



MODELLBASIERTER VARIANTENVERGLEICH HEIZUNGSTECHNISCHER SYSTEME IN FRÜHEN PLANUNGSPHASEN

Tom Radisch¹, John Grunewald², Ulrich Möller³

¹ HTWK Leipzig, IHBB, Deutschland, E-Mail: tom.radisch@htwk-leipzig.de

² TU Dresden, Institut für Bauklimatik, Deutschland, E-Mail: john.grunewald@tu-dresden.de

³ HTWK Leipzig, IHBB, Deutschland, E-Mail: ulrich.moeller@htwk-leipzig.de

Kurzfassung

Im vorliegenden Paper erfolgt eine systematische Aufbereitung des Variantenvergleichs heizungstechnischer Systeme mithilfe der Methode der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung unter Einbindung einer instationären anlagentechnischen Simulation. Relevant ist diese Arbeit für die Auswahl eines geeigneten Heizungssystems im Planungsprozess von Auftraggeber, Objektplaner, Bauphysiker und Fachplaner für Technische Gebäudeausrüstung.

Zur Erörterung einer geeigneten Methodik für den Variantenvergleich erfolgt in dieser Arbeit die Vorstellung einer Fallstudie, in der die Gegenüberstellung der heizungstechnischen Systeme hinsichtlich ökonomischer und ökologischer Kenngrößen durchgeführt wird. Im Ergebnis zeigt diese Arbeit die Potentiale und zu bearbeitende Handlungsfelder für die Anwendung der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung unter Einbindung anlagentechnischer Simulationen auf.

Abstract

In this paper, the comparison of alternatives of heating systems is conducted using the method of multi-criteria decision analysis with integration of transient simulation. This work is relevant for the selection of a heating system in the planning process of clients, architects, building physicists and MEP engineers.

This paper presents a case study for the comparison of heating systems, which is carried out with regard to economic and ecological criteria. As a result, this work shows the potentials and fields of action for the application of multi-criteria decision analysis in the presented use case.

Einführung

Bedeutung von Variantenvergleichen in frühen Planungsphasen

Die Wahl eines Systems zur heizungstechnischen Versorgung des Gebäudes ist von besonderer Bedeutung, in Deutschland nicht zuletzt aufgrund des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) und des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) mit den darin enthaltenen Vorgaben zur Begrenzung des Primärenergiebedarfs sowie zur Nutzung erneuerbarer Energien für die Wärme- und Kälteversorgung. Die Fokussierung auf frühe Planungsphasen resultiert aus der Überlegung, dass der Aufwand von Änderungen im Planungsprozess geringer ist, je früher eine Entscheidung getroffen wird (Gantner, 2017). Die Erstellung von Vergleichsübersichten folgt in der planerischen Praxis in der Regel einem individuellen Vorgehen des jeweiligen Unternehmens bzw. Planers, wobei eine strukturierte Aufbereitung der Methodik zum Vergleich solcher Anlagen fehlt und häufig nur Erfahrungswerte als Entscheidungsgrundlage herangezogen werden.

Bedeutung anlagentechnischer Simulationen für den Variantenvergleich

Die Bestimmung von ökonomischen und ökologischen Kennwerten für den Variantenvergleich von Heizungssystemen steht im direkten Zusammenhang mit energetischen Kenngrößen des Energiebedarfs. Daher nimmt die energetische Bewertung verschiedener Energieversorgungsvarianten eine zentrale Rolle für den Variantenvergleich ein.

Die Ermittlung des End- und Primärenergiebedarfs eines neu zu errichtenden Wohngebäudes muss nach GEG verpflichtend mithilfe des Berechnungsverfahrens der DIN V 18599 (bis 2023 auch nach DIN V 4108 möglich) durchgeführt werden. Nachteilig an dem Verfahren ist, dass unter Verwendung dieser Berechnungsmethode nicht der tatsächliche, gebäude-spezifische Energiebedarf ermittelt wird. Die Studien von (Ackermann, 2020), (dena, 2013) und (Großklos, 2016) belegen, dass der mithilfe statischer Methoden

ermittelte Energiebedarf in Wohngebäuden (z. B. nach DIN 4108-6 oder DIN V 18599-2) erheblich von den tatsächlich gemessenen Energieverbräuchen abweicht.

Eine Ursache dafür, dass stationäre Berechnungsmethoden für die Bewertung von zunehmend komplexen technischen Anlagen teilweise sehr ungenaue Ergebnisse erzielen, sind die zeitlich unterschiedlichen Verhaltensweisen gekoppelter Anlagensysteme, insbesondere zur Nutzung regenerativer Energien. Um genauere Vorhersagen über das Systemverhalten herleiten zu können, werden von modernen Simulationswerkzeugen unterschiedliche Lastzustände zu verschiedenen Jahres- und Tageszeiten unter Zuhilfenahme von Zeitreihen erfasst und verarbeitet.

Kennwertermittlung in frühen Planungsphasen mit TOP Energy

TOP Energy ist eine Softwareanwendung, die zur Simulation, Optimierung und Bewertung von Energieversorgungssystemen dient. Die Energiesimulationssoftware ermöglicht zeitabhängige Simulationen zur Analyse von Versorgungsvarianten für Wärme, Kälte, Strom und andere energetische Bedarfe. In (Wrobel et al., 2013) wird die Anwendung von *TOP-Energy* als Tool für die anlagentechnische Simulation auf Gebäudeebene in frühen Planungsphasen vorgestellt.

Grundlagen und Stand der Forschung

Charakteristika des Auswahlprozesses in frühen Planungsphasen

Charakteristisch für den Auswahlprozess von Heizungssystemen in frühen Planungsphasen sind in der Praxis häufig folgende Limitationen:

- unterschiedliche Interessen der Entscheidungsträger hinsichtlich mehrerer, teilweise zueinander in Konflikt stehender Kriterien (Catrinu, 2006),
- eine begrenzte Zeitkapazität der Beteiligten,
- unvollständige Planungsinformationen sowie
- kognitive Grenzen der Beteiligten (Gantner et al., 2018).

Aufbauend auf den Limitationen lassen sich für den Auswahlprozess folgende Anforderungen ableiten:

- eine hohe Zeiteffizienz für alle Beteiligten,
- eine überschaubare Komplexität der Ergebnisse sowie
- eine hohe Validität der Aussagen bzw. Ergebnisse bezüglich der relevanten Kriterien (Shahrestani et al., 2018B).

Multikriterielle Entscheidungsunterstützung

Für komplexe Auswahlprozesse mit mehreren, teilweise zueinander in Konflikt stehenden Kriterien steht die Methode der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung (engl. Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA) zur Verfügung. Die MCDA ist ein Verfahren, bei dem die Eignung mehrerer zur Verfügung stehender Alternativen in einem Auswahlprozess hinsichtlich mehrerer Kriterien transparent gegenübergestellt und verglichen wird. (Geldermann & Lerche, 2014)

Die Durchführung einer multikriteriellen Entscheidungsanalyse erfolgt in der Regel in folgenden grundlegenden Schritten, wobei je nach Literaturstelle Teilschritte unterschiedlich stark aggregiert oder hinsichtlich der Reihenfolge getauscht werden (Geldermann & Lerche, 2014; Schär, 2018):

1. Übergeordnete Zieldefinition der Auswahl-aufgabe
2. Definition der Alternativen
3. Hierarchische Definition des Zielsystems und der (Vergleichs-)Kriterien
4. Bewertung der Präferenzen und Kriterien-wichtung
5. Bestimmung der Kriterienausprägungen für die Alternativen
6. Aggregation und Erzielung einer Rangfolge
7. Sensitivitätsanalyse und Ergebnisbeurteilung

In Reviews zum Beispiel von (Shahrestani et al., 2018B), (Kamari et al., 2020) und (Siksnelyte-Butkiene et al., 2020) wird ersichtlich, dass es eine Vielzahl von Publikationen zu MCDA im Kontext energetischer Fragestellungen gibt. In den genannten Veröffentlichungen erfolgte jedoch keine Auseinandersetzung mit dem Variantenvergleich im Kontext früher Planungsphasen.

Fallstudie

Meta-Entscheidung der Methodenwahl

Für die Durchführung einer multikriteriellen Entscheidungsunterstützung stehen zahlreiche Methoden zur Verfügung, die beispielsweise in (Shahrestani et al., 2018A), (Wilkens, 2012) und (Ruhland, 2004) übersichtlich dargestellt werden. Im Rahmen dieser Fallstudie wird die Methode der Nutzwertanalyse (auch genannt: Scoring-Modell, Punktbewertungsverfahren) gewählt, die als kompensatorisches multiattributives Verfahren eine möglichst einfache, wenig komplexe Vorgehensweise zur Ergebnisaggregation ermöglicht, um den Limitationen in frühen Planungsphasen zu entsprechen.

Zieldefinition der Auswahl Aufgabe

Das übergeordnete Ziel im Rahmen der Fallstudie ist die Auswahl eines Heizungssystems für die Versorgung eines fiktiven Mehrfamilienhauses, im Folgenden Referenzgebäude genannt (Abb. 2).



Abbildung 2: Entwurfsmodell des Referenzgebäudes von Thomas Gröschke aus (Radisch et al., 2021)

Als zeitliche Bilanzgrenze (für ökonomische Betrachtungen) wird ein Betrachtungszeitraum von 15 Jahren festgelegt, der sich an der unteren Grenze der rechnerischen Nutzungsdauer für Komponenten der Wärmeerzeugung gemäß (VDI 2067-1, 2012) orientiert. Die Berechnung energetischer Kennwerte mithilfe der eingebundenen Simulationen bezieht sich jeweils auf den Zeitraum von einem Jahr. Auf dieser Basis werden ökonomische und ökologische Kennwerte gebildet.

Hinsichtlich der räumlichen Bilanzgrenze dienen die Grundstücksanschlüsse für die Gas-, Fernwärme- und/oder Stromversorgung der Liegenschaft als Systemgrenze, sodass die gebäudeinternen Verluste für die Speicherung, Verteilung und Übergabe von Wärme und Strom in der Fallstudie berücksichtigt werden (vgl. Albers, 2018).

Definition der Alternativen

Als zu vergleichende Alternativen werden sechs heizungstechnische Systeme berücksichtigt, die sich hinsichtlich Wärmeerzeugung, -speicherung und -verteilung unterscheiden. Diese können in Kurzform wie folgt charakterisiert werden:

1. Gas-Brennwertkessel + Solarthermie (Pufferspeicher, Wohnungsstationen)
2. Pelletkessel (Pufferspeicher, Wohnungsstationen)
3. Fernwärmestation (ohne Pufferspeicher, Wohnungsstationen)
4. Luft-Wärmepumpe + Gas-Brennwertkessel + Photovoltaik (Pufferspeicher, zentrale Trinkwarmwasserbereitung)
5. Sole-Wärmepumpe (Pufferspeicher, dezentrale elektrische Durchlauferhitzer)

6. Brennwertkessel + Blockheizkraftwerk (Pufferspeicher, Wohnungsstationen)

Eine aussagekräftige Vergleichbarkeit heizungstechnischer Systeme ist nach (Fitzner, 2005) nur möglich, wenn gleiche Randbedingungen sichergestellt werden. Diese stellen sich wie folgt dar:

- Wetterdaten: Testreferenzjahr des Deutschen Wetterdienstes für Potsdam in Anlehnung an (Weißmann, 2017),
- Lasten für Strom- und Trinkwarmwasserbedarf stündlich aufgelöst nach (VDI 4655, 2021),
- Berücksichtigung förderpolitischer Maßnahmen: i) Steuerentlastung für KWK-Anlagen, ii) KWKG-Förderung, iii) EEG-Umlage,
- Kalkulatorische Größen: i) Kalkulationszins: 3 %, ii) Preissteigerungsraten für Investitionskosten 0,6 %, für Energiekosten 2,4 %, für sonstige Kosten 1,3 % gemäß eigener statistischer Analysen.

Definition der Vergleichskennwerte

In Deutschland sind über 80 % der Wohngebäude und Wohnungen im Besitz von Privatpersonen oder privaten Wohnungsgemeinschaften (Destatis, 2011). Hinsichtlich der ökonomischen Bewertung wird für diese Zielgruppe angenommen, dass sowohl die Errichtungs- als auch die Nutzungskosten zu berücksichtigen sind. Hinsichtlich der ökologischen Bewertung stellen CO₂-Emissionen und Primärenergiebedarf in der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie (Deutsche Bundesregierung, 2021), im Klimaschutzgesetz, im GEG sowie in der Fachliteratur (Voss et al., 2016; Knapp et al., 2021) bedeutsame Kennwerte dar.

Als Vergleichskennwerte werden daher exemplarisch gewählt:

- Ökonomischer Kennwert:
Kriterium 1: Jährliches Saldo der Kosten nach (VDI 2067-1, 2012),
- Ökologische Kennwerte:
Kriterium 2.1: CO₂-Emissionen,
Kriterium 2.2: Primärenergiebedarf (nicht erneuerbarer Anteil)

Präferenzen und Kriterienwichtung

Um eine Vergleichbarkeit der definierten Vergleichskriterien zu erreichen, müssen Kriterien hinsichtlich der Präferenzen des Entscheidungsträgers in Bezug auf das Kriterium selbst (Höhenpräferenz) normiert und in Bezug auf die Bedeutung des Kriteriums für den gesamten Entscheidungsprozess (Artenpräferenz) gewichtet werden.

In dieser Fallstudie wird die Methode des Direct Ratio mit gleichmäßiger Gewichtung je Zielebene in Anlehnung an (Alanne et al., 2007) gewählt (Kriterium 1: $w_1 = 0,5 = 50\%$, Kriterium 2.1 und Kriterium 2.2: $w_{2.1} = w_{2.2} = 0,25 = 25\%$).

Die Bewertung der Höhenpräferenz wird anhand der minimalen und maximalen Kriterienausprägung je Kriterium nach Gleichung 1 in Anlehnung an (Ruhland, 2004) durchgeführt:

$$v_j = \begin{cases} \text{wenn } k_j(a_i) \rightarrow \max: v_j(k_j(a_i)) = \frac{k_j(a_i) - \min\{k_j(a_i)\}}{\max\{k_j(a_i)\} - \min\{k_j(a_i)\}} \\ \text{wenn } k_j(a_i) \rightarrow \min: v_j(k_j(a_i)) = \frac{\max\{k_j(a_i)\} - k_j(a_i)}{\max\{k_j(a_i)\} - \min\{k_j(a_i)\}} \end{cases} \quad (1)$$

v_j = Zielerfüllungsgrad (Punktwert, Höhenpräferenz) für Vergleichskriterium j ; a_i = Alternative i ; k_j = Kriterienausprägung für Vergleichskriterium j .

Kennwertermittlung

Übergeordneter Ablauf

Die Ermittlung der Kennwerte erfolgt mit folgendem Ablauf:

1. Gebäudeenergiesimulation zur Ermittlung der zeitlich aufgelösten Lasten für den Raumwärmebedarf (hier: Einsatz von BIM-HVACTool und Nandrad, vgl. (Weiß et al., 2016))
2. Entwicklung der Anlagenschemata zur Konzeptionierung der Alternativen (hier: schematische Aufbereitung in *TOP Energy*)
3. Dimensionierung wesentlicher Komponenten der heizungstechnischen Alternativen (hier: vereinfachte Auslegung mithilfe der Lasten in *TOP Energy* in Kombination mit Erfahrungswerten aus der Fachliteratur und normativen Vorgaben aus (DIN EN 12831-1, 2017))
4. Anlagentechnische Simulation (hier: mit *TOP Energy*)
5. Bestimmung ökonomischer und ökologischer Kennwerte (hier: unter Verwendung von Kostenfunktionen z. B. aus (Jagnow et al., 2007) und (Jagnow et al., 2009) in Kombination mit Berechnungsvorgaben aus (VDI 2067-1, 2012) und spezifischen CO₂-Emissionsfaktoren sowie Primärenergiefaktoren aus (DIN V 18599-1, 2018))

Kennwertermittlung mit *TOP Energy*

Das vorgestellte Fallbeispiel soll als möglichst „neutrales“ Vergleichsmodell dienen. Daher erfolgt die Modellbildung und Parametrisierung anhand ausgewerteter Fachliteratur und Richtlinien, zum Beispiel:

- die Abbildung lastabhängiger Kessel-Wirkungsgrade nach (Seifert et al., 2015) und (Albers, 2018),
- die Parametrisierung der Solarthermieanlage nach (Eicker, 2012), (Bollin, 2016) und (VDI 6002-1, 2014) sowie
- die Parametrisierung der Photovoltaikanlage nach (Eicker, 2012) und (Wagner, 2015).

Weiterhin wird auch das Anlagenverhalten der Wärmespeicherung, -verteilung und -übergabe vereinfacht in Anlehnung an Vorarbeiten von zum Beispiel (Eicker, 2012) und (Knorr et al., 2011) abgebildet.

Aggregation zur Erzielung einer Rangfolge

Für die betrachteten Varianten konnten die in Tabelle 1 aufgeführten Kennwerte ermittelt werden.

Tabelle 1: Kriterienausprägungen für die Alternativen in der Fallstudie

V	1) SALDO IN €/A	2.1) CO ₂ -EMISSIONEN IN T/A	2.2) PRIMÄR-ENERGIE-BEDARF IN MWH/A
1	-16.800	11,6	52,8
2	-17.700	3,2	15,1
3	-17.000	15,6	39,3
4	-15.900	10,0	41,5
5	-19.600	13,6	44,4
6	-18.400	10,9	58,7

Hieraus ergibt sich nach Gleichung 2 die in Tabelle 2 dargestellte Bewertung der Varianten in Anlehnung an (Kühnappel, 2019).

$$sc_{ges,i}(a_i) = \sum_{j=1}^m sc_j(a_i) = \sum_{j=1}^m w_j \cdot v_j(k_j(a_i)) \quad (2)$$

$sc_{ges,i}$ = Gesamtnutzwert (Score) der Alternative i ; sc_j = Teilnutzwert für Kriterium j ; w_j = Kriterien-gewicht (Artenpräferenz) des Vergleichskriteriums j .

Tabelle 2: Höhenpräferenzen hinsichtlich der Vergleichskriterien für die Alternativen in der Fallstudie

V	TEILNUTZWERTE D. KRITERIEN			NUTZ-WERT
	1	2.1	2.2	
1	76	32	14	49
2	51	100	100	76
3	70	0	44	46
4	100	45	39	71
5	0	16	33	12
6	32	38	0	26

Zusammenfassung der Chancen von MCDA unter Einbindung von *TOP Energy*

Im Rahmen der Fallstudie konnte die MCDA als unterstützende Methode für die Strukturierung des Variantenvergleichs heizungstechnischer Systeme identifiziert werden. Hierfür sind zwei wesentliche Charakteristika der Softwareanwendung *TOP Energy* relevant. Einerseits bietet die Software bei der Beschreibung der Anlagenvarianten eine vergleichsweise flexible Verschaltung der Anlagenkomponenten mit intuitiver Bedienbarkeit, die durch die grafische Verschaltung von Modellelementen ermöglicht wird. Andererseits erfolgt die Parametrisierung der Modellkomponenten weitestgehend mithilfe von Kennwerten, die einer Vielzahl energie- und anlagentechnischer Fachingenieure bekannt sind (z. B. für eine Solarthermieanlage unter Angabe der Kollektorfläche, des optischen Wirkungsgrads sowie der Wärmeverlustkoeffizienten nach (Eicker, 2012)).

Diskussion und identifizierte Handlungsfelder

Die im Rahmen der Fallstudie vorgestellten Ergebnisse sind als vorläufige Zwischenergebnisse zu interpretieren, nicht als pauschale Eignungsbewertung der benannten Systeme. Ausgehend von den Ergebnissen erschließen sich zahlreiche Handlungsfelder, die in zukünftigen Arbeiten der Autoren adressiert werden sollen, um eine belastbare Entscheidungsgrundlage für den Auswahlprozess zu generieren.

Abhängigkeit der Vergleichskennwerte vom Entscheidungsträger und Verordnungsrecht

In realen Bauprojekten besteht die Herausforderung, sowohl Auswahl als auch Wichtung der Vergleichskennwerte an die subjektiven Präferenzen des Entscheidungsträgers anzupassen (Hecher et al., 2017). Hierfür stehen beispielsweise die Verfahren SMART, SWING und Trade-Off aus der Entscheidungstheorie zur Verfügung (Rödel, 2019). Weiterhin ist das Auswahlverfahren an die jeweils aktuellen verordnungsrechtlichen Rahmenbedingungen anzupassen. Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Papers werden neben den Treibhausgasen zum Beispiel die Einführung des Endenergiebedarfs in Kombination mit einem Gebäuderessourcen- und nachhaltigkeitspass als wesentliche Anforderungen einer zukünftigen Novelle des GEG diskutiert (Pehnt et al. 2022). Diese Kriterien lösen möglicherweise den Primärenergiebedarf als wesentlichen Vergleichskennwert ab.

Analyse der getroffenen Vereinfachungen im Rahmen der Nutzwertanalyse

In der Methode der Nutzwertanalyse wird die Präferenz des Entscheidungsträgers stark vereinfacht auf einen Nutzwert aggregiert. Gemäß Tabelle 2 ergibt sich im Rahmen der Fallstudie beispielsweise eine

Präferenz für die Alternative mit Einbindung eines Holzpelletkessels. Durch die „Karbonisierung der Umweltpolitik“ wird der Energieträger Holz als weitestgehend erneuerbar eingestuft, wobei Perspektiven unter anderem der Biodiversität, der Feinstaubbelastung, des Biomasse-Potentials in Deutschland und des kritisch zu hinterfragenden Rebouneffekts im Rahmen dieser Vereinfachung nicht abgebildet werden können (Knapp et al., 2021). Folglich ist die Aussagekraft bzw. Belastbarkeit der Ergebnisse von Nutzwertanalysen unter Berücksichtigung der gewählten Form der Kriterienwichtung und -aggregation kritisch zu diskutieren.

Analyse der getroffenen Vereinfachungen im Rahmen der instationären Anlagensimulation

Im Rahmen der Fallstudie wurde das Handling in der Anwendung von *TOP Energy* durch eine an die Planungsphase angepasste Detaillierung der Parametrisierung als Vorteil hinsichtlich der Praktikabilität identifiziert. Dem gegenüber gilt es die bedeutsame Fragestellung kritisch zu beleuchten, welche Ungenauigkeiten bei der energetischen Bewertung der Alternativen entstehen, z. B. durch:

- die vereinfachte Berücksichtigung des Wirkungsgrades von Kesselanlagen als lastabhängige Größe,
- die fehlende Rückkopplung der simulierten anlagentechnischen Komponenten mit dem Gebäude und der Umgebung sowie
- die zeitliche Auflösung der Lastprofile und Simulationszeitschritte.

Im Rahmen einer weitergehenden Analyse gilt es zu identifizieren, welche Komplexität instationäre Anlagensimulationen in frühen Planungsphasen erreichen müssen, um tatsächlich belastbare Prognosen im Vergleich zu herkömmlichen Methoden wie beispielsweise der DIN V 18599 zu ermöglichen.

Durchführung von Sensitivitätsanalysen

Zahlreiche Parameter in der Bewertung anlagentechnischer Simulationen sind mit Unsicherheiten belegt. Hierzu zählen beispielsweise:

- der Einfluss des Nutzers der Anlage auf den Nutzenergiebedarf (betrifft Gebäudeenergiesimulation (Geissler & Tritthart W., 2002)),
- der Einfluss der Bauausführung auf die Anlageneffizienz (betrifft anlagentechnische Simulation (Voss et al., 2016)) sowie
- der Einfluss individueller Tarife auf die Preise der Energieträger (betrifft ökonomische Bewertung (Voss et al., 2016)).

Um die Aussagekraft der bestimmten Kriterienausprägungen hinsichtlich der Unsicherheiten einord-

nen zu können, sieht die MCDA als letzten Schritt die Durchführung von Sensitivitätsanalysen vor. Diese wurden von den Autoren bisher noch nicht untersucht, ermöglichen es aber perspektivisch, die Auswirkungen der Veränderung von Eingangsgrößen sowie unterschiedlicher Anlagenkonzepte und -dimensionierungen auf den Nutzwert zu quantifizieren.

Praktische Aufbereitung des Post-Processing für multikriterielle Entscheidungsunterstützung

Der Prozess der MCDA inklusive Variantenbildung, Kennwertauswahl, Kriterienwichtung, Datensammlung und Aggregation kann nur begrenzt mithilfe von *TOP Energy* unterstützt werden. Um die direkte Verwertbarkeit der Simulationsergebnisse für Präsentationen gegenüber Entscheidungsträgern zu verbessern, erscheint die Weiterentwicklung der bisher vorhandenen Funktionalitäten in Bezug auf eine Prozessunterstützung für MCDA erstrebenswert.

Erweiterung der Bilanzgrenze für den Variantenvergleich heizungstechnischer Systeme

Heizungssysteme mit Kraft-Wärme-Kopplung wie beispielsweise Blockheizkraftwerke versorgen Gebäude sowohl mit Wärme als auch mit Strom. Weiterhin können beispielsweise Photovoltaikanlagen Strom liefern für elektrisch betriebene Wärmeerzeuger wie Wärmepumpen. Diese Zusammenhänge beeinflussen nicht zuletzt die Anlageneffizienz und Wirtschaftlichkeit. Daher werden in der vorgestellten Fallstudie Haushaltsstrom sowie Stromeinspeisung und -bezug vom öffentlichen Stromversorger (inklusive Hilfsenergie) für die Ermittlung der ökonomischen und ökologischen Kennwerte berücksichtigt.

Darüber hinaus sind die Integration maschineller Lüftungs- und Klimaanlage sowie Aspekte der Elektromobilität weitere Einflussfaktoren. Diese können in einem vernetzten Energieversorgungskonzept berücksichtigt werden, um eine noch belastbarere Entscheidungsgrundlage für die Entscheidungsträger zu erzielen.

Literatur

- Ackermann, T., 2020. Energiebedarf versus Energieverbrauch unter Einbeziehung von Langzeitmessungen zum Temperaturverlauf, *Bauphysik*, 42 (1), 1–10.
- Alanne, K. et al., 2007. Multi-criteria evaluation of residential energy supply systems, *Energy and Buildings*, 39 (12), 1218–1226.
- Albers, K.-J. (Hg.), 2018. Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik - Einschließlich Trinkwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte, Augsburg, Deutschland.
- Bollin, E. (Hg.), 2016. Regenerative Energien im Gebäude nutzen - Wärme- und Kälteversorgung, Automation, Ausgeführte Beispiele, Wiesbaden, Deutschland.
- Catrinu, M. D., 2006. Decision Aid for Planning Local Energy Systems - Application of Multi-Criteria Decision Analysis, Trondheim, Norwegen.
- Deutsche Bundesregierung, 2021. Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie, <https://www.bundesregierung.de/re-source/blob/998194/1875176/3d3b15cd92d0261e7a0bc8f43b7839/deutsche-nachhaltigkeitsstrategie-2021-langfassung-download-bpa-data.pdf>.
- Deutsche Energie-Agentur, 2013. Auswertung von Verbrauchskennwerten energieeffizient sanierter Wohngebäude, https://www.zukunftshaus.info/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9003_Studie_Auswertung_von_Verbrauchskennwerten.pdf.
- Deutsches Institut für Normung e. V., 2017. DIN EN 12831-1: Energetische Bewertung von Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast - Teil 1: Raumheizlast, Modul M3-3.
- Deutsches Institut für Normung e. V., 2018. DIN V 18599-1: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger.
- Eicker, U., 2012. Solare Technologien für Gebäude - Grundlagen und Praxisbeispiele, Wiesbaden, Deutschland.
- Fitzner, K. (Hg.), 2005. Raumklimatechnik - Band 3: Raumheiztechnik, Berlin, Heidelberg, Deutschland.
- Gantner, J., 2017. Wahrscheinlichkeitsbasierte Ökobilanzierung zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in zukünftigen Entscheidungen und Ereignissen, Stuttgart, Deutschland.
- Gantner, J. et al., 2018. Ökobilanz - Integration in den Entwurfsprozess, *Bauphysik*, 40 (5), 286–297.
- Geissler, S. & Tritthart W., 2002. IEA TASK 23 - Optimization of Solar Energy Use in Large Buildings, https://nachhaltigwirtschaften.at/re-sources/nw_pdf/0223_iea_task23-v2.pdf.
- Geldermann, J. & Lerche, N., 2014. Leitfaden zur Anwendung von Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung, <https://www.uni-goettingen.de/de/document/download/285813337d59201d34806cfc48dae518.pdf/MCDA-Leitfaden-PROMETHEE.pdf>.

- Großklos, M., 2016. Warum sind sie denn so verschieden? Energiebedarf und tatsächlicher Verbrauch - Abgleich zwischen Theorie und Praxis, 7. Internationaler Holz(Bau)Physik-Kongress, 33–35.
- Hecher, M. et al., 2017. The trigger matters: The decision-making process for heating systems in the residential building sector, *Energy Policy*, 102, 288–306.
- Jagnow, K. et al., 2007. Investitionskostenfunktionen TGA, https://www.delta-q.de/export/sites/default/de/downloads/investitionskosten_tga_1.pdf.
- Jagnow, K. et al., 2009. Investitionskostenfunktionen TGA - Ergänzung I (2009), https://www.delta-q.de/export/sites/default/de/downloads/investitionskosten_tga_2.pdf.
- Kamari, M. L. et al., 2020. Applications of Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) Methods in Renewable Energy Development: A Review, *Journal of Renewable Energy Research and Applications (RERA)*, 1 (1), 47–54.
- Knapp, H. D., Klaus, S., Fähser, L. (Hg.), 2021. *Der Holzweg - Wald im Widerstreit der Interessen*, München, Deutschland.
- Knorr, M. et al., 2011. Energieoptimiertes Bauen - Energetische Gesamtanalyse, Bewertung und Verbesserung von komplexen HLK-Systemen für Wohngebäude unter Berücksichtigung wärmephysiologischer Aspekte, Stuttgart, Deutschland.
- Kühnapfel, J. B., 2019. *Nutzwertanalysen in Marketing und Vertrieb*, Wiesbaden, Deutschland.
- Pehnt et al. 2022. Gebäudeenergiegesetz - Chancen und Risiken. Vortrag: Berliner Energietage, 02.05.2022.
- Radisch, T. et al., 2021. VARIUS - BIM-basierte Variantenuntersuchung für verbesserte Planungsentscheidungen, *build-ing*, 2021 (5), 13–19.
- Rödel, S., 2019. Entscheidungsunterstützung zur Bewertung von Verfahren zur Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen, München, Deutschland.
- Ruhland, A., 2004. Entscheidungsunterstützung zur Auswahl von Verfahren der Trinkwasseraufbereitung an den Beispielen Arsenentfernung und zentrale Enthärtung, Berlin, Deutschland.
- Schär, S., 2018. State-of-the-Art dynamischer Methoden zur multikriteriellen Entscheidungsunterstützung, *JUNIOR MANAGEMENT SCIENCE*, 3 (3), 146–165.
- Seifert, J. et al., 2015. *Repetitorium Heizungstechnik*, Berlin, Offenbach, Deutschland.
- Shahrestani, M. et al., 2018A. A fuzzy multiple attribute decision making tool for HVAC&R systems selection with considering the future probabilistic climate changes and electricity decarbonisation plans in the UK, *Energy and Buildings*, 159, 398–418.
- Shahrestani, M. et al., 2018B. Decision-making on HVAC&R systems selection: a critical review, *Intelligent Buildings International*, 10 (3), 133–153.
- Siksnyte-Butkiene, I. et al., 2020. Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) for the Assessment of Renewable Energy Technologies in a Household: A Review, *Energies*, 13 (5), 1–22.
- Statistisches Bundesamt, 2011. Gebäude mit Wohnraum sowie Wohngebäude nach Eigentumsform des Gebäudes, https://ergebnisse.zensus2011.de/#StaticContent:00,GWZ_1_1_4,m,table.
- Verein Deutscher Ingenieure, 2012. VDI 2067-1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung.
- Verein Deutscher Ingenieure, 2014. VDI 6002-1: Solare Trinkwassererwärmung - Allgemeine Grundlagen - Systemtechnik und Anwendung im Wohnungsbau.
- Verein Deutscher Ingenieure, 2021. VDI 4655: Referenzlastprofile von Wohngebäuden für Strom, Heizung und Trinkwarmwasser sowie Referenzerzeugungsprofile für Fotovoltaikanlagen.
- Voss, K. et al. (Hg.), 2016. *Performance von Gebäuden - Kriterien, Konzepte und Erfahrungen*, Stuttgart, Deutschland.
- Wagner, A., 2015. *Photovoltaik Engineering - Handbuch für Planung, Entwicklung und Anwendung*, Heidelberg, Deutschland.
- Weiß, D. et al., 2016. Integration von thermischer Gebäudesimulation und Strömungssimulation in einer Nutzungsoberfläche - BIM HVACTool, Proceedings of the CESBP Central European Symposium on Building Physics and BauSIM 2016, Fraunhofer IRB Verlag, 589–595.
- Weißmann, C., 2017. Effizienter Einsatz erneuerbarer Energieträger in vernetzten Wohnquartieren, Darmstadt, Deutschland.
- Wilkens, I., 2012. Multikriterielle Analyse zur Nachhaltigkeitsbewertung von Energiesystemen - Von der Theorie zur praktischen Anwendung, Berlin, Deutschland.
- Wrobel, G. et al., 2013. Softwarebasierte Variantenvergleiche in der Gebäudeenergie-technik, 6. Energietechnisches Symposium: Variantenvergleiche in der Gebäudetechnik - Messen-Berechnen-Simulieren-Bewerten, Steinbeis, 35–50.