

Entscheidungstool für effiziente Energieregelung in multivalenten Heizungs- und Kälteanlagen

Florian Rapaic, MCI & Ortner Ges.m.b.H.

Silvia Öttl, MCI

Harald Erhart, Ortner Ges.m.b.H.

Abstract: Zur gezielten Aktivierung von Energieumwandlungssystemen in multivalenten Heiz- und Kältsystemen wird ein Entscheidungstool entwickelt. Es basiert auf einer realisierten Anlage, für die eine ON/OFF-Matrix erstellt und mithilfe von Wetterdaten aus dem Jahr 2023 simuliert wird. Der Vergleich zwischen Entwurfsplanung und umgesetztem System zeigt deutliche Effizienzvorteile durch die konsequente hydraulische Trennung der Temperaturniveaus in Kombination mit intelligenter Regelung. Der Gasverbrauch wird signifikant reduziert, die Nutzung von Umweltenergie erhöht und trotz steigenden Strombedarfs werden sowohl CO₂-Emissionen als auch Betriebskosten gesenkt. Das Tool ist bereits in die Steuerungssoftware integriert und vereinfacht die Programmierung. Es bildet eine praxisnahe Grundlage für zukünftige Projekte und unterstützt den effizienten und nachhaltigen Betrieb komplexer multivalenter Heiz- und Kältsysteme.

Keywords: Heiz- und Kältsysteme, Energieeffizienz, Regelungsstrategien, multivalente Systeme, intelligente Energieregulierung

1. EINLEITUNG

Multivalente Heiz- und Kältsysteme gewinnen angesichts steigender Anforderungen an Energieeffizienz und CO₂-Reduktion an Bedeutung, da sie durch die Kombination verschiedener Energiequellen Effizienz und Versorgungssicherheit erhöhen. Wärmepumpen arbeiten besonders effizient bei niedrigen Vorlauftemperaturen, während konventionelle Kessel hohe Temperaturniveaus und Spitzenlasten abdecken. Entscheidend für einen effizienten Betrieb ist das abgestimmte Zusammenspiel von Hydraulik und Regelung. In der Praxis werden Temperaturniveaus jedoch häufig nicht konsequent getrennt, was Regelbarkeit und Effizienz reduziert.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Entscheidungs- und Schaltmatrix, die Energieumwandlungssysteme last- und effizienzabhängig den Verbrauchern zuordnet. Grundlage bildet ein neu errichtetes Schulungs- und Verwaltungsgebäude, dessen Entwurfsplanung hydraulische Schwachstellen aufwies. Auf Basis der optimierten Ausführungsplanung wird eine Matrix entwickelt, die eine bedarfsgerechte Betriebsführung ermöglicht und Effizienz, erneuerbaren Energieeinsatz sowie Kosten gegenüber der Entwurfsvariante bewertet.

Die Matrix dient als praxisorientierte Entscheidungshilfe zwischen Planung und Regelung und unterstreicht die Bedeutung einer hydraulisch optimierten Systemarchitektur mit konsequenter Temperaturniveau-Trennung (International Organization for Standardization, 2024), (Bollin, 2016).

2. METHODIK

Die Entwicklung des Entscheidungstools basiert auf einem realisierten multivalenten Heiz- und Kühlsystem eines dreigeschossigen Verwaltungsneubaus für über 120 Personen mit integrierten Simulationsanlagen und Seminarräumen. Zunächst wird eine EIN/AUS-Matrix der Wärme- und Kälteerzeuger erstellt. Darauf aufbauend erfolgt eine Jahressimulation mit Wetterdaten des Jahres 2023. Das realisierte System wird mit der Entwurfsplanung als Referenz verglichen. Die Entscheidungsmatrix bildet dabei die Schnittstelle zwischen Planung und Regelung und bestimmt Schaltzustände in Abhängigkeit von Last und Temperaturniveau.

Untersucht wird insbesondere das Zusammenspiel von Hydraulik und Regelung sowie die konsequente Trennung der Temperaturniveaus. In der Entwurfsplanung identifizierte Schwachstellen werden im realisierten System korrigiert. Ziel ist der Vergleich beider Varianten hinsichtlich Energieeffizienz, Betriebskosten und CO₂-Emissionen, um die Vorteile einer optimierten Hydraulik mit intelligenter Schaltlogik aufzuzeigen.

2.1. HVAC System des Referenzprojekts

Wärme- und Kältebedarf

Das System arbeitet mit vier Temperaturniveaus (65 °C, 35 °C, 10 °C, 15 °C). Die 65 °C-Schiene versorgt Hochtemperaturverbraucher (z. B. Trinkwassererwärmung, Heizkörper), während die 35 °C-Schiene Niedertemperaturheizflächen und raumlufttechnische Anlagen bedient. Auf der Kälteseite deckt die 10 °C-Schiene prozessnahe Kühlanwendungen (z. B. Server, elektrische Anlagen) ab, während die 15 °C-Schiene für Flächenkühlung und Kühldecken genutzt wird. Die installierten Gesamtleistungen bei Volllast sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die 10 °C-Schiene besitzt die höchste Priorität, um eine zuverlässige Serverkühlung sicherzustellen.

Tabelle 1: Gesamtbedarf der Temperaturschienen

<i>Temperaturniveau</i>	<i>Gesamtleistung</i>
65 °C	312 kW
35 °C	472 kW
10 °C	647 kW
15 °C	162 kW

Wärme- und Kälteerzeuger

Zu den Erzeugern drei zählen reversible Luft/Wasser-Wärmepumpen (LWP) für 35 °C, 15 °C und bei Bedarf 10 °C, eine Wasser/Wasser-Wärmepumpe (WWP) mit bis zu 166 kW Kälteleistung bei 10 °C sowie bis zu 238 kW Heizleistung bei 65 °C, ein Trockenkühler (Dry Cooler, DC) zur freien Kühlung und Wärmeabfuhr sowie ein Gas-Brennwertkessel mit bis zu 600 kW zur Not- bzw. Spitzenlastversorgung auf 65 °C-Niveau.

Hydraulik der Entwurfsplanung, Optimierungspotenzial und Hydraulik des realisierten Systems

Die Hydraulik der Entwurfsplanung ist über Plattenwärmetauscher in Primär- und Sekundärkreise gegliedert. Heiz- und Kühlkreise nutzen jeweils gemeinsame Vor- und Rücklaufleitungen. Zwei 4-m³-Pufferspeicher fungieren aufgrund hoher Umlaufvolumenströme im Wesentlichen als hydraulische Weichen. Integriert sind ein Gas-Brennwertkessel, eine Wasser/Wasser-Wärmepumpe (WWP), zwei luftgekühlte Kältemaschinen, eine reversible Luft/Wasser-Wärmepumpe (LWP) sowie ein Trockenkühler zur reinen Wärmeabfuhr.

Die Temperaturniveaus sind nicht konsequent getrennt: Bei Bedarf von 65 °C bzw. 10 °C wird jeweils der gesamte Heiz- oder Kühlkreis auf dieses Niveau betrieben. Dadurch sind auf der Kälteseite bei 10 °C im Wesentlichen nur WWP und Kältemaschinen verfügbar, während auf der Heizseite vorwiegend WWP-Abwärme und der Kessel eingesetzt werden. Die reversible LWP bleibt im Heizbetrieb weitgehend ungenutzt; freie Kühlung ist hydraulisch nicht vorgesehen. Dies führt zu erhöhtem Exergieeinsatz und eingeschränkter Regelbarkeit.

Insgesamt resultieren daraus hohe Umlaufvolumenströme, reduzierte Speicherwirkung sowie der Betrieb auf unnötig hohen bzw. niedrigen Temperaturniveaus. Insbesondere steigt bei 65 °C-Bedarf der Kesseleinsatz, während Wärmepumpen außerhalb ihres optimalen Arbeitsbereichs arbeiten.

Diese Schwachstellen werden im realisierten System durch ein hydraulisches Konzept mit je einem Hochleistungs-Schichtenspeicher für Heizung und Kälte gezielt korrigiert.

Die Schichtenspeicher gewährleisten eine saubere Trennung der Temperaturniveaus und ermöglichen den Betrieb der Erzeuger in ihren optimalen Arbeitsbereichen. Die WWP ist quelseitig an den Kältespeicher und lastseitig an den Heizspeicher angebunden, während der Gas-Brennwertkessel den Heizspeicher direkt speist. Die beiden Trockenkühler der Entwurfsplanung werden durch zwei reversible LWP ersetzt. Die drei reversiblen LWP sind über Umschaltventile an beide Speicher angebunden und können sowohl Heiz- als auch Kühlleistung bereitstellen. Auch der Trockenkühler ist über Umschaltventile an beide Speicher angeschlossen, wodurch sowohl freie Kühlung als auch die Abfuhr überschüssiger Abwärme möglich sind. Auf der Heizseite bestehen getrennte Verteilnetze für 65 °C und 35 °C, auf der Kälteseite getrennte Verteiler für 10 °C und 15 °C.

2.2. Entwicklung der Regelungsentscheidungsmatrix anhand der ausgeführten Anlagenhydraulik

Die Regelungsentscheidungsmatrix priorisiert die Energiewandlungssysteme auf Basis der Hydraulik des realisierten Systems und wird in Microsoft Excel umgesetzt. Maßgebend ist die Effizienz der Erzeuger (COP, EER, η), nicht primär die Energiekosten. Die Schaltlogik berücksichtigt Außentemperatur, Last und Temperaturniveau; sie wird zunächst leistungsbasiert (kW) formuliert und für die Simulation auf Energiemengen (kWh) erweitert. Für die Temperaturniveaus 10 °C, 15 °C, 35 °C und 65 °C werden verknüpfte Entscheidungsbäume erstellt.

Bei gleichzeitigem Heiz- und Kühlbedarf fungiert die WWP als Master, da Kälte und Abwärme parallel genutzt werden können. Die 10 °C-Schiene besitzt aufgrund der Serverkühlung höchste Priorität. Variable Eingangsgrößen sind die Lasten für Server- und Gewerbekälte, Trinkwarmwasser, Raumheizung und Raumkühlung.

In der Entwurfsplanung sind die Temperaturniveaus nicht getrennt: Bei gleichzeitigem Bedarf wird jeweils der gesamte Heiz- oder Kühlkreis auf das höhere bzw. niedrigere Niveau betrieben. Dadurch

stehen nur eingeschränkt geeignete Erzeuger zur Verfügung, Wärmepumpen arbeiten außerhalb ihres optimalen Bereichs, freie Kühlung ist nicht möglich, und der Strom- bzw. Exergiebedarf steigt bei sinkender Effizienz.

2.3. Wetterdatenbasierte Simulation der Entscheidungsmatrix

Ziel der Simulation ist es, die energetische Performance der realisierten Hydraulik mit jener der Entwurfsplanung auf Grundlage derselben Entscheidungsmatrix zu vergleichen. Die Bewertung umfasst Energieverbrauch, CO₂-Emissionen und Kosten. Für jede Außentemperatur und Lastanforderung liefert die Matrix die EIN/AUS-Zustände der Erzeuger und damit die bereitgestellten Heiz- und Kälteleistungen. Durch Multiplikation dieser Zustände mit den jährlichen Stundenanteilen je Außentemperatur ergeben sich die entsprechenden Energiemengen.

Als Wettergrundlage dient die stündliche Außentemperaturverteilung des Jahres 2023 am Standort, dargestellt in Abbildung 2. Die meisten Stunden liegen im Bereich von 3 °C bis 10 °C (DWD Climate Data Center, 2024).

Berechnung des Energiebedarfs der Verbraucher und der Energiebereitstellung durch die Wandlungssysteme

Der jährliche Energiebedarf wird für jede Außentemperatur berechnet. Dazu wird die Leistung mit der Anzahl der Jahresstunden bei der jeweiligen Temperatur multipliziert, woraus sich der erforderliche Heiz- bzw. Kältebedarf $Q_{required}$ ergibt. Die EIN/AUS-Matrix legt fest, welches Wandlungssystem bei welcher Leistung verfügbar ist. Dadurch können die erforderliche elektrische Energie und Abwärme der WWP, die benötigte Wärme aus dem Gaskessel, die von der LWP genutzte Umweltenergie sowie der Strombedarf bestimmt werden.

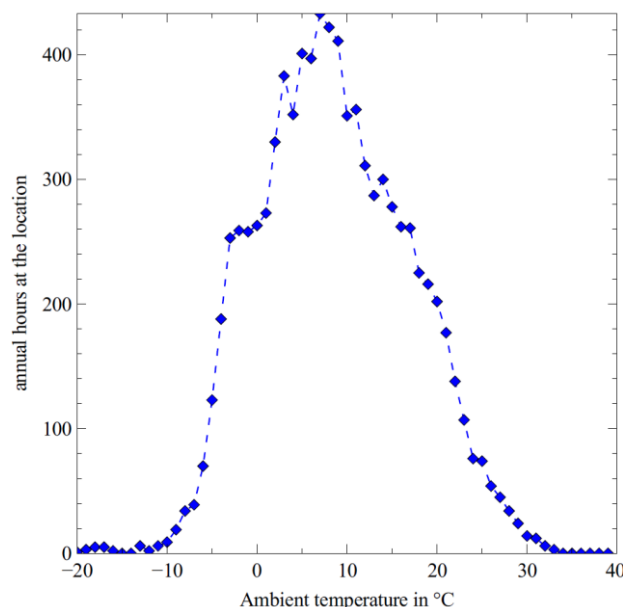


Abbildung 2: Jährliche Stundenanzahl in Abhängigkeit von der Außentemperatur im Jahr 2023 am Standort (DWD Climate Data Center, 2024); Die Linien zwischen den Punkten sind nur zur Orientierung eingezeichnet und basieren nicht auf Messdaten des Climate Data Center Portals

Berechnung der CO₂-Emissionen und Energiekosten

Auf Grundlage der berechneten Strom-, Umweltenergie- und Gasverbräuche können die resultierenden CO₂-Emissionen bestimmt werden. Für die Berechnung der CO₂-Emissionen aus Stromverbrauch wird der CO₂-Faktor aus dem Merkblatt der Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft (Deutschland) verwendet. Der CO₂-Faktor für Strom in Deutschland beträgt 0,435 t/MWh bzw. 435 g/kWh. Ergänzend erfolgt die Berechnung auch mit dem österreichischen Strom-CO₂-Faktor, der laut Umweltbundesamt 209 g/kWh beträgt. Für Gas wird der CO₂-Faktor moderner Brennwertkessel von 240 g/kWh angesetzt.

Auf Basis dieser Faktoren werden die CO₂-Emissionen für den Anlagenbetrieb in Deutschland entsprechend den Jahresbetriebsstunden berechnet. Analog wird die Berechnung für Österreich unter Verwendung der jeweiligen Jahresbetriebsstunden durchgeführt.

Aus den zuvor ermittelten Strom- und Gasmengen können anschließend die Energiekosten bestimmt werden. Die Strom- und Gaspreise basieren auf der Kostenabschätzung des Auftraggebers für das Jahr 2023. Demnach beträgt der Strompreis 0,198 €/kWh und der Gaspreis 0,082 €/kWh. Daraus wird ersichtlich, dass die Kosten für Gas um den Faktor 2,4 niedriger sind als jene für Strom (Umweltbundesamt GmbH, 2025), (Federal Office for Economic Affairs and Export Control, 2025), (Wien Energie, 2025).

3. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Abbildung 3 zeigt die Wärmeenergiebereitstellung beider Systeme, während Abbildung 4 die Ergebnisse der Kälteschiene für beide Systeme darstellt. Die Linie für die elektrische Energie des Systems gemäß Entwurfsplanung fehlt in Abbildung 3, da sie dort null ist. In der Entwurfsplanung wird die Wärme für die 65 °C- und 35 °C-Schiene überwiegend durch den Gaskessel bereitgestellt, während im realisierten System beide Temperaturniveaus infolge der hydraulischen Trennung separat erzeugt werden. Dadurch decken die reversiblen LWP den Großteil des Bedarfs der 35 °C-Schiene ab, wodurch der Gaseinsatz reduziert wird.

Insgesamt benötigt die Entwurfsplanung etwa 1,1 GWh/a mehr Kesselwärme, was rund 116 000 m³ Gas pro Jahr entspricht, dargestellt ist in Tabelle 2. Das realisierte System nutzt in stärkerem Maße elektrische und Umweltenergie, wodurch der Einsatz fossiler Energieträger sinkt und der Anteil erneuerbarer Energie steigt. Die Abwärme der WWP kann in beiden Systemen in ähnlichem Umfang genutzt werden.

Auf den Kälteschienen zeigt die Entwurfsplanung, dass ohne Temperaturniveau-Trennung eine 15 °C-Kältebereitstellung nicht möglich ist. Stattdessen müssen die LWP ebenfalls auf 10 °C betrieben werden, was den Strombedarf erhöht und die Effizienz senkt. Das realisierte System hingegen kann 10 °C und 15 °C getrennt bereitstellen und ermöglicht dadurch einen flexibleren und effizienteren Betrieb.

Die eingestellten Variablen führen zu Ungenauigkeiten in der EIN/AUS-Matrix, wodurch ein gleichzeitiger Betrieb aller Simulationsanlagen abgebildet werden kann. In der Realität ist dies möglich, und die Kälteleistung der WWP wäre ausreichend. Die Simulation kann daher lediglich für eine grobe Abschätzung herangezogen werden.

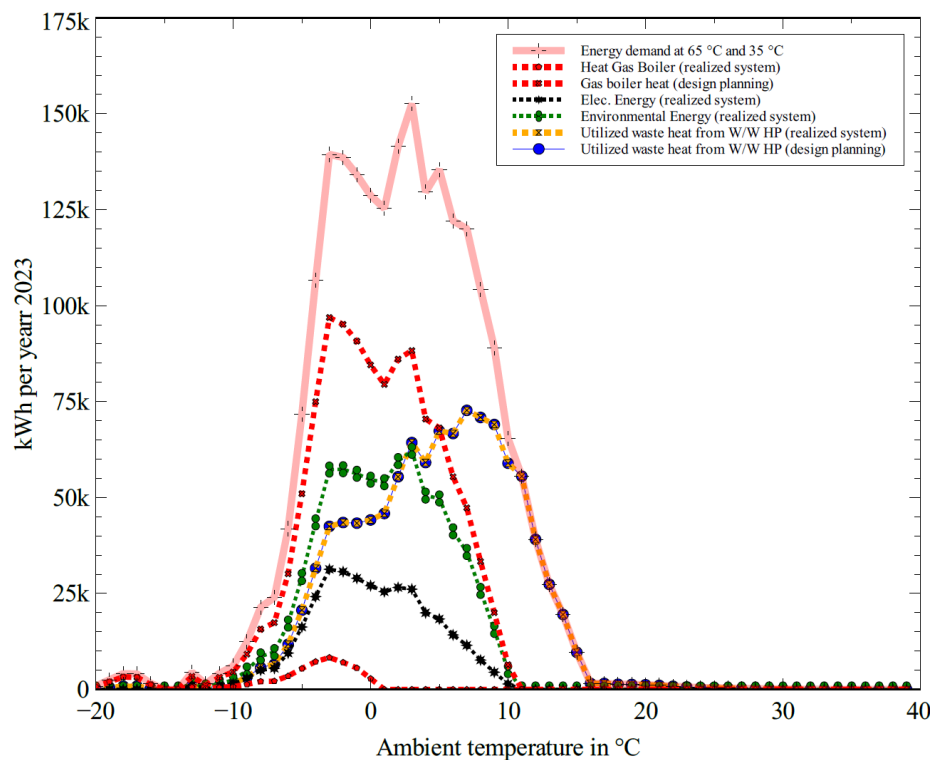


Abbildung 3: Vergleich der Bereitstellung des Energiebedarfs nach Energiequelle der realisierten Anlage mit der Führungsplanung auf der 65°C und 35°C Schiene. Grundlage der Berechnung sind die Wetterdaten des Jahres 2023. Die Linien zwischen den Punkten sind nur zur Orientierung eingezeichnet und basieren nicht auf eigenständigen Berechnungsergebnissen.

Insgesamt weist das realisierte System geringere Exergieverluste auf, da unnötig extreme Temperaturniveaus vermieden werden. Entscheidend ist dabei der Heizbetrieb: Durch die konsequente Trennung der Temperaturniveaus steigt die Effizienz, der Gaseinsatz sinkt und Umweltenergie wird besser genutzt. Das Entscheidungswerkzeug zielt auf eine Reduktion fossiler Energie ab, sodass die CO₂-Emissionen stark von den Strom- und Gas-Emissionsfaktoren abhängen, die in Österreich aufgrund des hohen Wasserkraftanteils deutlich günstiger sind. Vergleiche zeigen, dass das realisierte System in Deutschland bis zu etwa 190 t/a mehr CO₂ emittiert als in Österreich, während die Führungsstrategie mit höherem Gaseinsatz diesen Unterschied auf etwa 113 t/a reduziert.

Tabelle 2: Vergleich der jährlichen Energiemengen nach Energieträgern (Heizung + Kühlung) zwischen Führungsplanung und realisierter Anlage; Jahr 2023

	Umweltenergie (kWh/a)	Wärme Gas	Elektrische Energie (kWh/a)	genutzte Abwärme aus WWP (kWh/a)
Realisiertes System	855 627	57 901	839 352	1 052 567
Entwurfsplanung	107 695	1 143 340	500 114	1 052 567
Differenz	747 932	-1 085 439	339 238	0

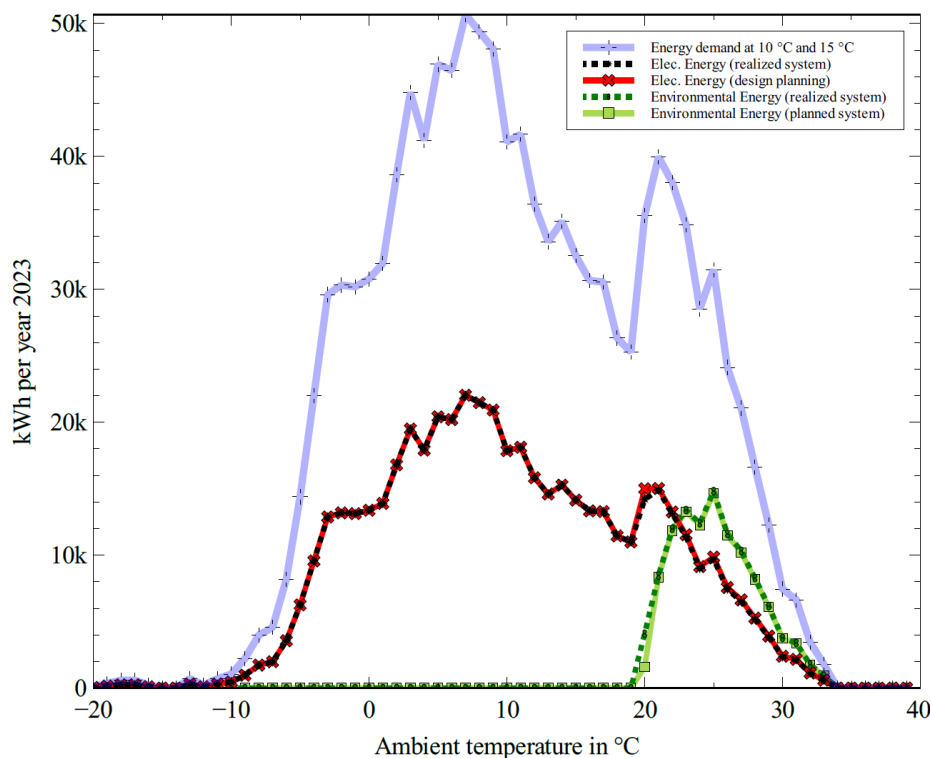


Abbildung 4: Vergleich der Bereitstellung des Energiebedarfs nach Energiequelle der realisierten Anlage mit der Führungsplanung auf der 10°C und 15°C Schiene. Grundlage der Berechnung sind die Wetterdaten des Jahres 2023. Die Linien zwischen den Punkten sind nur zur Orientierung eingezeichnet und basieren nicht auf eigenständigen Berechnungsergebnissen.

Gleichzeitig ermöglichen eine optimierte Hydraulik und eine intelligente Regelungsstrategie zusätzliche Einsparungen, die mit künftig sinkenden Strom-CO₂-Faktoren — insbesondere in Deutschland bis 2030 — weiter zunehmen werden (Umweltbundesamt GmbH, 2025), (Federal Office for Economic Affairs and Export Control, 2025), (Wien Energie, 2025).

4. FAZIT UND AUSBLICK

In dieser Arbeit wird ein Entscheidungswerkzeug zur Steuerung der Zuschaltung von Energiewandlungssystemen in multivalenten Heiz- und Kühlsystemen entwickelt. Es basiert auf einem neu errichteten Anlagensystem, für das eine EIN/AUS-Matrix erstellt und mit Wetterdaten des Jahres 2023 simuliert wird. Der Vergleich zwischen Entwurfsplanung und realisiertem System zeigt deutliche Vorteile einer hydraulischen Trennung der Temperaturniveaus in Kombination mit intelligenter Regelung. Der Gasverbrauch wird signifikant reduziert, die Nutzung von Umweltenergie steigt, und trotz eines höheren Strombedarfs werden sowohl CO₂-Emissionen als auch Betriebskosten gesenkt. Diese Vorteile sind insbesondere bei einem günstigen Strommix, wie beispielsweise in Österreich, ausgeprägt.

Das Werkzeug wurde bereits in die Regelungssoftware integriert und vereinfacht dort die Programmierung. Es bietet eine praxisnahe Grundlage für zukünftige Projekte und stärkt die Zusammenarbeit zwischen Planung, Regelungstechnik und Umsetzung. Insgesamt leistet es einen Beitrag zum effizienten und nachhaltigen Betrieb komplexer multivalenter Heiz- und Kühlsysteme.

Literaturverzeichnis

International Organization for Standardization (2024). ISO 16484-1:2024 – Building automation and control systems (BACS) – Part 1: Project specification and implementation (2nd ed.).

Bollin, E. (2016). Using renewable energy in buildings: Heating and cooling supply, automation, implemented examples (2nd ed.). Springer Fachmedien Wiesbaden.

DWD Climate Data Center (2024). Hourly station observations of 2 m air temperature and humidity for Germany, version v24.03 [Data set].

Umweltbundesamt GmbH (2025). Information sheet CO₂ factors Austria. Environment Agency Austria, Vienna, Austria, May 2025. Version 1.0. Available: <https://www.umweltbundesamt.at/>.

Federal Office for Economic Affairs and Export Control (2025). Information sheet CO₂ factors Germany – Federal funding for energy and resource efficiency in industry (grant program). Federal Office for Economic Affairs and Export Control (BAFA), Eschborn, Germany, May 2025. Version 3.3. Available: <https://www.bafa.de/>.

Wien Energie (2025). Shares of energy and electricity generation mix in Austria. Online dataset, 2025. Available at: <https://positionen.wienenergie.at/grafiken/anteile-energie-und-stromerzeugungsmix-oesterreich/>.

German Environment Agency (2020). CO₂ emissions per kilowatt-hour of electricity continued to decline in 2019 (Press release No. 15/2020). <https://www.umweltbundesamt.de>