley & Sons Inc., 2004

[ISO 2008] DIN EN ISO 13790, Energieeffizienz von Gebäuden –Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung. Beuth Verlag. 2008

[Salecki 2017] Salecki, S.: Regionalökonomische Bewertung energetischer Gebäudesanierung - Wertschöpfung und Beschäftigung in den Regionen Lausitz-Spreewald und Potsdam / Potsdam-Mittelmark, Gebäude-Energiewende, Arbeitspapier 10, 2017, Berlin.

[Schuler 1997] Schuler, M.: Dynamische Simulation des thermischen Verhaltens von Gebäuden. In: Armin Marko und Peter Braun (Hrg.): Thermische Solarenergienutzung an Gebäuden. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 173–193, 1997

[SIA 2006] SIA Merkblatt 2024. Standard-Nutzungsbedingungen für Energie- und Gebäudetechnik. SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein Zürich, 2006

[UBA 2013] Energieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren. Online verfügbar unter http://www.umweltbundesamt.de/daten/energiebereitstellung-verbrauch/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren, zuletzt geprüft am 24.06.2014

[van Treeck 1998] van Treeck, C.: Dynamische Simulation des thermischen Verhaltens von Gebäuden. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1998

[VDI 2000] VDI 2067 Blatt 1, Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen Grundlagen und Kostenberechnung, Beuth Verlag, 2000

[VDI 2013] VDI 2067 Blatt 40, Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen Energieaufwand für die Erzeugung, Beuth Verlag, 2013

[VDI 2014] VDI 4650 Blatt 1 Berechnung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpenanlagen, Beuth Verlag. 2014.

www.gebaeude-energiewende.de