

# GI

Gebäudetechnik  
in Wissenschaft & Praxis

**GESUNDHEITS-INGENIEUR.**

NEUE FOLGE DES ROHRLEGER.

ORGAN DES VEREINS

FÜR

GESUNDHEITS-TECHNIK.

Jubiläumsausgabe  
**140. Jahre GI**

**robatherm**  
**ROBATHERM-WERK 8872 BURGAU**  
 INDUSTRIESTR. 26 RUF: 08222/313 POSTFACH 40 TELEX 053 140

**Wärmeluft-Automat**  
 Baureihe RL für Öl u. Gas, 15 Modelle 20.000 bis 1,2 Mill. kcal/h, freibloßend, für Zentralanlagen

**Komfort-Wärmeluftautomat**  
 Baureihe rk für Öl u. Gas, speziell für den Wohnungsbau, 3 Modelle, 15.000 bis 40.000 kcal/h, eine überzeugende Leistung, auch preislich

**Kompakt-Ölbrenner**  
 Modell RDK, mit L- u. C-Stecksatz, 3 Leistungsbereiche 1,8 bis 12,0 kg/h, extrem geräuscharm, verbilligend preiswert  
 Für größere Leistungen: RD-Serie bis 50 kg/h ein- und zweistufig

Kennen Sie übrigens schon den neuesten ROBATHERM-Katalog? Nein, dann lassen Sie ihn bitte kommen, Postkarte genügt!

**robatherm**

1968

»manche mögen's heiß«

»lassen sie sich nicht von anderen wärmen«

»wir liefern das richtige programm«  
 Druckverdrücker-Ölbrenner · Wärmeluftautomaten · Klimageräte · Luftwäscher · Luftgitter

**robatherm**  
 robatherm-werk · 8872 burgau · postfach 1160 · industriestrasse 26  
 telefon 08222 - 313 telex 053 140 robath-d

1972

[www.robatherm.com](http://www.robatherm.com)

robatherm - the air handling company. Einer der führenden Hersteller Raumlufttechnischer Geräte. Weltweit. Ob Bürogebäude, Produktionshallen, Konzertsäle oder Krankenhäuser – Sie finden die robatherm Geräte überall dort, wo komplexe Anforderungen projektspezifische Lösungen verlangen. Individuell, leistungsstark und wirtschaftlich, das ist unsere Stärke.

**robatherm**  
 the air handling company

robatherm · Industriestrasse 26 · 89325 Burgau · Tel. 08222 / 999-0  
 Fax 08222 / 995-222 · info@robatherm.com · www.robatherm.com

2005

**robatherm**  
 the air handling company

**RAUMLUFTTECHNISCHE PREMIUM-LÖSUNGEN.**

Menschen brauchen Luft zum Atmen. robatherm sorgt täglich dafür, dass auf der ganzen Welt Menschen mit der gewünschten Luftqualität versorgt werden. Kundenorientierte Lösungen mit hohen Standards für Sicherheit, Qualität und Nachhaltigkeit sind Ausdruck der konsequenten Premium-Strategie von robatherm.

[robatherm.com](http://robatherm.com)

2019

Wir gratulieren zum 140. Jahrgang und freuen uns, die GI Gebäudetechnik auf ihrem Weg seit Jahrzehnten begleiten zu dürfen.

[robatherm.com](http://robatherm.com)



## 140 Jahre GI – Zeit für den Wechsel in die digitale Welt

Liebe Leserinnen und Leser,  
in diesem Jahr erscheint die GI bereits im 140. Jahrgang und ist damit eine der ältesten Fachzeitschriften der Branche.

Anlass für uns, auf die Historie zu blicken, die Veränderungen aufzuzeigen und neue Wege zu beschreiten:

Ende des 19. Jahrhunderts erschien erstmals „*der*“ **GI Gesundheits-Ingenieur** als Organ des Vereins für Gesundheits-Technik. Das Themenspektrum reichte von Vereins-Angelegenheiten über Heizung und Lüftung, Beleuchtungswesen und Elektrotechnik, Trinkwasser-Versorgung und öffentliche

Gesundheitspflege, Bewässerung und Reinigung, Gewerbskunde, Fortschritte der Mechanik und Rettungswesen.

Insbesondere der Untertitel der Fachzeitschrift änderte sich im Laufe der vielen Jahre unter Berücksichtigung der Marktentwicklungen häufiger:

- Zeitschrift für die Versorgung der Gebäude mit Wasser und Luft, Wärme und Licht
- Zeitschrift für die Gesamte Städtehygiene
- Zeitschrift für angewandte Hygiene und Gesundheitstechnik in Stadt und Land
- Zeitschrift für Hygiene, Gesundheitstechnik, Bauphysik mit den Fachgebieten Heizungs-, Klima- und Haustechnik, Wasser, Abwasser, Umweltschutz
- Haustechnik – Bauphysik – Umwelttechnik
- Gebäudetechnik – Innenraumklima

Zusammenfassender Kern der Themen ist und bleibt die Gebäudetechnik mit all ihren tangierenden Bereichen wie Heizung, Lüftungstechnik, Klimatechnik, Kältetechnik, Trinkwassertechnik und Energiekonzepte. So lautet der Titel der Fachzeitschrift seit einigen Jahren nun „*die*“ **GI – Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis**.

Aus der GI heraus, entstand bereits 1896 das „**Taschenbuch für Heizung+Klimatechnik – DER RECKNAGEL**“, das damals als „Kalender für Gesundheitstechniker“ erschienen ist, und sich kontinuierlich zu dem seit Generationen maßgebenden Standardwerk etabliert hat. Unter dem Label „Recknagel-Edition“ erscheinen heute darüber hinaus weitere Fachbücher, die einzelne Themenbereiche vertiefen.

2013 wurde schließlich das Fachportal [www.recknagel-online.de](http://www.recknagel-online.de) geboren, das sich als thematisch zusammenfassendes Zentrum aller Fachmedien rund um den Recknagel dynamisch weiterentwickelt. Neben tagesaktuellen Nachrichten und Informationen stehen hier ganz aktuell die HLK-Datenbank „**Recknagel-Exklusiv**“ bereit sowie das TGA-Lexikon als eines der umfassendsten Nachschlagewerke der Branche.

**Im Zuge des digitalen Wandels und des veränderten Informationsverhaltens unserer Leser läuten wir mit Erscheinen der nun vorliegenden historischen Ausgabe der GI ein neues Zeitalter ein:**

Die Fachbeiträge der GI werden künftig „digital only“ – eingebettet und in das Fachportal Recknagel-Online im für die Abonnenten geschützten Bereich „**GI-Exklusiv**“ veröffentlicht. Die Abonnenten können die aktuellen Fachbeiträge online lesen, herunterladen oder ausdrucken. Zusätzlich haben sie ab sofort uneingeschränkter Zugriff auf das Langzeitarchiv der GI, das alle erschienenen Fachbeiträge seit 2001 beinhaltet. Die Printversion der GI wird nun also von der deutlich umfassenderen und komfortablen digitalen Version abgelöst.

Diese finden Sie ab sofort online unter [www.recknagel-online.de](http://www.recknagel-online.de).

Ihre

Kirstin Sommer

Geschäftsführerin

ITM InnoTech Medien GmbH

## STANDPUNKT

„Im Zuge des digitalen Wandels und des veränderten Informationsverhaltens unserer Leser läuten wir mit Erscheinen der nun vorliegenden historischen Ausgabe der GI ein neues Zeitalter ein“  
Kirstin Sommer

289

## WISSENSCHAFT

|   |     |
|---|-----|
| Ökoeffizienzbewertung wärmetechnischer Anlagen<br>Assessing the Eco-Efficiency of Heating Systems<br>René Stang, Adrian G. Gebhard  | 292 |
| System und Verfahren zur cloudbasierten Betriebsoptimierung von<br>Nichtwohngebäuden und Energiewandlungsanlagen<br>System and method for cloud-based operation optimization of<br>non-residential buildings and energy conversion systemsnt<br>Erik Brümmendorf, Johannes Fütterer, Jan Henrik Ziegeldorf  | 308 |
| Studie zum technischen Flexibilitätspotenzial von Kälteanlagen für das<br>elektrische Lastmanagement mittels prädiktiver Optimierung<br>Study on the technical flexibility potential of refrigeration plants for electrical<br>demand side management by means of predictive optimization<br>Michael Bachseitz, Daniel Pfeiffer, Roland Koenigsdorff, Martin Becker | 322 |
| Installationstechnik im Wandel<br>Installation technology in transition<br>Lars Rickmann, Timo Kirchhoff, Werner Mathys, Bernd Rickmann, Carsten Bäcker   | 340 |
| Messtechnische Evaluation von thermisch und elektrisch angetriebener Kälteerzeugung<br>Experimental evaluation of thermally and electrically driven cooling systems<br>Jens Pfafferott, Sascha Reißmann   | 350 |



Titel: GESUNDHEITS-INGENIEUR „Vierter Jahrgang“.  
Lesen Sie mehr in der Historie ab Seite 378.



## FACHWISSEN

Digitales Flächenmanagement  
für die Mitarbeiterbindung  
Armin Anders 364

„Digitaler Zwilling“ soll die Regelung von  
Gebäudetechnik erleichtern  
Dagmar Jähnig, Christian Fink 370

## WISSENSWERT

Dezentrale Wohnraumlüftung –  
Vergangenheit und Zukunft  
tecalor GmbH 372

Wie hat sich die DIN 1946  
bis heute weiter entwickelt?  
Achim Trogisch 376

## GI HISTORISCH

Ausgewählte historische Beiträge 378

## SERVICES \ STANDARDS

Impressum Umschlag

# Zeit für Fortschritt.



Integrale Planung mit der  
liNear Softwareversion

# V20

Ab sofort erhältlich

► liNear Roadshow 2019

## WAY2VISION

05. – 26. November 2019

Kostenlose Anmeldung unter  
[www.linear.eu/roadshow](http://www.linear.eu/roadshow)

# Ökoeffizienzbewertung wärmetechnischer Anlagen

## Einfluss von Wirkungsabschätzungsmethodiken auf das Umweltbewertungsergebnis



*In diesem Artikel zum Thema „Ökoeffizienzbewertung wärmetechnischer Anlagen“ soll, ausgehend von der Sachbilanz (Life Cycle Inventory, LCI) der wärmetechnischen Anlage eines Einfamilienhauses, der Einfluss unterschiedlicher Wirkungsabschätzungsmethoden auf das Ergebnis der Umweltbewertung aufgezeigt werden. Der Schwerpunkt der durchgeführten Untersuchungen lag auf zwei Bewertungskonzepten, dem Distance-to-target-Ansatz und dem schadensorientierten Ansatz. Im Kern wurde geprüft, ob diese Ansätze bei gleichen Sachbilanzergebnissen zu grundsätzlich unterschiedlichen Schlussfolgerungen führen, um zu entscheiden, welche Methode zur Umweltbewertung geeignet ist. Die vorgestellten Ergebnisse sind einer Masterarbeit entnommen, die im Rahmen derzeitiger Forschungsaktivitäten zum Thema an der Fachhochschule Erfurt, basierend auf den Daten eines realen Gebäudes und dessen wärmetechnischer Anlage, entstand.*

**Assessing the Eco-Efficiency of Heating Systems – Influence of impact assessment methodologies on the environmental assessment result**

*In this article on the topic “Assessing the Eco-Efficiency of Heating Systems”, the influence of different impact assessment methods on the result of the environmental assessment will be shown, based on the Life Cycle Inventory (LCI) of a detached house. The focus of the analyses was on two assessment concepts, the distance to target approach and the damage oriented approach. In essence, it was examined whether these approaches lead to fundamentally different conclusions for the same Life Cycle Inventory results in order to decide which method should be chosen for the environmental assessment. The presented results are from a master thesis which was created in the context of current research activities on this topic at the Erfurt University of Applied Sciences, based on the data of a real building and its heating system.*

VON  
RENÉ STANG  
ADRIAN G. GEBHARD

## 1. Einführung

Durch den Gesetzgeber in der Energieeinsparverordnung (EnEV, [1, 2]) festgeschrieben und normativ in verschiedenen Richtlinien, beispielsweise der DIN V 4701-10 [3] oder der DIN V 18599-1 [4], verankert, erfolgt in der Ingenieurpraxis derzeit die ökologische Bewertung einer wärmetechnischen Anlage in erster Linie durch die Ermittlung des nicht regenerativen Primärenergiebedarfs. Bezüglich des Anspruchs einer zeitgemäßen ganzheitlichen Analyse der ökologischen Auswirkungen einer wärmetechnischen Anlage, führt diese Beschränkung zu einer verzerrten Sicht auf die umfänglichere Gesamtumweltproblematik sowie die sich daraus ergebenden möglichen Folgen. Es ist aber bisher noch nicht geklärt, auf welcher Grundlage wärmetechnische Anlagen in Gebäuden künftig bewertet werden sollen. Allerdings ist abzusehen, dass die aktuelle, ausschließlich durch die Nutzungsphase geprägte, primärenergetische Bewertung eines Heizsystems hierfür unzureichend sein wird [5, 6].

Ein möglicher Lösungsansatz zur ganzheitlichen Analyse und Bewertung der Umwelteinflüsse einer wärmetechnischen Anlage wäre die sogenannte Ökobilanz (Life Cycle Assessment, LCA) [7, 8]. Eine solche Lebenszyklusanalyse betrachtet neben der Primärenergie und dem Treibhauspotenzial eine Reihe weiterer Umweltwirkungen auf dem Lebensweg eines Produktes oder einer Dienstleistung. Zudem ermöglicht sie quantitative Aussagen zum potenziellen Umfang der Umweltbeeinflussung.

Neben der Betrachtung des Umwelteinflusses (Ökologie) müssen bei der Auswahl einer geeigneten Anlagentechnologie immer auch die wirtschaftlichen Aspekte (Ökonomie) berücksichtigt werden. Um diese ökologischen und ökonomischen Aspekte gemeinsam betrachten zu können, bedarf es ebenso der Nutzung geeigneter Methoden, wie der Ökoeffizienzbewertung [9]. Dieser Ansatz wurde beispielsweise als Grundlage für die Entwicklung der „Erfurter Methode“ [10] genutzt, die neben einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung vor allem eine Umweltbetrachtung im Umfang einer Ökobilanz (LCA) beinhaltet und Gegenstand aktueller Forschungen zur Ökoeffizienzbewertung wärmetechnischer Anlagen an der Fachhochschule Erfurt ist.

## 2. Zielstellung

Der Beweggrund zur ganzheitlichen Analyse der wärmetechnischen Anlage eines Einfamilienhauses auf Basis einer Ökobilanz (LCA) lag darin, einen Überblick über die möglichen Umweltauswirkungen zu bekommen. Es sollte vordergründig der Einfluss von Endenergieträgern, Anlagenkomponenten und Wirkungsabschätzungsmethoden untersucht werden. Problematische und zu optimierende Prozessbereiche waren herauszustellen und signifikante Umweltproblemfelder aufzuzeigen. Außerdem sollte eine wissenschaftlich seriöse und zugleich ingenieurtechnisch-praxisrelevante Methode der Wirkungsabschätzung (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) innerhalb von Ökobilanzen für wärmetechnische Anlagen empfohlen werden [11]. Die gewonnenen Erkenntnisse bildeten die Basis für weitere wissenschaftliche Untersuchungen im Rahmen der Entwicklung der „Erfurter Methode“ [10].

## 3. Untersuchungsumfang

### 3.1 Produktsystem und Systemgrenze

Das im Rahmen der Ökobilanzierung untersuchte Produktsystem beinhaltet alle Prozesse der verschiedenen Phasen (Herstellung, Nutzung, Entsorgung) entlang des Lebensweges („von der Wiege bis zur Bahre“) der untersuchten wärmetechnischen Anlage. Die Umsetzung der Ökobilanz (LCA) selbst erfolgte in Anlehnung an die europäischen Normen DIN EN ISO 14040 [7] und DIN EN ISO 14044 [8]. Um den Einstieg in die Thematik zu erleichtern und den weiteren Ausführungen besser folgen zu können, soll der im **Bild 1** gezeigte schematische Aufbau der untersuchten wärmetechnischen Anlage kurz vorgestellt werden.

Wie in **Bild 1** zu erkennen, zählen zur betrachteten Anlage vordergründig die Systeme zur Raumheizung und zur Warmwasserbereitung. Die Raumheizung erfolgt ausschließlich über eine Sole-Wasser-Wärmepumpe mit kompaktem Erdreich-Flachkollektor (Spiralverlegung) in Verbindung mit einem rücklaufseitig eingebundenen Pufferspeicher. Die Vorlauftemperatur  $\vartheta_{VL}$  beträgt im Auslegungsfall 35 °C bei einer Temperaturspreizung von 5 K. Die Wärmeübergabe im Gebäude wird mittels Fußboden- und Wandheizflächen, angeschlossen an insgesamt 14 Heizkreise, realisiert. Zusätzlich wird

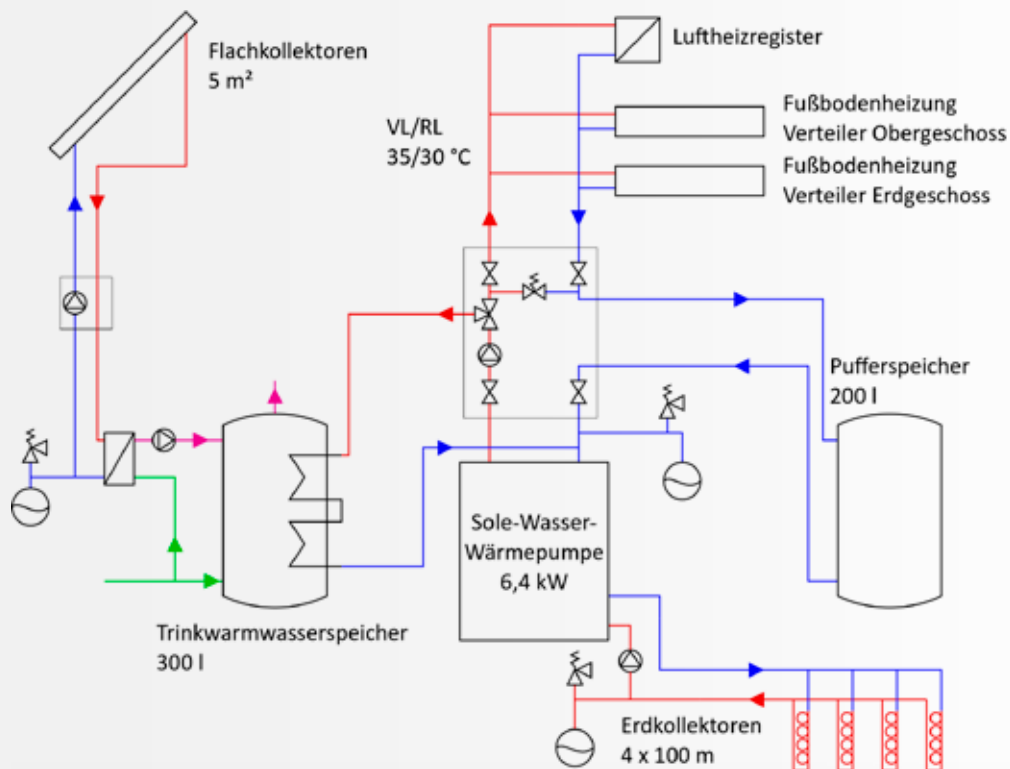


Bild 1: Vereinfachtes Schema der untersuchten wärmetechnischen Anlage [11].

ein Luftheizregister mit Wärme versorgt. Die Warmwasserbereitung erfolgt vorrangig über eine solarthermische Anlage mit einem Flachkollektor und einem Warmwasserspeicher. Die Nachheizung des Warmwasserspeichers wird bedarfsabhängig von der Wärmepumpe übernommen. Zu diesem Zweck wird die erforderliche Vorlauftemperatur  $\vartheta_{VL}$  auf 60 °C angehoben.

Die Systemgrenze des untersuchten Produktsystems umfasst alle bilanzierbaren Material- und Energieaufwendungen zur Herstellung, zur Nutzung und zur Entsorgung der Anlagenkomponenten und der Endenergieträger. Hierzu zählen auch die internen Umwandlungsprozesse sowie die umweltrelevanten Input- und Outputflüsse (Produkt-, Elementarflüsse [7, 8]). Als zeitlicher Horizont für die Untersuchung wurde ein Betrachtungszeitraum  $T$  von 20 Jahren festgelegt [11].

### 3.2 Funktionelle Einheit, Abschneideregeln und Allokation

Eine wesentliche Grundlage jeder Ökobilanz (LCA), vor allem für Vergleiche, bildet die sogenannte funktionelle Einheit. Die normative Definition [7] beschreibt sie als einheitlichen quantitativen Nutzen eines Produktsystems zur

Verwendung als Vergleichsbasis bzw. als Vergleichsmaßstab [12]. Übertragen auf wärmetechnische Anlagen ist deren Nutzen beispielsweise die Bereitstellung von Wärme zur Deckung des Jahresnutzwärmebedarfs  $Q_{NE}$  eines Gebäudes. Unter Beachtung dessen wurde als funktionelle Einheit des untersuchten Heizsystems die zur Raumheizung, Warmwasserbereitung und Deckung der Lüftungswärmeverluste der kontrollierten Wohnraumlüftung benötigte Wärme (Nutzenergie) definiert. Der für das Gebäude durchschnittliche Nutzwärmeverbrauch wurde hierfür messtechnisch ermittelt und beträgt 210.340 kWh, unter Berücksichtigung eines Betrachtungszeitraums  $T$  von 20 Jahren. Als Referenzfluss zur Erstellung der Sachbilanz (LCI), an dem alle Komponenten und Prozesse gekoppelt sind, die zur Bereitstellung dieser Energie benötigt werden, wurde hingegen „1 Stück wärmetechnische Anlage“ definiert [11].

Um den Umfang einer Ökobilanz auf die relevanten Stoff- und Energieflüsse zu begrenzen, ist es wichtig, bereits für die Erstellung der Sachbilanz und im weiteren Verlauf auch für die Wirkungsabschätzung (LCIA), sogenannte Abschneidekriterien festzulegen. Für die im Rahmen der Untersuchungen modellierten Prozesse und Module



wurden die 1-Prozent-Regel und die 5-Prozent-Regel angewendet.

Zur Lösung von in Ökobilanzen kaum zu vermeidenden Allokationsproblemen<sup>1</sup>, wie sie sich bei Koppelprodukten, im Recycling oder auch bei der Abfallentsorgung ergeben, sind im Vorfeld ebenfalls klare Festlegungen zu treffen. Ähnlich wie bei den Abschneideregeln sind die internen Allokationskriterien der hier genutzten generischen Datensätze vordefiniert, unveränderlich und mussten nicht bestimmt werden. Sie wurden lediglich in das Sachbilanzmodell übernommen. Allokationsprobleme auf übergeordneten Ebenen waren aufgrund fehlender Koppelprodukte bei der untersuchten Anlage, wie beispielsweise einer Stromgutschrift beim Einsatz von Blockheizkraftwerken (BHKW), nicht zu erwarten [11].

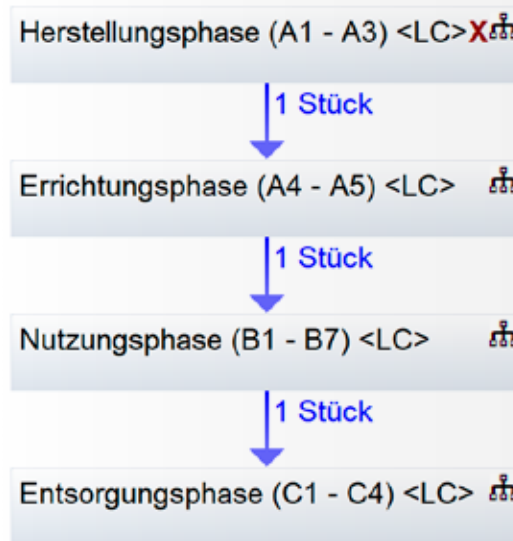
## 4 Sachbilanz

### 4.1 Modellstruktur

Zur Umsetzung der Ökobilanz (LCA) im beschriebenen Untersuchungsumfang und zum Erreichen der Zielstellung wurde zunächst eine Sachbilanz (LCI) als einheitliche Basis für den Vergleich der unterschiedlichen Umweltbewertungsmethoden aufgestellt. Die Sachbilanz ist ein Instrument zur Erfassung möglichst aller Stoff- und Energieströme (Elementarflüsse), die die Systemgrenze des festgelegten Produktsystems überschreiten und Veränderungen in der natürlichen Umwelt bewirken [13].

Im Allgemeinen und im Speziellen für den Systemvergleich unterschiedlicher wärmetechnischer Anlagen bietet es sich an, die Sachbilanz auf Grundlage eines allgemeingültigen Lebenszyklusmodells zu erstellen. Diese Verfahrensweise ermöglicht eine ganzheitliche Analyse des Lebensweges im Sinne „von der Wiege bis zur Bahre“. Ein hierfür geeignetes, auch auf wärmetechnische Anlagen anwendbares Modell für Bauprodukte ist in der Produktdeklarationsnorm DIN EN 15804 [14] bzw. in der DIN EN 15978 [15] zu finden. Dieses Modell wurde im Rahmen der hier vorgestellten Ökobilanzierung im Grundsatz genutzt.

Für die praktische Umsetzung des Sachbilanzmodells und die Berechnung der Ergebnisse des zuvor beschriebenen Produktsystems wurden



**Bild 2:** Sachbilanzmodell der untersuchten wärmetechnischen Anlage (WTA) in Anlehnung an die genannten Normen DIN EN 15804 [14] bzw. DIN EN 15978 [15], erstellt mit der Ökobilanz-Software GaBi ts [16].

alle innerhalb der Systemgrenze befindlichen Prozesse mit der Ökobilanz-Software GaBi ts [16] detailliert erfasst und beschrieben. Diese Vorgehensweise schloss auch die Beschreibung aller relevanten Stoff- und Energieströme mit ein. Das **Bild 2** zeigt beispielhaft das mit der Bilanzierungssoftware umgesetzte finale Sachbilanzmodell, welches wiederum aus mehreren Teilmodellen besteht.

**Tabelle 1:** Primärdaten des Einfamilienhauses und der wärmetechnischen Anlage [11].

| Parameter  | Wert   | Einheit        |
|--|--------|----------------|
| Netto-Grundfläche                                  | 193    | m <sup>2</sup> |
| Wohnfläche   | 176    | m <sup>2</sup> |
| Anzahl der beheizten Vollgeschosse                 | 2      | -              |
| Geschosshöhe                                       | 2,98   | m              |
| Norm-Heizlast                                      | 6,36   | kW             |
| Heizleistung der Wärmepumpe                        | 6,40   | kW             |
| Vorlauftemperatur                                  | 35     | °C             |
| Rücklauftemperatur                                 | 30     | °C             |
| Spreizung  | 5      | K              |
| Anzahl der Erdkollektoren                          | 4      | -              |
| Länge je Erdkollektor                              | 100    | m              |
| Solar-Kollektorfläche                              | 5      | m <sup>2</sup> |
| Fläche der Fußbodenheizung                         | 176    | m <sup>2</sup> |
| Jahresheizwärmeverbrauch (2010 bis 2015)           | 10.517 | kWh/a          |
| Endenergie Strom (2010 bis 2015)                   | 2.480  | kWh/a          |
| Hilfsenergie Strom                                 | 416    | kWh/a          |
| mittlere Jahresarbeitszahl (einschl. Hilfsenergie) | 3,63   | -              |
| Betrachtungszeitraum                               | 20     | a              |

<sup>1</sup> „Gerechte“ Zuordnung von umweltrelevanten In- und Outputflüssen (Produkt-, Elementarflüsse) [12].

**4.2 Datenbasis**

Zur Beschreibung aller erforderlichen Informations- und Prozessmodule sowie der notwendigen Stoff- und Energieströme des Produktsystems musste sowohl auf Primärdaten, z. B. Massen, Energieverbräuche und andere, als auch auf generische Daten aus Datenbanken zurückgegriffen werden. Eine Zusammenfassung wichtiger primärer Eingangsdaten enthält **Tabelle 1**.

Während die Primärdaten überwiegend vom Anlagenbetreiber oder mithilfe eigens entwickelter Approximationsfunktionen [11, 17], beispielsweise zur Bestimmung des Materialaufwandes der Anlagenkomponenten, vergleichsweise einfach zu ermitteln waren, wurden die notwendigen generischen Daten (Hintergrunddaten, z. B. zur Wärmepumpenherstellung) aus etablierten kommerziellen Datenbanken entnommen. Hierfür standen zum einen die zur Ökobilanz-Software GaBi ts [16] gehörende Standarddatenbank „Professional“ sowie die optionalen Datenbanken „Construction Materials“ und „End of Life“ zur Verfügung. Zum anderen konnte bei Bedarf auf die Datenbank „ecoinvent“ zugegriffen werden. Hinsichtlich des regionalen Ortsbezuges wurden in Übereinstimmung mit dem Anlagenstandort gemittelte Datensätze für Deutschland und nur in Ausnahmefällen generische Datensätze für europäische Gegebenheiten verwendet.

Zur Bestimmung des Umwelteinflusses der eingesetzten Anlagenkomponenten konnte auf die generischen Datensätze der optionalen Datenbank „Construction Materials“ zurückgegriffen werden. Die Datenerfassung der Anlagenkomponenten

erfolgte übersichtlich, gruppiert und entsprechend der Energieumwandlungskette (Erzeugung ⇒ Speicherung ⇒ Verteilung ⇒ Übergabe) des Endenergieträgers zur Nutzenergie (Wärme) in der Anlage. Je nach verfügbaren Primärdaten und generischen Datensätzen wurden im Einzelnen die in **Tabelle 2** aufgeführten Anlagenkomponenten berücksichtigt (siehe auch **Bild 1**).

Zur Betrachtung des Endenergieträgers „Strom“, der ausschließlich zur Gebäudebeheizung und Warmwasserbereitung verwendet wird, wurde der generische Datensatz für den deutschen Strommix aus der Standarddatenbank „Professional“ genutzt und mit der gemessenen Endenergiemenge (siehe auch **Tabelle 1**) skaliert. Ähnliches gilt für die Hilfsenergiebereitstellung (Pumpen, Regelung). Auch hier kam der gleiche generische Datensatz zur Anwendung. Die benötigte Hilfsenergiemenge wurde nach DIN V 18599 [18] berechnet.

**4.3 Ergebnisse**

Das Ergebnis der Sachbilanz (LCI) ist eine Auflistung sowohl der umweltbeeinflussenden elementaren In- und Outputflüsse als auch der Produkt- und Zwischenproduktflüsse des untersuchten Produktsystems, wobei die zuerst genannten grenzüberschreitenden Elementarflüsse die für die Wirkungsabschätzung entscheidenden Flüsse darstellen. Sie enthalten die wichtigen Informationen zu den mit der wärmetechnischen Anlage verbundenen Umweltwirkungen [7, 13]. Jedoch auch grenzüberschreitende Produkt- und Zwischenproduktflüsse haben Einfluss auf das Sachbilanzergebnis und die

*Tabelle 2: Auflistung der in der Ökobilanz (LCA) berücksichtigten Anlagenkomponenten.*

| Funktionsbereich | Anlagenkomponente  |
|------------------|--|
| Erzeugung        | Sole-Wasser-Wärmepumpe   |
|                  | Solarthermischer Flachkollektor                                    |
| Speicherung      | Heizwasserpufferspeicher   |
|                  | Bivalenter Warmwasserspeicher                                      |
| Verteilung       | Rohrleitungen verschiedener Nennweiten (PE, Edelstahl)             |
|                  | Dämmung (PE-Schaum, EPDM-Schaum)                                   |
|                  | Armaturen- und Pumpengruppen                                       |
|                  | Heizkreisverteiler/-sammler einschließlich Verteilerschränke       |
|                  | Membranausdehnungsgefäße   |
| Übergabe         | Solarwärmeübertrager (extern)                                      |
|                  | Fußbodenheizung (Systemdämmplatte, PE-Rohrleitungen, ohne Estrich) |
|                  | Luftheizregister (Wohnraumlüftungsanlage)                          |

Wirkungsabschätzung, beispielsweise in Form von berücksichtigten Gutschriften.

Unter Beachtung der zu Beginn im Untersuchungsrahmen definierten Abschneidekriterien und der primären Eingangsdaten aus **Tabelle 1** sollen im Folgenden kurz die prozentualen Anteile und die Zusammensetzung wesentlicher Flusskategorien erläutert werden. Auch wenn diese allein noch keine Umweltwirkungen nach sich ziehen, so vermitteln sie doch einen ersten Eindruck hinsichtlich möglicher Einflussgrößen, auch solcher Größen, die nicht masse- oder energiebezogen sind, wie beispielsweise Flächennutzungen. Da an dieser Stelle nur ein Überblick gegeben werden soll, wurden die Flüsse kategorisiert und zusammengefasst. Eine Gruppierung der Elementarflüsse ist zum einen in die übergeordnete Input-Kategorie „Ressourcen“ und zum anderen in die Output-Kategorie „Emissionen“ möglich. Beide Kategorien können weiter unterteilt werden.

So lassen sich die Ressourcen in energetische (Primärenergie) und stoffliche Ressourcen einteilen. Die energetischen Ressourcen<sup>2</sup> können weiter in den bewertungsrelevanten fossilen Anteil (74 %) und den regenerativen Anteil (26 %) aufgesplittet werden. Der dominante fossile Primärenergiebedarf wiederum wird im Wesentlichen durch die Primärenergieträger Braunkohle (31 %), Steinkohle (23 %), Kernbrennstoffe (22 %), Erdgas (16 %) und Erdöl (8 %) gedeckt. Die regenerative Ressourcenbeanspruchung verteilt sich überwiegend auf die Solarenergie (66 %), die Windenergie (25 %) und die Wasserkraftnutzung (9 %). Auch die stofflichen Ressourcen können in regenerierbare (Wasser, Sauerstoff), nicht regenerierbare stoffliche (Bauxit, Natriumchlorid) und nicht regenerierbare elementare (Eisen, Kupfer) Ressourcen eingeteilt werden.

Zu den outputbezogenen Emissionen<sup>3</sup> zählen neben Abfällen die Emissionen in Luft (0,94 %), Wasser (99,06 %) und Boden (< 0,01 %). Die Abfälle können in Produktionsrückstände (Abfälle zur Beseitigung (< 0,01 %)) und Ablagegüter (Haldengüter (99,98 %), radioaktive Abfälle (0,02 %)) unterteilt werden.

Die massebezogene Verteilung der Emissionen in Luft wurde in **Tabelle 3** aufgelistet.

<sup>2</sup> Angabe als energiebezogene prozentuale Verteilung (Heizwert).

<sup>3</sup> Angabe als massebezogene prozentuale Verteilung.

## 5 Wirkungsabschätzung

### 5.1 Bewertungsumfang

Ausgehend von den Ergebnissen der Sachbilanz (LCI) stellt sich im Anschluss die Frage nach der Relevanz der einzelnen Elementarflüsse hinsichtlich deren möglicher Umweltwirkungen. Solchen Fragen wird im Rahmen einer Wirkungsabschätzung (LCIA) nachgegangen. Grundsätzlich hat eine normkonforme Wirkungsabschätzung verbindliche, weitestgehend naturwissenschaftlich begründete Bestandteile. Sie kann aber auch zur besseren Interpretation zusätzlich optionale, tendenziell subjektiv begründete Inhalte berücksichtigen [7, 8]. Zu den verbindlichen Bestandteilen gehören

- die Auswahl von Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodellen,
- die Zuordnung der Sachbilanzergebnisse (Klassifizierung) zu den relevanten Wirkungskategorien sowie
- die Berechnung von Wirkungsindikatorwerten (Charakterisierung).

Die optionalen Bestandteile der Wirkungsabschätzung können

- die Berechnung des Betrages von Wirkungsindikatorwerten im Verhältnis zu einem oder mehreren Referenzwerten (Normierung),
- die Ordnung sowie
- die Gewichtung mit einer möglichen Aggregation verschiedener Wirkungskategorien umfassen.

Für gewöhnlich liegt der Fokus einer Wirkungsabschätzung auf der Bewertung der umweltbeeinflussenden elementaren In- und Outputflüsse mittels einer ganzheitlichen Abschätzungsmethode, die insbesondere für Vergleiche einheitlich zur Anwendung kommen muss. Solche in sich geschlossenen Methoden berücksichtigen oft eine Vielzahl verschiedener

**Tabelle 3:** Verteilung der Emissionen in Luft.

| Elementarflusskategorie                    | Wert          | Einheit  |
|--|---------------|----------|
| anorganische Emissionen in Luft            | 80,25         | %        |
| organische Emissionen in Luft (Gruppe VOC) | < 0,01        | %        |
| Partikel in Luft                           | < 0,01        | %        |
| Pestizide in Luft                          | < 0,01        | %        |
| Schwermetalle in Luft                      | < 0,01        | %        |
| sonstige Emissionen in Luft                | 19,75         | %        |
| <b>Summe</b>                               | <b>100,00</b> | <b>%</b> |

Umweltwirkungen und beinhalten zumeist alle verbindlichen sowie einige optionale Bestandteile einer normkonformen Wirkungsabschätzung [7, 13].

Bei den hier vorgestellten Untersuchungen lag der Schwerpunkt aber nicht nur auf der Wirkungsabschätzung an sich, sondern auch auf dem Einfluss unterschiedlicher methodischer Ansätze auf das Ergebnis der Umweltbewertung bei identischen Sachbilanzdaten. So hat neben der Sachbilanz vor allem die Wahl der Wirkungsabschätzungsmethode großen Einfluss auf die Bewertung und das Aufzeigen von kritischen Umweltproblembefeldern.

**5.2 Methoden**

**5.2.1 Vorbetrachtungen**

Um eine Einschränkung hinsichtlich der zur Auswahl stehenden Wirkungsabschätzungsmethoden vornehmen zu können, wurden im Vorfeld der Untersuchungen primär qualitative Kriterien festgelegt. So sollten nur Methoden untersucht werden, die möglichst viele und auch aktuellste Umweltkategorien bzw. -problembfelder berücksichtigen und deren Gesamtergebnis mit einem aggregierten Ein-Punkt-Indikator („Vollaggregation“ [19]) abbildbar ist. Diese übersichtliche Zusammenfassung der Bilanzergebnisse ermöglicht gerade aus Sicht der Interessenten (Investor, Endkunde) eine einfache Interpretation insbesondere bei Vergleichen. Auf die willkürliche Auswahl nur einzelner Umweltwirkungskategorien wurde explizit verzichtet, auch um Fehlanwendungen und -interpretationen zu vermeiden [19]. Zudem galt der Anspruch, dass die Methoden wissenschaftlich und international anerkannt sind [5, 7, 8] und sowohl verbindliche als auch optionale Bestandteile beinhalten. Daher wurden nur ganzheitliche Wirkungsabschätzungsmethoden gewählt.

Unter Beachtung der beschriebenen Kriterien für die Auswahl konnten zwei Ansätze bestimmt und, teilweise zusätzlich in abgewandelter Form, analysiert werden. Die gewählten Verfahren lassen sich konzeptionell in zwei Kategorien einteilen. So handelt es sich bei dem ersten Ansatz, der Methode der ökologischen Knappheit (MöK, [19–21]), um einen sogenannten Distance-to-target-Ansatz (Differenz zur Toleranzmenge). Im Unterschied hierzu zählt das zweite Verfahren, die ReCiPe-Methode [22], zu den schadensorientierten Methoden [13, 23, 24].

**5.2.2 Methode der ökologischen Knappheit**

Die in der Schweiz entwickelte Methode der ökologischen Knappheit (MöK), auch als Methode der Umweltbelastungspunkte (UBP-Methode) oder Umweltbelastungspunkteverfahren bezeichnet, ist einer der ersten Ansätze zur Abschätzung von Umweltwirkungen. Es werden zur Berechnung des Umwelteinflusses von Produkten und Dienstleistungen sogenannte regionale Ökofaktoren genutzt, die für jeden zu berücksichtigenden Schadstoff oder jede Ressource (Elementarfluss) einheitlich ermittelt wurden und die die möglichen unterschiedlichen Umweltwirkungen spezifisch in Form von aggregierbaren Umweltbelastungspunkten (UBP) repräsentieren.

Die Berechnung der Ökofaktoren *f* der Methode der ökologischen Knappheit erfolgt in ihrer aktuellsten Form gemäß der **Gleichung (1)**.

$$f_{MöK} = K_{MöK} \cdot \frac{1}{F_n} \cdot \left( \frac{F}{F_k} \right)^2 \cdot c \tag{1}$$

Der mathematische Ansatz berücksichtigt die Charakterisierung mit dem Charakterisierungsfaktor *K*, die Normierung mit dem Normierungsfluss *F<sub>n</sub>*<sup>4</sup> und die Gewichtung<sup>5</sup> auf Grundlage des quadratischen Verhältnisses des aktuellen (gegenwärtigen) Flusses *F*<sup>6</sup> bezogen auf den kritischen Fluss *F<sub>k</sub>*<sup>7</sup> (Grenzwertfluss) eines Schadstoffs oder einer Ressource. Die Konstante *c* dient der einheitlichen Skalierung des Ökofaktors, um dessen Wert anschaulicher darzustellen. Als Einheit des Ökofaktors ergeben sich Umweltbelastungspunkte (UBP) je Mengeneinheit eines Schadstoffs oder einer Ressource [19].

$$[f_{MöK}] = \frac{UBP}{Mengeinheit}$$

Zur Ermittlung des gesamten Umwelteinflusses *UI*, dies kann auch als Umweltleistung [9]

4 Bspw. die gesamte Masse der jährlich emittierten Treibhausgase in kg<sub>CO<sub>2</sub>-Äq.</sub> der Schweiz.  
 5 Auf Basis des Abstands zur Umweltzielsetzung (distance to target), auch als ökologische Knappheit bezeichnet.  
 6 Bspw. die gesamte Masse der emittierten Treibhausgase in t<sub>CO<sub>2</sub>-Äq.</sub> eines Kantons der Schweiz.  
 7 Bspw. die maximal zulässige Masse emittierter Treibhausgase in t<sub>CO<sub>2</sub>-Äq.</sub> eines Kantons der Schweiz, aus nationalen Festlegungen.

oder Umweltschadungsindikator [10] bezeichnet werden, eines Produktes oder einer Dienstleistung muss der jeweilige Ökofaktor gemäß **Gleichung (2)** noch mit der durch dieses Produkt oder diese Dienstleistung verursachten Menge  $x$  eines Schadstoffes oder einer Ressource  $i$  multipliziert und aufsummiert werden<sup>8</sup>.

$$U_{MöK} = \sum_{i=1}^n (f_{MöK,i} \cdot x_i) \quad (2)$$

Die hierfür erforderlichen Daten sind beispielsweise mittels einer Sachbilanz (LCI) für ein spezifisches Produktsystem bestimmbar. Grundsätzlich kann die Methode der ökologischen Knappheit auch in anderen Ländern zur Anwendung kommen, nur sind hierfür nicht die gleichen regionalspezifischen, auf die Schweiz bezogenen (nationale Grenzwerte) Ökofaktoren nutzbar [19]. Soll die Methode beispielsweise in Deutschland angewendet werden, so sind die entsprechenden Faktoren nach **Gleichung (1)** für deutsche Verhältnisse (Normierungsflüsse, Grenzflüsse) neu zu berechnen. Hierzu liegen bereits Ergebnisse in Form verfügbarer Ökofaktoren vor, auf die für diese Untersuchungen auch zurückgegriffen wurde [20, 21]. Dementsprechend konnte die Wirkungsabschätzung differenziert nach den jeweils vorliegenden Studien, hier als „MöK Schweiz“, „MöK VW AG“ und „MöK TU Berlin“ bezeichnet, für die einheitlich bestimmten Sachbilanzresultate durchgeführt werden.

### 5.2.3 ReCiPe-Methode

Auch bei der in den Niederlanden entwickelten ReCiPe-Methode<sup>9</sup> [22, 25] handelt es sich um einen Ansatz, mit dem der mögliche Umwelteinfluss eines Produktes oder einer Dienstleistung mit einem vollaggregierten Ein-Punkt-Indikator quantifizierbar ist. Im Unterschied zur Methode der ökologischen Knappheit (MöK) erfolgt die Wirkungsabschätzung (LCIA) standardmäßig über den gesamten Umweltwirkungsmechanismus, quantifiziert mittels sogenannter End-Point-Indikatoren. Diese Indikatoren beziffern einen potenziellen Umweltschaden an den drei schutzwürdigen Gütern, der menschlichen Gesundheit

(Human Health, HH), der Ökosystemdiversität (Ecosystem Diversity, ED) und der Ressourcenverfügbarkeit (Resource Availability, RA).

Um die Unsicherheiten der Charakterisierungsmodelle, d. h. das unvollständige Wissen über die tatsächlichen Umweltwirkmechanismen, berücksichtigen zu können, wurden drei kulturelle Perspektiven (Sichtweisen) bzw. Szenarien<sup>10</sup>, z. B. hinsichtlich des Zeithorizonts, für die ReCiPe-Methode seitens der Entwickler festgelegt. Dementsprechend sind für die Charakterisierung, die Normierung und die Gewichtung unterschiedliche Berechnungsfaktoren anzuwenden. Für die in diesem Beitrag vorgestellten Untersuchungen wurde die Perspektive H (Hierarchisch, mittelfristig denkend, beispielsweise gilt für den Klimawandel ein Zeithorizont von 100 Jahren) für die Charakterisierungs- und die Normierungsfaktoren gewählt.

Im Gegensatz zur grenzwertbezogenen Gewichtung der Methode der ökologischen Knappheit basiert die Bestimmung der Gewichtungsfaktoren der ReCiPe-Methode auf einer Befragung.

Mit Blick auf **Gleichung (1)** lässt sich zur Wirkungsabschätzung nach der ReCiPe-Methode der Faktor  $f$  mit **Gleichung (3)** mathematisch analog formulieren.

$$f_{\text{ReCiPe}} = K_{\text{ReCiPe}} \cdot \frac{1}{UW_N} \cdot G \cdot c \quad (3)$$

Auch hier wird zunächst die Charakterisierung mit dem Charakterisierungsfaktor  $K$  vorgenommen, gefolgt von der Normierung mit dem Referenzwert der jeweiligen Umweltwirkungskategorie  $UW_N$ <sup>11</sup> und dem zugehörigen Gewichtungsfaktor  $G$ . Ebenso wie bei der Methode der ökologischen Knappheit dient die Konstante  $c$  der einheitlichen Skalierung des Faktors  $f$ . Da es sich bei dem Faktor  $f$  formal um einen spezifischen anteiligen Umweltschaden handelt, also die jeweilige Umweltwirkung bezogen auf einen Referenzwert, z. B. den weltweiten potenziellen Umweltschaden, lässt sich daraus die Maßeinheit Umweltschadungsanteile (ULA) je Mengeneinheit

<sup>8</sup> Bspw. die emittierte Masse des Treibhausgases Kohlenstoffdioxid in kg.

<sup>9</sup> Entstanden aus der CML- und der Eco-Indicator-Methode, ebenfalls aus den Niederlanden.

<sup>10</sup> Individuell (I), kurzfristig denkend; Hierarchisch (H), mittelfristig denkend; Egalitär (E), langfristig denkend [22].

<sup>11</sup> Bspw. der weltweit gesamte potenzielle Schaden an der menschlichen Gesundheit (HH) in DALY (Disability-Adjusted Life Years), ermittelt aus Statistiken.



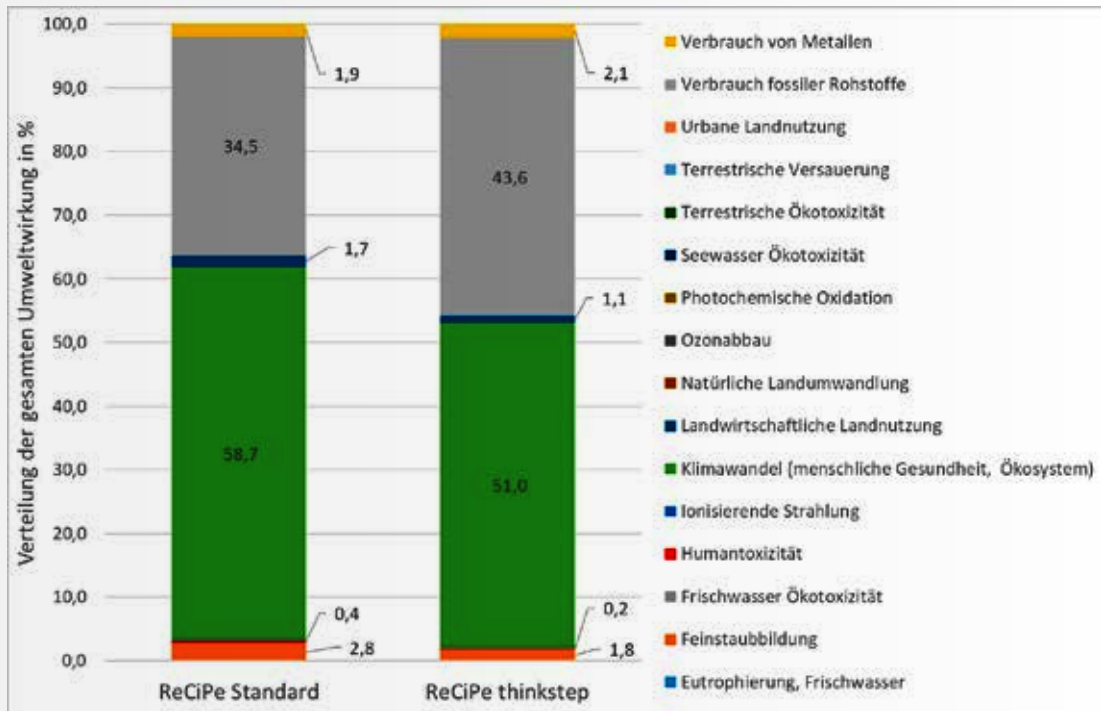


Bild 3: Anteile der signifikantesten Wirkungskategorien am Gesamtergebnis der Wirkungsabschätzung nach der ReCiPe-Methode.

eines Schadstoffs oder einer Ressource (Elementarfluss) ableiten und definieren.

$$[f_{\text{ReCiPe}}] = \frac{\text{ULA}}{\text{Mengeinheit}}$$

Zur abschließenden Berechnung des Umwelteinflusses  $UI$  [10] nach der ReCiPe-Methode muss der jeweilige Faktor  $f$  gemäß Gleichung (4) nur noch mit der durch dieses Produkt oder diese Dienstleistung bedingten Menge  $x$  eines Schadstoffs oder einer Ressource  $j$  multipliziert und aufsummiert werden.

$$UI_{\text{ReCiPe}} = \sum_{j=1}^m (f_{\text{ReCiPe},j} \cdot x_j) \tag{4}$$

Bei den hier vorgestellten Ergebnissen wurden für zwei Varianten der ReCiPe-Methode die einheitlich bestimmten Sachbilanzresultate mittels der drei End-Point-Indikatoren (HH, ED, RA) je Wirkungskategorie bewertet und für Vergleiche zusammengefasst. Beide Varianten unterscheiden sich lediglich in der Gewichtung. Diese

erfolgte bei der Variante „ReCiPe Standard“<sup>12</sup> auf Grundlage der empfohlenen durchschnittlichen Faktoren [22]. Für die Variante „ReCiPe thinkstep“<sup>13</sup> wurden Gewichtungsfaktoren, ermittelt auf Grundlage einer LCIA-Umfrage im Jahr 2012, genutzt [16].

### 5.3 Ergebnisse

#### 5.3.1 Methode der ökologischen Knappheit

Bevor die Resultate aus den Untersuchungen der unterschiedlichen Ansätze (distance to target, schadensorientiert) bewertet werden, sollen zunächst die Umweltwirkungen je Wirkungskategorie der einzelnen Ansätze und ihrer Varianten, sowohl absolut als auch bezogen auf den jeweiligen gesamten Umwelteinfluss  $UI$ , vorgestellt werden. Es ist zu beachten, dass die Methode der ökologischen Knappheit (Mök) und die ReCiPe-Methode teilweise unterschiedlich definierte Wirkungskategorien verwenden.

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung, differenziert nach den drei unterschiedlichen

12 Version ReCiPe 1.08 (H), End-Point-Normierung für Europa, ohne biogenen Kohlenstoff, durchschnittliche Gewichtung nach ReCiPe.

13 Version ReCiPe 1.08 (H), End-Point-Normierung für Europa, ohne biogenen Kohlenstoff, Gewichtung nach thinkstep-LCIA-Umfrage 2012.

Varianten der Methode der ökologischen Knappheit, sind der **Tabelle 4** zu entnehmen. Es ist deutlich zu erkennen, dass der berechnete gesamte Umwelteinfluss  $UI$  je Variante unterschiedlich stark eingeschätzt wird. So hat die wärmetechnische Anlage nach der Variante „MöK Schweiz“ (30.206.305 UBPs) einen wesentlich höheren Umwelteinfluss als nach der Variante „MöK TU Berlin“ (409.729 UBPs). Bei genauer Betrachtung der Wirkungskategorien fällt auf, dass für einige Kategorien, insbesondere der Varianten „MöK VW AG“ und „MöK TU Berlin“, keine Werte ermittelt werden konnten. Die Gründe sind nicht in fehlenden Sachbilanzdaten zu suchen, sondern in nicht vorhandenen Ökofaktoren zur Bewertung der Umweltwirkung eines Schadstoffs

oder einer Ressource (Elementarfluss). Aber auch innerhalb einer Wirkungskategorie konnten aufgrund fehlender Ökofaktoren je nach Variante nicht alle Elementarflüsse bewertet werden. Den größten Umfang bewerteter Schadstoffe oder Ressourcen aller drei Varianten hat die Variante „MöK Schweiz“. Es ist allerdings zu beachten, dass die Ökofaktoren und das Gesamtergebnis im Gegensatz zu den beiden anderen Varianten regional auf die Verhältnisse der Schweiz bezogen und damit nicht direkt vergleichbar sind. Aber selbst mit gleichem regionalen Bezug ergeben sich beispielsweise aufgrund unterschiedlicher Gewichtung der Ökofaktoren verschiedene Ergebnisse. Ein Beispiel zeigt **Tabelle 5**. Der Grund für die hier gezeigte abweichende

**Tabelle 4:** Ergebnis der Wirkungsabschätzung der unterschiedlichen Varianten der Methode der ökologischen Knappheit (MöK).

| Wirkungskategorie (Mid-Point-Indikatoren)    | MöK Schweiz |       | MöK VW AG  |       | MöK TU Berlin |       |
|--|-------------|-------|------------|-------|---------------|-------|
|  | $UI_{MöK}$  | -     | $UI_{MöK}$ | -     | $UI_{MöK}$    | -     |
|  | UBP         | %     | UBP        | %     | UBP           | %     |
| Energetische Ressourcen                      | 2.026.063   | 6,7   | 309.037    | 3,8   | 66.626        | 16,3  |
| Flächeninanspruchnahme                       | 490.083     | 1,6   | -          | -     | -             | -     |
| Gefährlicher Abfall                          | -           | -     | 2.738      | < 0,1 | -             | -     |
| Karzinogene Stoffe in Luft                   | 173.246     | 0,6   | 43         | < 0,1 | 31            | < 0,1 |
| Mineralische Ressourcen                      | 103.387     | 0,3   | -          | -     | -             | -     |
| Ozonabbaupotenzial                           | 164         | < 0,1 | -          | -     | < 1           | < 0,1 |
| Persistente organische Schadstoffe in Wasser | 68.833      | 0,2   | 269.581    | 3,3   | 31            | < 0,1 |
| Pestizide in Boden                           | < 1         | < 0,1 | -          | -     | -             | -     |
| Radioaktive Stoffe in Luft                   | < 1         | < 0,1 | -          | -     | -             | -     |
| Radioaktive Stoffe in Wasser                 | 3.282       | < 0,1 | -          | -     | -             | -     |
| Schwermetalle in Boden                       | 13.052      | < 0,1 | -          | -     | -             | -     |
| Schwermetalle in Luft                        | 174.841     | 0,6   | -          | -     | 40.535        | 9,9   |
| Schwermetalle in Wasser                      | 743.969     | 2,5   | 2.808.204  | 34,5  | -             | -     |
| Treibhauspotenzial                           | 17.360.265  | 57,5  | 564.673    | 6,9   | 60.341        | 14,7  |
| Ungefährlicher Abfall                        | -           | -     | 1.527.471  | 18,8  | -             | -     |
| Wasserressourcen                             | 5.817.980   | 19,3  | 2.158.375  | 26,5  | -             | -     |
| Wasserschadstoffe                            | 613.758     | 2,0   | 343.644    | 4,2   | 18.641        | 4,5   |
| Wichtige Luftschadstoffe                     | 2.617.382   | 8,7   | 153.611    | 1,9   | 223.524       | 54,6  |
| Summe  | 30.206.305  | 100   | 8.137.377  | 100   | 409.729       | 100   |

**Tabelle 5:** Ökofaktoren der untersuchten Varianten der MöK für Treibhausgase [19–21].

| Berechnungsgrößen   | MöK Schweiz       | MöK VW AG          | MöK TU Berlin      |
|---|-------------------|--------------------|--------------------|
| Normierungsfluss $F_n$ in $t_{CO_2-Aq}/a$                           | 53.040.000        | 916.769.000        | 916.495.078        |
| aktueller (gegenwärtiger) Fluss $F$ in $t_{CO_2-Aq}/a$ (Bezugsjahr) | 53.040.000 (2009) | 916.769.000 (2011) | 916.495.078 (2011) |
| kritischer Fluss $F_k$ in $t_{CO_2-Aq}/a$ (Bezugsjahr)              | 10.766.000 (2050) | 246.486.000 (2050) | 750.158.162 (2020) |
| Gewichtung  | 24,3              | 13,8               | 1,5                |
| Ökofaktor $f_{UBP,CO_2}$ in $UPB/kg_{CO_2-Aq}$                      | 460               | 15                 | 1,6                |

Gewichtung liegt am je nach Bezugsjahr unterschiedlich gewählten kritischen Fluss  $F_k$ .

Außerdem ist festzuhalten, dass je nach Variante der Methode der ökologischen Knappheit unterschiedliche Wirkungskategorien fokussiert werden. Während der Umwelteinfluss durch die wärmetechnische Anlage nach der Variante „MöK Schweiz“ hauptsächlich vom Treibhauspotenzial (58 %) und den Wasserschadstoffen (19 %) geprägt wird, sind es bei der Variante „MöK VW AG“ eher die Schwermetalle in Wasser (35 %), die Wasserressourcen (27 %) sowie der ungefährliche Abfall (19 %). Unter Verwendung der an der TU Berlin [21] berechneten Ökofaktoren hat die wärmetechnische Anlage vor allem Einfluss auf wichtige Luftschadstoffe (55 %), wie Stickoxide, flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (Non-Methane Volatile Organic Compounds, NMVOC) und Partikel in Luft. Eine grundsätzlich geringe Bedeutung messen alle drei Varianten den energetischen Ressourcen zu.

**5.3.2 ReCiPe-Methode**

Im Gegensatz zur Methode der ökologischen Knappheit (MöK) ist die Vergleichbarkeit der Wirkungskategorien der beiden Varianten der ReCiPe-Methode eher gegeben, da sich die Varianten lediglich in der Gewichtung unterscheiden. Hiermit lässt sich auch der Unterschied des berechneten gesamten Umwelteinflusses

UI zwischen der Variante „ReCiPe Standard“ (399.422 ULA) und der Variante „ReCiPe thinkstep“ (10.100 ULA) begründen.

Die **Tabelle 6** und das **Bild 3** zeigen die einflussreichsten Wirkungskategorien beider Varianten. Es ist ersichtlich, dass die wärmetechnische Anlage vor allem Auswirkungen auf den Klimawandel (> 50 %) hat, zusammengefasst hinsichtlich des potenziellen Schadens an der menschlichen Gesundheit (HH) und an der Ökosystemdiversität (ED). Neben dem Einfluss des Klimawandels ist der Verbrauch fossiler Rohstoffe (35 % bis 44 %) nicht unerheblich. Von eher geringer Bedeutung sind die Feinstaubbildung (2 % bis 3 %), der Verbrauch von Metallen (2 %) und die landwirtschaftliche Landnutzung (1 % bis 2 %). Die übrigen mit der ReCiPe-Methode bewertbaren Wirkungskategorien sind mit Anteilen von weniger als einem Prozent vernachlässigbar.

**6 Schlussfolgerungen**

Abschließend werden die Erkenntnisse aus den vorgestellten Untersuchungen genutzt, um eine geeignete Wirkungsabschätzungsmethode zur Berechnung des gesamten Umwelteinflusses wärmetechnischer Anlagen zu bestimmen. Die Wahl erfolgt unter der Maßgabe, die Methode für vergleichende Untersuchungen von Anlagentechnologien zu nutzen. Hieraus ergeben sich primäre

*Tabelle 6: Ergebnis der Wirkungsabschätzung der unterschiedlichen Varianten der ReCiPe-Methode.*

| Wirkungskategorie (End-Point-Indikatoren)       | ReCiPe Standard |            | ReCiPe thinkstep |            |
|---|-----------------|------------|------------------|------------|
|   | $UI_{ReCiPe}$   | -          | $UI_{ReCiPe}$    | -          |
|   | ULA             | %          | ULA              | %          |
| Eutrophierung, Frischwasser                     | 2               | < 0,1      | < 1              | < 0,1      |
| Feinstaubbildung                                | 11.256          | 2,8        | 183              | 1,8        |
| Frischwasser Ökotoxizität                       | 2               | < 0,1      | < 1              | < 0,1      |
| Humantoxizität                                  | 1.424           | 0,4        | 23               | 0,2        |
| Ionisierende Strahlung                          | 186             | < 0,1      | 2,4              | < 0,1      |
| Klimawandel (menschliche Gesundheit, Ökosystem) | 234.262         | 58,7       | 5.154            | 51,0       |
| Landwirtschaftliche Landnutzung                 | 6.983           | 1,7        | 115              | 1,1        |
| Ozonabbau                                       | < 1             | < 0,1      | < 1              | < 0,1      |
| Photochemische Oxidation                        | 5               | < 0,1      | < 1              | < 0,1      |
| Seewasser Ökotoxizität                          | < 1             | < 0,1      | < 1              | < 0,1      |
| Terrestrische Ökotoxizität                      | 28              | < 0,1      | < 1              | < 0,1      |
| Terrestrische Versauerung                       | 86              | < 0,1      | 1,2              | < 0,1      |
| Verbrauch fossiler Rohstoffe                    | 137.753         | 34,5       | 4.409            | 43,6       |
| Verbrauch von Metallen                          | 7.435           | 1,9        | 212              | 2,1        |
| <b>Summe</b>                                    | <b>399.422</b>  | <b>100</b> | <b>10.100</b>    | <b>100</b> |

Anforderungen, die die Methode erfüllen sollte und anhand derer eine Festlegung getroffen wurde.

Wie die Untersuchungen gezeigt haben, unterscheidet sich der ermittelte Gesamtwelteinfluss aller Varianten bei identischen Sachbilanzdaten deutlich. Es entsteht der Eindruck, dass die Resultate einer gewissen Subjektivität unterliegen, was nicht vollständig ausgeschlossen werden kann. Dies gilt vor allem für die Varianten der Methode der ökologischen Knappheit (MöK), aber in gewissem Maße auch für die der ReCiPe-Methode. So existieren beispielsweise für einige Wirkungskategorien vollständig und andere teilweise keine nutzbaren Ökofaktoren. Andere vorhandene Faktoren unterscheiden sich wiederum hinsichtlich ihres Wertes.

Auch wenn die Gründe für die fehlende Bewertung einiger Stoffe und Ressourcen (Elementarflüsse) sowie ganzer Wirkungskategorien nicht vollständig nachvollzogen werden konnten, so liegt ein Grund sicher darin, dass

für die Bestimmung insbesondere der deutschen Ökofaktoren keine festgelegten Grenzwerte existieren. Ein solches Bewertungsergebnis quantifiziert als Ein-Punkt-Indikator („Vollaggregation“ [19]) wäre unvollständig, verzerrt und entspräche nicht dem Anspruch der Ganzheitlichkeit [7, 8]. Übertragen auf vergleichende Untersuchungen von Anlagentechnologien bestehen die Risiken darin, dass Technologien mit einem größeren Schadenspotenzial bevorzugt werden, weil relevante Stoffe und Ressourcen nicht berücksichtigt wurden. Da die Varianten „MöK VW AG“ und „MöK TU Berlin“ aufgrund fehlender Ökofaktoren der Forderung nach Ganzheitlichkeit weniger als die anderen Varianten entsprechen, sollten sie in ihrer aktuellen Ausprägung nicht gewählt werden.

Die Variante „MöK Schweiz“ wäre den anderen Varianten vorzuziehen, nur besteht das Problem des regionalen Bezuges der Ökofaktoren und somit des nicht repräsentativen Umweltbewertungsergebnisses bei einer Nutzung

Anzeige

## Ökologisch sinnvoll. Ökonomisch effizient.

**KAUT**  
THE AIR COMPANY

### driSteem LX Gas-Dampfbefeuchter

- Hoher Wirkungsgrad > 103 % ( $H_p$ )
- Niedrige Stickoxidwerte ( $NO_x$ ) < 20 ppm
- Niedrige Abgastemperatur < 60 °C
- Leistungsbereich 23 – 272 kg/h
- Ein Niveauregelsystem für den Betrieb aller Wasserarten
- Großer Modulationsbereich
- Permanente Leitwertüberwachung
- Abgaswege aus Polypropylenrohren (kein Edelstahlkamin erforderlich)
- Geringe Montage- und Betriebskosten



Gerne beraten wir Sie persönlich vor Ort.  
[info@kaut.de](mailto:info@kaut.de) | [www.kaut.de](http://www.kaut.de)

für Deutschland. Dies äußert sich vor allem in der Wahl der Normierungsflüsse und der kritischen Flüsse (Grenzwertflüsse), da sie Einfluss auf die Gewichtung haben. Um diese Methode auch in Deutschland sinnvoll einzusetzen, ist es erforderlich, einheitliche und verbindliche Festlegungen zu treffen. Die Umsetzung sollte ähnlich wie in der Schweiz auf Basis demokratisch legitimierter Umweltschutzziele zentral erfolgen. Sie ist allerdings äußerst aufwendig und gegenwärtig für viele zu berücksichtigende Substanzen kaum realisierbar. Die Variante „MöK Schweiz“ ist aufgrund des regionalen Bezuges und der beschriebenen Unwägbarkeiten für vergleichende Untersuchungen von Anlagentechnologien nicht sinnvoll nutzbar.

Im Gegensatz zur Methode der ökologischen Knappheit erfolgt die Normierung nach der ReCiPe-Methode nur entweder bezogen auf den weltweiten Umweltschaden, was dem Gerechtigkeitsanspruch am nächsten kommt und zu bevorzugen ist, oder den in Europa verursachten Schaden. Außerdem lassen sich derzeit wesentlich mehr Substanzen als mit der Methode der ökologischen Knappheit berücksichtigen, was der Ganzheitlichkeit entgegenkommt. Für die Nutzung der ReCiPe-Methode sprechen auch die zu verwendenden Charakterisierungsmodelle. Mit ihnen lassen sich die Ergebnisse der Umweltbewertung einem breiteren Publikum verständlicher (anschaulicher) vermitteln, da der gesamte Umweltwirkungsmechanismus (End-Point-Bezug) betrachtet und ein Schaden an schutzwürdigen Gütern quantifiziert wird. Vorteilhaft ist es auch, dass für alle drei Schadenskategorien der ReCiPe-Methode allgemeingültige Gewichtungsfaktoren existieren, die zwar „nur“ auf Basis von Befragungen ermittelt wurden, jedoch regional unabhängig angewendet werden können. Es sind ebenso andere als die vorgegebenen Gewichtungsfaktoren denkbar, beispielsweise ermittelt auf Grundlage einer Stichprobenbefragung der deutschen Bevölkerung oder durch die Vorgabe politisch festgelegter Grenzwerte.

Grundsätzlich genügen beide Varianten der ReCiPe-Methode dem Anspruch der ganzheitlichen naturwissenschaftlich basierten Umweltwirkungsabschätzung und können zur vergleichenden Bewertung von wärmetechnischen Anlagen genutzt werden. Dennoch ist die ursprüngliche Ausprägung der ReCiPe-Methode, die Variante „ReCiPe Standard“, zu bevorzugen.

Sie entspricht aufgrund ihrer uneingeschränkten öffentlichen Zugänglichkeit auch dem Anspruch an Transparenz [7, 8]. So sind alle notwendigen Berechnungsfaktoren zur Charakterisierung, Normierung und Gewichtung allgemein verfügbar [22, 25]. Dies gilt jedoch nicht für die Gewichtungsfaktoren der Variante „ReCiPe thinkstep“. Die erforderlichen Informationen können nur auf Anfrage erworben oder den kommerziellen Datenbanken entnommen werden [16].

Ausgehend von diesen Erkenntnissen wurde zur Wirkungsabschätzung im Rahmen der „Erfurter Methode“ [10] die Variante „ReCiPe Standard“ gewählt und zur Bestimmung des Umwelteinflusses genutzt.

## 7 Ausblick

Mit diesem Beitrag wurden weitere für die Entwicklung der „Erfurter Methode“ wichtige Aspekte untersucht und vorgestellt. So lag ein besonderes Augenmerk auf der Auswahl einer geeigneten Methodik zur Umweltwirkungsabschätzung mit entsprechenden Wirkungskategorien. Es konnte mit der ReCiPe-Methode eine akademisch akzeptierte und anwenderfreundliche Lösung gefunden werden. Hierauf aufbauend wurde mit der Berechnung der spezifischen Umweltleistungen  $u$  und parallel der Festlegung von Allokationsregeln für Koppelprodukte begonnen. Die Ergebnisse dieser Berechnungen und Untersuchungen sollen nach Abschluss der Arbeiten unmittelbar veröffentlicht werden, ebenso wie die sich noch in der Entwicklung befindende Lösung zur Verknüpfung des Umweltleistungsindikators  $UI$  und des Wirtschaftlichkeitsindikators  $WI$  zum Ökoeffizienzindikator  $UWI$  [10].

## Abkürzungen

|      |  |
|------|--|
| BHKW | Blockheizkraftwerk   |
| DALY | Disability-Adjusted Life Years, behinderbereinigte Lebensjahre |
| ED   | Ecosystem Diversity, Ökosystemdiversität                       |
| EnEV | Energieeinsparverordnung                                       |
| EPDM | Ethylen-Propylen-Dien-Monomer-kautschuk                        |
| HH   | Human Health, menschliche Gesundheit                           |
| LCA  | Life Cycle Assessment, Ökobilanz                               |



|        |  |
|--------|--|
| LCI    | Life Cycle Inventory, Sachbilanz   |
| LCIA   | Life Cycle Impact Assessment, Wirkungsabschätzung  |
| Mök    | Methode der ökologischen Knappheit   |
| NMVOc  | Non-Methane Volatile Organic Compounds, flüchtige organische Verbindungen ohne Methan  |
| PE     | Polyethylen  |
| RA     | Resource Availability, Ressourcenverfügbarkeit   |
| ReCiPe | Akronym aus den Initialen der Organisationen (RIVM, Radboud University Nijmegen, Center of Environmental Sciences (CML, Leiden University), PRé Consultants), die diese Methode entwickelt haben |
| UBP    | Umweltbelastungspunkte, Einheit der bewerteten Umweltwirkung nach der UBP-Methode  |
| ULA    | Umweltleistungsanteile, Einheit der bewerteten Umweltwirkung nach der ReCiPe-Methode, eigene Definition  |
| WTA    | wärmetechnische Anlage   |

## Formelzeichen

|             |   |
|-------------|---|
| $\vartheta$ | Celsius-Temperatur  |
| $c$         | Konstante nach MöK $\left(\frac{10^{10}}{a}\right)$ ,<br>nach ReCiPe $\left(\frac{10^{10}}{a}\right)$ |
| $F$         | Menge, Fluss  |
| $f$         | Faktor  |
| $G$         | Gewichtungsfaktor   |
| $Q$         | Nutzwärmebedarf,<br>Jahresnutzwärmebedarf   |
| $T$         | Betrachtungszeitraum, entspricht auch dem Nutzungszeitraum der WTA                                    |
| $u$         | spezifische Umweltleistung  |
| $UI$        | Umwelteinfluss, Umweltleistung,<br>Umweltleistungsindikator   |
| $UW$        | charakteristische Menge einer<br>Umweltwirkungskategorie  |
| $UWI$       | Ökoeffizienzindikator zur Bewertung<br>der Umweltleistung und Wirtschaftlichkeit der WTA              |
| $WI$        | Wirtschaftlichkeitsindikator  |
| $x$         | Menge, allgemein  |

## Indizes

|        |                                    |
|--------|------------------------------------|
| $i, j$ | laufender Zeiger                   |
| $CO_2$ | Kohlenstoffdioxid                  |
| $k$    | kritisch                           |
| Mök    | Methode der ökologischen Knappheit |
| N      | Norm                               |
| $n$    | normal                             |
| NE     | Nutzenergie                        |
| ReCiPe | ReCiPe-Methode                     |
| VL     | Vorlauf                            |

## Literatur

- [1] BGBl. I S. 3951: Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung vom 18. November 2013. Bundesgesetzblatt 2013 Teil I Nr. 67. Bonn, November 2013.
- [2] EnEV 2014: Energieeinsparverordnung. Nichtamtliche Lesefassung zur Zweiten Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung vom 18. November 2013 (BGBl. I S. 3951). Ausgangstext ist die EnEV 2009. Internet: [http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/enev-nichtamtliche-lesefassung-zur-zweiten-verordnung-zur-aenderung-derenergieeinsparverordnung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/enev-nichtamtliche-lesefassung-zur-zweiten-verordnung-zur-aenderung-derenergieeinsparverordnung.pdf?__blob=publicationFile&v=1) (06.02.2019).
- [3] DIN V 4701-10: Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen - Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung. August 2003. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag, 2003.
- [4] 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. Dezember 2011. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag, 2011.
- [5] Wuppertal Institut (2015): Konsistenz und Aussagefähigkeit der Primärenergie-Faktoren für Endenergieträger im Rahmen der EnEV. Diskussionspapier unter Mitarbeit von Dietmar Schüwer, Thomas Hanke und Hans-Jochen Luhmann. Wuppertal, Dezember 2015.
- [6] iTG, ifeu, Wuppertal Institut (2016): Weiterentwicklung der Primärenergiefaktoren im neuen Energiesparrecht für Gebäude. Endbericht unter Mitarbeit von Bert Oschatz, Martin Pehnt und Dietmar Schüwer. Dresden, Heidelberg, Wuppertal, April 2016.
- [7] DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement. Ökobilanz. Grundsätze und Rahmenbedingungen. November 2009. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag, 2009.
- [8] DIN EN ISO 14044: Umweltmanagement. Ökobilanz. Anforderungen und Anleitungen. Oktober 2006. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag, 2006.
- [9] DIN EN ISO 14045: Umweltmanagement – Ökoeffizienzbewertung von Produktsystemen – Prinzipien, Anforderungen und Leitlinien. Oktober 2012. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag, 2012.
- [10] Stang, R.: Ökoeffizienzbewertung wärmetechnischer Anlagen. Anforderungen und Lösungsansätze. In: GI Jg. 139 (2018) Nr. 4, S. 286–299.

- [11] Gebhard, A. G.: Ganzheitliche Analyse und Bewertung der Umwelteinflüsse (Ökobilanz) der wärmetechnischen Anlage eines Einfamilienhauses. Masterarbeit MA-GE 29/16. Fachhochschule Erfurt. FB Gebäude- und Energietechnik. Erfurt, 2016 (unveröffentlicht).
- [12] Klöpffer, W. und Grahl, B.: Ökobilanz (LCA). Ein Leitfa- den für Ausbildung und Beruf. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2009.
- [13] Kaltschmitt, M. und Schebek, L.: Umweltbewertung für Ingenieure. Methoden und Verfahren. Berlin, Heidel- berg: Springer Vieweg, 2015.

- [14] DIN EN 15804: Nachhaltigkeit von Bauwerken. Umwelt- produktdeklarationen. Grundregeln für die Produktka- tegorie Bauprodukte. Juni 2014. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag, 2014.
- [15] DIN EN 15978: Nachhaltigkeit von Bauwerken. Bewer- tung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden. Berechnungsmethode. Oktober 2012. Deutsches Insti- tut für Normung (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag, 2012.
- [16] GaBi thinkstep: GaBi Product Sustainability Software. Internet: [http://www.gabi-software.com/ international/ software/gabi-software](http://www.gabi-software.com/international/software/gabi-software) (06.02.2019).
- [17] Kamin, J.: Energetische und strömungstechnische Untersuchung für die Wohnungslüftung. Bachelorar- beit BA-GE 11/10. Fachhochschule Erfurt. FB Gebäude- und Energietechnik. Erfurt, 2010 (unveröffentlicht).
- [18] DIN V 18599-5: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebe- darfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 5: Endenergiebedarf von Heizsystemen. Dezember 2011. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag, 2011.
- [19] Frischknecht, R. und Büsser Knöpfel S. 2013 (Bundesamt für Umwelt (Hrsg.)): Ökofaktoren Schweiz 2013 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit. Metho- dische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz. Bern. (Umwelt-Wissen Nr. 1330: 256 S.).
- [20] Ahbe, S.; Schebek, L.; Jansky, N.; Wellge, S. und Wei- hofen, S.: Methode der ökologischen Knappheit für Deutschland - eine Initiative der Volkswagen AG. 2., überarbeitete Auflage. Bd. 68. Berlin: Logos Verlag Berlin, 2014. (AutoUni-Schriftenreihe).
- [21] Grinberg, M.: Development of the ecological scarcity method. Application to Russia and Germany. Dissertati- on. Technische Universität Berlin. Berlin, 2015.
- [22] Goedkoop, M.; Heijungs, R.; Huijbregts, M.; De Schry- ver, A.; Struijs, J. und van Zelm, R. (National Institute for Public Health and the Environment (Hrsg.)): ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. First edition (version 1.08) Report I: Characterisation. Mai 2013.
- [23] Joint Research Centre (JRC), Institute for Environment and Sustainability: ILCD Handbook - Background Document. Analysis of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assess- ment - First edition. Internet: <http://eplca.jrc.ec.europa. eu/ilcdHandbook.html> (06.02.2019).
- [24] EU FP7 (RU, NTNU, IIASA, ETH, DTU und PRé Consul- tants): LC-Impact. A spatially differentiated life cycle impact assessment approach. Internet: <https://lc-impact. eu> (06.02.2019).
- [25] RIVM; CML; PRé Consultants und Universiteit Nijmegen: ReCiPe. Methodology for Life Cycle Impact Assessment (LCIA). Internet: [https://www.rivm.nl/en/Topics/L/ Life\\_Cycle\\_Assessment\\_LCA/ReCiPe](https://www.rivm.nl/en/Topics/L/ Life_Cycle_Assessment_LCA/ReCiPe) (06.02.2019).

## i | AUTOREN VITA



Dipl.-Ing. (FH) RENÉ STANG, M.Eng

Jahrgang 1976

- 2001 – 2005 Studium der Versorgungstechnik, Diplom, Fachhochschule Erfurt
- 2006 – 2009 Studium der Gebäude- und Energietechnik, Master, Fachhochschule Erfurt
- 2005 – 2012 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für bauwerksintegrierte Technologien (IBIT), Fachhochschule Erfurt
- seit 2013 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fakultät Gebäudetechnik und Informatik, Fachrichtung Gebäude- und Energietechnik, Fachhochschule Erfurt

**Kontakt** Fachhochschule Erfurt  
Fakultät Gebäudetechnik und Informatik  
Fachrichtung Gebäude- und Energietechnik  
Tel.: +49 361 6700 327  
E-Mail: [stang@fh-erfurt.de](mailto:stang@fh-erfurt.de)



ADRIAN G. GEBHARD, M.Eng.

Jahrgang 1991

- 2011 – 2016 duales Studium der Gebäude- und Energietechnik, Master, Fachhochschule Erfurt
- seit 2017 Projektingenieur bei der Gebhard GmbH & Co. KG, Wiederstedt; Projektingenieur bei der Ingenieur- planungsgesellschaft mbH Wohlrab, Landeck & Cie., Aschersleben
- seit 2018 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für bauwerksintegrierte Technologien (IBIT), Fachhochschule Erfurt

**Kontakt** Fachhochschule Erfurt  
Fakultät Gebäudetechnik und Informatik  
Fachrichtung Gebäude- und Energietechnik  
Institut für bauwerksintegrierte Technologien (IBIT)  
Tel.: +49 361 6700 4277  
E-Mail: [adrian.g.gebhard@fh-erfurt.de](mailto:adrian.g.gebhard@fh-erfurt.de)

1955

Für hochwertige Lüftungs- und Klimaanlage verwendet man

# TROX-Luftgitter

mit Strahlleitung und Mengeneinstellung

**Vorteile:**  
 Steuerung des Luftstroms, Lenkung in waagrechter und senkrechter Ebene, zugleich Einbläsung, große Wurfweiten, ansprechende Formgebung

**Gebüder TROX GmbH, GERÄTEBAU**  
 Neukirchen, Kinz-Meiers

Wir stellen her: Lüftungsgitter, Jalousien, Winterduschgitter, Lüftliche Türen, Feuerschutzklappen u. a.

1960

Wie liefern für Lüftungs-Anlagen:  
 Lüftungsgitter mit Mengeneinstellung für Ein- und Ausbläsung, Strahlregler für horizontalen und vertikalen Luftstrom, Winterduschgitter, Jalousien, Feuerschutzklappen, Lüftliche Türen, Feuerschutzklappen u. a.

**TROX**

GERÄTE FÜR LUFT- UND KLIMATECHNIK

GEBR. TROX GMBH, NEUKIRCHEN-PLATZ 10 D-41333 NEUKIRCHEN-AM-HEINRICH-SEE, WESTDEUTSCHLAND  
 Tel. Wagon 4123 - Fernschreiber 1812112

1968

**TROX**

Zubehör für die Lüftungs-Klima- und Wärmetechnik

**TROX**

NEULÄNGE HERGESTELLT UND WIEDERLIEFERBAR

- Regelgitter
- Strahlregler
- Einbläser
- Feuerschutzklappen
- Winterduschgitter
- Reinigungsgerate

**GEBRÜDER TROX GMBH**  
 41333 NEUKIRCHEN-AM-HEINRICH-SEE

1974

Ihr Partner für Lufttechnik  
 Filtertechnik  
 Schalltechnik

**TROX**

**GEBRÜDER TROX GMBH**  
 41333 NEUKIRCHEN-AM-HEINRICH-SEE  
 POSTFACH 10 010 10 3301 TEL 0181 200

1988

LUFT  
 SCHALL  
 LICHT  
 FEUER

**TROX** TECHNIK

Gebüder Trox GmbH  
 Heinrich-Trox-Platz  
 D-41333 Neukirchen-Vluyn 1  
 Telefon 0 20 451 20 30

1992

Das breiteste Programm für die Klimatechnik

Lüftungsgitter und -ablässe, Decken- und Bodenabstrichgitter, Jalousienklappen und Winterduschgitter, Strahlregler und Strahlungsregler, Filtermedien und Filterabstrichgitter, Winterduschgitter.

**TROX** TECHNIK

Heinrich-Trox-Platz  
 D-41333 Neukirchen-Vluyn 1  
 Telefon 0 20 451 20 30  
 Telefax 0 20 451 20 31  
 Telex 9 17 27  
 Telex 9 17 27 27 27

2001

The art of handling air

Luftdurchlässe für Decke, Wand und Boden  
 Luft-Wasser-Systeme  
 Regen- und Abgemengert  
 Brandschutz-, Rauchschutz- und Entrauchungsgitter,  
 BLS-Systeme TroxNetCom  
 Regen- und Schallschäler  
 Regen- und Überwachungs-systeme für Laboratorien  
 Filtermedien und Filtergeräte

**TROX** TECHNIK  
 Kooperationspartner für gutes Klima

Gebüder Trox GmbH  
 Heinrich-Trox-Platz  
 D-41333 Neukirchen-Vluyn  
 Telefon 0 20 451 20 30  
 Telefax 0 20 451 20 31  
 Telex 9 17 27 27 27  
 www.trox.de  
 e-mail: trox@trox.de

2019

**TROX**

ATME AUF  
 TAKE A BREATH

[www.trox.de](http://www.trox.de)

TROX gratuliert der GI zum Jubiläum!

# System und Verfahren zur cloudbasierten Betriebsoptimierung von Nichtwohngebäuden und Energiewandlungsanlagen



**Die Betriebsoptimierung von Nichtwohngebäuden und Energiewandlungsanlagen** hat das Potential große Einsparungen des Primärenergieverbrauches und Wartungsaufwandes zu realisieren, unterliegt jedoch auf Grund der Systemkomplexität hohem Kostendruck, da regelmäßig der Aufwand der Optimierung deren Nutzen übersteigt. Datengetriebene Verfahren der (teil-)automatisierten Analyse und Identifizierung von Optimierungsmaßnahmen gepaart mit der Möglichkeit regelungstechnische Maßnahmen unmittelbar durch Beeinflussung der Automationssysteme umzusetzen, stellen eine effiziente Lösung und ein nützliches Werkzeug für optimierende Fachkräfte dar. In diesem Beitrag wird ein solches Verfahren und dessen cloudbasierte Umsetzung vorgestellt. Im Rahmen eines BMWi-Forschungstransferprojekts konnte dieses Verfahren zur Marktreife entwickelt werden und steht kommerziell als Werkzeug zur Verfügung [1]. Im Fokus dieses Beitrags stehen die IT-infrastrukturellen Aspekte und deren Sicherheit.

System and method for cloud-based operation optimization of non-residential buildings and energy conversion systems

**The optimization of the operation of non-residential buildings and energy conversion plants** has the potential to realize large savings in primary energy consumption and maintenance expenses, but is subject to high cost pressure due to the complexity of these systems, as the effort required for optimisation regularly exceeds its benefits. Data-driven methods of (semi-) automated analysis and identification of optimization measures paired with the possibility of directly implementing those regarding control systems by influencing the automation systems represent an efficient solution and a useful tool for optimizing specialists. This article presents such a method and its cloud-based implementation. Within a BMWi-transfer-of-research project, this process was developed to market maturity and is commercially available [1]. This paper focuses on the IT-infrastructural aspects and their security.

VON  
ERIK BRÜMMENDORF  
JOHANNES FÜTTERER  
JAN HENRIK ZIEGELDORF



## 1. Einleitung

Im Kontext der Energiewende stellen Gebäude mit einem Anteil am europäischen Primärenergieverbrauch von 40 % einen großen Hebel dar [2]. Insbesondere auf Nicht-Wohngebäude entfällt ein großer Anteil. In Deutschland ist dieser mit 37 % an der in Gebäuden konsumierten Primärenergie überproportional hoch [3]. Von den 2,7 Mio. Gebäuden in Deutschland, die in diese Kategorie fallen, sind bereits ca. ein Viertel (26 % im europäischen Durchschnitt) mit Gebäudeautomationsystemen ausgestattet [2], [4]. In einer ausführlichen Umfrage von Herstellern, Planern, Errichtern und Betreibern von Gebäudeautomationsystemen wird jedoch gezeigt, dass mehr als 70 % der Systeme sowohl in der Dimension der möglichen Energieeffizienz als auch der Versorgungsqualität nicht zufriedenstellend betrieben werden [5]. Eine Optimierung dieser Systeme unterliegt branchenspezifisch einem hohen Kostendruck, sodass unter der Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte durch manuelle Analyse und Verbesserung nur ein kleiner Teil der Optimierungspotentiale realisiert werden kann. Es bedarf kostengünstiger, einfach nutzbarer und effizienter Werkzeuge um optimierende Fachkräfte und Ingenieure in ihrer Arbeit zu unterstützen. Ein großes Potential liegt hierbei in datengetriebenen, informationstechnologischen Verfahren. Für den wissenschaftlichen und praktischen Einsatz fehlen jedoch praktikable Lösungen der qualitativ hochwertigen Datenerhebung, -speicherung, -bereitstellung und -analyse. Darüber hinaus fehlen Verfahren um standardisiert, komfortabel und ortsunabhängig Werte an Automationsysteme zu schreiben und damit ihren Betrieb unmittelbar zu optimieren. In diesem Beitrag werden ein System und Verfahren zur Lösung dieser Herausforderungen vorgestellt.

Das System und Verfahren löst unter höchster IT-Sicherheit verschiedene Herausforderungen wie die Datenverfügbarkeit und -interpretation sowie das Zurückspielen von Erkenntnissen durch eine Plug-and-Play Kommunikationsschnittstelle in Verbindung mit einer Cloud-Plattform, welche durch Forschungsarbeiten am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik der RWTH Aachen entstanden ist. Durch einen BMWi-Exist-Forschungstransfer konnte dieses, auf Forschungsergebnissen basierende, System und Verfahren in ein marktaugliches Produkt überführt werden, welches nun durch die neu entstandene aedifion GmbH am Markt angeboten wird [1].

## 2. Stand-der-Technik datengetriebener Betriebsoptimierung

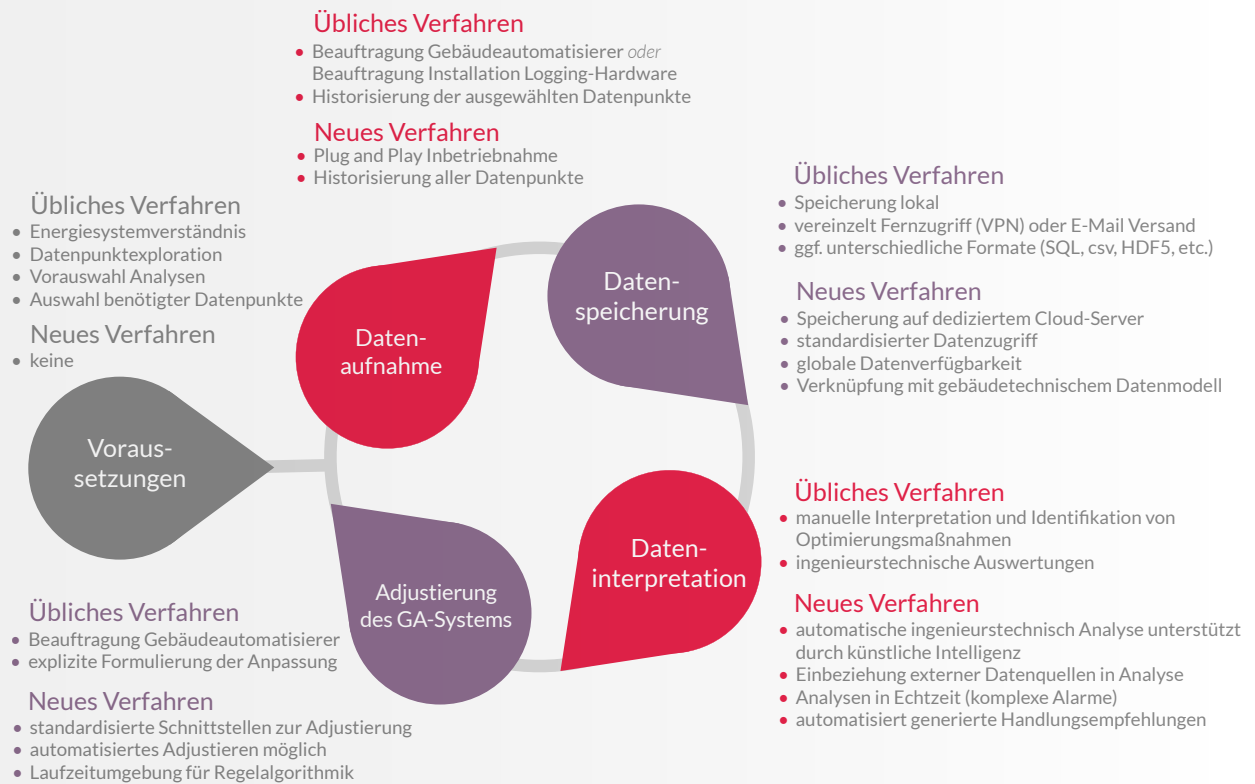
Zum gegenwärtigen Stand-der-Technik werden datengetriebene Optimierungsprozesse in der Regel nach einem gleichbleibenden Muster aufgebaut: Bereits zu Beginn des Projektes wird durch Fachkräfte unter Kenntnis des betrachteten Energiesystems eine Vorauswahl der durchzuführenden Untersuchungen und Analysen vorgenommen. Daraufhin werden, das Vorhandensein von Datenpunktlisten zwingend vorausgesetzt, benötigte Datenpunkte durch manuelle Datenpunktexploration ermittelt, deren Trends für spätere Analysen historisiert werden. Ursache für diese Einschränkung sind die, zum gegenwärtigen Stand-der-Technik, hohen, datenpunktspezifisch anfallenden Kosten der Historisierung. Dies ist vergleichbar mit der Metapher „Spitze eines Eisbergs“, bleibt hierdurch doch ein Großteil der durch datengetriebene Verfahren möglichen Betriebstransparenz im Verborgenen und vorhandenes Optimierungspotential kann nur partiell identifiziert werden.

Technisch kann die Historisierung einzelner Datenpunkte durch Beauftragung von Gebäudeautomatisierern, die eine lokale Speicherung einzelner Datenpunkte, meist in SQL-Datenbanken, einrichten oder durch das Einbringen von zusätzlichen Hardware-Komponenten, sogenannten Loggern, gelöst werden. Gegebenenfalls werden in dem betrachteten System bereits vereinzelt Datenpunkte historisiert. In diesem Fall muss jedoch in einem ersten Schritt ein Zugang zu diesen Daten eingerichtet werden. Die Frequenz, in der Datenpunkte historisiert werden, divergiert sehr stark und kann sich auf Auflösungen im Minutenspektrum bis hin zu Tages- oder Monatswerten – insbesondere bei Energiezählern – belaufen.

In einem nächsten Schritt muss der Zugriff auf die erhobenen Daten ermöglicht werden. Hier stellen sowohl unterschiedliche Speicherformate, die informationstechnologische Performanz des gezielten Auslesens dieser Daten als auch die physische Erreichbarkeit der Speichermedien eine zentrale Herausforderung dar. Übliche Lösungen arbeiten hier mit SQL-Datenbanken, HDF5- oder csv-formatierten Datenspeichern. Der Zugriff erfolgt häufig lokal, vereinzelt durch das Versenden von E-Mails oder einem Fernzugriff über VPN.

Den aufwändigsten Teil derartiger Optimierungsprozesse stellt die Nutzung der erhobe-





**Bild 1:** Prozessvergleich des Standes-der-Technik mit dem vorgestellten Verfahren

nen Daten dar. Hier steht die Interpretation und letztendliche Ableitung und Umsetzung praktikabler Handlungen zur Verbesserung des Systembetriebs im Mittelpunkt. Gängige Praxis ist die manuelle Aufbereitung, Analyse und Interpretation der erhobenen Zeitreihen, beispielsweise anhand deren Visualisierung. Darüberhinausgehend existieren Software-Lösungen, die in unterschiedlicher Tiefe eine Aggregation der erhobenen Daten zur Unterstützung der manuellen Interpretation vornehmen.

Der letzte Prozessschritt der Optimierung stellt der tatsächliche Eingriff in das Gebäudeautomationssystem dar. Neben einer Substitution von Anlagenkomponenten, die meist mit hohen Investitionskosten einhergehen, kann häufig bereits eine Anpassung der Parametrierung oder Steuerung des Automationssystems eine große Wirkung entfalten. Die Implementierung dieses „Software-Updates“ wird in der Regel durch Beauftragung der proprietären Gebäudeautomatisierer vorgenommen, was die Wirtschaftlichkeit dieser Lösung unter Druck setzt. In **Bild 1** werden die einzelnen Prozessschritte erläuternd dargestellt und mit dem im Folgenden vorgestellten neuen Verfahren verglichen.

### 3. Neues Verfahren

In diesem Beitrag wird ein Verfahren vorgestellt, das konzeptionell deutlich vom Stand-der-Technik abweicht. Im Folgenden wird eine Zusammenfassung über das Verfahren und die, in **Bild 2** visualisierte, entwickelte IT-Infrastruktur gegeben um anschließend technisch detailliert auf die einzelnen Prozessschritte einzugehen. Auf Grund der zentralen Wichtigkeit der IT-Sicherheit und des Datenschutzes dieses Verfahrens, wird dieser Thematik ein eigenes Kapitel (Kapitel 7) gewidmet.

Das vorgeschlagene Verfahren unterscheidet sich bereits in der Datenaufnahme und Zurverfügungstellung dieser deutlich von den gegenwärtig etablierten Methoden: Die verwendete IT-Technologie ermöglicht eine Plug-and-Play-Datenerhebung, die aus einer hochfrequenten Datenaufnahme vor Ort unter Verwendung eines Edge-Devices<sup>1</sup> (**Bild 2**, links) und einer Historisierung der Daten auf einer Cloud-Plattform (**Bild 2**, mittig) besteht. Hierbei werden jegliche sich im Automationsnetzwerk befindliche Datenpunkte

<sup>1</sup> Ein Edge-Device ist als Netzwerk-Gateway mit der Möglichkeit zum lokalen Ausführen von Computing-Services geringer Komplexität zu verstehen. Im IoT-Kontext werden derartig Edge-Devices zur Cloud-Kopplung genutzt.

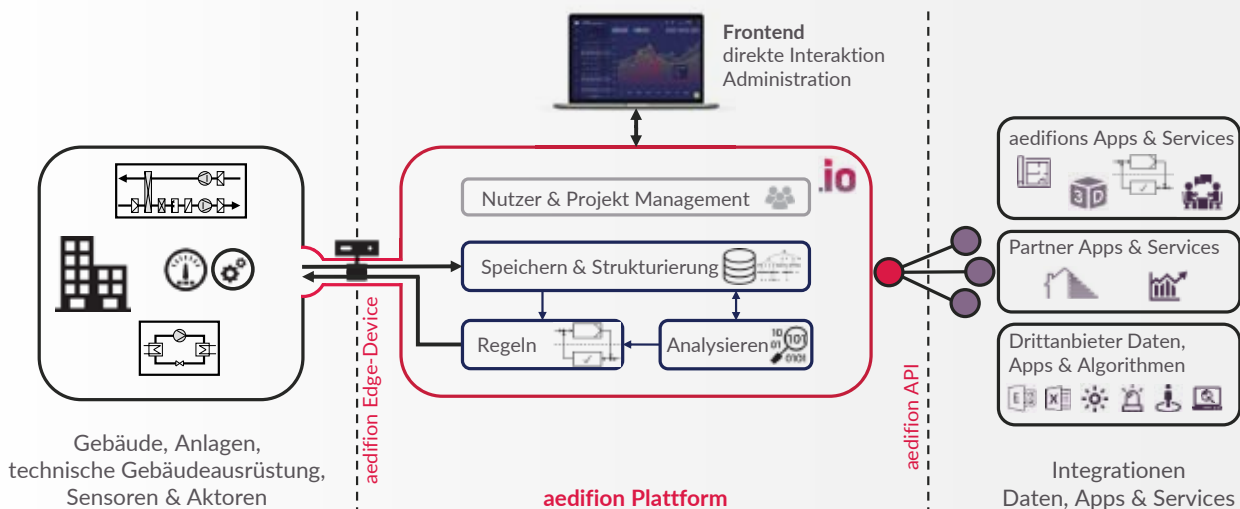


Bild 2: Zusammenfassender Überblick über die IT-Infrastruktur des vorgestellten Verfahrens

– ohne Mehrkosten für den einzelnen Datenpunkt – genutzt. Diese Technologie kann sowohl zur Datenerhebung einzelner Anlagen, wie beispielsweise BHKW-Nahwärmeversorgungsstellen, bis hin zu ganzen Quartieren genutzt werden.

Auf der Cloud-Plattform können Datenpunkte anhand ihres Trends mit Algorithmen der künstlichen Intelligenz automatisiert klassifiziert und hierdurch einem semantischen Gebäudemodell zugeführt werden. Dies unterstützt zum einen bei der Datenpunktexploration, zum anderen bei einer Verknüpfung von Datenpunkten zu generischen Analysealgorithmen. Diese können sowohl kontinuierlich in nahezu Realzeit (Stream-Processing) als auch in zeitdiskrete Berechnungen über größere Zeitintervalle (Batch-Processing) ausgeführt werden. Anhand der Analyseergebnisse können automatisiert Handlungsempfehlungen zur Verbesserung des System- und Anlagenbetriebs gegeben werden.

Handlungen, die mit einer Nachkonfiguration des Automationssystems durchführbar sind, können direkt über die dargestellte IT-Infrastruktur durch das Schreiben von Parameter an das Automationssystem umgesetzt werden. Die entwickelte Infrastruktur ermöglicht ebenfalls ein cloudbasiertes Steuern und Regeln von Automationssystemen, wodurch der Einsatz fortschrittlicher Regelverfahren mit rechenintensiven Algorithmen und basierend auf einer breiten Datenbasis realisierbar ist. Das Edge-Device verfügt über eine Laufzeitumgebung, die eine Rea-

lisierung von zeit- oder konnektivitätssensiblen Services ermöglicht.

Während das Verfahren ganzheitlich die Prozesskette von Datenerhebung über interpretation bis hin zum Steuern von Automationssystemen abdeckt, können jegliche Schritte des Verfahrens als eigenständige Module, wie beispielsweise die Analyse von Betriebsdaten, ausgegliedert werden und stehen somit externen Services zur Verfügung (Bild 2, rechts).

#### 4. Ganzheitliche Datenverfügbarkeit

Die Herausforderungen einer ganzheitlichen Datenverfügbarkeit bestehen aus einer Zusammenführung lokaler<sup>2</sup> und externer<sup>3</sup> Datenquellen, deren Historisierung, Speicherung und deren performanten, komfortablen (easy-to-use) und standardisierten Bereitstellung.

Das vorgeschlagene Verfahren schafft eine ganzheitliche Datenverfügbarkeit durch Nutzung eines handelsüblichen Industrie-PCs als

- 2 Lokale Daten aus Automationssystemen: Sensoren, Aktoren, Automationsparameter, Soll-, Stellwerte etc. stellen volatile Ist-Zustände bereit, die grundsätzlich zeitvariabel sind. Durch eine Historisierung dieser können Zeitreihenverläufe (Trends) erhoben werden. Je nach verwendetem Automationsprotokoll und dessen Einrichtungsgüte, sind Datenpunkte mit zusätzlichen Metainformationen wie beispielsweise physikalischen Einheiten versehen.
- 3 Daten aus externen Quellen: z.B. ortsabhängige Witterungs- und Stromnetzinformationen aus Web-Services, Raumbelegungsdaten z.B. aus Microsoft-Exchange und beliebigen weiteren Web- und Cloud-Services.

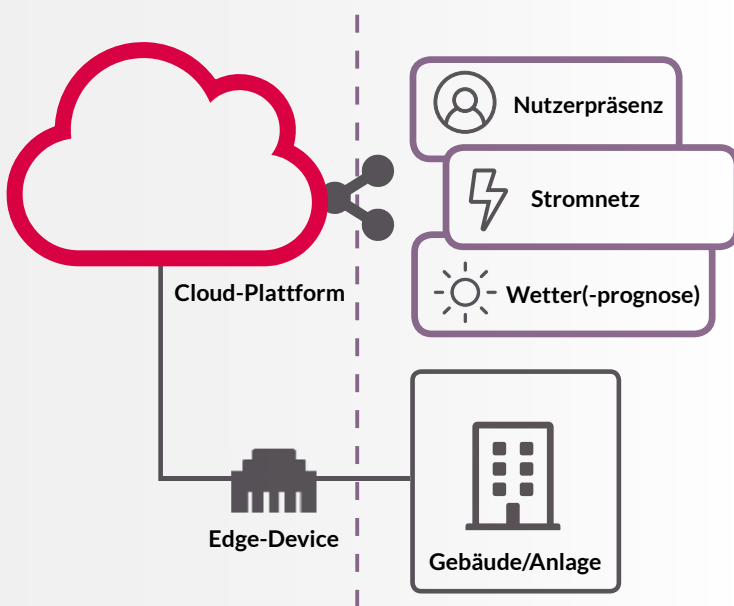


Bild 3: Datenerhebung lokaler und externer Datenquellen in die Cloud-Plattform

Edge-Device zur lokalen Datenerhebung und einer Cloud-Plattform als Daten-Hub, die eine Zusammenführung von sämtlichen gebäudebetriebsbezogenen Daten und Informationen mit Daten aus externen Quellen und deren Bereitstellung ermöglicht. Darüber hinaus werden, durch Klassifizierungsalgorithmen der künstlichen Intelligenz unterstützt, Verfahren zur Datenpunktexploration angewendet. Diese ermöglichen ein komfortables Filtern und Sichten der Datenquellen. In den folgenden Abschnitten wird diese Lösung detailliert dargestellt.

#### 4.1 Ganzheitliche Datenerhebung

Unter einer ganzheitlichen Datenerhebung ist das Zusammenführen von Daten aus lokalen und externen Datenquellen zu verstehen, wie in Bild 3 schematisch dargestellt. Während das Einbinden externer Datenquellen durch die Cloud-Plattform realisiert ist, kann der Datenerhebung lokaler Datenquellen auf unterschiedliche Weise erfolgen. Hierbei ist zwischen einer kontinuierlichen und diskreten Aufnahme der Daten zu unterscheiden. Ein kontinuierlicher Datenerhebung, ein sogenanntes Streaming, ist für spezielle datengetriebene Dienstleistungen unerlässlich. Die Cloud-Plattform stellt hierfür eine Schnittstelle zum Daten-Streaming per MQTT-Protokoll zur Verfügung. Ein zeitdiskreter, sogenannter Batch-Datenerhebung ganzer Messperioden ist per Import von csv-Dateien möglich. Die jeweiligen

Konventionen des Protokollaufbaus sind öffentlich dokumentiert<sup>4</sup>. Auf diese Weise können bereits vorhandene Daten und Einrichtungen zur Datenerhebung genutzt werden um sie in die Cloud-Plattform einzubinden. Da dies zum gegenwärtigen Stand-der-Technik nach wie vor eine Ausnahme darstellt, wird im Folgenden eine Lösung aufgezeigt, mit der lokale Datenquellen Plug-and-Play nutzbar gemacht werden können. Sie eignet sich hervorragend für eine nachträgliche Installation (Retrofitting).

##### 4.1.1 Verfahren zur Erhebung lokaler Daten

Gegenwärtig werden Energie-Monitoring- und Gebäudeautomations-TCP/IP-Netzwerke meist physikalisch oder logisch vom Internet getrennt. In einem solchen Fall kann ein vorkonfigurierter, handelsüblicher Industrie-PC mit zwei Netzwerkanschlüssen vor Ort verbaut und im Sinne eines Edge-Device (Bild 2, mittig-links) als Gateway genutzt werden. Über die eine Netzwerkkarte kann der PC mit dem aufzuschaltenden Netz (bspw. Gebäudeautomationsnetz) und über die andere Netzwerkkarte mit einem Netzwerk mit Internetkonnektivität verbunden werden. Ist das zu erfassende Netzwerk bereits mit dem Internet verbunden, so genügt das Verbinden lediglich einer Netzwerkkarte.

Die Vorkonfiguration des Industrie-PCs ermöglicht ein automatisches Anmelden bei der Cloud-Plattform, sobald dieser mit Strom versorgt und mit dem Internet verbunden ist. Durch den Anmelde-Service wird sowohl eine Überwachung der Erreichbar- und Funktionstüchtigkeit des Computers, als auch ein temporärer, vollverschlüsselter Fernzugriff zu Wartungszwecken möglich. Somit ist die Inbetriebnahme des Daten-Gateways von Fachkräften vor Ort ausschließlich durch Verkabeln des Edge-Devices vorzunehmen.

Das Edge-Device wird mit einer Software vorkonfiguriert, die bei erfolgreichem Zugang zum Gebäudeautomationsnetz einen automatischen Scan der erreichbaren Gebäudeautomationskomponenten durchführt. Beispielhaft für den Fall eines BACnet-Systems: Im Rahmen eines BACnet/IP-Scans werden per „Who-Is“-Abfrage die vorhandenen Datenpunkte im System erkannt. Die Antwort dieser erfolgt entweder als „I-Am“-Nachricht per Broadcast oder als

<sup>4</sup> Unter <https://docs.aedifion.io> ersichtlich.

Direktantwort. Sind alle Datenpunkte erfasst, können ihre jeweiligen Metadaten ausgelesen und an die Cloud-Plattform versendet werden. Das Scannen des Automationsnetzwerks und Auslesen der Metadaten kann periodisch, z.B. täglich, wöchentlich, oder manuell über die grafische Web-Oberfläche des Edge-Devices wiederholt werden.

Die aktuellen Ist-Zustände der Datenpunkte hingegen werden hochfrequent und periodisch in Abhängigkeit der Performanz der im Feld verbauten Endgeräte erhoben. Frequenzen im zehntel Hertz-Bereich sind selbst bei größeren Automationsnetzwerken erreichbar. Auf diese Weise werden Daten aus sämtlichen gebäude-technischen Gewerken, wie Gebäudeautomation, Energie-Monitoring, Anlagenleittechnik und ggf. weiteren relevanten Systemen IP-basiert aufgenommen. Hierbei greift die Datenerhebung nach Freigabe über gängige Kommunikationsstandards (z.B. BACnet, KNX, Modbus), Datenserver (z.B. OPC), lokale Datenbanken und weitere Schnittstellen von Datenanbietern auf lokale Datenquellen zu.

Die erhobenen Daten, sowohl Zeitreihen als auch Metadaten, werden verschlüsselt via Streaming-Protokoll MQTT an die Cloud-Plattform geschickt und dort historisiert. Darüber hinaus werden die Daten in einem lokalen Pufferspeicher gesichert, sodass bei Unterbrechungen der Internetverbindung, beispielsweise durch Updates der im lokalen Netzwerk verbauten Internet-Router, kein Datenverlust entsteht. Ein gezieltes, bei Bedarf auch zusätzliches, Streaming der Daten an Datenserven und Clouds von Drittparteien und somit der Bezug von gemanagtem Datenlogging als eigenständiges Modul ist möglich.

Um Kommunikations- und Speichereffizienz zu gewährleisten, werden lediglich Change-of-Value-Events (CoV) an die Plattform versendet. Bei dem standardmäßig konfigurierten CoV-Grenzwert von Null erfolgt dies ohne Informations- und Genauigkeitsverlust der Daten. Nach Bedarf können ebenfalls ein äquidistantes Erheben, Versenden und Speichern der Daten konfiguriert werden.

#### 4.1.2 Einbindung externer Datenquellen

Die Cloud-Plattform verfügt über Konnektoren zu einigen Anbietern von externen Datenquellen (**Bild 2**, rechts), wie Witterungs- oder

Belegungsdaten<sup>5</sup> und ebenfalls Drittparteien-IoT-Plattformen<sup>6</sup>. Die Einbindung derartiger Quellen kann nach Bedarf direkt über die Plattform konfiguriert und automatisch mit den lokalen Datenquellen auf der Plattform zusammengeführt werden. Grundsätzlich kann die Einbindung externer Datenquellen auch außerhalb der Plattform realisiert werden, indem eigene Schnittstellen zwischen Datenanbietern und der Plattform programmiert und selbstständig dauerhaft betrieben werden. Es besteht die Möglichkeit den Betrieb derartiger Konnektoren auf die Plattform auszulagern, oder die Entwicklung derartiger Konnektoren zu beauftragen.

#### 4.2 Cloudbasiertes Datenmanagement

Die Herausforderungen einer Zusammenführung, Speicherung und zur Verfügungstellung der gesammelten Daten aus unterschiedlichsten Quellen können mit cloudbasierten Daten-Hubs gelöst werden. Neben einer frei skalierbaren Speicher- und Rechenleistung, wie sie zur Analyse und Ausführen fortschrittlicher Reglungsalgorithmen benötigt werden (Kapitel 5 und 6), kann ebenfalls von ökonomischen Vorteilen profitiert werden, die mit dem Einsatz lokaler Infrastruktur nicht erreicht werden können. Diese ökonomischen Vorteile resultieren primär aus einer gemeinschaftlichen Hardware-Nutzung und einer Skalierung der Hard- und Software-Administration. Darüber hinaus lassen sich durch den zentralisierten Datenzugriff problemlos Daten unterschiedlicher Energiesysteme, Liegenschaften und gesamter Quartiere hoch performant und ortsunabhängig abrufen.

##### 4.2.1 Datenzusammenführung und -speicherung

Auf Grund der Diversität der erhobenen und benötigten Daten kommen in der vorgeschlagenen Lösung unterschiedliche Datenbanktechnologien zum Einsatz um eine nutzenorientierte und performante Datenhaltung zu ermöglichen.

Die Speicherung der hochfrequent erhobenen Zeitreihendaten erfolgt nach aktuellem Standard-Technik für große Datenmengen (Big Data) in speziellen Zeitreihendatenbanken. So wird

<sup>5</sup> Beispielsweise aus Microsoft Exchange.

<sup>6</sup> Beispielsweise Cumulocity, Discovergy, Wago-Cloud

hochfrequentes Auslesen als auch ein performanter Zugriff auf Zeitreihen in hoher Auflösung über lange Zeiträume ermöglicht, ohne dass sich zeitgleiche Abfragen der Datenbank gegenseitig beeinträchtigen.

Die geborgenen Metadaten, die durch künstliche Intelligenz abgeleitete Klassifizierung und durch Nutzer manuell hinzugefügte Informationen der einzelnen Datenpunkte und spezifische Gebäude- und Anlagendaten werden in einem semantischen Gebäudemodell abgebildet und in relationalen Datenbanken gespeichert. Externe Datenquellen werden je nach Verfügbarkeit und Art des externen Service entweder nach Bedarf (on demand) bereitgestellt oder, vergleichbar mit Daten aus lokalen Quellen, periodisch geloggt und gespeichert. In beiden Fällen wird ein standardisierter Datenzugriff unabhängig der eigentlichen Quelle erreicht.

#### 4.2.2 Schnittstellen zum standardisierten Datenaustausch

Datenzugriff und -austausch werden über verschiedene Wege realisiert. Zum einen über Browser-Anwendungen, Programmierschnittstellen, ein frei verfügbares Excel-Addin, Chat-Bots, Sprachassistenten, Web-Sockets und MQTT-Streams.

Die Browser-Anwendungen stellen web-erreichbare grafische Oberflächen, mit denen endgeräte- und ortsunabhängig auf alle gespeicherten Daten zugegriffen werden kann, dar. Es sind Zeitreihen in mehreren Darstellungsarten (beispielsweise Multiline- und Carpet-Plots) auch liegenschaftsübergreifend visualisierbar. Während die sogenannte Dashboard-Anwendung, dargestellt in **Bild 4**, sich insbesondere eignet um in Echtzeit anhand frei konfigurierbarer Schaubilder Anlagenbetrieb transparent darzustellen, ermöglicht das eigens konzipierte Frontend die Interaktion mit weiteren Services der Plattform<sup>7</sup>, beispielsweise der semantischen Modellierung von Gebäude- und Energiesystemen und deren Analyse.

Es existiert eine öffentliche, graphische und interaktive Dokumentation der Programmierschnittstellen (Application Programming Interface, API) der Plattform<sup>8</sup>. Das API ist nach dem

7 Übersicht und Erläuterung der verfügbaren Services: <https://docs.aedifion.io>

8 Interaktive Web-Darstellung der Schnittstellendokumentation: <https://api.aedifion.io/ui/>

REST-Standard konzipiert und kann daher flexibel in allen gängigen Entwicklungsumgebungen bzw. Programmiersprachen genutzt werden. Ein öffentliches Tutorial zur Programmierung von Schnittstellenkonnectoren inklusive Beispielimplementierungen für Python, MATLAB und cURL schafft die Voraussetzung für eine schnelle und modulare Integration in verschiedenste weitere Anwendungen<sup>9</sup>.

Darüber hinaus ermöglicht ein frei verfügbares, open-source Excel-Addin<sup>10</sup> Datenreihen flexibel mit einem Klick in bestehende Excel-Datenblätter einzubinden. Es können direkt Rohdaten abgerufen oder verschiedene Interpolationsmethoden genutzt werden.

Zusätzlich zu diesem RESTful API verfügt die Plattform ebenfalls über Streaming-Schnittstellen. Diese können je nach Bedarf per Streaming-Protokoll MQTT oder die Verwendung von Web-Sockets genutzt werden. Hierdurch werden Services, wie beispielsweise das Einbinden von Live-Daten in Websites und 3D-Visualisierungen<sup>11</sup>, möglich.

#### 4.2.3 Datenpunktexploration

Nicht selten sind in gebäudetechnischen Automationssystemen mehrere Tausend Datenpunkte vorhanden. Um zielorientiert und effizient in dieser großen Anzahl von Datenpunkten zu navigieren, beziehungsweise Datenpunkte für weitere Analysen zu identifizieren, bedarf es erweiterten Möglichkeiten zur Datenpunktexploration.

Die Cloud-Plattform erlaubt dies über diverse Funktionen des Datenmanagements. Datenpunkte können mehrfach benannt werden, sodass unterschiedliche Datenpunktbenennungsschlüssel und individuelle Benennungen möglich sind. Weiterhin können jeder Datenquelle beliebig viele Attribute, sogenannte Tags<sup>12</sup>, zugeordnet werden. Schlussendlich lassen sich Datenpunkte nach diesen Attributen filtern, ausgeben und sortieren. Auf dieser Grundlage können Baumstrukturen angelegt werden.

9 Öffentliches API-Tutorial: <https://docs.aedifion.io/docs/developers/api-documentation>

10 Download-Link zum Excel-Addin: <https://github.com/aedifion/aedifion-excel-plugin>

11 Videodarstellung unter: <https://www.youtube.com/channel/UC49tHwyyoPB1aDpSmyHG1iQ>

12 Ein Tag besteht aus einem Schlüssel (engl. Key), welcher die Art des Tags widerspiegelt und einem Wert (engl. Value), welcher die Ausprägung eines Tags definiert, z.B. Tag: Key = „Einheit“, Value = „° C“ (Grad Celsius).





Bild 4: Beispiel für Datenvisualisierung per Dashboard

Als Quelle für Attribute werden Metadaten aus den Automationssystemen, manuelle Nutzereingaben und automatisiert durch künstliche Intelligenz identifizierte Attribute herangezogen. Bei letzterem werden Datenpunkte anhand ihrer Zeitreihenverläufe klassifiziert. So lassen sich beispielsweise Attribute wie „Temperatur“ eines „Gases“ zu über 99 % korrekt identifizieren [6].

Die Ergebnisse dieser Klassifizierung ebenso wie die weiteren Metadaten lassen sich nutzen um Datenpunkte mit semantischen Datenmodellen von gebäudetechnischen Anlagen und Gewerken zu verknüpfen. Diese semantischen Modelle können wiederum für ein automatisiertes, datengetriebenes Generieren von Informationen über den Anlagenbetrieb herangezogen werden.

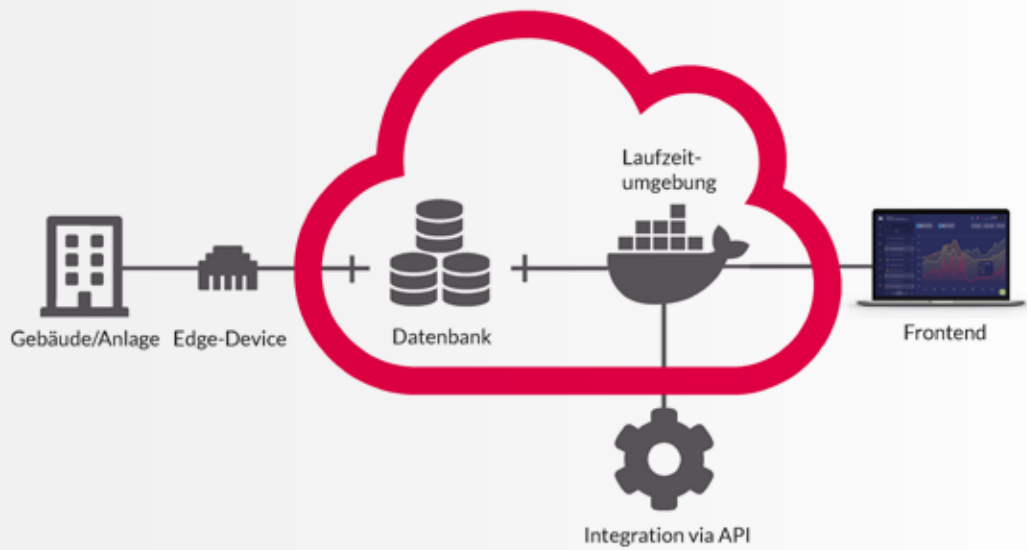
## 5. Nutzung der erhobenen Daten

Unter Einsatz verschiedener Daten-Services können automatisierte Analysen des Gebäude- und Anlagenbetriebs durchgeführt werden. Ziel ist das Erreichen von Transparenz und das Generieren von Handlungsempfehlungen zur Betriebsoptimierung. Hierfür können die grundsätzlich unterschiedlichen Herangehensweisen des Stream- und Batch-Processings genutzt werden.

Ein Stream-Prozess wird kontinuierlich in nahezu Realzeit betrieben und eignet sich insbesondere

für zeitkritische Services. Beispielanwendungen sind kontinuierliche Überwachungen von Datenpunkten auf eine Einhaltung von Grenzwerten, wie sie in Gaskonzentrationsüberwachungen benötigt werden, Präsenzmeldungen oder den Einsatz virtueller Datenpunkte. Mit virtuellen Datenpunkten ist hierbei ein simpler deterministischer Zusammenhang zwischen einem oder mehreren Datenpunkten und einem gewünschten Ergebnis, wie er z.B. zwischen zwei Temperaturen und eine Volumenstrom zur Berechnung eines Wärmestrom besteht, gemeint. Die in Quasi-Realzeit berechneten Ist-Zustände des virtuellen Datenpunktes können sowohl über die Streaming-Schnittstelle der Cloud-Infrastruktur als auch als historisierter Datenpunkt abgerufen oder für Grenzwertüberwachungen herangezogen werden. Dies bietet die Grundlage für weitreichende Funktionalitäten. So werden dezentrale „Rechenwerke“ in Wärmemengenzählern zur Berechnung der Wärmemenge obsolet, oder es lassen sich bestimmte Key-Performance-Indikatoren (KPIs) von Anlagentechnik direkt kontinuierlich erzeugen und anschließend historisiert nachverfolgen.

Ein Batch-Prozess wird über abgeschlossene Zeitintervalle ausgeführt und ist in der Regel nicht zeitkritisch. Hierdurch können komplexe Berechnungen durchgeführt werden. Beispielanwendungen sind Berechnungen der Leistungszahl



*Bild 5: Integration von Algorithmik in die Laufzeitumgebung der Plattform oder per API-Datenkommunikation*

und der Taktraten einer Wärmepumpe über einen bestimmten Zeitraum, deren Korrelation und Bewertung oder die Auswertung der Energieperformance eines Gebäudes über einen Berichtszeitraum.

In beiden Verfahren ist die Einbindung mehrerer Datenzeitreihen aus internen wie auch aus externen Datenquellen und Metadaten möglich. Die Verknüpfung der entsprechenden Datenpunkte zu generischen Algorithmen wird durch die, im semantischen Gebäudemodell hinterlegten, Zusammenhänge automatisiert. Für die semantische Gebäudemodellierung steht eine Bibliothek an Komponentenmodellen zur Verfügung, welche die Beziehung von Datenpunkten untereinander abbilden und Metadaten der Komponentenauslegung für Analysen bereitstellen können. Mit Hilfe von künstlicher Intelligenz wird diese Modellierung und somit die Verknüpfung von Datenpunkten zu generischen Analysealgorithmen zunehmend automatisiert. Die Ergebnisse der Analysen werden genutzt um automatisiert Handlungsempfehlungen auszugeben, mit deren Durchführung der Betrieb des betrachteten Systems unmittelbar verbessert werden kann. Die generierten Informationen und Handlungsempfehlungen können via Email, Instant-Messenger (Chat-Bots), API und Web-Seite bereitgestellt werden. Dieser deklarative Prozess der semantischen Modellierung, Auswahl von Analysealgorithmen und automatisierten Interpretation der Analyseergebnisse anhand von in Datenbanken verwaltetem Ingenieurwissen ist in einem

Analyse-Framework<sup>13</sup> IT-technologisch abgebildet, kann vollständig über das API genutzt werden, ist hierdurch generisch und skalierend anwendbar und in plattformexterne Services integrierbar. Zusätzlich besteht die Option Analysealgorithmen imperativ, d.h. durch gezielten Aufruf eines Algorithmus mit zeitgleicher Übergabe von Zeitreihen, über das API aufzurufen und schafft somit eine Integrierbarkeit der Algorithmen in externe Daten-Services ohne eine vorherige Speicherung der Daten auf der Cloud-Plattform zu benötigen. Vice versa können externe Algorithmen über APIs auf Daten innerhalb der Plattform angewendet werden. Wie in **Bild 5** dargestellt, können nutzerseitig entwickelte Auswertungen extern betreiben, oder in die Plattform integriert werden.

## 6. Schreiben von Automationswerten aus der Cloud

Ein wichtiger Bestandteil des in diesem Beitrag vorgestellten Verfahrens ist das cloudbasierte Schreiben von Werten an lokale Automationssysteme. Dies offeriert neben der Möglichkeit einer Anpassung von Automationsparametern, wie Heizkurven und Regelparametern, ebenfalls den Betrieb externer, cloudbasierter Regelalgorithmen, anhand derer Systemregler überschrieben werden können und die Einbindung von Smart-Building-Services wie beispielsweise einer Sprach-

<sup>13</sup> Übersicht der Analyse-Infrastruktur: <https://docs.aedifion.io/docs/aedifion.analytics>

steuerung des Automationssystems. Ersteres verhilft somit zu einem direkten Umsetzen der durch Analysen identifizierten, automationssystembezogenen Handlungsempfehlungen, ohne dass eine Beauftragung der Gebäudeautomationsfirma notwendig wird.

Realisiert durch das Zusammenspiel von Cloud-Plattform und lokalem Edge-Device, besteht die Möglichkeit sowohl Sollwerte als auch sämtliche Systemein- und -ausgänge über APIs der Plattform zu schreiben. Hiermit kann das lokale Gebäudeautomationssystem verlässlich überschrieben werden, ohne jedoch sicherheitskritische Funktionalitäten des Automationsnetzwerkes zu beeinträchtigen<sup>14</sup>. Es können einzelne Sollwerte oder ganze Abfolgen von Stellbefehlen, sogenannte Schedules, übergeben werden. Implementierte Sicherheitsfunktionen überprüfen ständig die Verbindung zwischen Gebäudeautomationssystem und Plattform. Es lassen sich Regeln für einen Verbindungsabbruch hinterlegen, beispielsweise das Zurücksetzen auf Standardwerte oder den ursprünglichen Datenpunktzustand. Zum einfachen Hinterlegen von Zeitprogrammen, wie Tages-, Wochen-, Monats oder Jahresprogrammen, existiert eine Wiederholungsfunktion der Schedules. Darüber hinaus verfügt das Edge-Device über eine Laufzeitumgebung zur Ausführung zeitkritischer Regelalgorithmen.

Es stehen erste Algorithmen, wie beispielsweise der Max-Phi-Algorithmus, zum Steuern von Gebäudekomponenten über die Plattform bereit. Vergleichbar zu den Analysealgorithmen sind diese Algorithmen sowohl deklarativ als auch imperativ nutzbar.

Die Kommunikation zwischen Cloud-Plattform und Edge-Device ist durch das eigens entwickelte SWOP-Protokoll<sup>15</sup> (Simple/Standard/Save Writing Operation Protocol) standardisiert. Dieses Application-Layer-Protokoll ist öffentlich dokumentiert und dient der Trennung des Senders und Empfängers von Schreibbefehlen und ermöglicht hierdurch den modularen Einsatz von Drittparteien-Edge-Devices und -Cloud-Plattformen.

## 7. IT-Sicherheit des vorgestellten Verfahrens

Da IT-Sicherheits- und Datenschutzängel und -bedenken große Verhinderer insbesondere von internetbasierten Innovationen sein können, ist dies bei der praktischen Umsetzung des dargestellten Verfahrens zur cloudbasierten Betriebsoptimierung konsequent bedacht und umgesetzt. Dies wird im Folgenden diskutiert.

### 7.1 Sicherheit des lokalen Automationsnetzwerks

Für die praktische Umsetzung des vorgestellten Verfahrens wird eine Verbindung von Feld-, Automations- und ggf. Managementgeräten der Gebäudeautomation zu den Servern, auf denen die Cloud-Plattform gehostet ist, benötigt. Typischerweise sind Gebäudeautomationsgeräte in einem oder mehreren lokalen Netzen, sogenannten Gebäudeautomationsnetzen organisiert. Die lokale Datenaufnahme wird durch ein Software-Gateway realisiert, das auf einem handelsüblichen Hutschienen-Industrie-PC, welcher nach deutschen Standards konzeptioniert, zusammengebaut und abgenommen wird, installiert ist.

Um das Risiko einer Netzwerk- oder Teilnehmer-Anfrage-Überlastung durch die eingebrachte Technologie auszuschließen, werden die Antwortzeiten der Datenquellen, im Falle einer BACnet-Datenerhebung aller BACnet-Teilnehmer, überprüft und die Abfragefrequenz der Datenerhebung entsprechend gewählt.

Das Schreiben von Werten an das Automationssystem muss projektindividuell und datenpunktspezifisch freigeschaltet werden. Hierbei wird der schreibbare Wertebereich und bei Verwendung des BACnet-Standards die schreibbare Priorität limitiert.

Der Industrie-PC stellt eine Internet-Verbindung zum Datenaustausch mit der Cloud-Plattform her, ohne jedoch dabei eine direkte Verbindung der Gebäudeautomation zum Internet herzustellen. Dies wird realisiert, indem der Zugang zur Gebäudeautomation nur lokal erfolgt und nicht „über das Internet“. Eine Kommunikation des Edge-Devices zur Cloud-Plattform erfolgt, selbst im Falle eines Schreibens von Werten aus der Cloud an das Automationssystem, unidirektional ausgehend von dem Edge-Device „nach außen“. Hierdurch wird ausgeschlossen, dass von anderen Servern „nach innen“ Einfluss ausgeübt werden kann.

<sup>14</sup> Im BACnet-Fall können Prioritäten weitestgehend frei gewählt werden ohne sicherheitskritische Funktionen (bspw. Entrauchung) zu beeinträchtigen. Durch die Prioritätsauswahl kann der Eingriffsgrad der jeweiligen Anwendung entsprechend sachgerecht gewählt werden.

<sup>15</sup> Dokumentation des Protokolls: <https://docs.aedifion.io/docs/developers/writing-protocol>

Eine Fernwartbarkeit des Industrie-PCs wird über die Secure Shell (SSH) Technologie anhand eines Reverse-SSH Tunnels zwischen

dem Industrie-PC und einem speziell gesicherten Server aufgebaut. Ausgehend vom Industrie-PC wird hierbei eine asymmetrisch verschlüsselte Verbindung ebenfalls „nach außen“ aufgebaut, die ausschließlich für die Fernzugriffsdauer aufrechterhalten wird. Über selbige Verbindung können zukünftige Softwareupdates und Wartungen vollzogen werden, ohne manuelle Interaktion vor Ort zu erfordern. Zugriff auf das Edge-Device ist somit nur über die auf dem Device konfigurierten Server möglich.

Es ist zu keinem Zeitpunkt ein Zugriff von außen auf das lokale Netzwerk erforderlich. Alle benötigten Verbindungen sind unidirektionale Kommunikation zu den konfigurierten Servern. Hierzu bedarf es lediglich einer Kommunikation über die Ports 22 (SSH zur Fernwartung), 443 (https zur periodischen Überwachung der Erreichbarkeit und Funktionstüchtigkeit des Edge-Devices) und 8884 (TLS verschlüsseltes Streaming per MQTT-Protokoll) an die Cloud-Plattform. Dadurch können lokale Netze gegen Zugriffe von außen vollständig, z.B. durch bereits existierende Firewalls, geschützt bleiben. Für Spezialanwendungen kann ebenfalls eine Fernwartung per VPN-Zugriff und Batch-Upload der Daten per https ermöglicht werden. Diese Lösungen erfordern allerdings einen deutlich höheren Einrichtungs- und Wartungsaufwand und limitieren die möglichen Daten-Services auf Batch-Processing Algorithmen.

Ist im lokalen Netzwerk kein Zeitsynchronisations-Server in Betrieb, muss zusätzlich eine Möglichkeit zur Zeitsynchronisierung per Network-Time-Protocol (NTP) beispielsweise über eine Erreichbarkeit der Ubuntu NTP-Server vorhanden sein. Dies dient der Synchronisation der Systemzeit des Industrie-PCs, damit erhobene Zeitreihen und Schreibbefehle mit synchronen Zeitstempeln versehen bzw. verarbeitet werden können.

## 7.2 Sicherheit der Datenkommunikation

Sämtlicher Datentransfer über das öffentliche Internet sowohl zwischen dem Edge-Device und der Cloud-Plattform als auch zwischen der Cloud-Plattform und Nutzerendgeräten, ist per Ende-zu-Ende-Verschlüsselung nach aktuellem Stand-der-Technik abgesichert. Hierfür werden TLS 1.2 sowie SSH 1.5 / 2.0 Verschlüsselungen genutzt. Die Identität und Authentizität der Plattform ist über ein gültiges 2048-bit RSA Server-Zertifikat, das durch eine in üblichen

## i | AUTOREN VITA



ERIK BRÜMMENDORF, M.Sc.

- seit 2019      Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimattechnik, E.ON Energieforschungszentrum, RWTH Aachen University
- seit 2017      Head of Engineering, aedifion GmbH
- 09/2017      Gründung der aedifion GmbH
- 2017–2019    Mitarbeiter im EXIST Forschungstransferprojekt building data am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimattechnik, E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen University
- 2016–2017    Mitarbeiter am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimattechnik, E.ON Energieforschungszentrum, RWTH Aachen University
- 2016          Abschluss des Studiums des Maschinenbaus, Fachrichtung Energietechnik, M.Sc., RWTH Aachen University

**Kontakt**      E-Mail: ebruemmendorf@aedifion.com  
 Telefon: +49 221 98650770  
 Hohenzollernring 72  
 50672 Köln



Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. JOHANNES FÜTTERER

- seit 2017      Chief Executive Officer, aedifion GmbH
- 09/2017      Gründung der aedifion GmbH
- 09/2017      Promotion: „Tuning of PID Controllers within Building Energy Systems“, Dr.-Ing., RWTH Aachen University
- 2017–2019    Leitung des EXIST Forschungstransferprojekts building data am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimattechnik, E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen University
- 2015–2017    Leitung des Teams Gebäudeautomation am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimattechnik, E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen University
- 2010–2017    Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimattechnik, E.ON Energieforschungszentrum, RWTH Aachen University
- 2010          Abschluss des Studiums des Wirtschaftsingenieurwesens, Fachrichtung Maschinenbau, Dipl.-Wirt.-Ing., RWTH Aachen University

**Kontakt**      E-Mail: jfuetterer@aedifion.com  
 Telefon: +49 221 98650772  
 Hohenzollernring 72  
 50672 Köln



Browsern akzeptierte Wurzelzertifikatsautorisierungsstelle verifizierbar ist, sichergestellt. Die Authentizität des Edge-Devices und dessen Autorisierung zur Nutzung der Kommunikationskanäle und Daten-Services wird entweder per Nutzernamen und Passwort oder per Client-Zertifikat überprüft und sichergestellt.

Die genutzten Verschlüsselungstechnologien und Datentransferprotokolle https, MQTT, TLS und SSH sind der jeweils etablierte Standard für die benötigten Aufgaben. Sie sind erprobt und werden in dem vorgestellten Verfahren zu keinem Zeitpunkt in Ihrer Funktionsweise verändert. So wird der Stand der Technik und eine Funktionsweise nach guter Praxis garantiert.

### 7.3 Sicherheit der Cloud-Plattform

Die Plattform verfügt über Schutz vor DDoS-Angriffen und verfügt über eine multiredundante Anbindung. Jegliche Services werden ausschließlich auf dedizierten Servern gehostet, dadurch werden mögliche Risiken durch Co-Location ausgeschlossen.

Zusätzlich sind sämtliche Dienste und Daten konsequent gekapselt und separiert. Es wird jeweils eine dedizierte Datenbank pro Projekt betrieben. Virtuelle Nutzer im Backend, beispielsweise Microservices, aber auch reale Nutzer haben standardmäßig nur genau diejenigen Rechte (Privilegien), die sie für Ihren vorgesehenen Zweck auch tatsächlich benötigen. So darf z.B. ein datenauswertender, also lesender Service, standardmäßig keine Datenpunkte schreiben. Sämtliche Prozesse auf Systemebene werden durch Container-Virtualisierung<sup>16</sup> voneinander getrennt und nur wenn notwendig in dedizierten virtuellen Netzwerken zusammengeschaltet. So wird z.B. die Analyse von Daten des einen Projektes strikt von der Analyse der Daten eines anderen getrennt.

### 7.4 Sicherheit des Datenzugriffs

Der Datenzugriff erfolgt über personalisierte Nutzerkonten per Single-Sign-On für die Nutzung

<sup>16</sup> Verwendete Technologie: Docker vgl. <https://www.docker.com/>

Anzeige

**LUNOS**  
energy-efficient

## e<sup>2</sup>60 [equadratsechzig]

**Wortart**

Substantiv, maskulin

**Gruppe**

Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung

**Bedeutung:**

1. Der Lüfter, der für die Zukunft gerüstet ist
2. Der Lüfter, der die Messlatte noch höher legt
3. Der Lüfter, der höchsten Ansprüchen gerecht wird



Made in Germany





der Plattform-Services. Die Nutzerauthentifizierung erfolgt standardmäßig über Benutzernamen und Passwort. Bei Bedarf können diese Authentifizierungsdaten in einen temporär gültigen, verschlüsselten Token überführt werden, sodass beispielsweise bei einer API-Nutzung das Speichern der Anmeldedaten in Klartext ausbleiben kann. Weitere Identitätsprovider, wie OpenID, Google, oder GitHub, sind über den entsprechenden OAuth-Standard verfügbar.

## 7.5 Datenschutz und DSGVO-Konformität

Zur Wahrung von Anforderungen aus der Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) können Zugriffsrechte auf einzelne Datenpunkte und Services individuell und granular autorisiert werden. Der Zugriff auf sämtliche erhobene Daten, inklusive nachträglich angereicherter Metadaten, ist auf Projektbasis und anhand einer eindeutigen Identität eines Nutzers rollenbasiert frei konfigurierbar sowie entsprechend kontrollier-, nachverfolg-, und widerrufbar.

Ein rollenbasiertes Rechtemanagement zeichnet sich durch eine wiederverwendbare Definition

von Autorisierungs-Leveln aus, die individuell mit einzelnen Nutzerkonten verknüpft werden. Dabei können sowohl vordefinierte als auch individuell eingerichtete Rollen verwendet werden. Zur Definition einer Rolle wird angegeben, auf welche Datenpunkte (schreibend und/oder lesend) zugegriffen werden darf und welche Funktionalitäten der Plattform für die entsprechende Rolle freigeschaltet sind. Für jedes Projekt können beliebig viele Nutzer und Rollen angelegt werden. Durch diese Möglichkeit zur datenpunktscharfen Rol- lendefinition ist ein DSGVO-konformer Betrieb der Datenplattform möglich.

Darüber hinaus besteht die Option bestimmte Datenpunkte oder ganze Bereiche des Gebäudes von der Datenerhebung auszuschließen. Dies kann entweder im Vorhinein technisch verhindert werden, beispielsweise durch Netzwerkmaskierungen oder VLANs, oder innerhalb der Datenaufnahme-Software flexibel konfiguriert werden. Für de-facto personenbezogene oder -beziehbare Daten kann eine vollständig verschlüsselte Datenspeicherung erfolgen.

## 8. Fazit

In diesem Beitrag wurde ein ganzheitliches System und Verfahren zur datengetriebenen Betriebsoptimierung von sowohl Einzelanlagen als auch Gebäudeenergiesystemen dargestellt. Auf Grund der Bedenken gegenüber cloudbasierten Verfahren, wurde die Thematik der IT-Sicherheit und des Datenschutzes separat aufgegriffen und Lösungen zur Erreichung eines höchstmöglichen Schutzes der dargestellten Cloud-Plattform erläutert.

Das vorgestellte Verfahren ist als ganzheitliche Lösung und in seinen einzelnen Modulen am Markt verfügbar und durch den dauerhaften Betrieb in verschiedenen Projekten der Industrie und Forschung in ihrer Funktionalität validiert. So wird das Energetikum der FH Burgenland mit rund 5400 Datenpunkten in einer Frequenz von 0,1 Hz und das E.ON Energy Research Center der RWTH Aachen University (E.ON ERC) mit rund 12.000 Datenpunkten minütlich geloggt. Die gewonnenen Daten werden in Forschungsprojekten zur Entwicklung von Analyse- und Regelverfahren genutzt. Von Industriekunden<sup>17</sup> (Ingenieurbüros, Energiedienstleister, OEMs)

<sup>17</sup> Unternehmensnamen durch Verschwiegenheitsvereinbarungen gedeckt.



Dr. rer. nat. Dipl.-Inform. JAN HENRIK ZIEGELDORF

- seit 2017 Chief Technology Officer, aedifion GmbH
- 12/2017 Promotion: „Designing Digital Services with Cryptographic Guarantees for Data Security and Privacy“, Dr. rer. nat., RWTH Aachen University
- 09/2017 Gründung der aedifion GmbH
- 2017–2019 Mitarbeiter im EXIST Forschungstransferprojekt building data am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen University
- 2012–2018 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Kommunikation und verteilte Systeme, RWTH Aachen University
- 2012–2013 Gastwissenschaftler bei Philips Research Europe, Eindhoven
- 2011–2012 Data Analyst, Zalando SE
- 2011 Abschluss des Studiums der Informatik, mit Auszeichnung, Dipl.-Inform., RWTH Aachen University

**Kontakt** E-Mail: hziegeldorf@aedifion.com  
Telefon: +49 221 98650770  
Hohenzollernring 72  
50672 Köln

werden ebenso Monitoring- und Analyse-, wie auch Infrastrukturlösungen des vorgestellten Verfahrens dauerhaft genutzt. Beispiele für den praktischen Einsatz der Technologie sind sowohl eine cloudbasierte Regelung von Meeting-Räumen unter Einbeziehung des gegenwärtigen Raumzustandes und dessen Raumbuchungsinformationen als auch eine witterungsprädiktive, cloudbasierte Regelung von thermisch aktivierten Bauteilen zur Steigerung der Energieeffizienz und Reduktion des Spitzenlastanlagenbetriebs, mit der ein Betriebsreduktion um 65 % am E.ON ERC im Herbst 2018 erreicht werden konnte. Ein Beispiel der automatisierten Analyse von Anlagenbetrieb stellt die Betriebs- und Taktzeitanalyse der Wärmepumpe des E.ON ERC dar. Es konnte eine überhöhte Anzahl an Startvorgängen nachgewiesen, deren Auswirkung auf Anlagenverschleiß und Energieeffizienz eingeschätzt und Handlungsempfehlungen zur Reduktion der Startvorgänge ausgegeben werden. [1]

Weiterhin wurden Möglichkeiten zur Sprachsteuerung von Gebäudeautomationsssystemen, zur Dateninteraktionsmöglichkeit per Chat-Bot (Basis-Service) und eine Einbindung von Life-Daten in 3D-Visualisierungen realisiert. Somit eignet sich die Cloud-Plattform für weitreichende Services des Internet-of-Things.

Wir sind überzeugt, dass sich durch die Digitalisierung und insbesondere durch die verstärkte Nutzung von Cloud und IoT-Technik ressourcenschonende, energieeffiziente und nutzererweiternde Lösungen umsetzen lassen. Wir sehen die höchstmögliche IT-Sicherheit als absolutes Kriterium an um diesen Fortschritt mitbegleiten zu können. Daher verschreiben wir uns der permanenten Gewährleistung von höchsten IT-Sicherheitsstandards.

Wir danken für die finanzielle Unterstützung durch das BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) im Rahmen der Richtlinie zur Förderung von forschungsintensiven Unternehmensgründungen (EXIST-Forschungstransfer) im Programm „Existenzgründungen aus der Wissenschaft“. Anhand des Projekts „BuildingData“ mit Förderkennzeichen 03EFINW144 konnte 2017 die aedifion GmbH gegründet werden, welche die im Artikel beschriebene Plattform am Markt anbietet.

## Small devices, big impact.



### Sichtbare Energieeinsparung.

Das Belimo Energy Valve™ ermöglicht eine transparente Überwachung des Heiz- oder Kühlsystems und stellt sicher, dass dieses nicht mit einem zu geringen Delta-T-Wert (Temperaturdifferenz) betrieben wird. Durch Messen, Berechnen und Visualisieren wichtiger Anlagendaten und durch die von Belimo zur Verfügung gestellten Performance-Reports wird ein energieeffizienter Anlagenbetrieb über die ganze Lebensdauer gewährleistet.

### Big impact with CESIM.

Comfort | **Energy Efficiency** | Safety | Installation | Maintenance

→ Erfahren Sie mehr  
[Belimo.com/CESIM](https://www.belimo.com/CESIM)

**BELIMO** Stellantriebe Vertriebs GmbH  
info@belimo.de, www.belimo.de

**BELIMO**

## Literatur

- [1] aedifion GmbH, Unternehmensdarstellung, Aachen, 2018, <https://www.aedifion.com>
- [2] European Commission, The energy performance of buildings directive, Informationsbroschüre, Zugriff: 28.10.2018, [https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/epbd\\_factsheet\\_20180503\\_dc\\_v03e\\_final.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/epbd_factsheet_20180503_dc_v03e_final.pdf)
- [3] Deutsche Energie Agentur GmbH (dena), Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand, in: dena-GEBÄUDEREPORT KOMPAKT 2018, Berlin, 2018, [https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads\\_Dateien/bau/9254\\_Gebaeudereport\\_dena\\_kompakt\\_2018.pdf](https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/bau/9254_Gebaeudereport_dena_kompakt_2018.pdf)
- [4] P. Waide, J. Ure, N. Karagianni, G. Smith und B. Bordass, The scope for energy and CO<sub>2</sub> savings in the EU through the use of building automation technology, Waide Strategic Efficiency Limited, 2014
- [5] J. Fütterer, T. Schild, D. Müller, Gebäudeautomationsysteme in der Praxis, Whitepaper RWTH-EBC 2017-001, Aachen, 2017, <http://dx.doi.org/10.18154/RWTH-2017-05671>
- [6] J. Fütterer, M. Kochanski, and D. Müller, "Application of selected supervised learning methods for time series classification in building automation and control systems", Energy Procedia 122, 943–948 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.428>

# Studie zum technischen Flexibilitätpotenzial von Kälteanlagen für das elektrische Lastmanagement mittels prädiktiver Optimierung



*Die heute üblicherweise als Kaltwassersatz ausgeführten Kompressionskälteanlagen sind in Verbindung mit thermischen Speichern und einer prädiktiv optimierten Betriebsführung grundsätzlich geeignet, einen Beitrag zum elektrischen Lastmanagement zu leisten. In der hier vorgestellten Studie wird hierzu ein Algorithmus für eine Zählerstandkurvenbasierte Optimierung von Fahrplänen thermischer Energieerzeuger (ZOFtE) angewendet. Das Potenzial zur Verschiebung der Betriebszeiten einer Kälteanlage hängt wesentlich von der Leistung der Kälteanlage, der Kältespeicherkapazität und vom zeitlichen Verlauf der Kältelast ab. Die durchgeführte Studie zeigt die durch die prädiktiv optimierte Betriebsführung erreichbare Ausnutzung des technischen Flexibilitätpotenzials in Bezug zu zwei Referenzbetriebsweisen. Dabei wird zwischen verschiedenen Einflussfaktoren differenziert, wobei ein besonderes Augenmerk auf die Charakteristik der Lastprofile gelegt wird.*

**Study on the technical flexibility potential of refrigeration plants for electrical demand side management by means of predictive optimization**

*Today's standard chilled water units with compression refrigeration systems combined with thermal storage tanks and a predictive mode of operation are basically suitable for providing a contribution to electrical load management. In the study presented here, an algorithm for a meter reading curve-based optimization of schedules for thermal energy generators (German acronym: ZOFtE) is applied for this purpose. The potential for shifting the operating times of the refrigeration plant essentially depends on the capacity of the refrigeration plant, on the refrigeration storage capacity and on the characteristics of the cooling load. The study carried out depicts the utilization levels of the technical flexibility potential which can be achieved by the predictively optimized operation mode in relation to two reference operation modes. A distinction is made between different influencing factors, with special attention being paid to the characteristics of the load profiles.*

VON  
MICHAEL BACHSEITZ  
DANIEL PFEIFFER  
ROLAND KOENIGSDORFF  
MARTIN BECKER

## 1. Einleitung

Durch den Ausbau der Erneuerbaren Energien im Stromsektor rücken vermehrt Verbraucher, welche sich nach dem Prinzip „Demand Response“ [1] an das schwankende Stromangebot anpassen können, in den Fokus. Zu diesen Verbrauchern zählen auch die in der Gebäudeklimatisierung weit verbreiteten indirekten Kälteanlagen (Kaltwassersätze) mit thermischen Speichern. Für das elektrische Lastmanagement durch eine prädiktiv optimierte Betriebsführung derartiger Anlagen wurde ein Algorithmus für eine Zählerstandkurvenbasierte Optimierung von Fahrplänen thermischer Energieerzeuger (ZOftE) entwickelt und in [2] vorgestellt. Dieser nutzt eine Vorhersage des Kältelastprofils und ein Anreizsignal zur Optimierung der Laufzeiten und Leistungsmodulation der Kälteanlage, um einen im Sinne des Anreizsignals möglichst günstigen Fahrplan für die Kältebereitstellung zu ermitteln.

Das Potenzial zur Verschiebung der Anlagenbetriebszeiten hängt von der Dimensionierung der Kälteanlage und des thermischen Speichers (Kältespeicher) im Zusammenhang mit dem Verlauf des Kältelastprofils ab. Grundsätzlich gilt dabei: Je größer der Kältespeicher ausgelegt wird, desto größer ist der Zeitraum, innerhalb dessen die Betriebszeiten verschoben werden können. Je größer die Leistung der Kälteanlage und die Kapazität des Kältespeichers dimensioniert werden, desto kürzer kann die Betriebsdauer der Kälteanlage gewählt werden. Dadurch kann der Betrieb in größerem Umfang in, bezogen auf das Anreizsignal, günstige Zeiträume verlegt werden. Welche zeitlichen Verschiebungen notwendig bzw. sinnvoll sind und wie kurz die Betriebsdauer ausfallen soll, hängt wiederum vom zeitlichen Verlauf des Anreizsignals ab.

Zur systematischen Untersuchung dieser Zusammenhänge werden Jahressimulationen für sechs synthetische Kältelastprofile, welche unterschiedliche Kältenutzungsarten repräsentieren, durchgeführt. Die vorgestellten Lastprofile unterscheiden sich im zeitlichen Verlauf der Leistung, ergeben in der Jahressumme jedoch alle die gleiche Jahresnutzkälteenergie, so dass eine Vergleichbarkeit zwischen den Lastprofilen gegeben ist. Die Deckung dieser Lastprofile erfolgt durch eine Kälteanlage, deren Betriebsweise durch die in [2] vorgestellte prädiktive Optimierung (ZOftE-Algorithmus) festgelegt wird. Als

exemplarisches Anreizsignal für eine optimierte Kältebereitstellung und Speichernutzung wird ein dynamischer Strompreis verwendet. Am Beispiel der sechs synthetischen Lastprofile werden im Rahmen einer Parameterstudie verschiedene Kombinationen von Kälteanlagenleistungen und Kältespeicherkapazitäten untersucht und hierfür jeweils die durch die prädiktiv optimierte Betriebsführung erreichbaren Jahresstromkosten ermittelt. Zur Beurteilung, wie gut eine Anpassung an das Anreizsignal durch die prädiktiv optimierte Betriebsführung möglich ist, werden den erzielten Jahresstromkosten ein unterer und ein oberer Kostenbezugswert gegenübergestellt. Die Bezugswerte ergeben sich aus zwei unterschiedlichen Referenzbetriebsweisen, welche im Abschnitt 2.3.2 genauer erläutert werden. Abschließend lassen sich aus diesen Untersuchungen Hinweise für eine sinnvolle Kälteanlagenleistung und Kältespeicherkapazität im Hinblick auf ein Flexibilitätspotenzial für eine Lastverschiebung ableiten.

## 2. Analyse des Flexibilitätspotenzials

Die im Folgenden dargestellte Parameterstudie zeigt die Leistungsfähigkeit des in [2] vorgestellten ZOftE-Algorithmus zur prädiktiven Optimierung der Betriebsführung von Kälteanlagen mit eingebundenen Kältespeichern. Für die hier dargestellten systematischen Untersuchungen mit Hilfe von Jahressimulationen werden folgende Annahmen getroffen:

- konstanter Wert der Leistungszahl EER der Kälteanlage
- ideal modulierende Leistungsregelung der Kälteanlage von 0 bis 100 %
- Modellierung des Kältespeichers mit einer Kapazität und ohne Kälteverluste.

In den folgenden Abschnitten werden das exemplarische Anreizsignal, die sechs verwendeten synthetischen Kältelastprofile und die Bezugswerte zur Einordnung des Potenzials der mit ZOftE prädiktiv optimierten Betriebsführung beschrieben. Für die Durchführung der Potenzialanalyse wird im ersten Schritt von einer Anlagendimensionierung (Standardauslegung) ausgegangen, welche sich im Wesentlichen an der Jahresspitzenlast der verwendeten Lastprofile orientiert. Im zweiten Schritt wird die Potenzialanalyse um eine Parameterstudie der Anlagenparameter Kälteanlagenleistung und Kältespeicherkapazität ergänzt.

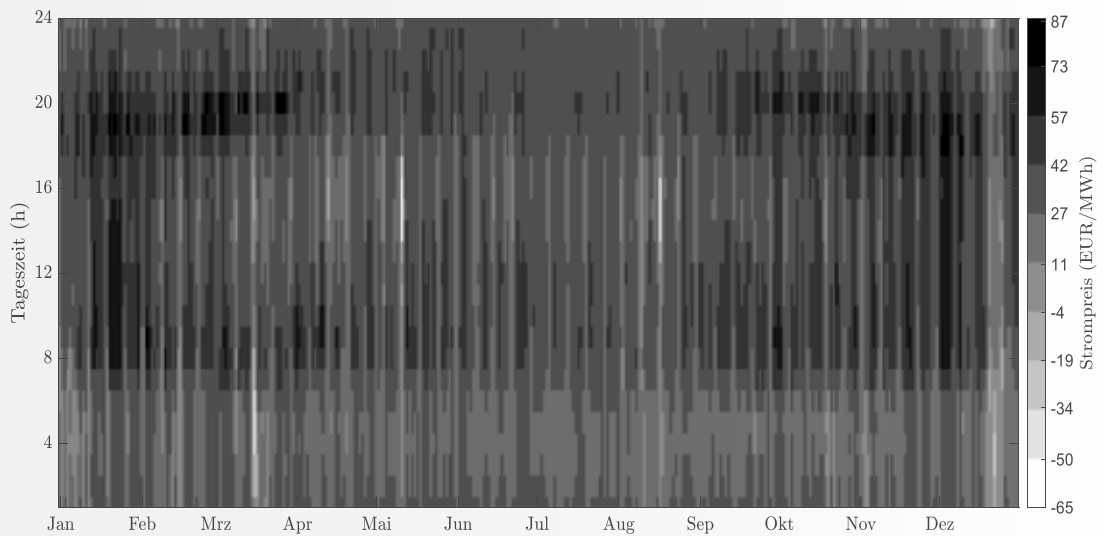


Bild 1: Jahres- und Tagesverlauf des Börsenstrompreises EPEX SPOT Day-Ahead von 2014 [3]

### 2.1 Strompreis als Beispiel für ein Anreizsignal

Als Anreizsignal wird beispielhaft der Strompreis des Day-Ahead-Marktes der Börse EPEX SPOT von 2014 verwendet [3]. Anhand des in Bild 1 dargestellten Carpet-Plots, in dem niedrige Strompreise hell und hohe Strompreise dunkel markiert sind, lässt sich dessen Dynamik analysieren. Über den Tag betrachtet treten die höchsten Strompreise in den Morgen- sowie den Abendstunden auf. Über das Jahr betrachtet sind die Strompreise im Sommer tendenziell niedriger als in den Wintermonaten.

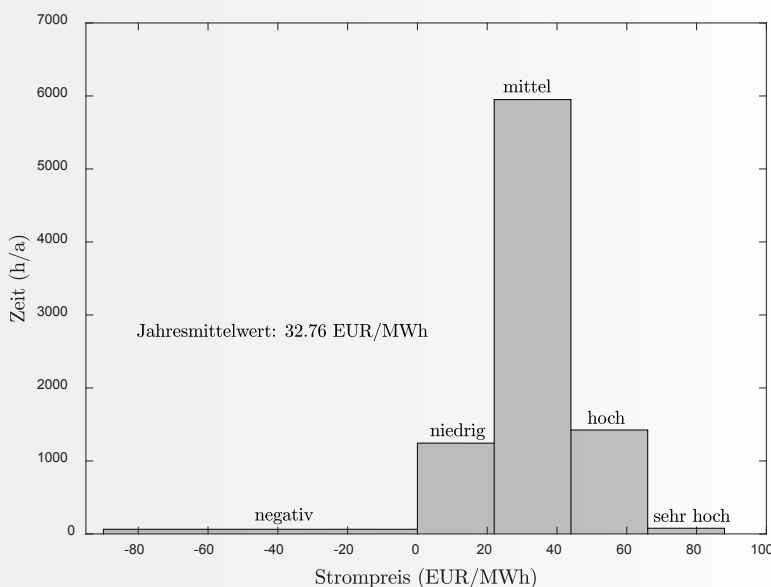


Bild 2: Häufigkeitsverteilung des Börsenstrompreises EPEX SPOT Day-Ahead von 2014 [3], eingeteilt in fünf Preisgruppen

Bild 2 zeigt ergänzend die Häufigkeitsverteilung für fünf definierte Preisgruppen des verwendeten Jahresdatensatzes. Hierbei wurden alle negativen Preise der ersten Preisgruppe („negativer Preis“) zugeordnet. Die weiteren Preisgruppen ergeben sich aus der Aufteilung der Bandbreite der positiven Strompreise in vier gleich große Abschnitte. Diese werden mit „niedriger Preis“, „mittlerer Preis“, „hoher Preis“ und „sehr hoher Preis“ bezeichnet. Die Häufigkeit ist in der Preisgruppe „mittlerer Preis“ am höchsten.

Diese Preisgruppen werden in der Analyse des Flexibilitätspotenzials als Indikatoren dafür herangezogen, wie effektiv die Lastverschiebung von Zeiten eines höheren Strompreises in Zeiten eines geringeren Strompreises durch die prädiktiv optimierte Betriebsführung erfolgen kann.

Da der Börsenstrompreis keine Steuern, Abgaben, etc. beinhaltet, entsprechen die in der Parameterstudie ermittelten Jahresstromkosten nicht den gesamten Stromkosten, sondern sind lediglich als exemplarisches Maß für die erreichte Optimierung der Kältebereitstellung im Hinblick auf ein vom Strompreis abhängiges Anreizsignal zu verstehen.

### 2.2 Entwicklung der synthetischen Kältebelastprofile

Trotz der großen Bandbreite an möglichen Kälteanwendungen und der dadurch vielfältigen Lastprofile können insbesondere für typische Anwendungsfälle im Gebäudebereich grundlegende Lastprofil-Charakteristiken abgeleitet



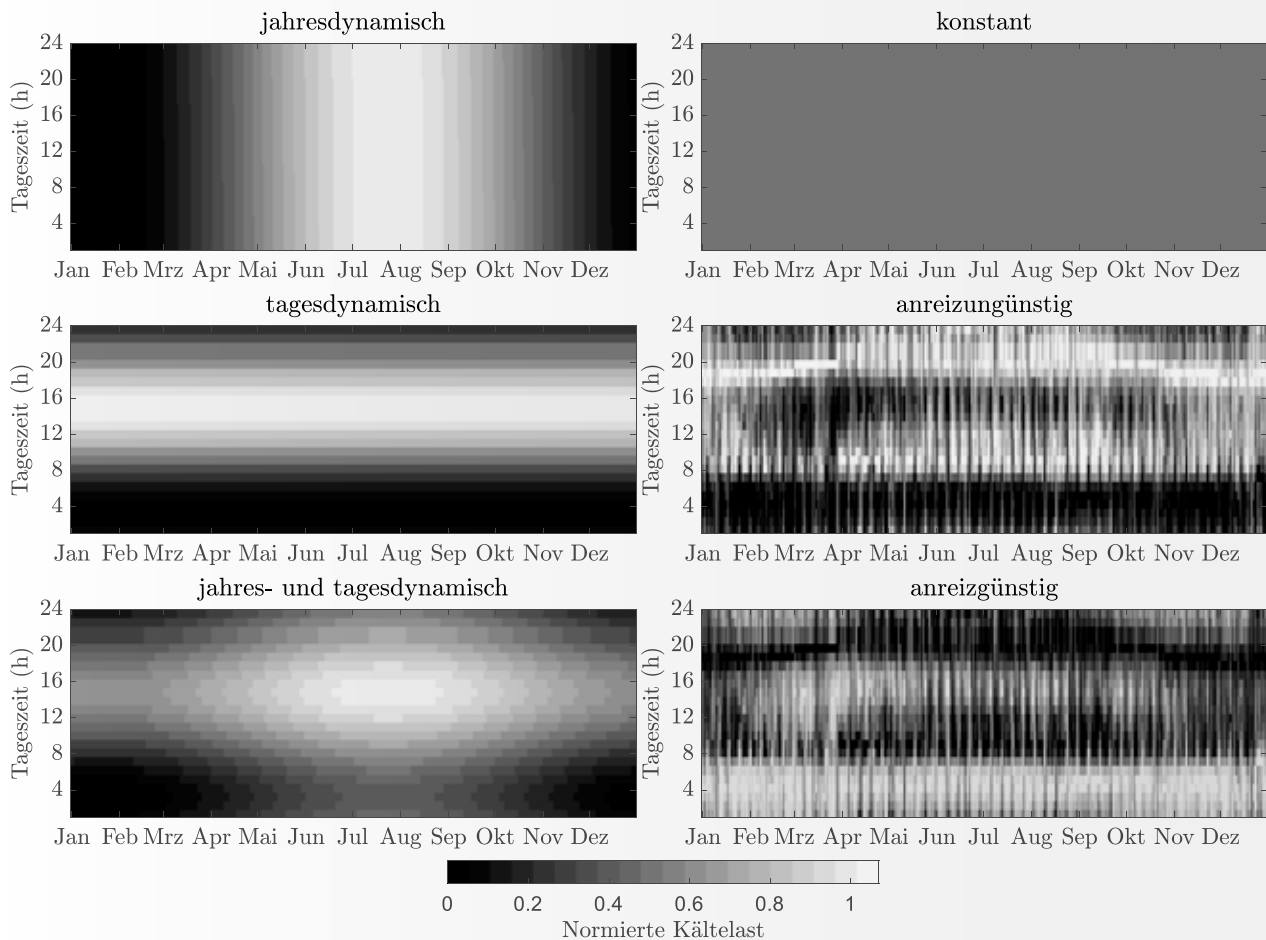


Bild 3: Jahresenergienormierte synthetische Kältelastprofile

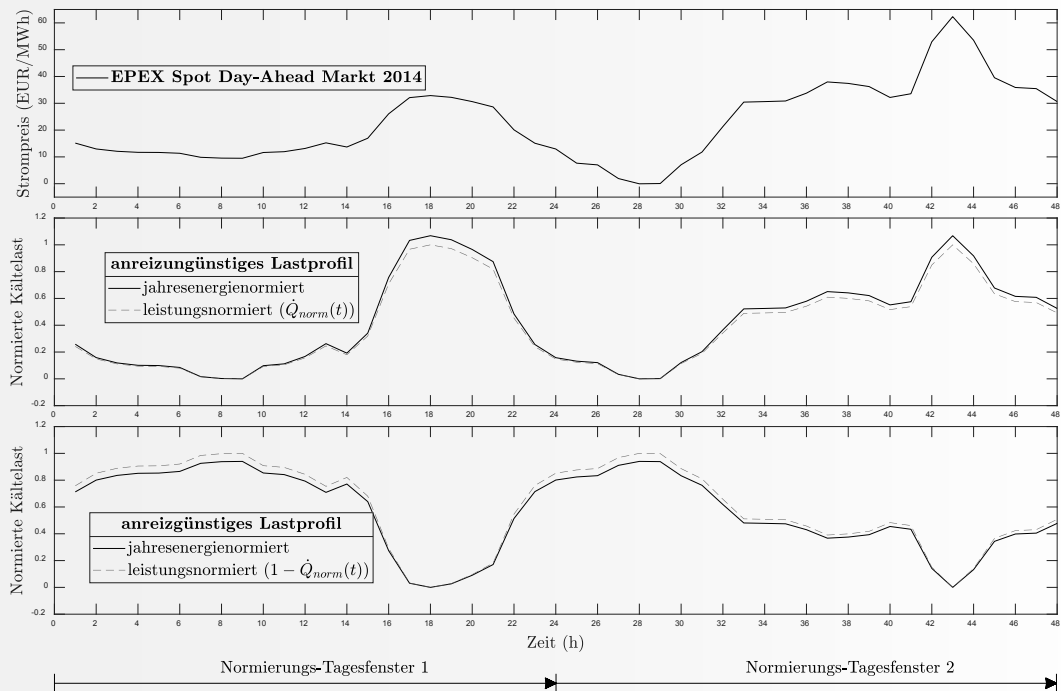
werden. Die anhand der hier entwickelten und untersuchten synthetischen Lastprofile gewonnenen Erkenntnisse lassen sich somit auf reale Anwendungsfälle übertragen und bieten einen Dimensionierungshinweis.

Üblicherweise wird der Bedarf an Gebäudekühlung wesentlich durch externe und interne Wärmelasten mit einer Tages- und Jahreszeitdynamik beeinflusst, u. a. durch die Außentemperatur und Solarstrahlung sowie durch tageszeitbedingte Betriebsauslastungen bzw. Raumbelegung mit Personen. Diese Charakteristiken werden daher durch ein jahresdynamisches, ein tagesdynamisches und ein kombiniertes jahres- und tagesdynamisches synthetisches Lastprofil beschrieben. In der vorliegenden Betrachtung werden hierfür drei unterschiedliche harmonische Sinusschwingungen verwendet, siehe Bild 3 links. Die minimale Leistung wurde dabei dimensionslos auf den Wert 0 und die maximale

Leistung auf den Wert 1 normiert, wodurch eine Skalierung auf beliebige Spitzenkältelasten ermöglicht wird.

Das jahresdynamische Lastprofil lässt eine Jahreshochlastphase zwischen Juli und Mitte August und das tagesdynamische Lastprofil eine über das Jahr wiederkehrende Tagesdynamik mit einem Tages-Hochlastzeitfenster jeweils in den Nachmittagsstunden erkennen. Der Verlauf des jahres- und tagesdynamischen Lastprofils zeigt durch die Kombination beider Einzelprofile eine entsprechend überlagerte Jahres- und Tagesdynamik.

Neben diesen drei Lastprofilen werden auch der immer mehr an Bedeutung gewinnende Spezialfall der Rechenzentrumsabkühlung in Form eines konstanten Kältelastprofils sowie zwei hypothetische, extrem auf das verwendete Anreizsignal bezogene Kältelastprofile („Extrem-Lastprofile“) in die Analyse mit einbezogen (siehe



**Bild 4:** Exemplarischer Zeitreihenausschnitt des Strompreises (oben) [3], des anreizungünstigen (Mitte) und anreizgünstigen Extrem-Lastprofils (unten), als Dezimaltrennzeichen wird hier programmbedingt ein Punkt verwendet

Bild 3 rechts). Da die drei letztgenannten Lastprofile aus Vergleichbarkeitsgründen den identischen Energiebedarf wie die drei harmonisch schwingenden Lastprofile ergeben sollen, müssen diesen andere maximale Leistungen zugewiesen werden. Das konstante Lastprofil wird daher mit einer konstanten normierten Leistung von 0,5 angesetzt. Bei den beiden Extrem-Lastprofilen handelt es sich um bezogen auf die Dynamik des gegebenen Anreizsignals (siehe Bild 1) sehr anreizgünstige und -ungünstige Kältelastprofile, welche für eine Grenzfallbetrachtung herangezogen werden. Deren Leistungsverlauf ergibt sich wie folgt:

Das anreizungünstige Extrem-Lastprofil folgt qualitativ dem Verlauf des Strompreises (Anreizsignal), indem es bei niedrigem Strompreis eine geringe Leistung aufweist und umgekehrt. Das anreizgünstige Extrem-Lastprofil verläuft dem Strompreis entgegengesetzt mit hoher Leistung bei niedrigem Strompreis und niedriger Leistung bei hohem Strompreis.

Um das zugrundeliegende Entwicklungsprinzip dieser Profile zu verdeutlichen, sind in **Bild 4** Zeitreihenausschnitte für den Strompreis (Anreizsignal) und für die entwickelten Extrem-Lastprofile über zwei exemplarische Tage dargestellt.

Der Verlauf des anreizungünstigen Extrem-Lastprofils (siehe grau gestrichelte Linie in Bild 4 Mitte) ergibt sich zunächst aus einer tageweisen Normierung des Strompreisesverlaufs, bei welcher der minimale Preis eines Tages auf null und der maximale Preis eines Tages auf eins festgelegt werden ( $p_{norm}(t)$ ). Der Verlauf des anreizgünstigen Extrem-Lastprofils entsteht daraus durch Spiegelung des Verlaufs von  $p_{norm}(t)$  an der horizontalen Linie mit dem Wert 0,5. Werden diese Verläufe als Lastprofile mit normierten Leistungen zwischen 0 und 1 interpretiert ( $\dot{Q}_{norm}(t)$ ), entspricht der resultierende Jahresenergiebedarf zunächst nicht dem der vier anderen synthetischen Lastprofile. Um dies zu erreichen, muss der jeweilige Verlauf für das anreizungünstige Extrem-Lastprofil im vorliegenden Fall (Verlauf des Börsenstrompreises im Jahr 2014) für eine Jahresenergienormierung um den Faktor  $n_1 = 1,0681$  gestreckt und für das anreizgünstige Extrem-Lastprofil um den Faktor  $n_2 = 0,9401$  gestaucht werden (siehe schwarze Linien in Bild 4 Mitte und unten). Diese Skalierungsfaktoren  $n_1$  und  $n_2$  berechnen sich wie folgt:

$$n_1 = \frac{Q_{o,a}}{\int_{t=1}^{8760} \dot{Q}_{norm}(t) dt}$$

bzw.

$$n_2 = \frac{Q_{o,a}}{\int_{t=1}^{8760} 1 - \dot{Q}_{norm}(t) dt}$$

mit:

- $\dot{Q}_{norm}(t)$  Normierter Leistungsverlauf des Kältebedarfs (Stundenmittelwerte), dimensionslos
- $Q_{o,a}$  normierter Referenz-Jahresenergiebedarf in Stunden (Jahresenergiebedarf der harmonisch schwingenden Lastprofile und des konstanten Lastprofils)
- $t$  Zeit in Stunden.

Bei diesen in Bild 3 rechts in der Mitte und unten dargestellten Extrem-Lastprofilen ist an der Schattierung deutlich zu erkennen, dass die Spitzenwerte der Leistung des anreizungünstigen Extrem-Lastprofils in Zeiten eines hohen Strompreises (vgl. Bild 1) auftreten und in Zeiten eines niedrigen Strompreises nur geringe Lasten vorliegen. Entsprechend entgegengesetzt lässt es sich im Jahresverlauf des anreizgünstigen Extrem-Lastprofils beobachten.

### 2.3 Analyse des Flexibilitätpotenzials für eine Standardauslegung

Durch eine Jahressimulation werden für jedes der vorgestellten synthetischen Lastprofile die Jahresstromkosten durch die mit ZOFtE prädiktiv optimierte Betriebsführung ermittelt und zur Einordnung mit den Jahresstromkosten von zwei Referenzbetriebsweisen verglichen. Zur Analyse des Verschiebepotenzials der prädiktiv optimierten Betriebsführung werden neben den Jahresstromkosten weitere Kenngrößen herangezogen, die im Folgenden erläutert werden.

### 2.3.1 Dimensionierung der Kälteanlagen und Kältespeicher

Grundlage der in Tabelle 2 und Bild 5 dargestellten Kostengegenüberstellung ist die Dimensionierung der Kälteanlage und des Kältespeichers nach folgender Systematik: Die Kälteanlagenleistung wird auf 130 % der Jahresspitzenlast des jeweiligen Lastprofils ausgelegt. Damit ist gewährleistet, dass auch zu Zeiten mit maximaler Kältelast eine Leistungsreserve vorhanden ist, welche für eine Lastverschiebung genutzt werden kann. Dies ist insbesondere beim konstanten Lastprofil von Bedeutung. Hier würde eine Auslegung exakt auf die Spitzenlast, welche der konstanten Last entspricht, bedeuten, dass von vornherein keinerlei Lastverschiebung möglich ist. Die Kältespeicherkapazität wird so gewählt, dass für eine Dauer von vier Stunden die maximale Verbraucherlast (Jahresspitzenlast) abgedeckt werden kann. Im Sinne einer anschaulichen Darstellung werden im Folgenden die Lastprofile und die daraus resultierenden Dimensionierungen vom normierten und dimensionslosen Wert 1 auf den Wert 1 MW respektive 1.000 kW skaliert.

Aus diesem Vorgehen resultieren für die sechs synthetischen Lastprofile die in **Tabelle 1** dargestellten Anlagendimensionen und weiteren Kenngrößen. Bei der Jahresspitzenlast fällt das konstante Lastprofil auf, welches definitionsbedingt eine deutlich kleinere Spitzenlast von 500 kW (Faktor 0,5) im Vergleich zu allen anderen synthetischen Lastprofilen mit ca. 1.000 kW Spitzenlast aufweist. Dies führt dazu, dass die Kälteanlagenleistung mit 650 kW und die Kältespeicherkapazität mit 2.000 kWh ebenfalls deutlich kleiner ausfallen. Einen ersten Hinweis darauf, wie flexibel eine Anlagenkonfiguration ist, geben

**Tabelle 1:** Für die Potenzialanalyse in Abschnitt 2.3.2 vorgegebene Anlagendaten

| Synthetisches Lastprofil:                         | jahres- und tagesdynamisch | jahresdynamisch | tagesdynamisch | konstant | anreizungünstig | anreizgünstig |
|---|----------------------------|-----------------|----------------|----------|-----------------|---------------|
| Jahreskältebedarf in (MWh)                        | 4.380                      | 4.380           | 4.380          | 4.380    | 4.380           | 4.380         |
| Jahresspitzenkältelast in (kW)                    | 1.000                      | 1.000           | 1.000          | 500      | 1.068           | 940           |
| Kälteanlagenleistung in (kW)                      | 1.300                      | 1.300           | 1.300          | 650      | 1.389           | 1.222         |
| Volllastbetriebsstunden der Kälteanlage in (h/a)  | 3.370                      | 3.370           | 3.370          | 6.739    | 3.155           | 3.584         |
| Kältespeicherkapazität in (kWh)                   | 4.000                      | 4.000           | 4.000          | 2.000    | 4.272           | 3.760         |
| Mittlere Leistungsreserve der Kälteanlage in (kW) | 800                        | 800             | 800            | 150      | 888             | 722           |

Hinweis: Durch Rundung der hier angegebenen Zahlenwerte können sich geringe Abweichungen bei berechneten Größen ergeben.

**Tabelle 2:** Gegenüberstellung der Jahresstromkosten (in €) und weiterer Kenngrößen für die sechs synthetischen Lastprofile

| Synthetisches Lastprofil:   | jahres- und tagesdynamisch | jahresdynamisch | tagesdynamisch | konstant | anreizungünstig | anreizgünstig |
|---|----------------------------|-----------------|----------------|----------|-----------------|---------------|
| Referenzkosten (konstanter, mittlerer Strompreis)   | 47.834                     | 47.834          | 47.834         | 47.834   | 47.834          | 47.834        |
| Kosten der Referenzbetriebsweise 1 (oberer Bezugswert)  | 50.005                     | 46.703          | 52.206         | 47.834   | 55.548          | 41.046        |
| Kosten der Referenzbetriebsweise 2 (unterer Bezugswert)   | 29.237                     | 29.237          | 29.237         | 38.430   | 28.422          | 29.989        |
| Theor. Einsparpotenzial (absolut)   | 20.768                     | 17.466          | 22.969         | 9.404    | 27.126          | 11.057        |
| Kosten der mit ZOFtE prädiktiv optimierten Betriebsführung (absolut)                            | 39.005                     | 39.151          | 40.776         | 43.032   | 41.113          | 35.278        |
| Erzielte Einsparung (absolut)   | 11.000                     | 7.552           | 11.430         | 4.802    | 14.435          | 5.768         |
| Erzielte Einsparung in Bezug zur Referenzbetriebsweise 1 (relativ)                              | 22 %                       | 16 %            | 21 %           | 10 %     | 26 %            | 14 %          |
| Erzielte Einsparung in Bezug zum jeweiligen theoretischen, maximalen Einsparpotenzial (relativ) | 53 %                       | 43 %            | 50 %           | 51 %     | 53 %            | 52 %          |

Hinweis: Durch Rundung der hier angegebenen Zahlenwerte können sich geringe Abweichungen bei berechneten Größen ergeben.

die Volllastbetriebsstunden der Kälteanlage. Diese geben die Zeit an, die die Kälteanlage mit Volllast betrieben werden müsste, um die gesamte Jahreskälteenergie bereitzustellen. Die Volllastbetriebsstunden hängen bei gegebenem Jahreskälteenergiebedarf direkt von der Kälteanlagenleistung ab und sind bei der Auslegung für das konstante Lastprofil in etwa um das Doppelte größer als bei allen anderen synthetischen Lastprofilen. Daran ist ersichtlich, dass hier deutlich weniger Zeit vorhanden ist, in die der Anlagenbetrieb verschoben werden kann, was letztlich eine geringere Flexibilität für die Lastverschiebung bedeutet. Dies lässt sich auch an der mittleren Leistungsreserve erkennen. Diese beschreibt die Differenz aus der vorhandenen Kälteanlagenleistung und der über das Jahr gemittelten, für alle sechs synthetischen Lastprofile identischen Kältebelastung von 500 kW. Die Leistungsreserve kann dazu genutzt werden, den Kältespeicher zu beladen, um preisungünstige Zeiten überbrücken zu können. Je kleiner die Leistungsreserve ist, desto geringer ist das Verschiebepotenzial.

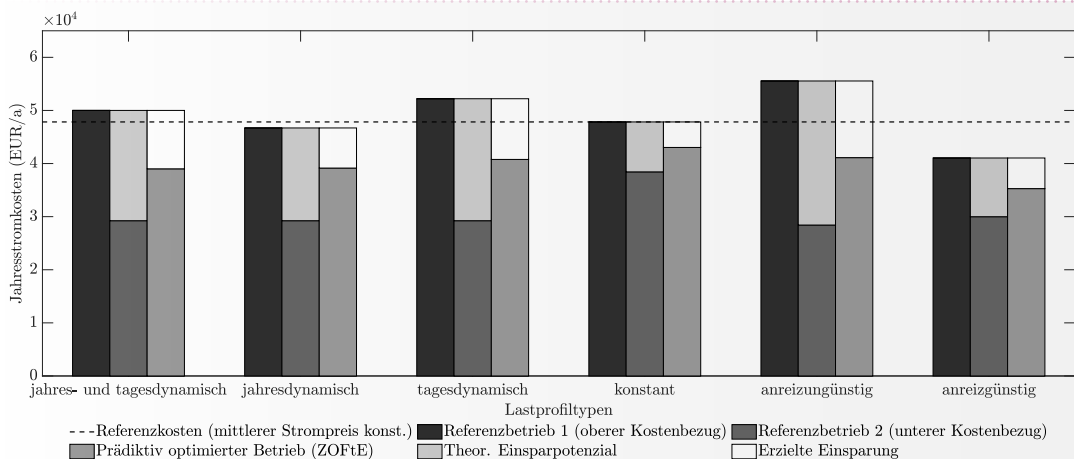
### 2.3.2 Ermittlung der Jahresstromkosten und weiterer Kenngrößen

Geht man von der derzeit üblichen Situation eines für den Endkunden konstanten Strompreises aus, ergeben sich die mit einem mittleren Börsenstrompreis von 2014 berechneten Referenzkosten (siehe **Tabelle 2**). Diese sind unab-

hängig vom Lastprofil und durch die gestrichelte schwarze Linie in Bild 5 dargestellt. Verallgemeinert entspricht dies der Situation mit einem zeitunabhängigen Anreizsignal.

Bei der in [2] vorgestellten herkömmlichen Speicherbeladestrategie wird die Kälteanlage angeschaltet, wenn der Kältespeicher leer ist und solange betrieben, bis der Kältespeicher vollständig beladen ist. Die aus dieser Betriebsweise resultierenden Jahresstromkosten können sich je nach Lastprofil und Startbedingungen (Speicherladezustand, Betriebszustand der Kälteanlage) voneinander zufallsbedingt unterscheiden. Um in der folgenden Potenzialabschätzung nur vergleichbare Effekte darstellen zu können, wird im Folgenden eine ideal modulierende Anlage ohne Kältespeicher, welche den Kältebedarf direkt deckt, als Referenzbetriebsweise 1 herangezogen. Diese benötigt keinerlei Vorhersagen. Die damit für jedes synthetische Lastprofil ermittelten Jahresstromkosten werden als oberer Kostenbezugswert festgelegt („Kosten der Referenzbetriebsweise 1 (oberer Bezugswert)“ in Tabelle 2).

Den unteren Kostenbezugswert stellen die unter idealen, theoretischen Voraussetzungen erzielbaren Minimalkosten dar („Kosten der Referenzbetriebsweise 2 (unterer Bezugswert)“ in Tabelle 2 und Bild 5). Ausgangspunkt der Minimalkostenermittlung ist die theoretische Betrachtung einer unbegrenzten Lastverschiebung (im Folgenden als Referenzbetriebsweise 2



**Bild 5:** Jahresstromkosten für verschiedene synthetische Lastprofile und Anlagenbetriebsweisen (Referenzbetriebsweise 1 und 2, prädiktiv optimierte Betriebsführung)

bezeichnet). Für diese wird angenommen, dass die zur Deckung des Jahreskälteenergiebedarfs notwendigen Volllastbetriebsstunden der betrachteten Kälteanlage ohne jegliche Restriktionen vollständig in die Zeiten innerhalb des Jahres mit den günstigsten Strompreisen verschoben werden können. Im Gegensatz zur Referenzbetriebsweise 1 setzt dies eine ideale Vorhersage des Kältebelastungsprofils sowie des Anreizsignals für das betrachtete Jahr sowie eine zunächst unbegrenzte Kältespeicherkapazität voraus.

Die Differenz aus oberem und unterem Kostenbezugswert bildet das theoretische, maximale Einsparpotenzial für die ausgewählten synthetischen Lastprofile und Anlagendimensionen („Theor. Einsparpotenzial“ in Tabelle 2 und Bild 5). Sie entspricht dem theoretischen Lastverschiebepotenzial.

Die Differenz aus oberem Kostenbezugswert und den Jahresstromkosten der prädiktiv optimierten Betriebsführung ergibt die durch diese Betriebsstrategie erreichbare absolute Stromkosteneinsparung („Erzielte Einsparung (absolut)“ in Tabelle 2 und Bild 5). Daraus lassen sich zwei weitere Kenngrößen ableiten:

Zum einen ergibt sich aus dem Verhältnis aus dieser absoluten Stromkosteneinsparung und den Jahresstromkosten der Referenzbetriebsweise 1 die relative Stromkosteneinsparung durch die jeweilige prädiktiv optimierte Betriebsführung („Erzielte Einsparung in Bezug zur Referenzbetriebsweise 1 (relativ)“ in Tabelle 2).

Bezieht man dagegen diese absolute Stromkosteneinsparung auf das theoretische, maximale Einsparpotenzial, erhält man den

relativen Ausnutzungsgrad des theoretischen, maximalen Einsparpotenzials durch die prädiktiv optimierte Betriebsführung („Erzielte Einsparung in Bezug zum jeweiligen theoretischen, maximalen Einsparpotenzial (relativ)“ in Tabelle 2). Je größer der Unterschied zwischen dem oberen und dem unteren Kostenbezugswert ist und je näher die Jahresstromkosten der prädiktiv optimierten Betriebsführung am unteren Bezugswert liegen, desto größer ist der Ausnutzungsgrad des maximal möglichen Lastverschiebepotenzials der betrachteten Kälteanlagen-Speicher-Kombination.

### 2.3.3 Analyse der Jahresstromkosten der Referenzbetriebsweise 1

In der Gegenüberstellung der Ergebnisse für die sechs synthetischen Lastprofile in Tabelle 2 und Bild 5 sind die sich deutlich unterscheidenden Jahresstromkosten der Referenzbetriebsweise 1 (schwarze Balken) zu erkennen. Der Grund hierfür liegt darin, dass die Referenzbetriebsweise 1 die Kälte je nach Lastprofil zu unterschiedlichen Preisen bereitstellt. Der Vergleich mit den Referenzkosten bei konstantem mittlerem Strompreis in Bild 5 zeigt den Einfluss des dynamischen Strompreises (vgl. Bild 1) auf die Jahresstromkosten der Referenzbetriebsweise 1 für die betrachteten synthetischen Lastprofile.

Erwartungsgemäß verursacht das anreizgünstige Extrem-Lastprofil die geringsten und das anreizungünstige Extrem-Lastprofil die höchsten Kosten. Durch die vor allem in den Wintermonaten sehr geringen und auch in den Frühlings- und Herbstmonaten teilweise moderaten Kältebelastungen



des jahresdynamischen Kältelastprofils haben die in diesem Zeitraum vermehrt auftretenden Hochpreisphasen (vgl. Bild 1) einen geringen Einfluss auf die Jahresstromkosten für diesen Lastprofiltyp. Deshalb liegen die Jahresstromkosten der Referenzbetriebsweise 1 beim jahresdynamischen Lastprofil etwas unterhalb der Kosten bei konstantem mittlerem Strompreis. Genau entgegengesetzt lässt es sich für das tagesdynamische Lastprofil beobachten. Aufgrund der über das gesamte Jahr wiederkehrenden Tagesdynamik mit einer höheren Last zwischen ca. 12 und 18 Uhr besteht eine große Überlappung zwischen den Hochlast- und Hochpreisphasen. Dadurch ergibt sich ein resultierender Wert für die Jahresstromkosten der Referenzbetriebsweise 1, der höher liegt als die Kosten bei konstantem mittlerem Strompreis. Die Kosten für das kombinierte jahres- und tagesdynamische Lastprofil liegen zwischen den Kosten des jahresdynamischen und des tagesdynamischen Lastprofils und leicht über den Kosten bei konstantem mittlerem Strompreis. Die Kosten für das konstante Lastprofil entsprechen definitionsgemäß exakt den Kosten bei konstantem mittlerem Strompreis.

### 2.3.4 Analyse der theoretischen Minimalkosten (Jahresstromkosten der Referenzbetriebsweise 2)

Die ebenfalls auffallende Variation der theoretischen Minimalkosten (Jahresstromkosten der Referenzbetriebsweise 2 in Tabelle 2) ist durch die unterschiedlichen Jahresspitzenlasten und die dadurch bedingten unterschiedlichen Dimensionierungen der Kälteanlagenleistungen (vgl. Tabelle 1) verursacht. Hierbei fällt insbesondere die große Abweichung zwischen dem konstanten Lastprofil und den restlichen fünf synthetischen Lastprofilen auf. Aus der Kälteanlagenleistung

auf 650 kW, die dem konstanten Lastprofil zugrunde liegt, resultiert mit ca. 6.739 h/a ein etwa doppelt so großer Volllastbetriebsstundenwert als bei den anderen fünf synthetischen Lastprofilen mit jeweils ca. 1.300 kW Kälteanlagenleistung. Dies führt dazu, dass zwangsläufig beim konstanten Lastprofil ein großer Teil der Kälte zu Zeiten mit höheren Preisen bereitgestellt werden muss, was wiederum zu höheren theoretischen Minimalkosten führt. Die theoretischen Minimalkosten für die anderen fünf synthetischen Lastprofile unterscheiden sich nicht bzw. kaum, da sich auch deren Auslegungsleistungen nicht oder nur leicht unterscheiden.

Um die theoretischen Minimalkosten in der Praxis zu erreichen, würden neben idealen Vorhersagen unverhältnismäßig große Kältespeicher benötigt. Zur Veranschaulichung, welche Dimensionen hierfür notwendig wären, werden die Kältespeicherkapazitäten der Standardauslegung den Kältespeicherkapazitäten, die zur Erreichung der theoretischen Minimalkosten benötigt würden, in **Tabelle 3** gegenübergestellt.

### 2.3.5 Analyse der Jahresstromkosten der prädiktiv optimierten Betriebsführung (ZOFtE)

Bei Betrachtung der erzielten Stromkosteneinsparungen durch die prädiktiv optimierte Betriebsführung fällt auf, dass die absoluten Einsparungen und die auf die Referenzbetriebsweise 1 bezogenen relativen Einsparungen sich abhängig vom Lastprofil teilweise stark unterscheiden.

Die höchsten absoluten und relativen Einsparungen ergeben sich erwartungsgemäß beim anreizungünstigen Extrem-Lastprofil, da hier definitionsgemäß ein hohes Optimierungspotenzial vorliegt.

**Tabelle 3:** Gegenüberstellung der Kältespeicherkapazitäten

| Synthetisches Lastprofil:  | jahres- und tagesdynamisch | jahresdynamisch | tagesdynamisch | konstant | anreizungünstig | anreizgünstig |
|--|----------------------------|-----------------|----------------|----------|-----------------|---------------|
| Kältespeicherkapazität in (MWh) für prädiktiv optimierte Betriebsführung   | 4                          | 4               | 4              | 2        | 4,27            | 3,76          |
| Kältespeicherkapazität in (MWh) für Referenzbetriebsweise 2  | 629                        | 1.360           | 385            | 273      | 447             | 396           |
| Verhältnis aus der Kältespeicherkapazität für prädiktiv optimierte Betriebsführung und Referenzbetriebsweise 2           | 0,6 %                      | 0,3 %           | 1,0 %          | 0,7 %    | 1,0 %           | 1,0 %         |
| Hinweis: Durch Rundung der hier angegebenen Zahlenwerte können sich geringe Abweichungen bei berechneten Größen ergeben. |                            |                 |                |          |                 |               |

Entgegen den Erwartungen werden dagegen die geringsten Einsparungen nicht beim anreizgünstigen Lastprofil erreicht, sondern beim konstanten Lastprofil. Dies liegt an der bereits diskutierten Auslegung der Anlage und des Kältespeichers: Die in jeder Betriebsstunde im Jahr vorhandene Leistungsreserve zur Lastverschiebung von 150 kW, welche sich auch in den hohen Volllaststunden widerspiegelt, ist sehr gering. Der Vergleich mit mittleren Leistungsreserven von 800 kW (tages- und/oder jahresdynamische Lastprofile), 888 kW (anreizungünstiges Extrem-Lastprofil) bzw. 722 kW (anreizgünstiges Extrem-Lastprofil) erklärt, weshalb die prädiktiv optimierte Betriebsführung beim konstanten Lastprofil deutlich weniger absolute und auch relative Einsparungen erzielen kann.

Die geringen Einsparungen beim anreizgünstigen Extrem-Lastprofil sind damit zu erklären, dass die Referenzbetriebsweise 1 bei diesem Lastprofil bereits zu den niedrigsten Jahresstromkosten aller Referenzbetriebsweisen 1 führt. Damit ist das Potenzial zur weiteren Kosteneinsparung sehr gering, was an den theoretischen, minimalen Kosten bzw. dem theoretischen, maximalen Einsparpotenzial ersichtlich ist.

Auch die Einsparung beim jahresdynamischen Lastprofil ist vergleichsweise gering. Dies liegt zum einen daran, dass sich für dieses Lastprofil die zweitniedrigsten Jahresstromkosten aller Referenzbetriebsweisen 1 ergeben und damit das weitere Einsparpotenzial ähnlich wie beim anreizgünstigen Extrem-Lastprofil geringer ist. Ein weiterer Grund ist, dass die gewählte Kältespeicherkapazität nicht für eine saisonale Lastverschiebung ausreicht. Hierfür wären Kältespeicherkapazitäten in der Größenordnung wie für die Referenzbetriebsweise 2 (siehe Tabelle 3) notwendig, um den in preisgünstigen Winterzeiten mit hohen Leistungsreserven produzierbaren Kälteüberschuss in ungünstige Sommerzeiten mit hohen Lasten verschieben zu können. Dies zeigt sich auch im Ausnutzungsgrad des theoretischen, maximalen Einsparpotenzials. Dieser liegt mit lediglich 43 % deutlich unter den Werten der anderen fünf synthetischen Lastprofile, welche sich in einem engen Bereich zwischen 50 % und 53 % bewegen.

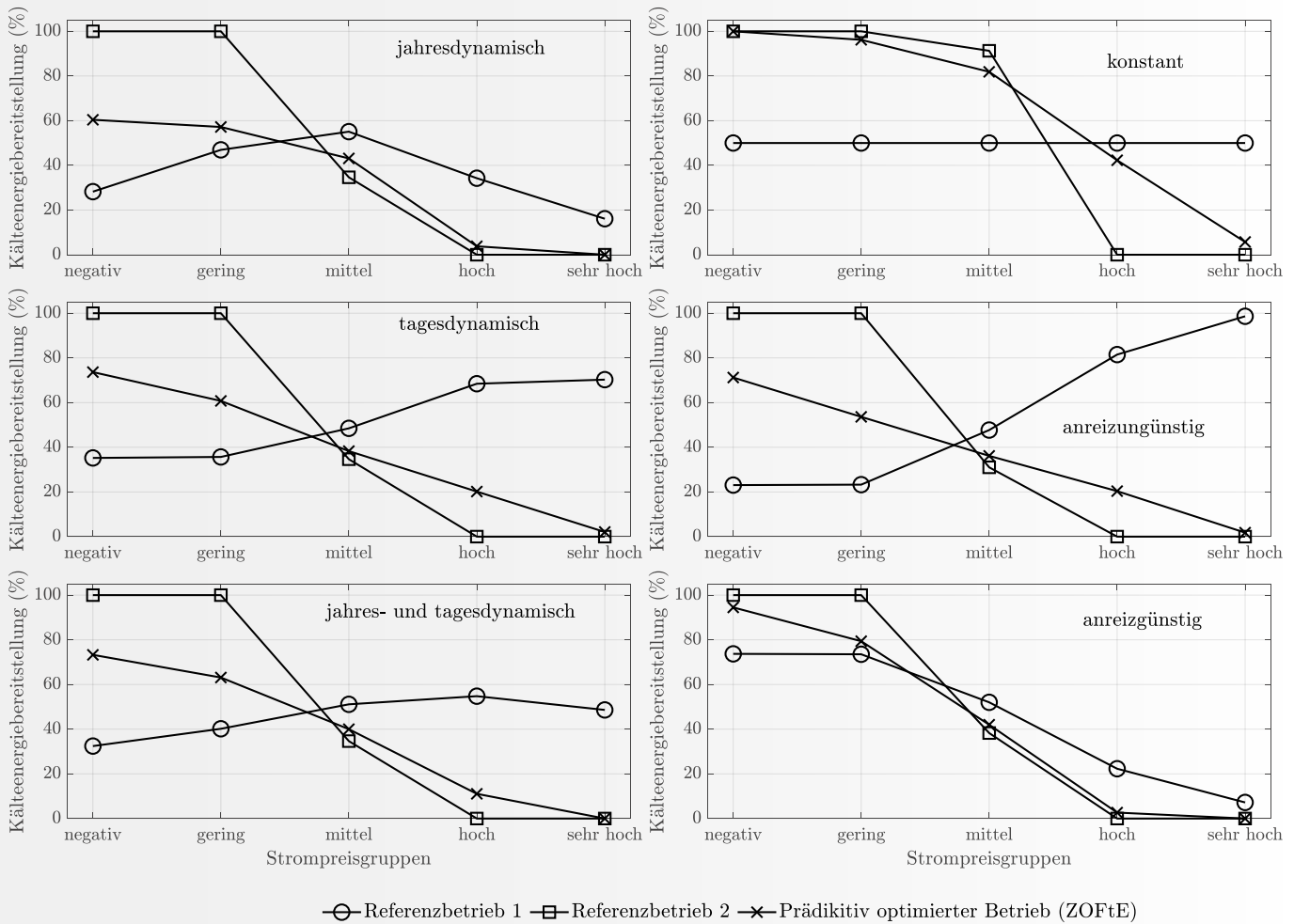
Anhand dieser Gegenüberstellung wird ersichtlich, dass die Dimensionierung der Kälteanlage und des Kältespeichers einen erheblichen Einfluss auf die erreichbaren Kosteneinsparungen haben. Aus diesem Grund wurde

ergänzend eine Parameterstudie durchgeführt, um einen großen Bereich an Kälteanlagenleistungen und Kältespeicherkapazitäten zu untersuchen. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 2.4 vorgestellt.

Um zu veranschaulichen, wie die Kältebereitstellung bei der prädiktiv optimierten Betriebsführung in preisgünstigere Zeiten verschoben wird, werden die bereitgestellten Kälteenergien den in Bild 2 definierten Strompreisgruppen („negativ“ bis „sehr hoch“) zugeordnet. Die maximal in einer Strompreisgruppe bereitstellbare Kälteenergie ermittelt sich jeweils aus dem Produkt der Stundenanzahl, in denen die Börsenstrompreise in der jeweiligen Preisgruppe liegen (s. Häufigkeitsverteilung des Börsenstrompreises in Bild 2), und der Kälteanlagenleistung. **Bild 6** zeigt für die sechs synthetischen Lastprofile das jeweilige Verhältnis aus bereitgestellten und maximal bereitstellbaren Kälteenergien je Strompreisgruppe für die Referenzbetriebsweise 1, die prädiktiv optimierte Betriebsführung sowie für die Referenzbetriebsweise 2, die der Ermittlung der theoretischen Minimalkosten zugrunde liegt. Dieses Verhältnis kann auch als relative Kälteenergiebereitstellung je Strompreisgruppe bezeichnet werden.

Es ist ersichtlich, dass definitionsgemäß bei der Referenzbetriebsweise 2, die der Ermittlung der theoretischen Minimalkosten zugrunde liegt, stets die Zeiten mit „negativen“ und „geringen“ spezifischen Kältekosten komplett genutzt werden (100 %) und die Restkälteenergie zu Zeiten mit „mittleren“ spezifischen Kältekosten bereitgestellt wird. Beim konstanten Lastprofil ist der Anteil der bei „mittleren“ spezifischen Kosten bereitgestellten Kälteenergie mit ca. 91 % größer als bei den anderen fünf synthetischen Lastprofilen mit Anteilen zwischen 31 % und 38 %. Dies kann durch die niedrigere Kälteanlagenleistung und die daraus resultierende höhere Anzahl an Volllastbetriebsstunden erklärt werden. Durch die größere Anzahl an Volllastbetriebsstunden muss mehr Kälteenergie zu Zeiten mit höheren Strompreisen d. h. höheren spezifischen Kältekosten bereitgestellt werden.

Bei der Referenzbetriebsweise 1 sind die Anteile lastprofilabhängig unterschiedlich verteilt. Beim anreizgünstigen Extrem-Lastprofil ist erwartungsgemäß bereits eine Ähnlichkeit mit der Referenzbetriebsweise 2 erkennbar. Entsprechend groß ist die Abweichung beim anreizungünstigen Extrem-Lastprofil. Beim konstanten



**Bild 6:** Verhältnis aus bereitgestellten und maximal bereitstellbaren Kälteenergien je Strompreisgruppe für die sechs synthetischen Lastprofile und drei Betriebsweisen (Referenzbetriebsweise 1 und 2, prädiktiv optimierte Betriebsführung)

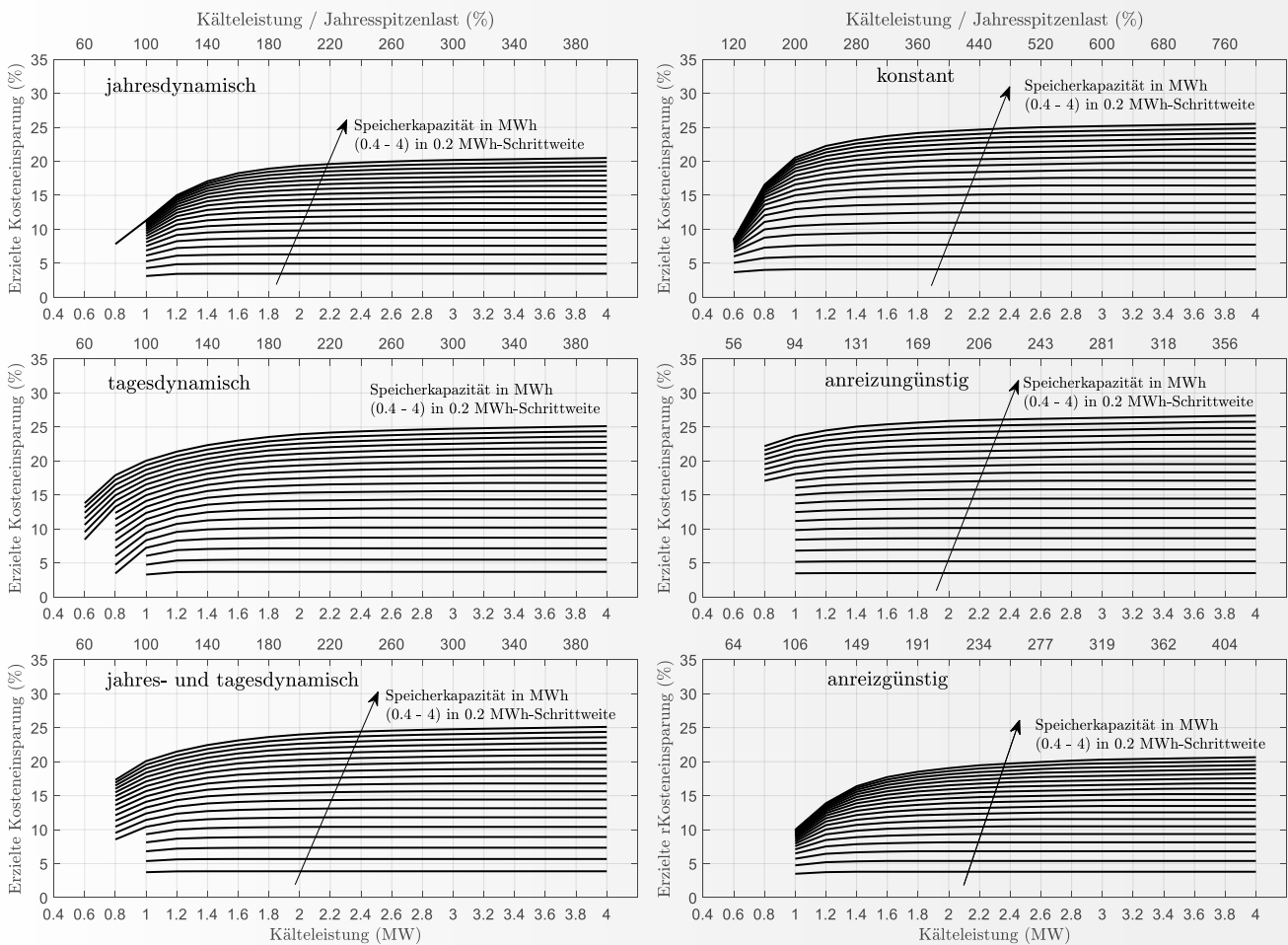
Lastprofil sind die Anteile definitionsgemäß über alle Preisgruppen gleich hoch.

Für die prädiktiv optimierte Betriebsführung (ZOFtE) lässt sich nun lastprofilübergreifend erkennen, dass die Anteile im Vergleich zur Referenzbetriebsweise 1 deutlich in Richtung der Anteile der Referenzbetriebsweise 2 verschoben sind. D. h. die Anteile bei der prädiktiv optimierten Betriebsführung liegen bei den „negativen“ und „niedrigen“ spezifischen Kosten jeweils oberhalb und bei den „hohen“ und „sehr hohen“ spezifischen Kosten unterhalb der Anteile für die Referenzbetriebsweise 1. Beim konstanten Lastprofil ergeben sich im Vergleich die höchsten Energieanteile bei den „negativen“ und „geringen“ spezifischen Kältekosten. Der Grund dafür liegt in der geringen Kälteanlagenleistung. Durch diese ist die in preisgünstigen Zeiten bereitstellbare Kälteenergie vergleichsweise gering und kann daher fast vollständig direkt genutzt bzw.

gespeichert und später genutzt werden. Bei den anderen fünf synthetischen Lastprofilen führt die sehr hohe Leistungsreserve zu Zeiten geringer Kältebelastung dazu, dass die in preisgünstigen Zeiten bereitstellbare Kälteenergie nur teilweise genutzt bzw. gespeichert und später genutzt werden kann und somit die Preistäler nicht komplett genutzt werden können. Das jahresdynamische Lastprofil hat den geringsten Energieanteil zu Zeiten „negativer“ spezifischer Kosten von ca. 60 %. Dies deckt sich mit der verhältnismäßig geringen relativen Ausnutzung des theoretischen Einspar- bzw. Lastverschiebepotenzials von 43 % (s. Kostengegenüberstellung in Tabelle 2) und ist darin begründet, dass keine saisonale Speicherung möglich ist.

## 2.4 Potenzialanalyse anhand einer Parameterstudie

Die in Abschnitt 2.3 dargestellten Ergebnisse, insbesondere das im Fall des konstanten Lastprofils



**Bild 7:** Variation der Kälteanlagenleistung und der Kältespeicherkapazität für die sechs synthetischen Kältelastprofile – erzielte relative Kosteneinsparung durch die prädiktiv optimierte Betriebsführung bezogen auf die jeweiligen Kosten der Referenzbetriebsweise 1 gemäß Tabelle 2, als Dezimaltrennzeichen wird hier programmbedingt ein Punkt verwendet

geringe Kosteneinsparpotenzial, zeigen, dass eine Leistungsdimensionierung von Kälteanlagen, die sich ausschließlich an der Jahresspitzenlast des Kältebedarfs orientiert, nicht unbedingt zu einem gewünschten Maß an Flexibilität führt. Vielmehr ist die Charakteristik des Kältelastprofils in die Dimensionierungssystematik mit einzubeziehen. Die beiden entscheidenden Kenngrößen für das Maß an Flexibilität der Kältebereitstellung sind die auf den Jahreskältebedarf bezogenen Volllastbetriebsstunden der Kälteanlage sowie die Kapazität des Kältespeichers.

**2.4.1 Analyse der erzielten Kosteneinsparung durch die prädiktiv optimierte Betriebsführung (ZOftE) bezogen auf die Kosten der Referenzbetriebsweise 1**

Im Folgenden wird der Einfluss der Kälteanlagenleistung und der Kältespeicherkapazität auf die

durch die prädiktiv optimierte Betriebsführung erzielte Kosteneinsparung diskutiert. Hierfür wurde die Kälteanlagenleistung im Bereich von 0,4 MW bis 4,0 MW in 0,2 MW-Schritten (x-Achsen in Bild 7 und Bild 8) sowie die Kältespeicherkapazität von 0,4 MWh bis 4,0 MWh in 0,2 MWh-Schritten (Kurvenschaaren in Bild 7 und Bild 8) variiert.

Zur Darstellung des Einflusses der Kälteanlagenleistung und Kältespeicherkapazität werden für die sechs synthetischen Lastprofile die Kosteneinsparungen auf die Kosten der jeweiligen Referenzbetriebsweise 1 (gemäß Tabelle 2) bezogen und in den Diagrammen in Bild 7 dargestellt. Durch den Bezug auf die Kosten, die aus der Referenzbetriebsweise 1 und dem jeweiligen Lastprofil unabhängig von der Anlagenauslegung resultieren, werden die Kosteneinsparungen um den Einfluss der Korrelation

zwischen Strompreis und Lastprofil bereinigt und geben die Wirkung der prädiktiv optimierten Betriebsführung in vergleichbarer Weise wieder.

Bei kleinen Kälteanlagenleistungen unter 1 MW und kleinen Kältespeicherkapazitäten ist eine vollständige Kälteversorgung nicht immer gewährleistet. Für diese Fälle können keine relativen Kosteneinsparungen angegeben werden, was in **Bild 7** am Abbruch der Kurvenscharen an der linken Seite in allen Diagrammen erkennbar wird. Der Grund hierfür liegt darin, dass die kleinen gewählten Kälteanlagenleistungen eine Unterdimensionierung darstellen, wenn die Kälteanlagenleistung den maximalen Kältebedarf unterschreitet. Eine Deckung des Kältebedarfs kann jedoch trotz einer Unterdimensionierung gewährleistet sein, wenn die Kältespeicherkapazität so groß gewählt wurde, dass eine Überbrückung der Spitzenlastzeiten durch den Kältespeicher möglich ist. Dies ist sehr gut am tagesdynamischen Lastprofil erkennbar. Hier sind mit zunehmender Kältespeicherkapazität auch Kälteanlagenleistungen möglich, die deutlich kleiner als die Spitzenlast von 1 MW sind.

Grundsätzlich lässt sich gut erkennen, dass sowohl eine Erhöhung der Kälteanlagenleistung als auch der Kältespeicherkapazität zu einer größeren Kosteneinsparung führt. Wie groß der jeweilige Einfluss der Dimensionierung von Kälteanlage und -speicher ist, ist jedoch stark vom Lastprofil abhängig:

- Beim jahresdynamischen Lastprofil liegen die Kurvenscharen bei niedrigen Kälteanlagenleistungen nahe zusammen. Dies bedeutet, dass der Einfluss der Kältespeicherkapazität auf die Kosteneinsparung dort vergleichsweise gering ist. Der Abstand der Kurvenscharen und damit der Einfluss der Kältespeicherkapazität nehmen mit steigender Kälteanlagenleistung bis zu einem Grenzwert zu. Die bei maximaler Kälteanlagenleistung und Kältespeicherkapazität erreichte relative Kosteneinsparung ist mit ca. 20 % die im Vergleich zu den anderen fünf synthetischen Lastprofilen kleinste erreichte Einsparung bei maximaler Auslegung.
- Beim tagesdynamischen Lastprofil ist im Vergleich zum jahresdynamischen Lastprofil der Einfluss der Kältespeicherkapazität bei niedrigen Kälteanlagenleistungen deutlich größer, nimmt jedoch mit der Kälteanlagenleistung nicht mehr so stark zu. Die bei maximaler

Auslegung von Kälteanlage und -speicher erreichte relative Kosteneinsparung beträgt ca. 25 %.

- Die Kosteneinsparungen des jahres- und tagesdynamischen Lastprofils zeigen ein ähnliches Verhalten wie beim tagesdynamischen Lastprofil.
- Beim konstanten Lastprofil ist der Einfluss der Kältespeicherkapazität auf die Kosteneinsparung bei kleinen Kälteanlagenleistungen am geringsten, nimmt mit der Kälteanlagenleistung jedoch am stärksten zu. Die bei maximaler Auslegung von Kälteanlage und -speicher erreichte relative Kosteneinsparung beträgt ebenfalls ca. 25 %.
- Der größte Einfluss der Kältespeicherkapazität auf die Kosteneinsparung zeigt sich beim anreizungünstigen Extrem-Lastprofil. Jedoch nimmt der Einfluss hier auch mit steigender Kälteanlagenleistung kaum mehr zu. Die Kosteneinsparung bei maximaler Auslegung von Kälteanlage und -speicher ist hier mit ca. 27 % am höchsten.
- Die Kosteneinsparungen beim anreizgünstigen Extrem-Lastprofil verhalten sich ähnlich wie beim jahresdynamischen Lastprofil, wobei bei kleinen Kälteanlagenleistungen der Einfluss der Kältespeicherkapazität am geringsten ist.

Zusammengefasst kann die Aussage getroffen werden, dass der Einfluss der Kälteanlagenleistung auf die Kosteneinsparung bezogen auf die Jahresstromkosten der Referenzbetriebsweise 1 umso größer ausfällt, je größer die Kältespeicherkapazität ist. Selbst bei den größten Kältespeicherkapazitäten bringt eine Vergrößerung der Kälteanlagenleistung auf Werte, die je nach Lastprofil mehr als das ein- bis zweifache der Jahresspitzenverbraucherlast betragen, keine nennenswerte Steigerung der Kosteneinsparung mehr. Beide Effekte lassen sich an der Krümmung der Kurvenscharen in den Diagrammen in **Bild 7** erkennen. Die Krümmung ist bei hohen Kältespeicherkapazitäten und niedrigen Kälteanlagenleistung am stärksten. Die Schwellwerte für die Kälteanlagenleistung, ab der die relative Kosteneinsparung nur noch um weniger als 1 Prozentpunkt pro 200 kW Kälteanlagenleistung zunimmt, liegen beim tagesdynamischen und jahres- und tagesdynamischen Lastprofil bei ca. 1,2 MW (1,2-fache Jahresspitzenverbraucherlast). Beim konstanten Lastprofil liegt der Schwellwert

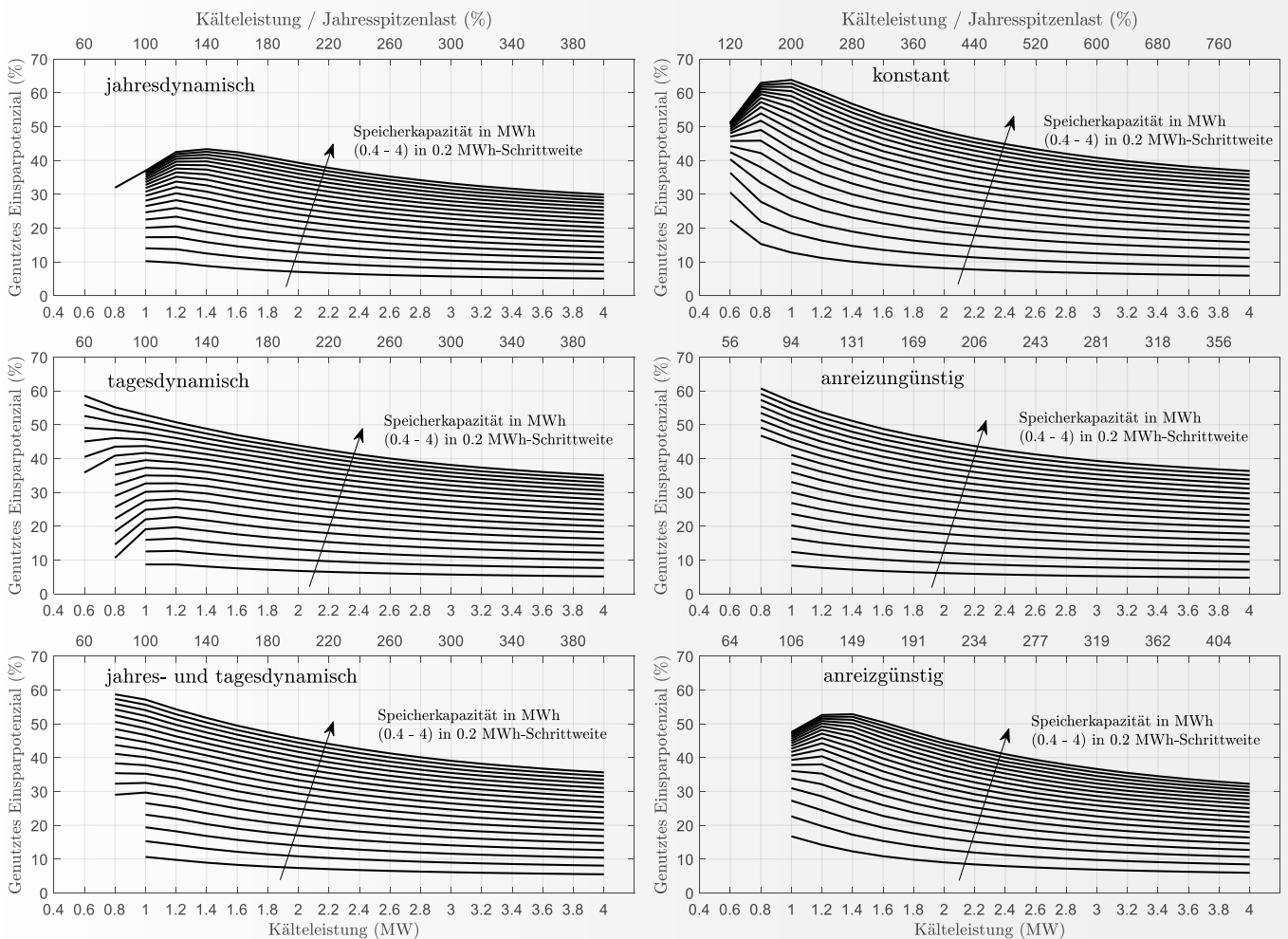


ebenso bei ca. 1,2 MW, was jedoch mehr als dem zweifachen der Jahresspitzenverbraucherlast entspricht. Beim jahresdynamischen Lastprofil und beim anreizgünstigen Extrem-Lastprofil liegt der Schwellwert bei ca. 1,6 MW (1,6-fache Jahresspitzenverbraucherlast). Beim anreizungünstigen Extrem-Lastprofil entspricht der Schwellwert in etwa der Jahresspitzenverbraucherlast von 1,068 MW, d. h. hier ist keine Überdimensionierung der Kälteanlagenleistung notwendig bzw. sinnvoll.

**2.4.2 Analyse der erzielten Kosteneinsparung durch die prädiktiv optimierte Betriebsführung bezogen auf das theoretische, maximale Einsparpotenzial**

Zur Beurteilung, wie gut das theoretische, maximale Einsparpotenzial mit Hilfe der prädiktiv

optimierten Betriebsführung – unter den gegebenen Randbedingungen der Kälteanlagen- und Kältespeicherdimensionierung – ausgenutzt wird, werden die erzielten Kosteneinsparungen auf das theoretische, maximale Einsparpotenzial bezogen und in **Bild 8** für die sechs synthetischen Lastprofile dargestellt. Das theoretische, maximale Einsparpotenzial ist aufgrund der darin verrechneten Kosten der Referenzbetriebsweise 1 vom Lastprofil abhängig, aufgrund der theoretischen Minimalkosten (Kosten der Referenzbetriebsweise 2) jedoch zusätzlich auch von der gewählten Kälteanlagenleistung. Somit ist der Bezugswert für jede Variante der Kälteanlagenleistung individuell zu berechnen und liegt in einem Bereich von 1.138 € (maximales Einsparpotenzial bei 0,6 MW Kälteanlagenleistung für das anreizgünstige Extrem-Lastprofil) bis 40.787 €



**Bild 8:** Variation der Kälteanlagenleistung und der Kältespeicherkapazität für die sechs synthetischen Kältebelastprofile – erzielte relative Kosteneinsparung durch die prädiktiv optimierte Betriebsführung (ZOFtE) bezogen auf das jeweilige theoretische, maximale Einsparpotenzial, als Dezimaltrennzeichen wird hier programmbedingt ein Punkt verwendet

(maximales Einsparpotenzial bei 4,0 MW Kälteanlagenleistung für das anreizungünstige Extrem-Lastprofil).

Wie zu erwarten ist, nimmt unabhängig vom betrachteten synthetischen Lastprofil der Ausnutzungsgrad des theoretischen, maximalen Einsparpotenzials durch die prädiktiv optimierte Betriebsführung mit steigender Kältespeicherkapazität zu. Mit zunehmender Kältespeicherkapazität nähern sich die Varianten immer mehr an die theoretischen Minimalkosten an, welche eine nahezu unbegrenzte Kältespeicherkapazität voraussetzen, vgl. Tabelle 3.

Beim jahresdynamischen, beim konstanten und beim anreizungünstigen Lastprofil hat bei großen Kältespeicherkapazitäten und niedrigen Kälteanlagenleistungen eine Erhöhung der Kälteanlagenleistung eine größere Kosteneinsparungen zur Folge (siehe Bild 7). Obwohl die theoretischen Minimalkosten mit zunehmender Kälteanlagenleistung sinken und damit auch das theoretische, maximale Einsparpotenzial, welches hier als Bezugswert herangezogen wird, steigt zunächst der Ausnutzungsgrad des theoretischen, maximalen Einsparpotenzials (siehe Bild 8). Dies bedeutet, dass der Anstieg der Kosteneinsparung im niedrigen Leistungsbereich im Verhältnis größer ist als der Anstieg des theoretischen, maximalen Einsparpotenzials. Bei weiter zunehmender Kälteanlagenleistung bzw. bei kleinen Kältespeicherkapazitäten ist der Anstieg der Kosteneinsparungen kleiner als der Anstieg des theoretischen, maximalen Einsparpotenzials, weshalb der Ausnutzungsgrad abnimmt. Darüber hinaus liegen die Ausnutzungsgrade bei diesen Lastprofilen bei niedrigen Kälteanlagenleistungen und hohen Kältespeicherkapazitäten nahe zusammen, d. h. eine höhere Kältespeicherkapazität bringt kaum eine Verbesserung. Die Hochpunkte der Ausnutzungsgrade liegen je nach Kältespeicherkapazität in einem Leistungsbereich der Kälteanlagen von ca. 600 kW bis 1.400 kW.

Bei den tagesdynamischen, jahres- und tagesdynamischen Lastprofilen sowie beim anreizungünstigen Extrem-Lastprofil nimmt der Ausnutzungsgrad bei nahezu allen Kältespeicherkapazitäten mit zunehmender Kälteanlagenleistung ab. Die Hochpunkte liegen bei sehr kleinen Kälteanlagenleistungen von ca. 600 kW bis 1.200 kW und kleinen Kältespeicherkapazitäten.

Die maximalen Ausnutzungsgrade liegen abhängig vom synthetischen Lastprofil zwischen ca. 52 % (anreizungünstiges Extrem-Lastprofil) und ca. 63 % (konstantes Lastprofil).

### 3. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die in [2] vorgestellte prädiktive Optimierung der Betriebsführung (ZOFtE) prinzipiell sehr gut geeignet ist, den Betrieb von Kälteanlagen im Rahmen der vorhandenen Flexibilität an ein Anreizsignal anzupassen. Die Flexibilität hängt jedoch sehr stark von der Anlagendimensionierung ab. Ein Maß hierfür stellen die Volllaststunden dar, also die Zeit für die die Kälteanlage mit Volllast betrieben werden muss, um die Jahreskälteenergie bereitzustellen. Je niedriger die Volllaststunden sind, desto größer ist prinzipiell die Flexibilität. Welcher Effekt mit dieser Flexibilität im konkreten Fall erreicht werden kann, hängt vom zeitlichen Zusammenhang zwischen Anreizsignal und Kältelastprofil ab.

Um dies genauer untersuchen zu können, wurde auf Basis von sechs entwickelten synthetischen Kältelastprofilen eine Potenzialanalyse für verschiedene Kälteanlagenleistungen und Kältespeicherkapazitäten durchgeführt. Es wurden umfangreiche Jahressimulationen mit zwei unterschiedlichen Referenzbetriebsweisen und der prädiktiv optimierten Betriebsführung durchgeführt und beispielhaft anhand von Jahresstromkosten (basierend auf dem Börsenstrompreis) miteinander verglichen. Es konnte gezeigt werden, dass erwartungsgemäß größere Kälteanlagenleistungen und Kältespeicherkapazitäten aufgrund der dadurch höheren Flexibilität zu niedrigeren Jahresstromkosten führen. Allerdings zeigte sich, dass beim tagesdynamischen bzw. tages- und jahresdynamischen Lastprofil und beim anreizungünstigen Extrem-Lastprofil eine Erhöhung der Speicherkapazität bereits bei kleinen Anlagenleistungen zu signifikant niedrigeren Jahresstromkosten führt, wohingegen beim jahresdynamischen bzw. konstantem Lastprofil und beim anreizungünstigen Extrem-Lastprofil erst in Verbindung mit einer Erhöhung der Anlagenleistungen signifikant niedrigere Jahresstromkosten erreicht werden.

Ein fallunabhängiges Optimum für die Auslegung der Kälteanlage und den Kältespeicher konnte somit nicht identifiziert werden.

Allerdings führt bei allen Lastprofilen eine Kälteanlagenleistung von mehr als dem ein- bis zweifachen der Jahresspitzenverbraucherlast zu keiner signifikanten Verringerung der Jahresstromkosten mehr, so dass hier eine Grenze identifizierbar ist. Tendenziell liegt diese Grenze um so höher, je günstiger das Lastprofil im Sinne des Anreizsignals ist. Die größten erreichbaren Potenziale ergeben sich beim anreizungünstigen Extrem-Lastprofil sowie beim tagesdynamischen bzw. beim tages- und jahresdynamischen Lastprofil. Alle drei Profile sowie das Anreizsignal sind stark von der Tagesdynamik geprägt, was darauf hindeutet, dass eine Kältespeicherkapazität, die eine Verschiebung der Betriebszeiten der Kälteanlage innerhalb eines Tages ermöglicht, am sinnvollsten erscheint. Dieses Ergebnis bekräftigt im Nachhinein auch die Wahl eines praxisnahen Prädiktionshorizonts für die Optimierung von einem Tag.

Obwohl hier keine einfachen Auslegungsempfehlungen aufgrund der zahlreichen Abhängigkeiten gegeben werden können, lassen sich die Ergebnisse dieses Beitrags einfach auf typische Kälteanwendungen übertragen und in den Planungsprozess derartiger Anlagenkonzepte einbeziehen. Darüber hinaus lässt sich der entwickelte ZOFtE-Algorithmus für eine prädiktiv optimierte Betriebsweise und die hier gezeigten Untersuchungen grundsätzlich auch auf sektorgekoppelte Wärmeerzeuger, z. B. Wärmepumpen oder Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, übertragen.

Ein Beispiel für die Anwendung des ZOFtE-Algorithmus für den Betrieb der Kälteversorgung eines Supermarktes ist in [4] beschrieben. Die Einbindung des ZOFtE-Algorithmus in innovative Kommunikationskonzepte in Verbindung mit dem offenen Kommunikationsstandard OPC UA werden in [5] vorgestellt. Darüber hinaus wird in weiterführenden Untersuchungen der Einfluss vereinfachter Modelle u. a. auf die Robustheit der ermittelten Anlagenfahrpläne analysiert. In diesem Zusammenhang wird der Fokus in [6] auf datengetriebene Verfahren zur Kältelastprognose und in [7] auf den Einfluss von Modellunsicherheiten bzgl. der nutzbaren Kältespeicherkapazität gelegt.

## Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen der Forschungsprojekte „FlexControl – Netzdienliche

Betriebsführungsstrategien für eine energieeffiziente Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden im GHD-Sektor“, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages (FKZ: 03ET1359C), und „ZAFH ENsource – Zentrum für angewandte Forschung Urbane Energiesysteme und Ressourceneffizienz“, gefördert vom Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg und dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE), Az: FEIH\_ZAFH\_562822, FEIH\_ZAFH\_1248932.

## i | AUTOREN VITA



Dipl.-Ing. (FH) MICHAEL BACHSEITZ, M. Sc.

- 2004 – 2009 Studium Bauingenieurwesen, Vertiefungsrichtung Bauphysik und Gebäudetechnik (Abschluss: Dipl.-Ing. (FH)), Hochschule Coburg
- 2009 – 2010 Studium Gebäudeklimatik (Abschluss: M. Sc.), Hochschule Biberach
- Seit 2010 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Gebäude- und Energiesysteme, Hochschule Biberach

**Kontakt** Hochschule Biberach,  
Biberach University of Applied Sciences, Biberach  
Institut für Gebäude- und Energiesysteme  
Karlstraße 11  
88400 Biberach  
Tel.: +49 7351 582 268  
E-Mail: bachseitz@hochschule-bc.de



DANIEL PFEIFFER, M. Sc.

- 2008 – 2012 Studium Energiesysteme (Abschluss B. Eng.), Hochschule Biberach und Hochschule Ulm
- 2012 – 2014 Studium Gebäudeklimatik (Abschluss: M. Sc.), Hochschule Biberach
- Seit 2014 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Gebäude- und Energiesysteme, Hochschule Biberach

**Kontakt** Hochschule Biberach,  
Biberach University of Applied Sciences, Biberach  
Institut für Gebäude- und Energiesysteme  
Karlstraße 11  
88400 Biberach  
Tel.: +49 7351 582 229  
E-Mail: pfeiffer@hochschule-bc.de

Die Autoren danken den Fördermittelgebern für die finanzielle Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## AUTOREN VITA



Prof. Dr.-Ing. ROLAND KOENIGSDORFF

- 1993 Promotion „Direkteinkopplung konzentrierter Solarstrahlung in eine zirkulierende Wirbelschicht“ am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt
- 1994 – 1998 Leitung der Gruppe Energiemanagement und Gebäude- und Anlagensimulation, DS-Plan GmbH, Stuttgart
- Seit 1998 Professor für die Fachgebiete Simulationstechnik, Energiekonzepte und Geothermie, Hochschule Biberach
- Seit 2010 Geschäftsführende Leitung des Institut für Gebäude- und Energiesysteme, Hochschule Biberach

**Kontakt** Hochschule Biberach,  
Biberach University of Applied Sciences, Biberach  
Institut für Gebäude- und Energiesysteme  
Karlstraße 11  
88400 Biberach  
Tel.: +49 7351 582 255  
E-Mail: koenigsdorff@hochschule-bc.de



Prof. Dr.-Ing. MARTIN BECKER

- 1995 Promotion „Automatisierung kältetechnischer Anlagen auf Basis der mathematischen Modellierung des Gesamtsystems“
- 1995 – 1999 Geschäftsführer der Transferstelle für Informations- und Automatisierungssysteme in der Kältetechnik, Universität Kaiserslautern
- Seit 1999 Professor für die Fachgebiete MSR-Technik, Gebäudeautomation und Energiemanagement, Hochschule Biberach
- Seit 2017 Prorektor für Forschung und Transfer, Hochschule Biberach

**Kontakt** Hochschule Biberach,  
Biberach University of Applied Sciences, Biberach  
Institut für Gebäude- und Energiesysteme  
Karlstraße 11  
88400 Biberach  
Tel.: +49 7351 582 253  
E-Mail: becker@hochschule-bc.de

## Symbole

- $p_{norm}$  Tageweise normierter Strompreis, dimensionslos
- $\dot{Q}_{norm}$  Normierte Leistung des Kältebedarfs (Stundenmittelwerte), dimensionslos
- $n$  Streckungsfaktor zur Energienormierung, dimensionslos
- $Q_{o,a}$  normierter Referenz-Jahresenergiebedarf in Stunden
- $t$  Zeit in Stunden

## Literatur

- [1] P. Palensky und D. Dietrich, „Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads,“ *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, pp. 381-388, August 2011.
- [2] M. Bachseitz, D. Pfeiffer, R. Koenigsdorff und M. Becker, „Methode zur prädiktiven Optimierung der Betriebsführung von Kälteanlagen für das elektrische Lastmanagement,“ *GI - Gebäudetechnik in Wissenschaft und Praxis*, Heft 03, Jahrgang 140, ITM InnoTech Medien GmbH, Augsburg, 2019, ISSN: 2195-643X.
- [3] EPEX SPOT, Day-Ahead-Markt. [Online]. Available: <http://www.epexspot.com/de/markt>. [Zugriff am 29. Oktober 2018].
- [4] M. Bachseitz und R. Koenigsdorff, „Modellprädiktiver, netzdienlicher Betrieb von Kälteanlagen in Supermärkten,“ *Tagungsband IBPSA 7. Deutsch-Österreichische Konferenz BausIM 2018*, pp. 399-406, Karlsruhe, September 2018, DOI 10.5445/IR/1000085743.
- [5] D. Pfeiffer und M. Becker, „Automatisierung von Kälteanlagen mit Einbindung in ein Demand Side Management - Einbindung von übergeordneten Algorithmen in neue Kommunikationskonzepte,“ in 19. Leitkongress der Mess- und Automatisierungstechnik AUTOMATION 2018 - Seamless Convergence of Automation & IT, VDI-Berichte 2330, pp. 933-946, Baden-Baden, 2018.
- [6] D. Pfeiffer und M. Becker, „Messdatengestützte Kälte-lastvorhersage für eine modellprädiktive Betriebsführung von Kälteanlagen,“ in 20. Leitkongress der Mess- und Automatisierungstechnik AUTOMATION 2019 - Autonomous Systems and 5G in Connected Industries, VDI-Berichte 2351, pp. 103-116, Baden-Baden, 2019.
- [7] D. Pfeiffer, S. Haußer, S. Hudjetz und M. Becker, „Electrical demand side flexibility from refrigeration systems with thermal energy storage based on a model predictive control strategy - influence of model uncertainties,“ in Refrigeration Science and Technology Proceedings, The 25th IIR International Congress of Refrigeration, pp. 2296-2303, Montréal, Canada, 2019, ISBN: 978-2-36215-035-7, ISSN: 1025-9031.



# Alles gut geregelt mit SAUTER - seit über 100 Jahren



## Der Beginn

Im Jahr 1910 legt Fritz Sauter in seinem Elternhaus im schweizerischen Grindelwald den Grundstein für die heutige weltweite Firmentätigkeit. Sein erstes Produkt ist eine astronomische Zeitschaltuhr zur morgendlichen Ausschaltung der Straßenbeleuchtung, welche den Gang der Sonne berücksichtigte. Kurz darauf entwickelt sich aus der Idee der effizienten Nutzung der Elektrizität auch das Erfolgsprodukt des elektrischen Wasserboilers «Cumulus».

Das Leben, Wohnen und Arbeiten in Gebäuden so angenehm und energieeffizient wie möglich zu gestalten, das ist eines der wichtigsten Ziele, welches die Unternehmen der SAUTER-Gruppe mit all ihren Geschäftsbereichen verfolgt.

[www.sauter-cumulus.de](http://www.sauter-cumulus.de)

## Die Anfänge der Regeltechnik

Mit der Entwicklung von Boilerthermostaten ist der Grundstein für das heutige Kerngeschäft, die Gebäude- und Raumautomation, gelegt. Die Einstellung einer konstanten Raumtemperatur in Gebäuden gelang erstmals mit dem Produkt SAUTER equitherm®, welches die Temperatur des Heizwassers in Zentralheizungsanlagen in Abhängigkeit von der Außentemperatur regelte. Mit dem SAUTER flexotron® werden ab 1961 nicht nur Heizungen, sondern auch Lüftungen, Klima- und industrielle Anlagen gesteuert.



## Das Software- und Internet-Zeitalter beginnt

1974 kommt das erste softwaregesteuerte Gebäudeleitsystem EY1200 auf den Markt. Und auch das Internet eröffnet neue Möglichkeiten. So kann ein Gebäudeleitsystem im Jahr 1997 bereits mit dem EY3600 von jedem beliebigen PC über einen Webbrowser gesteuert werden. 2012 wird das SAUTER Vision Center, eine neue Klasse von Gebäudemanagementsoftware entwickelt, HTML5-basiert mit modularer, skalierbarer Visualisierungs- und Managementebene.



## Neue Lösungen für Energieeffizienz und Gebäudemanagement

Mit der Lancierung der SAUTER Energy Management Solution (EMS) 2009 beginnt SAUTER mit der Entwicklung besonders energieeffizienter Lösungen. Das Programm ECO10 wird ins Leben gerufen. Im Produktportfolio spiegelt sich diese Ausrichtung z.B. im Automationssystem SAUTER EY-modulo 5 wider, welches eine beachtliche Senkung bei den Energiekosten in Gebäuden und beim CO<sub>2</sub>-Ausstoß ermöglicht.

## SAUTER 4.0

Unter dem Slogan „Intelligence Inside“ präsentiert SAUTER 2019 ihre Digitalisierungsstrategie. Teil der Strategie ist, neben diverser App-, Cloud- und IoT-Lösungen, die Neuentwicklung SAUTER modulo 6, eine neue Automationsstation, welche sich vor allem durch eine überdurchschnittliche Leistungsfähigkeit, intuitive Bedienung sowie Cloud- und IoT-Fähigkeit bei Gewährleistung höchster Sicherheitsanforderungen auszeichnet.



 **SAUTER**  
Für Lebensräume mit Zukunft.



# Installationstechnik im Wandel

## Optimierung aktiver Prozesse zur Temperaturhaltung des kalten Trinkwassers

*In den vergangenen Jahrzehnten hat sich die Installationstechnik für Trinkwasserleitungen grundlegend verändert. Bis in die 1980er Jahre hinein wurden kalte und warme Trinkwasserleitungen in Schlitzfenstern massiver Wände verlegt und anschließend eingemauert. Kalte Trinkwasserleitungen wurden i.d.R. von Heizungsleitungen weit entfernt installiert und so nur unwesentlich mit Wärmelasten beaufschlagt. Diese Installationstechnik hatte viele Nachteile, führte aber automatisch zu relativ geringen Temperaturen des kalten Trinkwassers - auch nach Stagnationsphasen. Die zu dieser Zeit entwickelten Spülmaßnahmen dienten daher nur einem gelegentlichen Wasserwechsel zur Aufrechterhaltung des bestimmungsgemäßen Betriebs in entnahmeschwachen Zeiten.*

*Heute werden Trinkwasserleitungen fast ausschließlich in den Hohlräumen sogenannter Installationsvorwände, -schächten und Zwischendecken frei verlegt. Neben den warmgehenden Leitungen der Sanitär- und Heizungstechnik sorgen in diesem Bereich weitere Wärmequellen, z.B. aus der Elektro und Klimatechnik, für Lufttemperaturen, die erfahrungsgemäß deutlich höher liegen als  $\vartheta > 25 \text{ °C}$ . Mit der Veränderung der Installationsarten wurden zunehmend Spülprozesse eingesetzt, die der Absenkung der Kaltwassertemperaturen auf normativ geforderte Temperaturen dienen (temperaturgeführtes Spülen). Abhängig von den Randbedingungen und der verwendeten Technik führen solche Spülmaßnahmen gerade in den Sommermonaten häufig zu unerwartet hohen Spülvolumina [1].*

*Der nachfolgende Beitrag beschäftigt sich mit der Optimierung solcher Spülvorgänge und verweist auf eine wesentlich kostengünstigere Technik, die sowohl die dauerhafte Temperaturhaltung des kalten Trinkwassers unter  $20 \text{ °C}$  als auch die Durchführung von Spülmaßnahmen mit hohen Spülvolumenströmen ermöglicht.*



VON  
LARS RICKMANN  
TIMO KIRCHHOFF  
WERNER MATHYS  
BERND RICKMANN  
CARSTEN BÄCKER

## Installation technology in transition – Optimization of active processes for Temperature maintenance of cold drinking water

In recent decades, the installation technology for drinking water pipes has changed fundamentally. Until the 1980s, cold and warm drinking water pipes were installed in slits of massive walls and then walled in. Cold drinking water pipes were therefore installed far away from heating pipes and thus only insignificantly effected by heat loads. This installation technique had many disadvantages, but automatically led to relatively low temperatures of the cold drinking water - even after periods of stagnation. The water exchange measures developed at that time therefore served only an occasional change of water to maintain the intended operation in times of low water consumption.

Today, drinking water pipes are installed almost exclusively in pre- or dry-walls, shafts and ceiling voids. In addition to the hot-pipes of the plumbing and heating technology, other heat sources in this area, e.g. from electrical and air conditioning technology, provide air temperatures, which experience shows are significantly higher than  $> 25\text{ °C}$ . With the change of the installation methods, water changing measures were increasingly used, which served to lower the cold-water temperatures to a level required by regulations (temperature-controlled rinsing). Depending on the boundary conditions and the used technology, such water changing measures often lead to unexpected high water exchange rates [1], especially in summer months.

The following article deals with the optimization of such water exchange processes and refers to a much more cost-effective technique, which includes both the permanent temperature maintenance of the cold drinking water to max.  $20\text{ °C}$  as well as the implementation of water exchange measures with high flow rate.

### Grundsätzliches

Die Stagnation des Trinkwassers in der Leitungsanlage ist der wohl kritischste Faktor für die Vermehrung fakultativ-pathogener Krankheitserreger. Der länger andauernde Kontakt von Trinkwasser mit den Rohrleitungs- und Armaturenwerkstoffen führt zu einer erhöhten Migration von Nährstoffen in das Trinkwasser. In Stagnationsphasen fehlt der Abtransport und damit die Verdünnung der in den Wasserkörper gelangten Mikroorganismen. In Stagnationsphasen ist das Trinkwasser zudem den Umgebungstemperaturen im Installationsraum ausgesetzt, wodurch eine Erwärmung/Abkühlung des Trinkwassers auf

Temperaturen stattfinden kann, die im Wachstumsbereich von Krankheitserregern liegen können ( $\vartheta = 25 - 40\text{ °C}$ ). Als sichere Temperatur für das kalte Trinkwasser wird z.B. in der DVGW-Wasserinformation 90 [2] nur eine Temperatur von  $\vartheta < 20\text{ °C}$  angesehen.

Zur Reduzierung des Wärmeübergangs auf das kalte Trinkwasser müssen zunächst alle passiven Maßnahmen zur thermischen Entkopplung genutzt werden, wie die Leitungsführung in getrennten Schächten, die Abschottung der Schächte zu den Installationsvorwänden, die Erzeugung einer Temperaturschichtung in den Installationsvorwänden, dem Anschluss

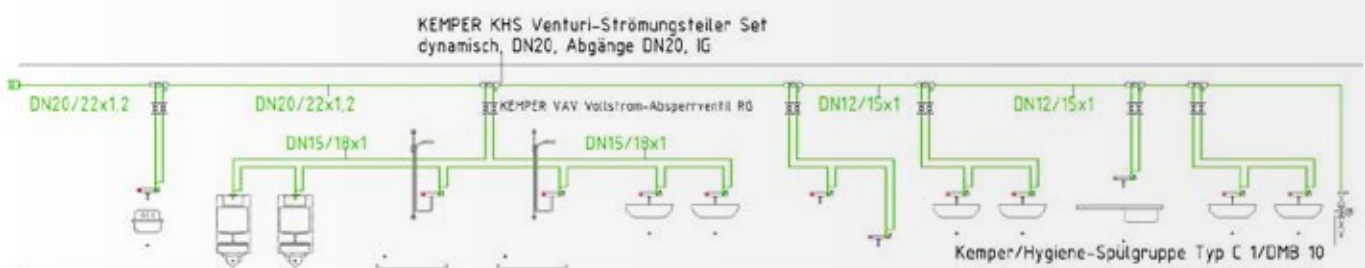


Bild 1: Konzeptioneller Aufbau der messtechnisch untersuchten Trinkwasserinstallation mit zentral angeordneter Spüleinrichtung. Quelle: Dendrit

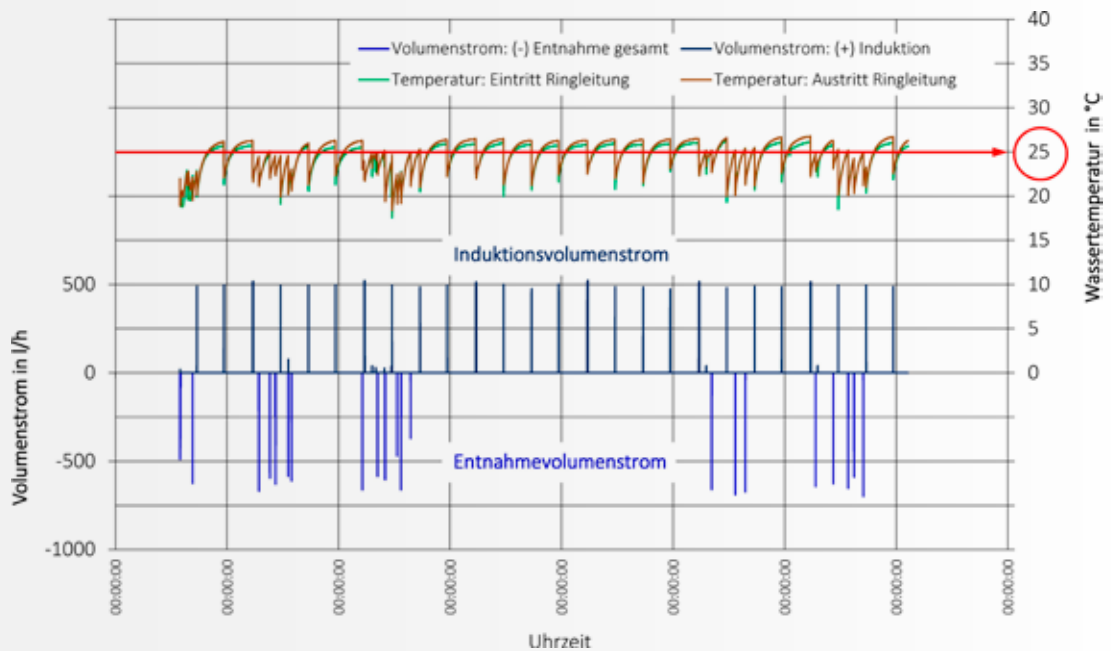


Bild 2: Messwerte für den Entnahmestrom, den Induktionsstrom in der Ringleitung und den Eintritts- und Austrittstemperaturen. Quelle: L. Rickmann

wandmontierter Entnahmearmaturen über ThermoTrenner usw.. Trotz Realisierung dieser Maßnahmen muss in den Sommermonaten, mit Wassereintrittstemperaturen in das Gebäude  $\vartheta > 20\text{ °C}$  und Raumlufttemperaturen  $\vartheta > 25\text{ °C}$ , damit gerechnet werden, dass die Temperatur des kalten Trinkwassers längerfristig über  $\vartheta = 25\text{ °C}$  ansteigt.

Damit z.B. in der Trinkwasserinstallation eines Krankenhauses eine vorgegebene Temperaturgrenze für das kalte Trinkwasser (z.B.  $\vartheta = 25\text{ °C}$  oder  $\vartheta = 20\text{ °C}$ ) zu jedem Zeitpunkt vom Betreiber eingehalten werden kann, bedarf es immer eines geeigneten aktiven Prozesses zur Temperaturbegrenzung.

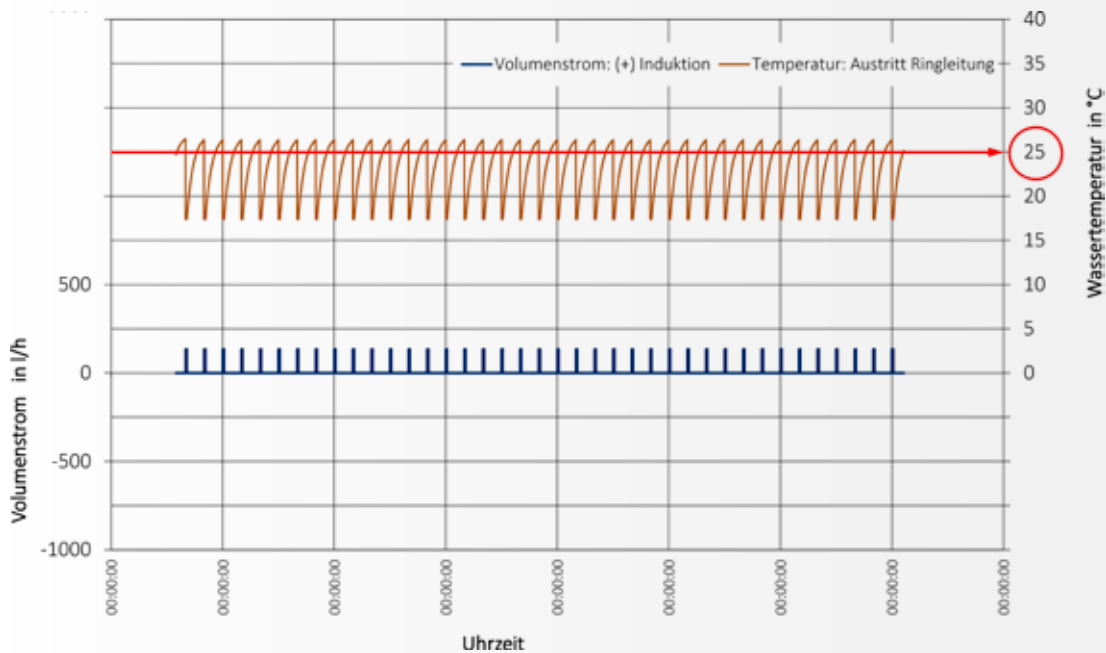
### Aktive Prozesse zur Temperaturhaltung im Kaltwasser

Als aktive Prozesse zur Temperaturbegrenzung werden temperaturgeführte Spülvorgänge oder die Kühlung des kalten Trinkwassers über eine Kaltwasserzirkulation bezeichnet. Da neuere Regelwerke wohl zu keinem Zeitpunkt mehr die Überschreitung einer Temperatur des kalten Trinkwassers von  $\vartheta = 25\text{ °C}$  zulassen, müssen die aktiven Maßnahmen zur Temperaturhaltung alle Leitungen bis hin zu den Anschlüssen für die Entnahmearmaturen umfassen. Im

Folgenden wird an einem konkreten Beispiel die Effektivität von aktiven Maßnahmen zur Temperaturhaltung aufgezeigt [3].

### Temperaturhaltung durch Spülprozesse

Der beispielhaft untersuchte Abschnitt einer Trinkwasserinstallation befindet sich im Kellergeschoss eines Krankenhauses (Bild 1). Die dabei detailliert untersuchte Ringleitung, die mit einem Strömungsteiler an die Stockwerksverteilungsleitung angeschlossen ist, befindet sich in Fließrichtung gesehen im vorderen Bereich der Verteilungsleitung. An die untersuchte Ringleitung wurden zwei Nasszellen, mit jeweils einem WC, einer Dusche und einem Waschtisch, angeschlossen. Die Ringleitung wurde mit Kupferrohren der Nennweite DN 15 ( $d_i \times s = 18 \times 1,0\text{ mm}$ ) ausgeführt und hat eine Länge von  $l = 20,5\text{ m}$  sowie einen Wasserinhalt von  $V = 4,12\text{ l}$ . Sie wird über eine in der abgehängten Decke horizontal verlegte Verteilungsleitung versorgt. Die Umgebungstemperatur in der abgehängten Decke und in der Installationsvorwand betrug im Messzeitraum im Mittel  $\vartheta = 27,0\text{ °C}$  und lag damit bereits deutlich über der für das kalte Trinkwasser zulässigen Grenztemperatur von  $\vartheta = 25\text{ °C}$ . Verteilungs- und



**Bild 3:** Grafische Darstellung der simulierten Werte für den Volumenstrom Induktion sowie der Austrittstemperaturen des Trinkwassers kalt in der Ringleitung mit Strömungsteiler bei einer Impulsspülung alle 4 Stunden. Quelle: L. Rickmann

Ringleitung wurden unter Berücksichtigung der allgemein anerkannten Regeln der Technik gedämmt. Die Entnahmestellen, die hinter dem untersuchten Strömungsteiler an die Verteilungsleitung angeschlossen sind, zeigt **Bild 1**.

Der betrachtete Gebäudeteil wird über eine Trinkwasserleitung versorgt, die in einem Rohrkanal geführt wird, in dem sich auch die Heizungsleitungen befinden. Durch die daraus resultierenden hohen Lufttemperaturen im Rohrkanal betrug die Temperatur des kalten Trinkwassers bereits beim Eintritt in die untersuchte Rohrnetzstruktur bis zu  $\vartheta = 20\text{ °C}$ . Erschwerend kam noch hinzu, dass die Umgebungslufttemperatur im Installationsbereich der untersuchten Rohrleitungen mit bis zu  $\vartheta = 27\text{ °C}$  auch noch vergleichsweise hoch war. Die hohe Umgebungslufttemperatur im Installationsraum resultiert aus der Wärmeabgabe, der in der Vorwandinstallation installierten Warmwasserleitungen. Die Leitungen sind in den Zirkulationskreislauf eingebunden und befanden sich im Messzeitraum dauerhaft in einem Temperaturbereich zwischen  $\vartheta = 55\text{ °C}$  und  $\vartheta = 60\text{ °C}$ . Maßnahmen zur thermischen Entkopplung wurden nicht umgesetzt [4].

Aus den Messdaten geht hervor, dass im betrachteten Zeitraum in den Nasszellen nur eine geringe Nutzung der Entnahmestellen

vorlag. Am Wochenende (Samstag und Sonntag) wurde die Trinkwasserinstallation nicht genutzt. Aufgrund der seltenen Nutzung der in Fließrichtung hinter dem Strömungsteiler angeordneten Entnahmearmaturen, war auch der Wasserwechsel durch Induktion<sup>1</sup> in der untersuchten Ringleitung gering (**Bild 2**). Damit trotz der ungünstigen Rahmenbedingungen – hohe Umgebungstemperaturen, hohe Wassereintrittstemperaturen, geringe Nutzungsfrequenz – ein kontrollierter Wasserwechsel sichergestellt werden kann, wurden Spülmaßnahmen etabliert. Dazu wurde am Ende des längsten Fließwegs eine zentrale Spüleinrichtung vorgesehen. Bedingt durch die Strömungsteiler fließt bei Spülvorgängen nicht nur in der Verteilungsleitung Wasser, sondern auch in den daran angeschlossenen Stockwerks-Ringleitungen. Dadurch kann mit einer zentral durchgeführten Spülmaßnahme der gesamte Wasserinhalt der Leitungsstruktur ausgetauscht werden.

Zum Zeitpunkt der messtechnischen Untersuchungen wurden pro Tag vier zeitgesteuerte Spülvorgänge realisiert. Täglich erfolgte um 05:30 Uhr ein „vollständiger“ Wasserwechsel. Weitere „einfache“ Wasserwechsel fanden

<sup>1</sup> Die Mitnahme von Wasser aus Stockwerksinstallationen durch den Hauptstrom in der Steig-/Verteilungsleitung

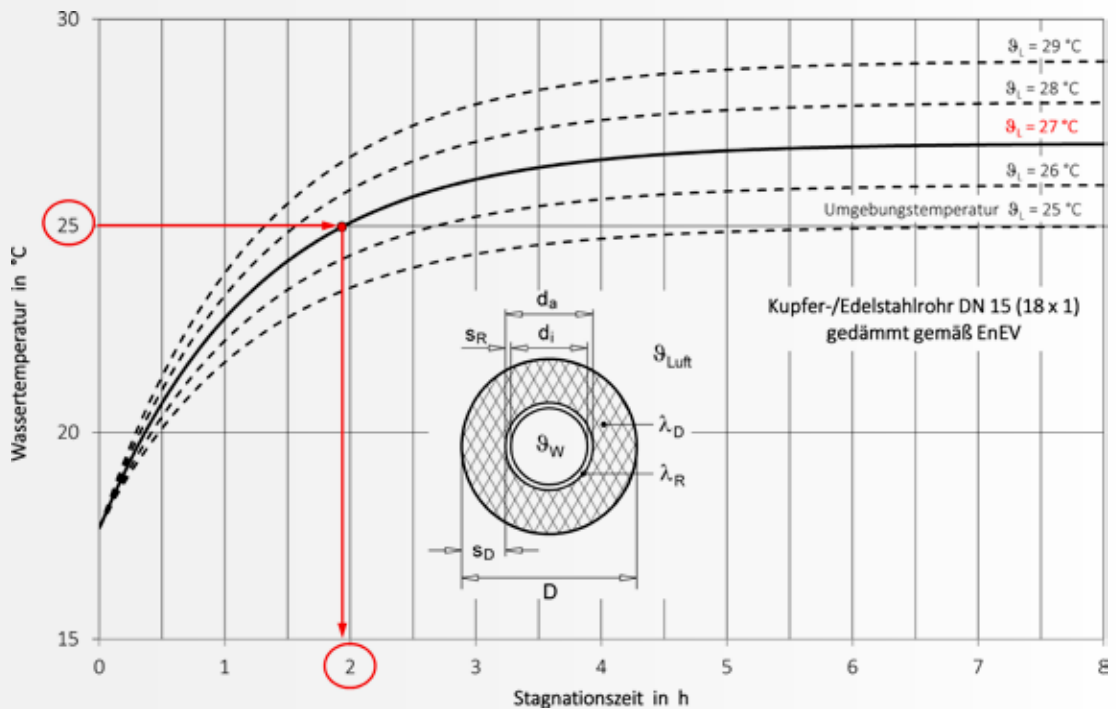


Bild 4: Temperaturerhöhung des kalten Trinkwassers in einer stagnierenden Leitung DN 15 (Werkstoff: Kupfer oder Edelstahl), gedämmt nach DIN 1988-200/EnEV. Quelle: B. Rickmann

um 11:30 Uhr, 17:30 Uhr und 23:30 Uhr statt. Die Spülvorgänge wurden mit vergleichsweise hohen Spülvolumenströmen von ca.  $\dot{V} = 2700$  l/h ausgeführt. Dadurch wurde auch in der untersuchten Ringleitung mit  $\dot{V} = 500$  l/h ein entsprechend hoher Induktionsvolumenstrom erzeugt (Bild 2). Die Spülmaßnahmen erfolgten mit einer Spüldauer von ca.  $t = 7$  min für den „vollständigen“ bzw. von ca.  $t = 3$  min für einen „einfachen“ Wasserwechsel. Die Spülvorgänge konzentrierten sich dadurch auf nur wenige Minuten am Tag, mit Stagnationsphasen von bis zu  $t = 6$  Std. Trotz der regelmäßigen und intensiven Spülmaßnahmen führen die langen Stagnationsphasen zwischen den Spülvorgängen immer wieder zu einem kontinuierlichen Temperaturanstieg auf Umgebungstemperatur von ca.  $\vartheta = 27$  °C. Mit den vorgenommenen Spülmaßnahmen konnte die Temperatur des kalten Trinkwassers daher immer nur kurzzeitig unter  $\vartheta = 25$  °C abgesenkt werden (Bild 3). Der in der untersuchten Trinkwasserinstallation etablierte Betrieb führte zu einem vergleichsweise hohen Spülvolumen von insgesamt ca.  $\dot{V} = 700$  l/d, das ungenutzt in die Kanalisation abgeleitet wurde.

Im Folgenden wird durch Simulation verschiedener Betriebszustände versucht,

sowohl ein verbessertes Temperatur- und Wasserwechselverhalten in den Verteilungs- und Ringleitungen zu erzielen als auch das Spülwasservolumen zu reduzieren.

### Wasserwechsel alle vier Stunden

Zur Sicherstellung eines Wasserwechsels alle 4 Stunden [5], der aktuell die Maximalanforderung aus nationalen und internationalen Empfehlungen, Richtlinien und Normen darstellt, wurden im vorliegenden Fall 6 Impulsspülungen pro Tag ausgelöst werden. In der vorgenommenen Simulation zur Ermittlung der aus dieser Betriebsweise resultierenden Temperaturverhältnisse wurde jeweils solange gespült, bis die niedrigste gemessene Eintrittstemperatur in die Verteilungsleitung von  $\vartheta = 17,7$  °C erreicht wurde (Bild 3). Es ist zu erkennen, dass die Temperatur des kalten Trinkwassers, trotz der Verkürzung der Stagnationszeiten auf weniger als vier Stunden, immer noch nicht dauerhaft unter  $\vartheta = 25$  °C gehalten werden kann. Gegenüber dem im Messzeitraum festgestellten Betriebszustand konnte die mittlere Temperatur des kalten Trinkwassers aber von  $\vartheta = 24,7$  °C auf  $\vartheta = 23,3$  °C abgesenkt werden. Ein weiterer positiver Effekt ergab sich aus der Reduzierung des



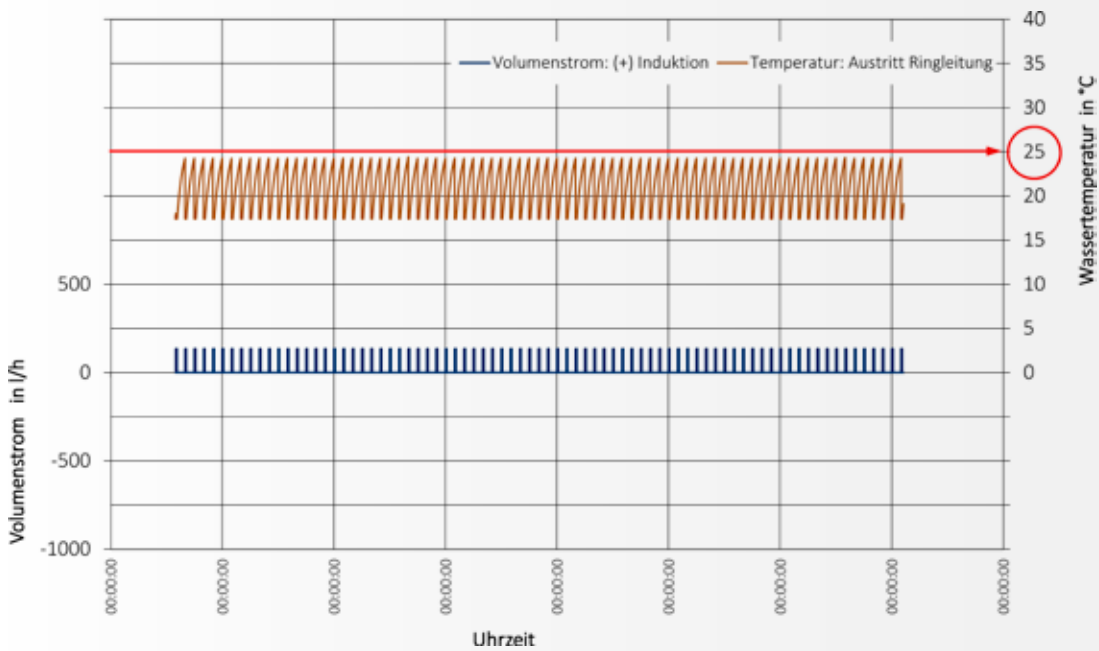


Bild 5: Grafische Darstellung der simulierten Werte für den Volumenstrom Induktion sowie der Austrittstemperaturen des Trinkwassers kalt in der Ringleitung mit Strömungsteiler bei einer Impulsspülung alle 2 Stunden. Quelle: L. Rickmann

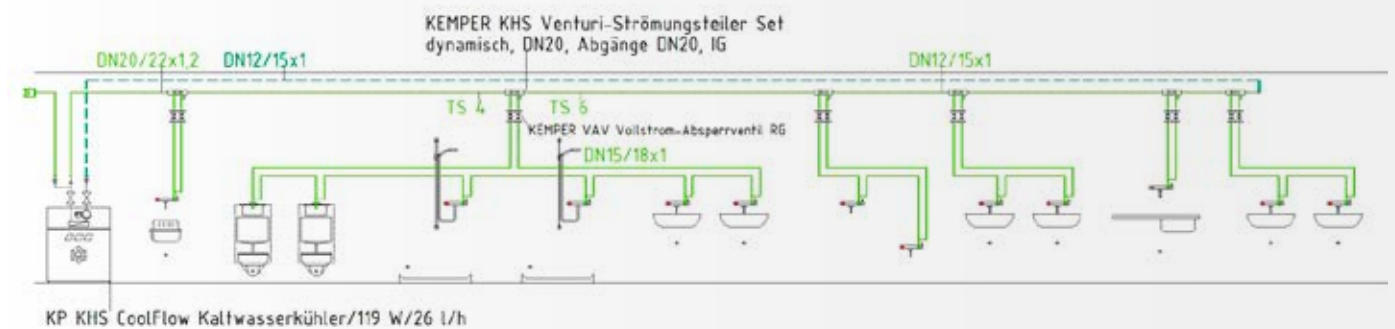


Bild 6: Konzeptioneller Aufbau der Trinkwasserinstallation mit einer Kaltwasserzirkulation

Spülwasservolumens, dass bei der alternativen Betriebsweise um  $\dot{V} = 420$  l/d verringert werden konnte. Dies bedeutet eine Reduktion um 58% bzw. um  $\dot{V} = 153$  m<sup>3</sup>/a (Tabelle 1).

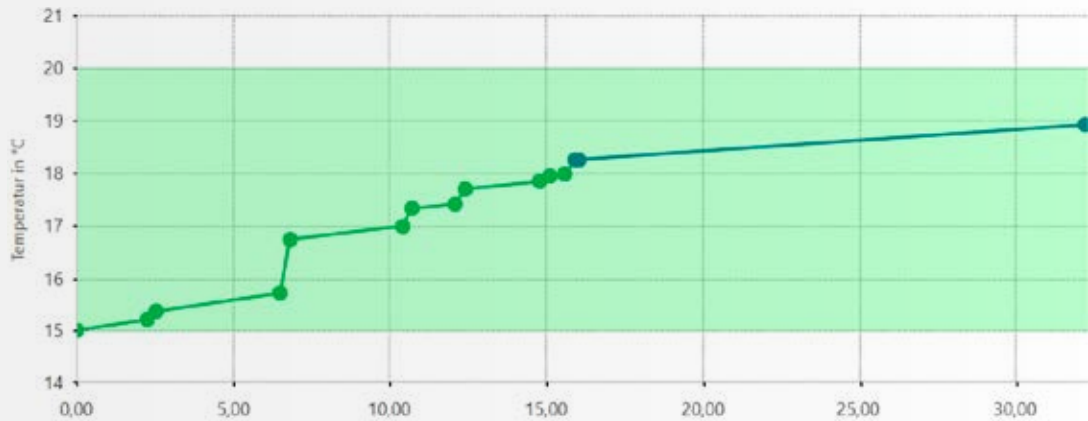
### Wasserwechsel alle zwei Stunden

Zur Absenkung der Temperatur des kalten Trinkwassers unter  $\vartheta = 25$  °C muss der Zeitabstand

zwischen zwei Spülvorgängen weiter verringert werden. Zur Ermittlung eines geeigneten Spülintervalls wurde für den Rohrdurchmesser DN 15 (18 x 1) die Temperaturerhöhung des kalten Trinkwassers bei Stagnation berechnet. Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass sich bei einer Umgebungstemperatur von  $\vartheta = 27$  °C bereits nach ca.  $t = 2$  Std. die Temperatur des in einer nach EnEV [6] gedämmten Kupfer-/Edelstahlrohrleitung

Tabelle 1: Spülvolumina in den untersuchten Varianten

| Bezeichnung                      | Einheit           | Messung | Impulsspülung alle 4 h | Impulsspülung alle 2 h | kontinuierliche Spülung |
|----------------------------------|-------------------|---------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| tägliches Spülvolumen            | l/d               | 720     | 300                    | 600                    | 400                     |
| tägliche Reduzierung/Erhöhung    | l/d               |         | -420                   | -120                   | -320                    |
| jährliche Reduzierung/Erhöhung   | m <sup>3</sup> /a |         | -153                   | -44                    | -117                    |
| prozentuale Reduzierung/Erhöhung | %                 |         | -58                    | -17                    | -44                     |



**Bild 7:** Temperaturverlauf bei einer Kaltwasserzirkulation im hydraulisch ungünstigsten Zirkulationskreis (Sollwerttemperatur  $\vartheta < 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

## i | AUTOREN VITA



Dr. LARS RICKMANN

- 2004 – heute Senior Manager in einem führenden Unternehmen der Sanitär- und Heizungsbranche
- 2011 – 2015 Promotionsstudium an der Universität für Gesundheitswissenschaften, Medizinische Informatik und Technik, Hall i. T.
- 2002 – 2004 Studium des Wirtschaftsingenieurwesens an der Fachhochschule Bielefeld
- 1999 – 2002 Studium des Bauingenieurwesens an der Fachhochschule Münster

**Kontakt** rickmann@fh-muenster.de



TIMO KIRCHHOFF, M. Eng.

- Seit 2018 Leiter Produktmanagement, Gebr. Kemper GmbH + Co. KG
- 2011 – 2017 Produktmanager, Stellv. Leiter Produktmanagement
- 2009 – 2011 Wissenschaftlicher Mitarbeiter (Projektingenieur), Fachhochschule Münster
- 2009 – 2011 Studium des Technischen Managements in der Gebäudetechnik an der Fachhochschule Münster, Abteilung Steinfurt
- 2006 – 2009 Studium Energie · Gebäude · Umwelt mit Schwerpunkt Gebäudetechnik an der Fachhochschule Münster, Abteilung Steinfurt

DN 15 (18 x 1,0) stagnierenden Trinkwassers von  $\vartheta = 17,7$  auf über  $\vartheta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  erwärmt (**Bild 5**).

Basierend auf dieser Erkenntnis wurde das Temperaturverhalten in der Ringleitung versuchsweise für Spülintervalle von  $t = 2\text{ h}$  berechnet (**Bild 6**). In dieser Optimierungsvariante wurde sowohl der angestrebte Wasserwechsel erreicht als auch die Grenztemperatur von  $\vartheta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  dauerhaft unterschritten. Allerdings steigt das Spülvolumen jetzt wieder auf ca.  $\dot{V} = 600\text{ l/d}$  an. Dadurch würde diese Betriebsweise nur zu einer Reduzierung des Spülvolumens um  $\dot{V} = 120\text{ l/d}$  bzw.  $\dot{V} = 44\text{ m}^3/\text{a}$  führen (**Tabelle 1**). Diese Betriebsweise entspricht in etwa einer temperaturgeführten Spülmaßnahme mit Zweipunktregelung (Einschalttemperatur  $\vartheta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  / Ausschalttemperatur  $\vartheta = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

### Konstanter Spülvolumenstrom

Für Spülmaßnahmen gilt grundsätzlich die sofort nachvollziehbare Erkenntnis: Je kürzer der Abstand zwischen den Spülereignissen, desto geringer ist die Temperaturerhöhung des kalten Trinkwassers. Durch Simulationsrechnung konnte als Spüloptimum ein konstanter Spülvolumenstrom mit lediglich  $\dot{V} = 16,8\text{ l/h}$  ermittelt werden, der dazu führt, dass gerade noch die vorgegebene Sollwerttemperatur von  $\vartheta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  am Spülventil erreicht bzw. in allen vorgeschalteten Teilstrecken – auch in den Teilstrecken der Ringleitungen – unterschritten wird.

Gegenüber den Impulsspülungen konnten mit diesem konstanten Spülvolumenstrom die Temperaturen des kalten Trinkwassers und

auch das Spülvolumen nochmals deutlich reduziert werden. Im Vergleich zur Ausgangssituation führte diese Betriebsweise zu einer Einsparung von 44% bzw.  $\dot{V} = 117 \text{ m}^3/\text{a}$  (Tabelle 1). Mit der optimierten Variante konnte durchgehend ein vierfacher Wasserwechsel pro Stunde sichergestellt werden. Neben dem Wasserwechsel verbessert sich auch noch das Temperaturniveau signifikant. Während bei den Impulsspülungen im Ausgangszustand noch 55% der Messwerte über  $\vartheta = 25 \text{ °C}$  lagen, fanden bei einer kontinuierlichen Spülung keine Überschreitungen mehr statt. Die Eintritts- und Austrittstemperaturen der untersuchten Ringleitung lagen dabei im Tagesverlauf konstant bei ca.  $\vartheta = 21,6 \text{ °C}$  bzw.  $\vartheta = 23,2 \text{ °C}$ , unabhängig von den Betriebs- und Nutzungsverhältnissen.

Impulsspülungen, die dem reinen Wasseraustausch dienen, sind zur dauerhaften Absenkung der Temperaturen in Stockwerks-/Ringleitungen nicht geeignet, da die Wassertemperatur nach einem Spülvorgang innerhalb von weniger als  $t = 2 \text{ h}$  wieder auf Umgebungslufttemperatur ansteigt (Bild 3). Zu den Impulsspülungen zählen auch Spülmaßnahmen, die dezentral an Entnahmemarmaturen durchgeführt werden.

Idealerweise muss der Spülvolumenstrom bei einer vorgegebenen Sollwerttemperatur für das kalte Trinkwasser genau die Wärmemenge abführen, die über die Oberfläche der Rohrleitung aufgenommen wird. Die vorstehenden Überlegungen zur Optimierung von Spülprozessen zeigen, dass die Abfuhr der aufgenommenen Wärme nur dann effektiv erreicht werden kann, wenn mit geringen Volumenströmen über einen längeren Zeitraum bzw. durchgehend gespült wird.

Lang andauernde Spülvorgänge mit kleinen Volumenströmen können über automatisch spülende Entnahmemarmaturen nicht realisiert werden. Daher ist eine kontrollierte dauerhafte Reduzierung der Temperatur des kalten Trinkwassers in einer größeren Leitungsstruktur mit dieser Technik nicht möglich. Da Entnahmemarmaturen mit automatisch auslösenden Spülprozessen i.d.R. komplex aufgebaut sind, muss aus gegebenem Anlass an die Ergebnisse einer Expertenanhörung am 31.03.2004 im Universitätsklinikum Bonn erinnert werden, dass „berührungslose Entnahmemarmaturen [...] mit Pseudomonaden und Legionellen besiedelt sein können. Sie bedürfen einer besonderen Aufmerksamkeit und Wartung“ [7]. Dieser Hinweis ist nach wie vor aktuell und muss bei Einsatz entsprechend konstruierter Entnahmemarmaturen beachtet werden.

### Kaltwasserzirkulation mit Kühlung

Spülmaßnahmen zur Temperaturhaltung des kalten Trinkwassers sind grundsätzlich nur dann ökologisch und ökonomisch sinnvoll darstellbar, wenn auch in den Sommermonaten das Trinkwasser vom WVU mit niedrigen Temperaturen ( $\vartheta < 15 \text{ °C}$ ) in das Gebäude eingespeist werden kann. Insbesondere bei oberflächennaher Trinkwassergewinnung ist das in den Sommermonaten allerdings häufig über einen längeren Zeitraum nicht der Fall. Bei solchen Gegebenheiten kann nur noch eine aktive Kühlung des Trinkwassers im Kreislauf die Einhaltung der geforderten Temperaturen zu jedem Zeitpunkt und zu jeder Jahreszeit sicherstellen.

Eine Kühlung des Trinkwassers im Kreislauf wurde erstmalig in den Hauptverteilungsleitungen von Kreuzfahrtschiffen realisiert. In England und Schottland wird mittlerweile eine Kreislaufkühlung für Intensivstationen in Krankenhäusern empfohlen, in denen Patienten durch eine Immunschwäche, z. B.



## INTELLIGENTE PLANUNG IST EINFACH. MIT UNSEREN DIGITALEN SERVICES.

Mit dem **Wildeboer BIM-Converter** wird intelligente Planung einfach Wirklichkeit.

- Planung mit dynamischen Berechnungsdaten in Echtzeit
- effektive Kollisionskontrolle durch detaillierte geometrische Daten
- direkte Schnittstellen zu liNear, AutoCAD und Revit
- Export von 2D- und 3D-Dateien im DWG- und DXF-Format

**SO WIRD BIM-PLANUNG  
WIRKLICH EINFACH.**

Mehr unter [wildeboer.de/bim](http://wildeboer.de/bim)



Prof. Dr. WERNER MATHYS

- 1976 – 2013 Leiter des Bereichs Umwelthygiene/Umweltmedizin am Institut für Hygiene der WWU Münster, Forschungsschwerpunkt: Fakultative Krankheitserreger in Trinkwasserinstallationen von Gebäuden
- 1994 Habilitation/Lehrbefugnis für das Gesamtgebiet Hygiene
- 1990 Anerkennung als Krankenhaushygieniker durch den Präsidenten des Bundesgesundheitsamtes (heute RKI)
- 1967 – 1975 Studium der Naturwissenschaften (Biologie, Chemie) an der WWU Münster, 1975 Promotion zum Dr. rer. nat.



Prof. Dipl.-Ing. BERND RICKMANN

- 2011 Beratungstätigkeiten mit dem Schwerpunkt Softwareentwicklung
- 1980 – 2011 Professor an der Fachhochschule Münster, Fachbereich Energie · Gebäude · Umwelt, mit den Lehrgebieten Sanitär- und Krankenhaustechnik, computergestütztes Planen  
Mitarbeit bei der Erstellung von Normen und Richtlinien  
Mitautor von Beuth-Kommentaren zu den Normen der Gebäude- und Grundstücksentwässerung sowie der Trinkwasserinstallation
- 1974 – 1980 Technischer GF eines Handwerksunternehmens (Sanitär- und Heizungstechnik)
- 1970 – 1974 Studium an der Technischen Universität Berlin mit dem Schwerpunkt Energie- und Verfahrenstechnik
- 1967 – 1970 Studium an der der SIA für Bauwesen Berlin mit dem Schwerpunkt Heizungs- und Gesundheitstechnik



Prof. Dr.-Ing. CARSTEN BÄCKER

- 2012 – heute Prof. Dr. Ing. Carsten Bäcker
- 2012 – heute Professor für das Lehr- und Forschungsgebiet „Projektierung und Simulation gebäudetechnischer Systeme“ an der Fachhochschule Münster, Fachbereich Energie · Gebäude · Umwelt
- 2010 – 2012 Produktmanager für Sanitärtechnik / Armaturen
- 2011 – 2012 Lehrbeauftragter
- 2001 – 2010 Wissenschaftlicher Mitarbeiter (Projektingenieur)
- 2005 – 2010 Promotionsstudent zur Ausarbeitung einer Doktorarbeit an der Universität Duisburg-Essen, Institut für Energie- und Umweltverfahrenstechnik, Fachgebiet Verfahrenstechnik/Wassertechnik,
- 2001 – 2003 Studium des Technischen Managements in der Gebäudetechnik an der Fachhochschule Münster, Abteilung Steinfurt
- 1997 – 2001 Studium der Versorgungs- und Entsorgungstechnik an der Fachhochschule Münster, Abteilung Steinfurt

aufgrund von Knochenmarktransplantationen, besonders gefährdet sind [8]. In Deutschland liefern darüber hinaus eine Reihe von Pilotprojekten, mit einer dauerhaften Temperaturhaltung für das kalte Trinkwasser unter  $\vartheta = 20\text{ °C}$ , in Bezug auf Funktionalität und Wirtschaftlichkeit außerordentlich positive Ergebnisse.

Damit in konventionellen Installationskonzepten ein Kreislaufsystem für das kalte Trinkwasser realisiert werden kann, muss ein zusätzliches Rohrleitungssystem aufgebaut werden. In Strömungsteiler-Installationen [9] ist das nicht erforderlich, da das bereits für die Bedarfsdeckung vorhandene Rohrleitungssystem für die Kaltwasserzirkulation geeignet ist und mitgenutzt werden kann (vgl.: **Bild 1** mit **Bild 6**). Bereits bestehende KHS-Anlagen können daher i.d.R. mit geringem Aufwand von Spültechnik auf Kreislaufkühlung umgestellt werden. Im Gegensatz zu konventionellen Installationen ermöglichen Strömungsteiler-Installationen die kontrollierte Temperaturhaltung in allen Leitungsteilen bis in den Anschluss der Entnahmemarmaturen hinein. Berechnungsergebnisse zeigen, dass auf Grund der geringen Temperaturdifferenzen zwischen der Umgebungsluft und dem kalten Trinkwasser der Wärmeeintrag gering ist (**Bild 7**). Im Gegensatz zur Warmwasserzirkulation sind dadurch auch die zur Temperaturhaltung erforderlichen Zirkulationsvolumenströme (PWC-C) gering [10]. Im konkreten Fall wird für eine dauerhafte Temperaturhaltung des kalten Trinkwassers unter  $\vartheta = 20\text{ °C}$  nur eine Kälteleistung von etwas mehr als 100 W benötigt (**Bild 6**). Dementsprechend ist auch der Kaltwasser-Zirkulationsvolumenstrom mit  $\dot{V} = 26\text{ l/h}$  gering und entspricht in der Größenordnung dem zuvor berechneten konstanten Spülvolumenstrom, der das kalte Trinkwasser im Beispielfall unter  $\vartheta = 25\text{ °C}$  halten kann.

## Fazit

Als sichere Temperatur für das kalte Trinkwasser wird in der DVGW-Wasserinformation 90 nur eine Temperatur von  $\vartheta < 20\text{ °C}$  angesehen. Sofern zur Sicherstellung einwandfreier trinkwasserhygienischer Verhältnisse die Einhaltung dieser Grenze als unabdingbar angesehen wird, muss ein aktiver Prozess zur Temperaturhaltung des kalten Trinkwassers etabliert werden.



Eine ganzjährige Temperaturhaltung unter  $\vartheta = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , z.B. in einer Krankenhausinstallation, kann ökonomisch nur mit einer Zirkulation des kalten Trinkwassers über einen Kaltwasserkühler sichergestellt werden. Mit Einsatz der Kaltwasserzirkulation können nicht nur die Kaltwassertemperaturen unabhängig von inneren und äußeren Wärmelasten dauerhaft begrenzt werden. Gegenüber dem effektivsten temperaturgeführten Spülverfahren können zusätzlich auch noch die Betriebskosten um etwa 70 % reduziert werden.

### Literaturverzeichnis:

- [1] Kirchhoff, T. u.a. (2019) - Wenn thermische Trennung nicht ausreicht - SBZ 06/19, S. 38 -44
- [2] DVGW-Information WASSER Nr. 90 03/2017 - Informationen und Erläuterungen zu Anforderungen des DVGW-Arbeitsblattes W 551
- [3] Rickmann L - Einfluss neuer Konzepte bei Planung und Konstruktion von Trinkwasserinstallationen in Großgebäuden auf die hygienische Qualität des Trinkwassers, Promotionsarbeit UMIT, September 2014
- [4] T. Kirchhoff u.a. – Rohrführung für Erhalt der Trinkwasserhygiene entscheidend, SanitärJournal, Sonderheft Installationstechnik Sanitär 2017
- [5] UBA Umweltbundesamt (2007) - Ratgeber Trink was – Trinkwasser aus dem Hahn. Gesundheitliche Aspekte der Trinkwasser-Installation. Informationen und Tipps für Mieter/Haus- und Wohnungsbesitzer.
- [6] EnEV - Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden
- [7] Exner et al. - Ergebnisse einer Expertenanhörung am 31.03.2004 im Universitätsklinikum Bonn. Hausinstallationen, aus de-nen Wasser für die Öffentlichkeit bereitgestellt wird, als potenzielles Infektionsreservoir mit besonderer Berücksichtigung von Einrichtungen zur medizinischen Versorgung – Kenntnisstand, Prävention und Kontrolle. Bundesgesundheitsbl - Gesundheitsforsch – Gesundheitsschutz. Springer Medizin Verlag. 49:681-686 (2006).
- [8] HTA Part A (2006). Health Technical Memorandum 04-01. The control of Legionella, hygiene, "safe" hot water, cold water and drinking water systems. Design, installation and testing. DH Estates and Facilities Division. The Stationery Office. ISBN 0-11-322744-2 978-0-11-322744-0
- [9] Rickmann, L. u.a. – Reduzierung der Kaltwassertemperatur in Stockwerksleitungen durch Erhöhung des Wasserwechsels, BTGA-Almanach 2019
- [10] Markert, F. – Entwicklung eines Berechnungskonzepts für die Kaltwasserzirkulation in Gebäuden zur Erhaltung der Trinkwasserhygiene, Masterarbeit FH Münster 2015



**Volumenströme  
sicher & fehlerfrei  
messen.**

## Die neue Generation der Klimamesstechnik.

Smarter. Schneller. Besser.  
Das Klima-Messgerät testo 400.

- **Smarter:** Mit Touch-Display so intuitiv zu bedienen wie Ihr Smartphone.
- **Schneller:** Messung mit vollständiger Dokumentation direkt beim Kunden abschließen.
- **Besser:** Normkonform und fehlerfrei durch jede Messung dank Mess-Assistenten.

[www.testo.de/testo-400](http://www.testo.de/testo-400)



# Messtechnische Evaluation von thermisch und elektrisch angetriebener Kälteerzeugung



*Thermisch angetriebene (Adsorptions-)Kältemaschinen können mit einem verhältnismäßig geringen elektrischen Energieaufwand bzw. mit einer hohen elektrischen Leistungszahl Kälte bereitstellen. Wird die zum Antrieb erforderliche Wärme aus industrieller Abwärme bereitgestellt, ist diese Kältebereitstellung energetisch effizienter als die Kältebereitstellung über eine Kompressionskältemaschine. Wird die Wärme jedoch in Kraft-Wärme-Kopplung bereitgestellt, ist die primärenergetische Bewertung sowohl von mehreren Teilwirkungsgraden als auch den Primärenergiefaktoren für den eingesetzten Brennstoff und die erzeugte bzw. bezogene elektrische Energie abhängig. Eine umfangreiche Messkampagne im Sommer 2018 liefert unter realitätsnahen Randbedingungen in einer Laborumgebung detaillierte Energiekennzahlen für einen typischen Tagesgang des Kältebedarfs. Damit gelingt es, Teilenergiekennwerte für die Planungspraxis abzuleiten und das Gesamtsystem energetisch mit einer konventionellen Kompressionskältemaschine zu vergleichen.*

## Experimental evaluation of thermally and electrically driven cooling systems

*Thermally driven (adsorption) chillers can provide cold energy with a relatively small amount of electrical energy or with a high electrical coefficient of performance, respectively. If the heat required as driving energy is provided by industrial waste heat, this kind of cold generation is more energy-efficient than the supply of cold via a compression cooling machine. If the heat is provided in combined heat and power, the primary energy rating will depend on both the number(s) of partial efficiencies and the primary energy factors for the fuel used as driving energy and the electrical energy which is fed in the public grid. An extensive measurement campaign in the summer of 2018 delivered detailed energy figures for a typical daily cycle of cooling demand under realistic boundary conditions in a laboratory environment. Based on the evaluation of the overall energy balance, we derive parameters for planning practice and compare the tri-generation system with a conventional compression cooling system.*

VON  
JENS PFAFFEROTT  
SASCHA RISSMANN



**Bild 1:** Ansicht des  $\mu$ KWKK-Labors (von links nach rechts: Schaltschrank mit Anbindung an das elektrische Microgrid, Blockheizkraftwerk, Wärmespeicher, reversible Adsorptions- und Kompressionskältemaschine und Kältespeicher) mit Messdatenerfassung und Klimakammer (hier mit Prozessthermostaten, rechts).

## 1. Einleitung und Versuchsziel

Am Institut für Energiesystemtechnik der Hochschule Offenburg wird ein kleinskaliges Energieverbundsystem mit reversibler Wärmepumpe und Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung betrieben, siehe **Bild 1**. In Verbindung mit einem elektrischen Microgrid und einer Doppelklimakammer können hier innovative Betriebsführungsstrategien für einen netzdienlichen Betrieb unter praxisnahen Laborbedingungen entwickelt und evaluiert werden [1]. Dabei können sowohl der Betriebszustand des elektrischen Netzes als auch dynamische Lastprofile für den Wärme- und Kältebedarf realitätsnah unter kontrollierten Laborbedingungen abgebildet werden.

In der vorliegenden Studie wird der Betrieb einer Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung bestehend aus Blockheizkraftwerk (BHKW) und Adsorptionskältemaschine (AdKM) mit dem Betrieb einer konventionellen Kompressionskältemaschine (KKM) verglichen. Diese labortechnische Analyse baut auf anderen numerischen und messtechnischen Arbeiten auf und zeichnet sich dadurch aus, dass der Anlagenbetrieb marktverfügbarer Komponenten unter gleichen, kontrollierbaren und dynamischen Betriebsbedingungen bewertet werden kann.

## 2. Bewertungskriterien in Literatur und Normung

Obwohl seit den 1990er Jahren die Kälteerzeugung in Energieverbundsystemen regelmäßig evaluiert wurde, hat sich bis heute kein einheitlicher

Standard etabliert. Dies ist maßgeblich darauf zurückzuführen, dass in Energieverbundsystemen und insb. beim Vergleich zwischen elektrisch und thermisch angetriebener Kälteerzeugung verschiedene Energieträger in die Bewertung eingehen: Fossile Brennstoffe, regenerativ bereitgestellte Energie, Wärme, Kälte sowie erzeugte und bezogene elektrische Energie.

In der täglichen Planungspraxis stellt sich oft die Frage, welche Bewertungskriterien für ein konkretes Projekt gut (und regelkonform) angewendet werden können. Meist legt die Energieeinsparverordnung (aktuell in der Fassung EnEV 2017 [2]) mit den dort vereinbarten Rechenmethoden auch den Planungsweg fest. Die vorliegende Studie fokussiert daher auf die primärenergetische Bewertung der Kältebereitstellung und die Bestimmung wichtiger Teilenergiekennwerte.

### 2.1 Literaturrecherche

In der Literatur werden meist Bewertungssysteme vorgestellt, die eine einheitliche Bewertung auf Basis von Primärenergie, von CO<sub>2</sub>-Emissionen und/oder einer energiewirtschaftlichen Rechnung vornehmen.

- **Übersicht zu Bewertungskriterien.** Wu und Wang [3] haben 2006 eine umfassende Zusammenstellung unterschiedlicher KWKK-Systeme vorgestellt, wobei Energieflussbilder zur Darstellung der Energieeffizienz einer gekoppelten Erzeugung genutzt werden. Damit gelingt eine einheitliche Darstellung sehr unterschiedlicher Anlagenkonzepte. Miara et al. [4] stellen die Verwendung von

Leistungs- und Arbeitszahlen in der Planung und in der Anwendung für das betriebliche Energiemonitoring von elektrisch betriebenen Wärmepumpen vor. Morgenstern et al. [5] bewerten mit in der Planungspraxis üblichen Kennzahlen unterschiedliche technische Konzepte zur thermischen Kältebereitstellung.

- **Solare Kühlung.** Da sich viele Arbeiten mit der Effizienz der solaren Kältebereitstellung beschäftigt haben, stehen aus diesem Bereich sehr umfangreiche, vergleichende Untersuchungen zur Verfügung. Eine gute Übersicht liefern Henning et al. [6]. Dabei werden Kennzahlenmodelle auch für die Planung dieser Anlagenkonzepte eingesetzt. Mugnier et al. [7] haben eine Methode vorgestellt, um auch komplexe Kälteanlagen vergleichend bewerten zu können und wenden diese auf Messdaten aus realisierten Anlagen an. Eicker et al. [8] und Lazzarin [9] vergleichen mit ähnlichen Methoden die solarthermische Kühlung mit der Kombination von Photovoltaik und Kompressionskältemaschine. Die Bewertung der Systemkonzepte hängen demnach stark von Standort, Nutzung, Lastprofil und den energiewirtschaftlichen Randbedingungen ab.
- **Energiewirtschaftliche Bewertungskriterien.** Stellvertretend für die Arbeiten zur primärenergetischen Evaluation von KWKK-Systemen sei das energiewirtschaftliche Planungswerkzeug von Chicco und Mancarella [10] genannt. Schicktanz et al. [11] und Henning et al. [12] haben ein Bewertungsmodell (weiter-)entwickelt, das die thermodynamischen Zusammenhänge modellhaft beschreibt und typische Leistungskennzahlen marktverfügbarer Komponenten berücksichtigt. Die Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung liefert im direkten Vergleich mit der konventionellen Kältebereitstellung demnach dann eine primärenergetische Einsparung, wenn der elektrische Wirkungsgrad des Blockheizkraftwerks größer als 32 % ist. (Mit einem geringeren Primärenergiefaktor für elektrische Energie steigt dieser Wert an, siehe Kapitel 5.3.)
- **Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung in der Simulation.** Bugaj [13] stellt eine umfangreiche Simulationsstudie zur Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung im Vergleich zur getrennten Erzeugung vor. Diese theoretische Untersuchung zeigt, dass die energiewirtschaftliche Bewertung sehr stark von den wirtschaftlichen und

weniger stark von den technischen Randbedingungen abhängt. Maraver et al. [14] weisen auf das Potenzial der Biomassenutzung hin. Erwartungsgemäß ist die Biomassenutzung primärenergetisch zwar vorteilhaft (insb. bei einem verhältnismäßig hohen Verhältnis von Wärme- zu Kältebedarf). Die dafür erforderliche Anlagentechnik ist aber aufwendig und heute kaum marktverfügbar.

- **Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung in der Praxis.** Henning et al. [15] stellen unterschiedliche, klein- und mittelskalige KWKK-Anlagenkonzepte in verschiedenen Anwendungsgebieten und in mehreren europäischen Ländern vor. Die einheitliche Bewertung dieser Konzepte, zeigt Effizienzgewinne der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung gegenüber der getrennten Erzeugung, wobei die energiewirtschaftlichen Vorteile erst in einer ganzjährigen Bewertung deutlich werden. Das KWKK-System ist nur dann vorteilhaft, wenn das BHKW ganzjährig und netzdienlich betrieben wird. Eine Marktstudie [16] stellt die Randbedingungen, unter denen eine Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung wirtschaftlich betrieben werden kann, zusammen und leitet daraus typische Anwendungsszenarien auf: Hotels und Krankenhäuser mit weniger als 200 Zimmern bzw. Betten, große Bürogebäude, Gewerbebetriebe und größere Supermärkte. Backes et al. [17] stellen die Ergebnisse aus drei kleinskaligen KWKK-Anlagen im Feldtest vor und weisen die hohe Energieeffizienz dieser Anlagen in der Betriebspraxis nach. Neben den hydraulischen und regelungstechnischen Aspekten spielen verbesserte Betriebsführungsstrategien eine wesentliche Rolle, um die jährliche Betriebszeit des Blockheizkraftwerks zu erhöhen. Dies führt wiederum zu einem wirtschaftlicheren Betrieb des Gesamtsystems. Diese Ergebnisse werden regelmäßig in Monitoringprojekten bestätigt, beispielsweise für die Energiezentrale der Hochschule Offenburg [18].
- **Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung im Labor.** In den letzten 20 Jahren sind viele kleinskalige KWKK-Systeme an Forschungseinrichtungen und Hochschulen realisiert worden. Becker et al. [19] stellen ein System mit flexiblen Wärmeerzeugern und einer emulierten Kältebelastung als Hardware-in-the-Loop-System vor. Mit Hilfe von Energieflussbildern werden verschiedene Anlagenkonzepte insb. mit solarthermischer

Unterstützung, analysiert. Angrisani et al. [20] haben ein kleinskaliges System mit Adsorptionskältemaschine experimentell untersucht und zeigen, dass das Einsparpotenzial sehr stark vom Lastprofil und dem Wirkungsgrad des Blockheizkraftwerks abhängt. Kong et al. [21] und Huangfu et al. [22] haben ein vergleichbares System mit einer Adsorptionskältemaschine experimentell untersucht. Sie zeigen ebenfalls, dass die Effizienz des Gesamtsystems stark von den Betriebsbedingungen abhängt, und weisen auf die Bedeutung der daraus resultierenden Betriebsführung hin.

Die in der vorliegenden Studie vorgestellte, kleinskalige Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung ist in ein Energieverbundsystem eingebunden und wurde nach den in der Literatur genannten, wirtschaftlichen Gesichtspunkten dimensioniert. In der Versuchsdurchführung wird ein typisches Lastprofil unter praxisnahen Laborbedingungen aufgeprägt. Das zur Datenauswertung in Kapitel 5 verwendete Modell folgt den oben beschriebenen Ansätzen zur primärenergetischen Evaluation.

## 2.2 Kennzahlen in Normen und Richtlinien

Leider hat sich in der Normung noch kein Bewertungsverfahren etabliert, das in vollem Umfang sowohl auf die Kältebereitstellung mit elektrisch angetriebenen Verdichtern als auch mit thermisch angetriebenen Verfahren angewendet werden kann:

- Bei Produktangaben für Flüssigkeitskühlsätze mit elektrisch angetriebenen Verdichtern wird grundsätzlich auf die Norm EN 14511 [23] Bezug genommen. Die im Folgenden vorgestellten, dynamischen Betriebsmessungen entsprechen in guter Näherung den Prüfabfolgen im Anhang C von Blatt 3 dieser Norm, wobei die Messdaten in Anlehnung an das Kalorimeter-Prüfverfahren gemäß Anhang A ausgewertet werden.
- EN 14825 [24] bewertet die Energieeffizienz von Flüssigkeitskühlsätzen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern über ein ganzes Jahr. Allerdings ist es nicht möglich, mit den vorliegenden Messergebnissen eine ganzjährige Bewertung vorzunehmen.
- Ein vergleichbares Verfahren zur Bestimmung der saisonalen Arbeitszahl im Kühlbetrieb wird in der EUROVENT-Richtlinie [25] zur Zertifizierung von Flüssigkeitskühlsätzen vereinbart.

- In der Planungspraxis wird oft auf die Richtlinie VDI 4650 hingewiesen. Allerdings ist sie bei der Berechnung des Jahresenergiebedarfs bzw. -verbrauchs nur auf den Heizfall anwendbar. In Blatt 1 [26] wird sowohl die berechnete Jahresarbeitszahl (SCOP) als auch die gemessene Jahresarbeitszahl (SPF) für Kompressionswärmepumpen definiert. In Blatt 2 [27] wird für Adsorptionswärmepumpen die Heizzahl  $\zeta$  als Bewertungsgröße eingeführt. Damit ist diese Richtlinie für die modellbasierte Auswertung der Messergebnisse leider nicht direkt anwendbar. Die Auswertung orientiert sich allerdings an den in der Richtlinie vereinbarten Randbedingungen.
- Um detailliertere Aussagen zur Effizienz der thermisch und elektrisch angetriebenen Kältebereitstellung treffen zu können, wäre eine messtechnische Analyse der Einzelkomponenten wünschenswert, insb. im Vergleich zwischen Kältemittel-Verdichter und Adsorptionskältemaschine. Leider vereinbart die Norm EN 12900 [28] für die Darstellung von Leistungsdaten für Verdichter völlig andere Randbedingungen, so dass hier eine vergleichende Untersuchung kaum möglich ist.
- In der energietechnischen Planung wird nach der Energieeinsparverordnung EnEV [2] eine primärenergetische Bewertung von Gesamtkonzepten gefordert, wobei in den dort vereinbarten Rechenverfahren nach DIN 18599 [29] für die einzelnen Erzeuger entsprechende Teilenergiekennwerte vereinbart werden, hier insb. für Kompressionskältemaschinen (mit der so genannten Jahreskälteleistungszahl SEER) und Adsorptionskältemaschinen (mit Nennwärmeverhältnis, Teillastfaktoren und Nutzungsfaktoren) sowie Blockheizkraftwerke (mit Deckungsanteil, Stromkennzahl und Nutzungsgrad).

In Kapitel 5 werden Teilenergiekennwerte messtechnisch bestimmt, um Energieverbundsysteme mit elektrisch und / oder thermisch angetriebenen Kältemaschinen primärenergetisch bewerten zu können.

## 3. Versuchsaufbau und -durchführung

Das Energieverbundsystem am *Institut für Energiesystemtechnik* (INES) an der Hochschule

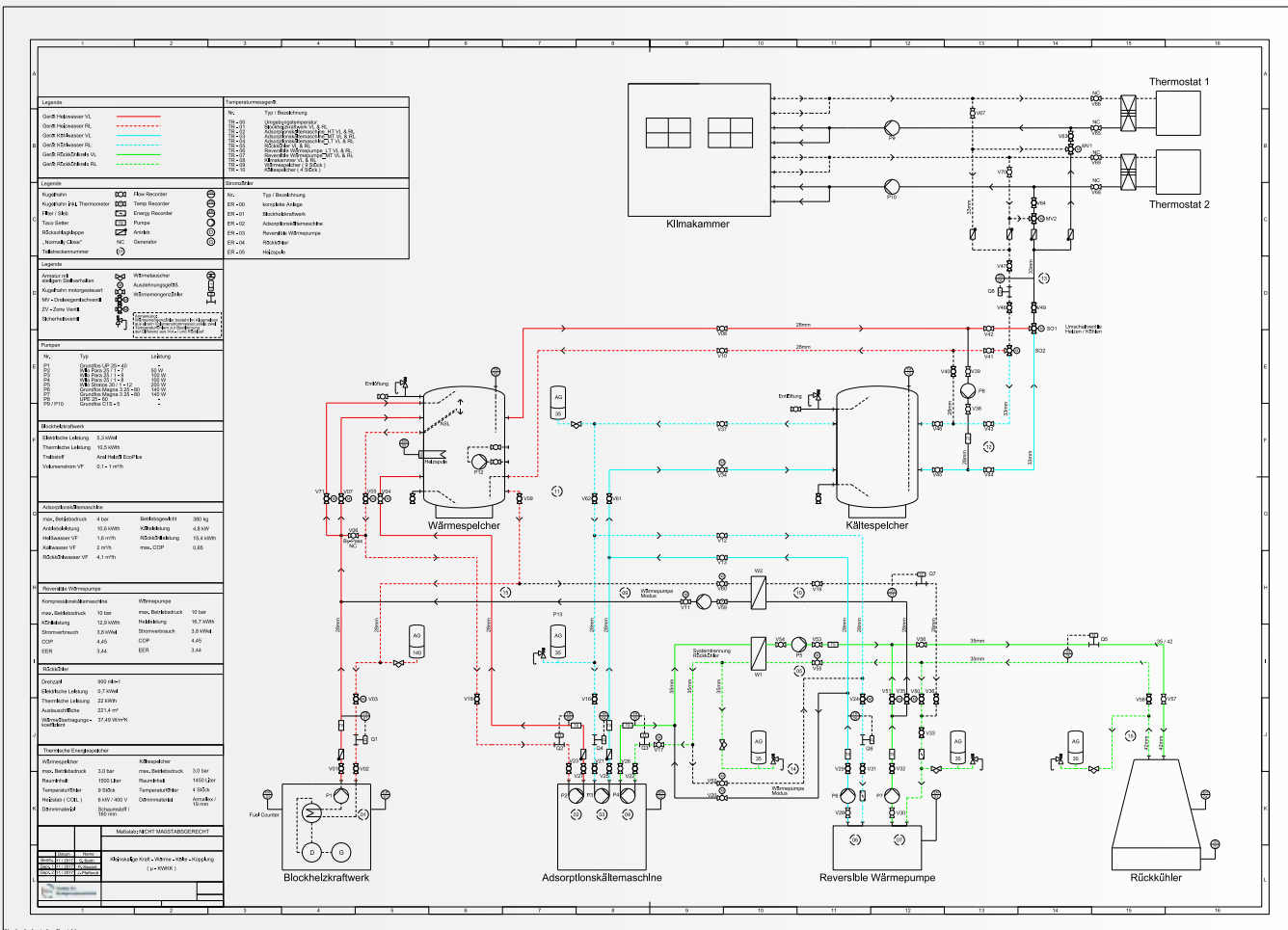


Bild 2: Vereinfachtes Rohrleitungs- und Instrumentierungsschema.

Offenburg (siehe Bild 2) kombiniert ein Blockheizkraftwerk, eine reversible Adsorptionskältemaschine / wärmepumpe, eine reversible Kompressionskältemaschine / wärmepumpe und einen elektrischen Heizstab mit einem warmen und einem kalten Speicher. Das Rückkühlwerk (RKW) kann sowohl als Wärmesenke zur Wärmeabfuhr der Kältemaschinen als auch als Wärmequelle für den Wärmepumpenbetrieb genutzt werden. Der Versuchsaufbau entspricht einer typischen, kleinskaligen Energieversorgung. So sind insbesondere Leitungsdurchmesser und -längen typisch, wodurch wiederum der Hilfsstrombedarf der peripheren Anlagenkomponenten gut abgebildet wird.

Strombezug und -erzeugung werden dem Microgrid entnommen bzw. für dieses bereitgestellt. Die von den beiden thermischen Speichern bereitgestellte Wärme- bzw. Kälteleistung wird in einem Raumklimalabor genutzt bzw. für die vorliegenden Versuche an einen Prozessthermo-

staten abgegeben. Damit ist eine praxisnahe, komplexe Betriebsführung (auch in Kombination mit Optimierungsalgorithmen für die Energiebereitstellung und -nutzung) realisierbar.

In der vorliegenden Studie werden zwei Betriebsführungsstrategien für die Kältebereitstellung unter praxisnahen Laborbedingungen verglichen:

- **AdKM-Betrieb mit Stromerzeugung und Kältebereitstellung.** Bei diesem Versuch wandelt das BHKW (fossile) Brennstoffenergie in Strom und Wärme um. Der Strom wird für die Versorgung der Adsorptionskältemaschine inkl. Rückkühlwerk und Hilfskomponenten (Pumpen, Stellmotoren, Mess- und Reglungstechnik) verwendet und überschüssige elektrische Energie in das Microgrid eingespeist. Das BHKW lädt den Warmwasserspeicher, aus dem die Adsorptionskältemaschine mit Wärme versorgt wird, um Kaltwasser zu erzeugen.
- **KKM-Betrieb mit Strombezug und Kältebereitstellung.** Bei diesem Versuch wird die



reversible Wärmepumpe als Kompressionskältemaschine betrieben. Dabei wird die benötigte elektrische Energie aus dem Microgrid bezogen.

In beiden Versuchsabläufen wird die bereitgestellte Kälte aus dem Kaltwasserspeicher entsprechend eines vorgegebenen Lastprofils an ein Thermostat abgegeben. Dabei werden Vor- und Rücklauftemperatur sowie der Volumenstrom im Verbraucherkreis so eingestellt, dass der Lastverlauf einem typischen Tagesbetrieb einer Klimaanlage (ohne Entfeuchtung) mit Vorlauf- / Rücklauftemperatur 13/18 entspricht. Dazu wird für den Betrieb der Kältemaschinen die Solltemperatur im Kaltwasserspeicher mit 12 °C vorgegeben.

Beide Kältemaschinen geben die Abwärme über das Rückkühlwerk an die Umgebung ab.

Die Kompressionskältemaschine erhält keine weiteren Betriebsvorgaben und wird ausschließlich in Abhängigkeit der Temperatur im Kaltwasserspeicher betrieben. Für den Betrieb der Adsorptionskältemaschine muss zusätzlich die Temperatur im Warmwasserspeicher geregelt werden: Das BHKW soll den Warmwasserspeicher auf eine Temperatur von 80 °C erwärmen.

#### 4. Messergebnisse und Diskussion

**Bild 3** zeigt ausgewählte Messdaten aus dem AdKM-Betrieb (linke Spalte) und aus dem KKM-Betrieb (rechte Spalte). Bei beiden Versuchen wird jeweils ein Zyklus im eingeschwungenen Betrieb ausgewertet. Die Zeiträume wurden so ausgewählt, dass bei vergleichbarem Wetter eine nahezu vergleichbare Nutzkälte bereitgestellt wird.

Werden die thermischen und elektrischen Leistungen der einzelnen Komponenten bilanziert, wird der prinzipielle Unterschied der beiden Anlagenkonzepte deutlich:

- Beide Kältemaschinen werden entsprechend des Lastprofils mit vergleichbaren Volumenströmen und Vor- bzw. Rücklauftemperaturen betrieben.
- Bei einer mittleren Außentemperatur von jeweils etwa 22 °C stellen beide Kältemaschinen eine mittlere Vorlauftemperatur von 12 bis 13 °C bereit, wobei die einzelnen Ad- und Desorptionszyklen der thermischen Kälteerzeugung gut zu erkennen sind. Da im

AdKM-Betrieb die Kaltwassertemperaturen mit ca. 13 °C etwas höher als im KKM-Betrieb mit 12 °C liegen, ist die Nutzkältebereitstellung im AdKM-Betrieb rund 20 % niedriger als im KKM-Betrieb.

- Der Kältespeicher wird dabei dauerhaft, entsprechend des dynamischen Lastprofils entladen, dabei unterscheiden sich die Ladezyklen deutlich: Die mit  $\vartheta_1$  bis  $\vartheta_4$  bezeichneten Temperaturen werden in vier unterschiedlichen Höhen im Kaltwasserspeicher gemessen. Hier ist einerseits die sehr gute Temperaturschichtung zu erkennen. Andererseits sind die Ladezyklen (bei fallenden Temperaturen) gut zu erkennen. Die Adsorptionskältemaschine liefert einen (mittleren) Volumenstrom von 1,15 m<sup>3</sup>/h und die Kompressionskältemaschine von 2,5 m<sup>3</sup>/h. Dadurch und durch die etwas niedrigere Vorlauftemperatur der Kompressionskältemaschine kühlt der Kaltwasserspeicher im KKM-Betrieb schneller ab.
- Auffällig ist der zyklische Betrieb der Adsorptionskältemaschine mit der schwankenden Antriebswärme. Der Wärmespeicher gewährleistet – trotz dieser schwankenden Wärmeabnahme – jedoch einen stabilen BHKW-Betrieb mit einer elektrischen Leistung von rund 5,4 kW<sub>el</sub> und einer thermischen Leistung von ca. 10,15 kW<sub>th</sub>.
- Der elektrische Leistungsbedarf im KKM-Betrieb liegt (bei kürzerer Laufzeit) deutlich über dem Leistungsbedarf im AdKM-Betrieb. Gleichzeitig ist die Abwärmeleistung im AdKM-Betrieb (wegen des thermischen Antriebs) kurzfristig mit über 60 kW<sub>th</sub> mehr als dreimal und im Durchschnitt rund doppelt so hoch wie die durchschnittliche Abwärmeleistung im KKM-Betrieb mit unter 20 kW<sub>th</sub>.

Die Versuche wurden oft wiederholt, wobei die sehr stabilen Wetterverhältnisse im Sommer 2018 eine sehr hohe Reproduzierbarkeit gewährleisteten. Eine detaillierte Analyse einzelner, nahezu stationärer Betriebszustände zeigt, dass die (gemessenen) Leistungszahlen der Adsorptions- und Kompressionskältemaschine sehr gut mit den in den Produktdatenblättern der Hersteller angegebenen Werten übereinstimmen [30]. Zur besseren Orientierungen sollen beispielhaft für zwei ausgewählte Betriebstage (berechnete) Leistungs- und (gemessene) Arbeitszahlen gegenübergestellt werden:

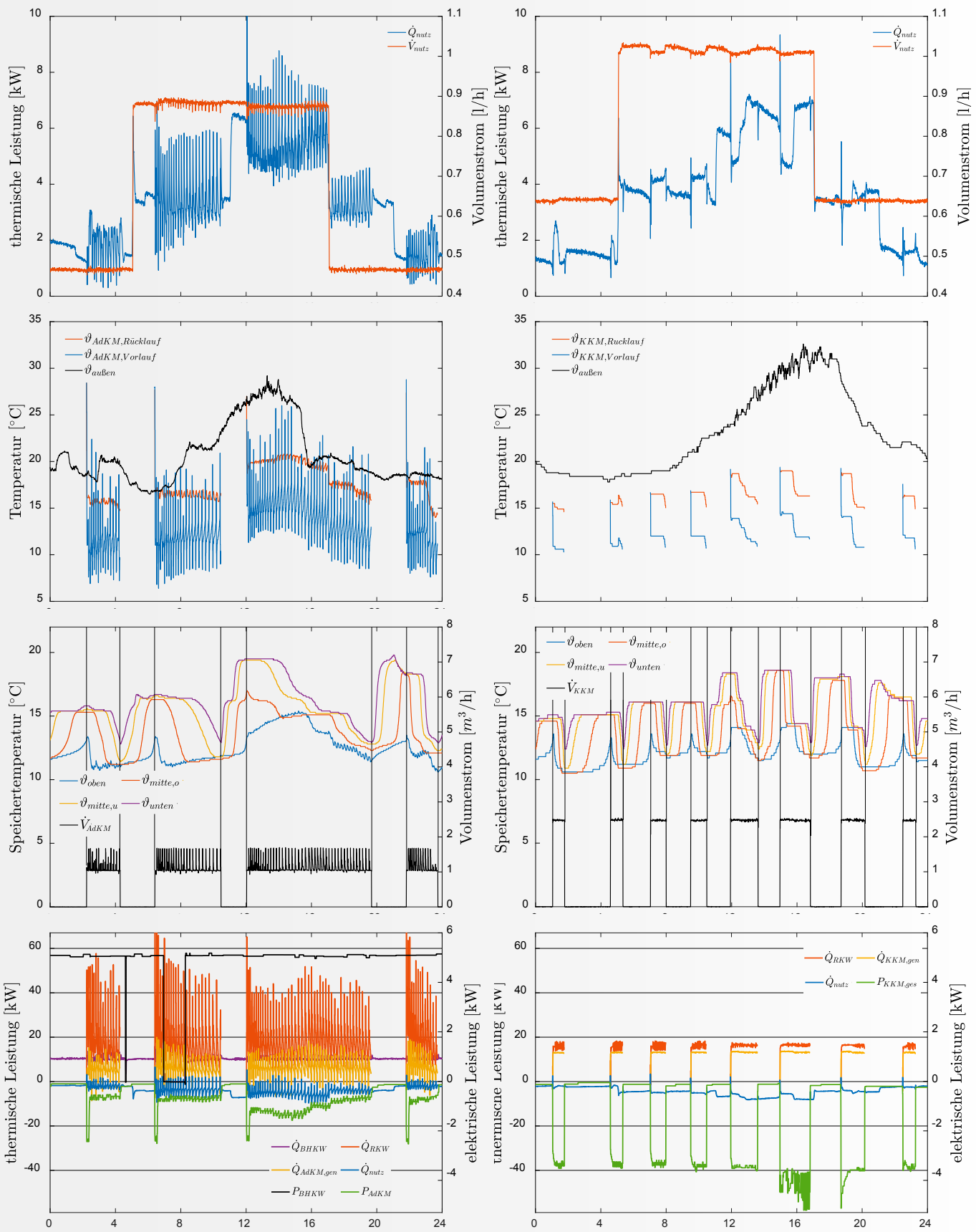


Bild 3: Messreihen für die Adsorptionskältemaschine am 6. September 2018 (links) und die Kompressionskältemaschine am 18. August 2018 (rechts).

- Am AdKM-Versuchstag (Messung vom 6.9.2018) lagen die mittleren Temperaturen bei 71 °C für den thermischen Antrieb, bei 25,5 °C für die Wärmeabgabe und bei 13 °C für die Nutzkälte. Dies liefert nach Produktdatenblatt eine thermische Leistungszahl von  $EER_{AdKM,th}=0,52 \text{ kW}_{th}/\text{kW}_{th}$ , während an diesem Tag eine Arbeitszahl von  $EER_{AdKM,th}=0,50 \text{ kWh}_{th}/\text{kWh}_{th}$  gemessen wurde.
- Am KKM-Versuchstag (Messung vom 18.8.2018) lagen die mittleren Temperaturen bei 30 °C für die Wärmeabgabe und bei 12 °C für die Nutzkälte. Dies liefert nach Produktdatenblatt (bei 7 °C / 30 °C) eine Leistungszahl von  $EER_{KKM}=3,6 \text{ kW}_{th}/\text{kW}_{th}$ , während an diesem Tag (bei 12 °C / 30 °C) ebenfalls eine Arbeitszahl von  $EER_{KKM}=3,6 \text{ kWh}_{th}/\text{kWh}_{el}$  gemessen wurde.

Eine Fehleranalyse weist Messunsicherheiten von deutlich unter 10 % aus, was im Rahmen einer Gesamtsystembilanzierung als akzeptabler Wert angesehen werden kann. Dabei sei darauf hingewiesen, dass einzelne Verlustterme zwar nur modellgestützt bilanziert werden können, die Gesamtenergiebilanz aber in jedem Fall ausgeglichen ist.

**Tabelle 1** stellt die Energiebilanz auf Basis der Messdaten vor [30]. Da nicht alle Verluste separat ausgewiesen werden, ist die zahlenmäßige Energiebilanz (hier) nicht ausgeglichen.

**Bild 4** zeigt ein Energieflussdiagramm für die beiden Anlagenkonzepte, ausgehend von der eingesetzten Endenergie bis zur bereitgestellten Nutzenergie.

Der Vergleich der Energieflüsse zeigt den deutlich geringeren Stromverbrauch zum Betrieb der Adsorptions- gegenüber der Kompressionskältemaschine. Bei 20 % weniger Kälteerzeugung verbraucht das Rückkühlwerk wegen der höheren Abwärme der Adsorptionskältemaschine allerdings deutlich mehr elektrische Energie als im KKM-Betrieb. Das Gesamtsystem mit Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung stellt neben der (aus der Wärme erzeugten) Kälte deutlich mehr elektrische Energie bereit als zum Betrieb der Adsorptionskältemaschine benötigt wird.

## 5. Auswertung

Die Auswertung der Messdaten liefert wichtige Auslegungsgrößen für die Planungspraxis:

- Zunächst werden die Versuche, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, entsprechend der Mess- und Auswertevorschriften aus den gängigen Normen und Richtlinien ausgewertet.
- In Anlehnung an die von Schick Tanz et al. [11] und Henning et al. [12] vorgeschlagene Rechenmethode werden die Messdaten für die beiden Versuchsdurchläufe zunächst getrennt primärenergetisch bewertet, wobei deren Methode so angepasst wird, dass an Stelle von Modellparametern (z.B. aus numerischen Analysen bzw. Simulationsergebnissen) hier Messwerte verwendet werden.

- Eine modellbasierte Messdatenanalyse liefert schließlich energiewirtschaftlich günstige Betriebsrandbedingungen für den Einsatz von thermisch und elektrisch angetriebenen Kältemaschinen.

Hier wird die Bilanzgrenze entsprechend VDI 4650 festgelegt, wobei diese strenggenommen nur zur Berechnung der Jahresarbeitszahl SCOP für (Sorptions-)Wärmepumpenanlagen herangezogen wird. Als Nutzen ist demnach die von der Kältemaschine bereitgestellte Kälte (und nicht die tatsächlich verbrauchte Nutzkälte) definiert. Der Aufwand wird für den Betrieb der gesamten Anlage also inkl. der Wärmesenke (hier: Rückkühlwerk) und aller Hilfsenergien bestimmt. Dabei sind die Systemverluste und die gespeicherte Wärme- bzw. Kälteenergie separat zu bilanzieren und in der Berechnung entsprechend zu berücksichtigen.

Im Folgenden werden die berechneten Kennzahlen als Leistungszahl EER bezeichnet. Zwar handelt es sich hierbei um gemessene Werte, so dass strenggenommen die Arbeitszahl SPF der korrekte Wert wäre. Aber in der Planungspraxis haben sich die Teilenergiekennwerte EER etabliert, die hier als Tagesmittelwerte dargestellt werden. Diese Teilenergiekennwerte können in DIN 18599 [29] ingenieurmäßig zur Energiebilanzierung genutzt werden.

### 5.1 Kennzahlen aus einer modellbasierten

#### Datenauswertung

Die Messwerte können mit den oben vorgestellten Werten detaillierter ausgewertet werden.

Für die Kompressionskältemaschine liefert

$$EER_{KKM} = \frac{Q_{KKM,th}}{W_{KKM,el}} \quad (1)$$

eine Leistungszahl von  $EER_{KKM}=3,6 \text{ kWh}_{th,Kälte}/\text{kWh}_{el}$ .

Bild 4: Energieflussbild für die beiden Kältemaschinen, Werte aus Tabelle 1.

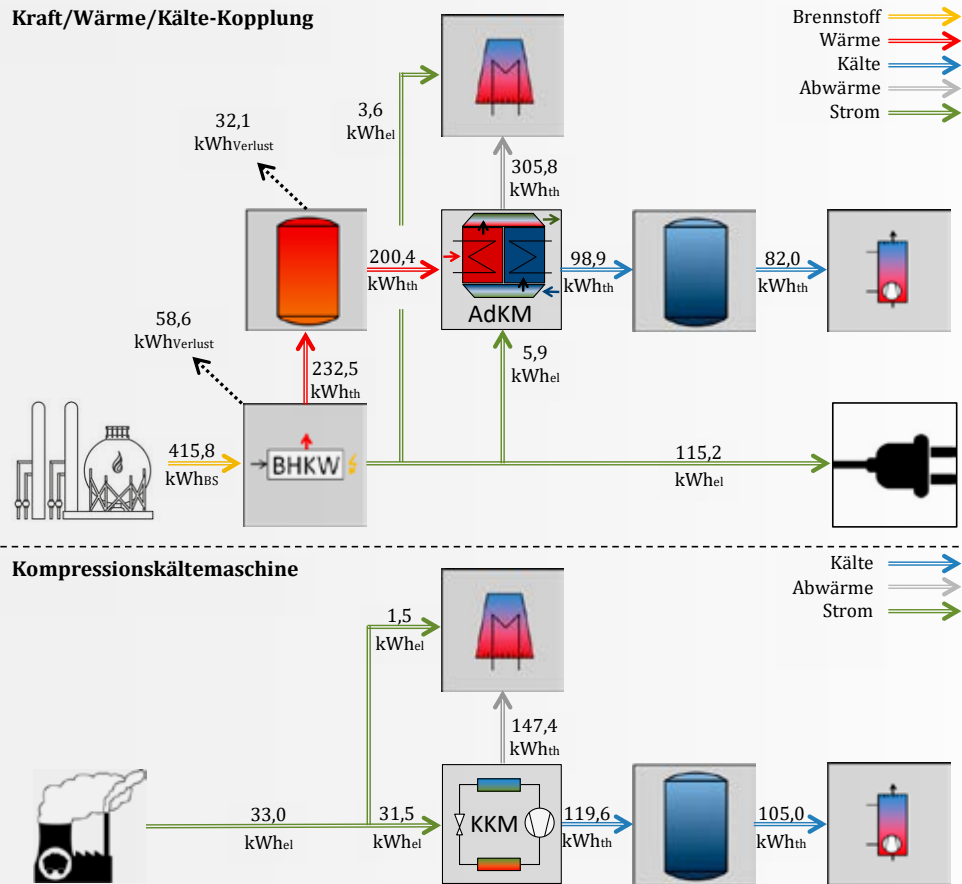


Tabelle 1: Energiebilanz für den AdKM- und den KKM-Betrieb, aus Messdaten (Messunsicherheit kleiner als 10%). Die geringe Energiedifferenz in den thermischen Speichern wird in der Auswertung nicht berücksichtigt. Die verhältnismäßig hohen Verluste (aufgrund des Laboraufbaus ohne anlagentechnische Wärmedämmung) werden informativ angegeben. Kursiv dargestellte Werte nur zur Information. Alle Temperaturen als Tagesmittelwert.

|                        | Symbol               | AdKM-Betrieb<br>(bei AT=21 °C) | KKM-Betrieb<br>(bei AT=23 °C) |            |
|------------------------|----------------------|--------------------------------|-------------------------------|------------|
| erzeugte Kälte         | $Q_{KM}$             | 98,9                           | 119,6                         | $kWh_{th}$ |
| Nutzkälte              | $Q_{Kälte}$          | 82,0 (bei 13 °C)               | 105,0 (bei 12 °C)             | $kWh_{th}$ |
| Stromverbrauch         | $W_{KM,ges}$         | 9,5                            | 33,0                          | $kWh_{el}$ |
| - Kältemaschine        | $W_{KM}$             | 2,6                            | 29,2                          | $kWh_{el}$ |
| - Rückkühlwerk         | $W_{RKW}$            | 3,6                            | 1,4                           | $kWh_{el}$ |
| - Hilfsenergie         | $W_{aux}$            | 3,3                            | 2,3                           | $kWh_{el}$ |
| therm. Antriebsenergie | $Q_{Antrieb}$        | 200,4 (bei 71 °C)              | -                             | $kWh_{th}$ |
| Abwärme Rückkühlwerk   | $Q_{Abwärme}$        | 305,8 (bei 25,5 °C)            | 147,4 (bei 30 °C)             | $kWh_{th}$ |
| Brennstoffeinsatz      | $Q_{BHKW,BS}$        | 415,8                          | -                             | $kWh_{BS}$ |
| - Stromerzeugung       | $W_{BHKW}$           | 124,7                          | -                             | $kWh_{el}$ |
| - Wärmeerzeugung       | $Q_{BHKW}$           | 232,5                          | -                             | $kWh_{th}$ |
| -(Wärme-)Verlust       | $Q_{BHKW,Verlust}$   | 58,6                           | -                             | $kWh_{th}$ |
| Stromeinspeisung       | $W_{Netz}$           | 115,2                          | -                             | $kWh_{el}$ |
| Wärmespeicherung       | $Q_{Speicher,h}$     | +1,4                           | -                             | $kWh_{th}$ |
| Kältespeicherung       | $Q_{Speicher,c}$     | -0,4                           | ±0                            | $kWh_{th}$ |
| therm. Verluste        | $Q_{System,Verlust}$ | 124,1                          | -                             | $kWh_{th}$ |

Aufwendiger ist die Analyse der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung.

Hier gilt für das Blockheizkraftwerk:

$$Q_{\text{BHKW,th}} = Q_{\text{BHKW,BS}} \cdot \eta_{\text{BHKW,th}} \quad (2)$$

$$W_{\text{BHKW,el}} = Q_{\text{BHKW,BS}} \cdot \eta_{\text{BHKW,el}} \quad (3)$$

$$\eta_{\text{BHKW,ges}} = \eta_{\text{BHKW,el}} + \eta_{\text{BHKW,th}} \quad (4)$$

mit

$Q_{\text{BHKW,BS}}$  Brennstoffeinsatz in kWh<sub>BS</sub>

$Q_{\text{BHKW,th}}$  erzeugte Wärme in kWh<sub>th</sub>

$W_{\text{BHKW,el}}$  erzeugter Strom in kWh<sub>el</sub>

$\eta_{\text{BHKW,el}}$  elektrischer Wirkungsgrad in kWh<sub>el</sub>/kWh<sub>BS</sub>

$\eta_{\text{BHKW,th}}$  thermischer Wirkungsgrad in kWh<sub>th</sub>/kWh<sub>BS</sub>

Die Adsorptionskältemaschine wird über die thermische und die elektrische Leistungszahl bewertet:

$$Q_{\text{AdKM,th}} = Q_{\text{BHKW,th}} \cdot EER_{\text{AdKM,th}} \quad (5)$$

$$W_{\text{AdKM,el}} = Q_{\text{AdKM,th}} / EER_{\text{AdKM,el}} \quad (6)$$

mit

$EER_{\text{AdKM,th}}$  thermische Leistungszahl in kWh<sub>th,Kälte</sub>/kWh<sub>th,Wärme</sub>

$EER_{\text{AdKM,el}}$  elektrische Leistungszahl in kWh<sub>th,Kälte</sub>/kWh<sub>el</sub>

Damit können die einzelnen (mittleren) Leistungszahlen bzw. Wirkungsgrade an diesem Versuchstag messtechnisch bestimmt werden:

- Für das Blockheizkraftwerk:  
 $\eta_{\text{BHKW,el}}=0,30$  kWh<sub>el</sub>/kWh<sub>BS</sub> und  $\eta_{\text{BHKW,th}}=0,56$  kWh<sub>th</sub>/kWh<sub>BS</sub>
- Für die Adsorptionskältemaschine:  
 $EER_{\text{AdKM,th}}=0,49$  kWh<sub>th,Kälte</sub>/kWh<sub>th,Wärme</sub> und  
 $EER_{\text{AdKM,el}}=10,4$  kWh<sub>th,Kälte</sub>/kWh<sub>el</sub>

### 5.2. Primärenergetisch bewertete Leistungszahl

#### EER aus der Messung für das Gesamtsystem

Die primärenergetische Leistungszahl im Kühlbetrieb  $EER_{\text{prim}}$  wird hier als Mittelwert über den jeweiligen Versuchszeitraum bestimmt. Dabei werden alle Energieströme über die Bilanzgrenze bilanziert, wobei im AdKM-Betrieb zusätzlich der Wärmespeicher zu Beginn und am Ende des Versuchs bilanziert werden muss.

Für den Betrieb der Kompressionskältemaschine ist die Leistungszahl  $EER_{\text{KKM}}$  als Verhältnis der erzeugten Kältemenge zum gesamten Strombezug definiert, wobei der Strombezug primärenergetisch bewertet wird:

$$EER_{\text{KKM,prim}} = \frac{Q_{\text{KKM,th}}}{W_{\text{KKM,el}} \cdot PEF_{\text{el}}} \quad (7)$$

mit

$Q_{\text{KKM,th}}$  erzeugte Kältemenge in kWh

$W_{\text{KKM,el}}$  Strombezug, inkl. Hilfsstrom und Rückkühlwerk in kWh

$PEF_{\text{el}}$  Primärenergiefaktor für Strom in kWh<sub>Primärenergie</sub>/kWh<sub>Endenergie</sub>

Die Adsorptionskältemaschine wird über  $EER_{\text{AdKM}}$  charakterisiert und grundsätzlich nach der gleichen Methode wie die Kompressionskältemaschine bewertet, wobei in der Berechnung des Primärenergieeinsatzes auch die überschüssige elektrische Energie aus dem BHKW-Betrieb zu berücksichtigen ist:

$$EER_{\text{AdKM,prim}} = \frac{Q_{\text{AdKM,th}}}{Q_{\text{BHKW,BS}} \cdot PEF_{\text{BS}} - (W_{\text{BHKW,el}} - W_{\text{AdKM,el}}) \cdot PEF_{\text{el}}} \quad (8)$$

mit

$Q_{\text{AdKM,th}}$  erzeugte Kältemenge in kWh<sub>th</sub>

$Q_{\text{BHKW,BS}}$  Brennstoffeinsatz in kWh<sub>BS</sub> (abzüglich der Wärmespeicherung)

$W_{\text{BHKW,el}}$  Stromerzeugung in kWh<sub>el</sub>

$W_{\text{AdKM,el}}$  Strombezug, inkl. Hilfsstrom und Rückkühlwerk in kWh<sub>el</sub>

$PEF_{\text{BS}}$  Primärenergiefaktor für Brennstoff in kWh<sub>Primärenergie</sub>/kWh<sub>Endenergie</sub>

$PEF_{\text{el}}$  Primärenergiefaktor für Strom in kWh<sub>Primärenergie</sub>/kWh<sub>Endenergie</sub>

In den Gleichungen (7) und (8) sind alle Energiemengen aus der Messung bekannt.

Nach der aktuellen Energieeinsparverordnung EnEV 2017 [2] wird der Primärenergiefaktor für Erdgas mit  $PEF_{\text{BS}}=1,1$ , für Strombezug  $PEF_{\text{el}}$  mit 1,8 (allgemeiner Strommix, für KKM-Betrieb) und für den eingespeisten Strom aus Kraft-Wärme-Kopplung mit 2,8 (Verdrängungsstrom, für AdKM-Betrieb) gewählt. Damit ergibt sich

- für den KKM-Betrieb  
 $EER_{\text{KKM,prim}}=2,0$  kWh<sub>th,Kälte</sub>/kWh<sub>prim</sub> und
- für den AdKM-Betrieb  
 $EER_{\text{AdKM,prim}}=0,63$  kWh<sub>th,Kälte</sub>/kWh<sub>prim</sub>



Wird diese Messkampagne ausschließlich mit den vorliegenden Messdaten ausgewertet, ist die Kälteerzeugung über eine Kompressionskältemaschine primärenergetisch in diesem System deutlich günstiger als der Betrieb der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung.

- Im BHKW-Betrieb fallen zunächst die hohen anlagentechnischen Wärmeverluste auf.
- Aufgrund des deutlich geringeren Strombedarfs bei der thermischen Kälteerzeugung, ist ein AdKM-Betrieb bei reiner Abwärmennutzung dem KKM-Betrieb primärenergetisch jedoch deutlich überlegen, siehe Kapitel 5.4.
- Die Kompressionskältemaschine profitiert von einem niedrigen Primärenergiefaktor für Strom und ist trotz des verhältnismäßig hohen Strombedarfs eine gute Alternative bei Stromüberschuss bzw. bei einem niedrigen netzpunktspezifischen Strompreis.
- Ein KWKK-Verbundsystem ist energiewirtschaftlich nur dann vorteilhaft, wenn das BHKW in einem Microgrid (mit modell-prädiktiver Regelung) ganzjährig, netzdienlich und bei einem hohen netzpunktspezifischen Strompreis betrieben wird.

### 5.3 Bewertung der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung

Einsetzen von Gl. (2) bis (6) in Gl. (8) liefert unter Berücksichtigung der Primärenergiefaktoren schließlich:

$$EER_{AdKM,prim} = \frac{EER_{AdKM,th} \cdot \eta_{BHKW,th}}{PEF_{BS} \cdot (\eta_{BHKW,el} \cdot \eta_{BHKW,th} \cdot EER_{AdKM,th} / EER_{AdKM,el}) \cdot PEF_{el}} \quad (9)$$

Außerdem gilt mit den oben eingeführten Werten:

$$EER_{KKM,prim} = \frac{EER_{KKM}}{PEF_{el}} \quad (10)$$

Eine Sensitivitätsanalyse der Kennzahlen (innerhalb eines typischen Wertebereichs) auf die primärenergetische Leistungszahl zeigt

- eine schwache Abhängigkeit von der thermischen Leistungszahl  $EER_{AdKM,th}$  und eine etwas stärkere Abhängigkeit von der elektrischen Leistungszahl  $EER_{AdKM,el}$ .
- eine stärkere Abhängigkeit von der Leistungszahl  $EER_{KKM}$  der Kompressionskältemaschine als

von den beiden Leistungszahlen  $EER_{AdKM,th}$  bzw.  $EER_{AdKM,el}$  der Adsorptionskältemaschine.

- einen sehr starken Einfluss des elektrischen Wirkungsgrades  $\eta_{BHKW,el}$  des Blockheizkraftwerks.

Dieses Ergebnis entspricht auch den Untersuchungen (und der Methode) von Schicktanz et al. [11] und Henning et al. [12]. Werden die Messdaten der beiden Versuche mit Hilfe der oben eingeführten Kennzahlen beschrieben, können die Messergebnisse für diesen Betriebsfall (typischer Betrieb einer Klimaanlage während eines Auslegungstages) verallgemeinert werden. Dabei werden folgende Annahmen getroffen:

- Die Leistungszahl  $EER_{KKM}$  der Kompressionskältemaschine entspricht einem guten Wert, der in der Praxis erreicht wird. Sie wird daher als Referenzgröße für die konventionelle Kälteerzeugung für die Gebäudeklimatisierung verwendet.
- Die thermischen Leistungszahlen  $EER_{AdKM,th}$  entsprechen an diesem Versuchstag in einzelnen Bilanzzeiträumen jeweils den Produktangaben [30]. Daher wird der oben bestimmte Tagesmittelwert zur weiteren Bilanzierung herangezogen.
- Die Strombedarfe für das Rückkühlwerk und Nebenaggregate sind bei Adsorptionskältemaschinen technologiebedingt höher als bei Kompressionskältemaschinen. Eine umfangreiche Analyse und Betriebsoptimierung führte zu einer deutlichen Effizienzverbesserung, so dass die mittlere elektrische Leistungszahl  $EER_{AdKM,el}$  als Referenzwert verwendet werden kann.
- Im eingeschwungenen Zustand ist der Speicherladezustand am Anfang des Tages und am Tagesende identisch.
- Die anlagentechnischen Wärmeverluste erscheinen unrealistisch hoch und werden im folgenden Modell demgegenüber zunächst vernachlässigt.
- Kleinskalige Blockheizkraftwerke haben Gesamtwirkungsgrade  $\eta_{BHKW,ges}$  von bis zu 90 %. Da dieser Wert hier (fast) erreicht wird, können auch der elektrische und der thermische Wirkungsgrad als Referenzwert übernommen werden.

Mit den oben genannten Annahmen kann Gleichung (2) mit einer entsprechend geänderten Energiebilanz neu berechnet werden. Die Leistungszahl für die Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung verbessert

sich damit auf  $EER_{AdKM,prim} = 0,94 \text{ kWh}_{th,Kälte}/\text{kWh}_{prim}$ . Dabei gilt unverändert  $EER_{KKM,prim} = 2,0 \text{ kWh}_{th,Kälte}/\text{kWh}_{prim}$  für die Kompressionskältemaschine (siehe auch Kapitel 5.1).

Hier zeigt sich die starke Abhängigkeit vom Primärenergiefaktor für Strom und vom elektrischen Wirkungsgrad des Blockheizkraftwerks: Selbst nach deutlicher Reduzierung der anlagentechnischen Wärmeverluste liegt die primärenergetische Leistungszahl der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung noch deutlich unter der Leistungszahl des konventionellen Vergleichssystems.

Alternativ kann mit Gleichung (9) der elektrische Wirkungsgrad des Blockheizkraftwerks  $\eta_{BHKW,el}$  so bestimmt werden, dass die primärenergetische Leistungszahl der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung  $EER_{AdKM,prim}$  die primärenergetische Leistungszahl der Kompressionskältemaschine  $EER_{KKM,prim}$  übersteigt. Dies ist bei elektrischen Wirkungsgraden von über 37 % gegeben.

Vergleichbare Wirkungsgrade erreichen wirkungsgradoptimierte Blockheizkraftwerke mit einer elektrischen Leistung von 100 kW<sub>el</sub> und mehr. Im direkten Vergleich der Kälteerzeugung ist die Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung also erst bei größeren Einheiten primärenergetisch vorteilhaft.

Es sei allerdings ausdrücklich darauf hingewiesen, dass ein ganzjähriger Vergleich unter Berücksichtigung der gekoppelten Wärmeerzeugung und der längeren Laufzeit auch bei kleinskaligen Anlagen energiewirtschaftliche und primärenergetische Vorteile hat [15].

#### 5.4 Abwärmenutzung statt Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung

Die messtechnische Bewertung der beiden Anlagenkonzepte zeigt einen deutlichen Vorteil der Kälteerzeugung mit Kompressionskältemaschine gegenüber der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung. Die thermisch angetriebene Kälteerzeugung schneidet primärenergetisch jedoch deutlich günstiger als eine Kompressionskältemaschine ab, wenn Abwärme als Antriebsenergie genutzt wird: Die Adsorptionskältemaschine bezieht im Vergleich zur Kompressionskältemaschine (an diesem typischen Tag) nur rund ein Drittel der elektrischen Energie.

Die Adsorptionskältemaschine würde in dem vorliegenden Versuch eine primärenergetische Leistungszahl  $EER_{AdKM,prim}$  von 5,8 kWh<sub>th,Kälte</sub>/kWh<sub>prim</sub> gegenüber  $EER_{KKM,prim}$  von 2,0 kWh<sub>th,Kälte</sub>/kWh<sub>prim</sub> für die Kompressionskältemaschine erreichen.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick zum netzdienlichen Betrieb von Energieverbundsystemen

Die vorliegende Studie analysiert und vergleicht den Betrieb einer Adsorptions- und einer Kompressionskältemaschine zur Bereitstellung von 13/18-Klimakälte über einen Kaltwasserspeicher mit 12 °C an einem typischen Sommertag.

Zunächst ist bemerkenswert, dass die Leistungskennzahlen sowohl der Kompressionskältemaschinen (gemäß VDI 4650-1 [26], auf den Kühlfall angewendet) als auch der Adsorptionskältemaschinen (in Anlehnung an VDI 4650-1 und unter Berücksichtigung von VDI 4650-2 [27], auf den Kühlfall angewendet) in diesem Betriebspunkt hoch sind und in guter Näherung den Produktdaten der Hersteller entsprechen, womit eine insgesamt gute Betriebsführung mit optimierten Reglereinstellungen (an der jeweiligen Kältemaschine, am Rückkühlwerk und der Peripherie) im Versuch nachgewiesen ist:

- Kompressionskältemaschine, Gesamtsystem:  
 $EER_{KKM} = 3,6 \text{ kWh}_{th,Kälte}/\text{kWh}_{el}$
- Adsorptionskältemaschine, Gesamtsystem:  
 $EER_{AdKM,el} = 10,4 \text{ kWh}_{th,Kälte}/\text{kWh}_{el}$  und  $EER_{AdKM,th} = 0,49 \text{ kWh}_{th,Kälte}/\text{kWh}_{th}$



**Tiefe**  
 < 30 cm

## VARIO 650 CC

Kompaktes Zu- und Abluftgerät mit Wärmerückgewinnung

- ▶ Flexibles Stand- oder deckenhängendes Gerät für den Innenbereich
- ▶ Sehr einfache Wartung und Reinigung
- ▶ Extrem flexible und umfassende Steuerung
- ▶ Luftleistung bis 650 m<sup>3</sup>/h
- ▶ **Einsatzbereiche:** Mehrfamilienhäuser, große Einfamilienhäuser, Büro- und Gewerbeeinheiten
- ▶ Optimale Luftverteilung in Kombination mit der ValloFlex Flat Box – jetzt noch besser dank Universal-Regelung
- ▶ Ab Lager sofort lieferbar

Adsorptionskältemaschinen schneiden primär energetisch dann günstiger ab als eine Kompressionskältemaschine, wenn zum Antrieb (industrielle) Abwärme zur Verfügung steht.

In Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung sind Adsorptionskältemaschinen nur dann primärenergetisch günstiger als Kompressionskältemaschinen, wenn das Blockheizkraftwerk einen hohen elektrischen Wirkungsgrad erreicht, in einer typischen Anwendung von mindestens 37 %. Dabei ist auffällig, dass unter Berücksichtigung der heute am Markt verfügbaren Komponenten mit ihren spezifischen Leistungszahlen bzw. Wirkungsgraden die energiewirtschaftliche Bewertung fast ausschließlich vom elektrischen Wirkungsgrad des Blockheizkraftwerks abhängt.

Der Primärenergiefaktor für den Energieträger Strom wird mit dem zunehmenden Anteil erneuerbarer Energie an der Stromproduktion weiter sinken. Ebenso wird perspektivisch auch der Primärenergiefaktor für Erdgas sinken, wenn Power-to-Gas-Technologien verbreitet eingesetzt werden. Die energiewirtschaftliche Situation der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung wird sich dementsprechend verschieben. Eine Prognose ist schwierig.

Leichter fällt die Prognose im Zusammenhang mit einem netzfreundlichen Betrieb von Energieverbundsystemen: Der Warmwasserspeicher kann sowohl im Winter für die stromgeführte Kraft-Wärme-Kopplung als auch im Sommer für die bedarfsgerechte und weitgehend vom Stromnetz entkoppelte Kältebereitstellung genutzt werden. Damit steht ein dezentrales Blockheizkraftwerk mit einer thermisch angetriebenen Kältemaschine ganzjährig für einen netzfreundlichen Betrieb zur Verfügung:

- Im vorliegenden System werden für die konventionelle Kälteversorgung bedarfsgerecht 3 bis 3,5 kW<sub>el</sub> elektrische Leistung aus dem Stromnetz bezogen.
- Von der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung können weitgehend unabhängig vom aktuellen Kältebedarf rund 5 kW<sub>el</sub> bereitgestellt werden.

Dieses Energieverbundsystem bestehend aus Kältemaschine / reversibler Wärmepumpe und Blockheizkraftwerk mit Adsorptionskältemaschine kann in etwa die gleiche elektrische Leistung aus dem Netz beziehen oder diesem bereitstellen, und zwar im Winter- (Wärmepumpe vs. Blockheizkraftwerk) oder Sommerbetrieb (elektrisch vs. thermisch angetriebener Kältemaschine).

In Kombination mit einer übergeordneten Regelung [31] können in Microgrids so elektrische Lastschwankungen vollständig und netzdienlich ausgeglichen werden, und zwar weitgehend unabhängig von der aktuellen thermischen Heiz- bzw. Kühllast.

## Danksagung

Diese Studie wurde durch die „Forschungsallianz Oberrhein zu den technischen Grundlagen der Nachhaltigkeit“ mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg finanziert. Im Rahmen dieser Studie wurde auch die Regelung der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung optimiert. Die Autoren danken Dr. Ferdinand Schmidt und Aditya Desai (KIT Karlsruhe), Carsten Hindenburg (Hindenburg Consulting) sowie Steffen Kühnert, Doreen Acker und Dr. Ursula Wittstadt (Fahrenheit GmbH) für intensive Diskussionen und tatkräftige Unterstützung. Ferner danken wir unseren Industriepartnern Fahrenheit GmbH in München, SenerTec Center GmbH in Lautenbach, Isenmann Ingenieur GmbH in Haslach und Elektrizitätswerk Mittelbaden AG & Co. KG für die Bereitstellung der Anlagenkomponenten sowie der Finanzierung der Prozessautomation.

## Literatur

- [1] P. Sawant, J. Pfafferoth. Experimental investigation of real-life microscale trigeneration system using adsorption cooling, reversible heat pump and a cogeneration unit. 7th IC-EPSMSO International Conference on Experiments/Process/System Modeling/Simulation/Optimization, Athens (Greece), 2017.
- [2] Energieeinsparverordnung – EnEV. Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden. In der aktuellen Fassung vom 24.10.2015 (EnEV 2017)
- [3] D.W. Wu, R.Z. Wang. Combined cooling, heating and power: A review. Progress in Energy and Combustion Science 32 (2006)
- [4] M. Miara et al. Wärmepumpen. Fraunhofer IRB Verlag, 2013.
- [5] A. Morgenstern et al. Mit solarer Wärme kühlen. BINE Themeninfo, 2016.
- [6] H.-M. Henning (Hrsg.). Solar-assisted Air-conditioning in Buildings: A Handbook for Planners. Springer, 2004.
- [7] D. Mugnier (Hrsg.). Quality Assurance and Support Measures for Solar Cooling. Positionspapier des IEA-Task 48 im Solar Heating and Cooling Programme, 2015.
- [8] U. Eicker, D. Pietruschka, A. Schmitt, M. Haag. Comparison of photovoltaic and solar thermal cooling systems for office buildings in different climates. Solar Energy 118 (2015)

- [9] R. M. Lazzarin. Solar cooling: PV or thermal? A thermodynamic and economical analysis. *Int. J. Refrigeration* 39 (2014)
- [10] G. Chicco and P. Mancarella. Trigeneration primary energy saving evaluation for energy planning and policy development. *Energy Policy* 35 (2007)
- [11] M.D. Schicktanz, J. Wapler, H.-M. Henning. Primary energy and economic analysis of combined heating, cooling and power systems. *Energy* 36 (2011)
- [12] H.-M. Henning, T. Urbanek et al. Kühlen und Klimatisieren mit Wärme. Fraunhofer IRB Verlag, 2012.
- [13] A. Bugaj. Energy and environmental evaluation of combined cooling heating and power system. *E3S Web of Conferences* 22 (2017)
- [14] D. Maraver, A. Sin, J. Royo, F. Sebastián. Assessment of CCHP systems based on biomass combustion for small-scale applications through a review of the technology and analysis of energy efficiency parameters. *Applied Energy* 102 (2013)
- [15] H.-M. Henning et al. PolySMART – Polygeneration with advanced small and medium scale thermally driven air-conditioning and refrigeration technology, an Integrated Project partly funded by the European Commission under Framework Programme 6, DG “Energy and Transport”, 2010.
- [16] M. Aprile. The market potential of micro-CHCP. *PolySMART*, 2011.
- [17] K. Backes, M. Adam, J. Gottschald, C. Faber, F. Hennebühl, M. Lanz, A. Anthrakidis. KWKK-Anlagen im Feldtest – Verbesserung ihrer Regelung und Hydraulik. Fachhochschule Düsseldorf und Fachhochschule Aachen, 2012.
- [18] S. Gopisetty, P. Treffinger. Combined cooling, heat and power (Trigeneration) at Offenburg University of Applied Sciences. *Environmental Biotechnology* 9 (2013)
- [19] M. Becker, B. Anders, K. Sturm, T. Patel, J. Braun. Regenerativ betriebene, innovative Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungsanlage. Hochschule Kempren und Technische Universität München, 2013.
- [20] G. Angrisani, A. Rosato, C. Roselli, M. Sasso, S. Sibilio. Experimental results of a micro-trigeneration installation. *Applied Thermal Engineering* 38 (2012)
- [21] X.Q. Kong, R.Z. Wang, J.Y. Wu, X.H. Huang, Y. Huangfu, D.W. Wu, Y.X. Xu. Experimental investigation of a micro-combined cooling, heating and power system driven by a gas engine. *International Journal of Refrigeration* 28 (2005)
- [22] Y. Huangfu, J.Y. Wu, R.Z. Wang, Z.Z. Xia. Experimental investigation of adsorption chiller for micro-scale BHP system application. *Energy and Buildings* 39 (2007)
- [23] prEN 14511-3:2015. Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen für die Raumbeheizung und -kühlung und Prozess-Kühler mit elektrisch angetriebenen Verdichtern – Teil 3: Prüfverfahren.
- [24] prEN 14825:2017. Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern zur Raumbeheizung und -kühlung – Prüfung und Leistungsbemessung unter Teillastbedingungen und Berechnung der jahreszeitbedingten Leistungszahl.
- [25] EUROVENT RS 6/C/003-2015. Rating standard for the certification of liquid chilling packages.
- [26] VDI 4650-1:2016. Berechnung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpenanlagen – Blatt 1: Elektrowärmepumpen zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung.
- [27] VDI 4650-2:2013. Kurzverfahren zur Berechnung der Jahresheizzahl und des Jahresnutzungsgrads von Sorptionswärmepumpenanlagen – Blatt 2: Gas-Wärmepumpen zur Raumheizung und Warmwasserbereitung.
- [28] EN 12900:2013. Kältemittel-Verdichter – Nennbedingungen, Toleranzen und Darstellung von Leistungsdaten des Herstellers.
- [29] DIN V 18599:2011. Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwasser und Beleuchtung. (Mehrere Teile, hier insb. Teil 7: Endenergiebedarf von Raumlufttechnik- und Klimakältesystemen für den Nichtwohnungsbau und Teil 9: End- und Primärenergiebedarf von stromproduzierenden Anlagen.
- [30] S. Reißmann. Messtechnische Untersuchungen zur Optimierung der Regelung einer Adsorptionskältemaschine. Interner Bericht des Instituts für Energiesystemtechnik an der Hochschule Offenburg, 2018.
- [31] P. Sawant, J. Pfafferott, C. Felsmann. Quasi-First Principle Based Grey-Box Modelling of Microscale Trigeneration Systems for Application in Automatic Control. 10th IFAC Symposium on Control of Power and Energy Systems, Tokyo (Japan), 2018.


 AUTOREN  
VITA


Prof. Dr.-Ing. JENS PFAFFEROTT

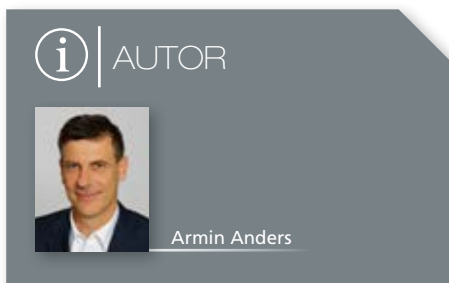
Prof. Dr.-Ing. Jens Pfafferott (1971), Studium der Energie- und Verfahrenstechnik an der TU Berlin, Promotion an der Universität Karlsruhe (TH). Beruflicher Werdegang: Energieversorger envia (Cottbus) und Vattenfall (Berlin) sowie Fraunhofer ISE (Freiburg). Seit 2011 vertritt Prof. Pfafferott die Lehrgebiete Thermodynamik, Mess- und Regelungstechnik, Wärmeversorgung und Klimatechnik, Planung und Betrieb technischer Anlagen sowie die Forschung zur nachhaltigen Gebäudetechnik an der Hochschule Offenburg

**Kontakt** Hochschule Offenburg  
Institut für Energiesystemtechnik  
Badstraße 24  
77652 Offenburg  
Tel.: 0049-(0)781-205-4604  
E-Mail: jens.pfafferott@hs-offenburg.de



B.Eng. SASCHA REISSMANN

B.Eng. Sascha Reißmann (1985), gelernte Fachkraft für Veranstaltungstechnik, Studium der Energiesystemtechnik an der Hochschule Offenburg. Seit 2017 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energiesystemtechnik (INES) in den Bereichen Betriebsoptimierung von Adsorptionskältemaschinen in Energieverbundsystemen, Stadtklimasimulation und thermische Behaglichkeit in öffentlichen Gebäuden.



# Digitales Flächenmanagement für die Mitarbeiterbindung

**Gebäudefläche ist eine sehr wertvolle Ressource, vor allem in Ballungsräumen.** Gemäß aktueller Analysen werden jedoch Flächen wie Büroarbeitsbereiche typischerweise lediglich zu 54 Prozent genutzt.<sup>1</sup> Die Digitalisierung von Gebäuden ermöglicht es, auf Basis von Sensordaten genaue Flächen-nutzungsprofile zu erstellen und damit die tatsächliche Flächenauslastung zu ermitteln. Wie lassen sich diese Informationen im nächsten Schritt verwenden? Zunächst können Gebäudebetreiber mithilfe entsprechender Analysen Energie- und Betriebskosten sparen. Tatsächlich geht der Nutzen eines digitalen Flächenmanagements aber weit darüber hinaus: Nutzungsdaten können als Grundlage für die Umsetzung flexibler Arbeitsplatzmodelle dienen und helfen als Teil moderner Arbeitswelten, die Mitarbeiter als höchstes Gut stärker an ein Unternehmen zu binden. Zusätzlich werden lernende Managementsysteme dabei unterstützen, Raumnutzung und Investitionsentscheidungen noch genauer anhand des tatsächlichen Bedarfs zu treffen. (siehe **Bild 1**)

Innovation ist die erfolgreiche Umsetzung einer Idee. Was sich im ersten Moment einfach anhört, ist gerade im Hinblick auf den Einsatz innovativer Technologien oftmals eine große Hürde. Denn der Mensch spielt eine zentrale Rolle dabei, sie umzusetzen. Genauso verhält es sich mit dem digitalen Flächennutzungsmanagement in Büros. Die Technologien gibt es bereits. Doch selbst wenn sich ein klarer Return-on-Investment (ROI) beziffern lässt, ist immer noch ein kultureller Wandel vonnöten.

Gerade die stark umworbenen Fachkräfte oder so genannten High Potentials stehen einer

dynamischen Arbeitswelt offen gegenüber. So sehen laut einer Studie von indeed.com knapp 75 Prozent der Arbeitnehmer in Deutschland flexible Arbeitsmodelle als wichtiges oder sehr wichtiges Entscheidungskriterium bei der Wahl des Arbeitgebers. Für 78 Prozent der so genannten Generation Y, also Arbeitnehmer zwischen 23 und 38 Jahren, ist das Arbeitsumfeld wichtig.<sup>2</sup> Damit geht der Nutzen innovativer Arbeitswelten weit über eingesparte Betriebskosten hinaus. Es

<sup>1</sup> Quelle: Steelcase

<sup>2</sup> Quelle: CBRE: „Millennials: Myths and Realities“





**Bild 1:** Facility Manager können über digitales Flächenmanagement einen hohen, individuellen Wohlfühlfaktor in Büros bereitstellen. Die sich einmietenden Unternehmen sammeln damit Pluspunkte im Wettbewerb um Fachkräfte und binden wichtige Wissensträger an sich.

entwickelt sich immer mehr zu einem starken Instrument für mehr Mitarbeiterzufriedenheit und -bindung im Wettbewerb um potenzielle Arbeitnehmer (siehe **Bild 2**).

## 1. Schlüsseltechnologien

Der Nutzen von digitalem Flächenmanagement ist vielfältig. Ebenso vielfältig sind allerdings die Gebäude. Das ist vor allem dann eine besondere Herausforderung, wenn es um die Digitalisierung im Bestand geht. Bei bestehenden Gebäuden – das sind über 99 Prozent! – müssen die Systeme ohne große Umbaumaßnahmen im laufenden Betrieb implementiert werden. Das erfordert flexible Technologien und schließt eine umfangreiche Verdrahtung von vorneherein aus. Zudem sollte sich die Installation auch jederzeit erweitern und an sich ändernden Bedarf anpassen lassen. Denn über die Jahre wechseln in Bürowie in Wohngebäuden die Mieter und damit die jeweiligen Anforderungen. Oftmals macht auch eine schrittweise Digitalisierung Sinn.

Die erforderlichen Schlüsseltechnologien sind weitestgehend vorhanden. Dabei müssen fünf Kernelemente ineinandergreifen, um zum gewünschten Ergebnis bzw. Kundennutzen zu führen: Sensorik, (Cloud-) Plattform, Applikation, Systemintegration und Geschäftsmodell.

### 1.1 Sensorik

Der gesamte Digitalisierungsprozess basiert auf Rohdaten von möglichst vielen Punkten im Gebäude. Die Rolle dieser „Sinnesorgane“ übernehmen Sensoren, die per Funk die Informationen an Gateways zur Cloud übermitteln.



**Bild 2:** Laut einer Untersuchung von T-Systems und Microsoft lassen sich durch optimierte Flächennutzung pro Jahr typischerweise rund 3 €/m<sup>2</sup> an Energiekosten sowie bei der Flächenmiete etwa 30 €/m<sup>2</sup> einsparen. Bei zufriedenen Mitarbeitern liegt das Potenzial bei 300 €/m<sup>2</sup>, da eine Wohlfühlatmosphäre am Arbeitsplatz unter anderem die Produktivität fördert und die Bindung ans Unternehmen stärkt.



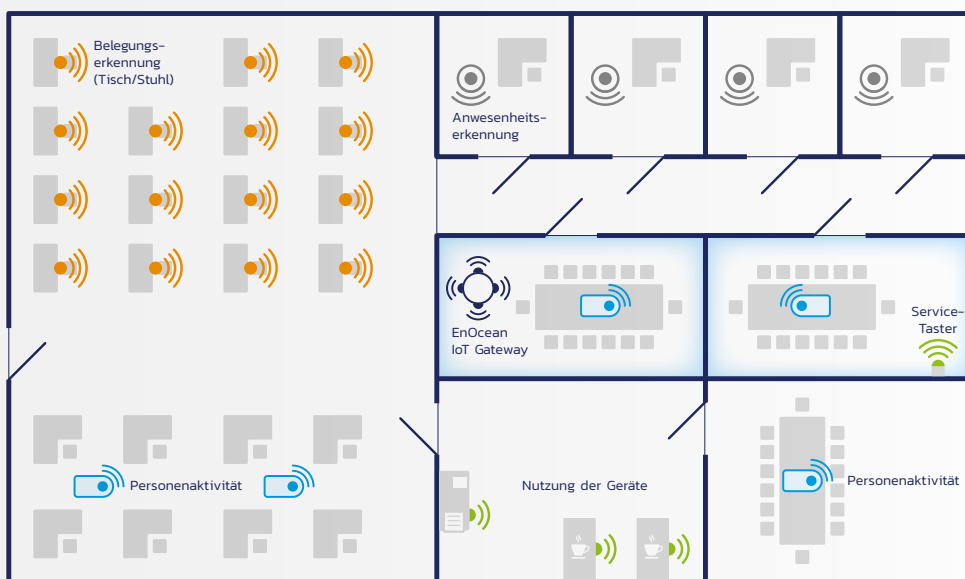
**Bild 3:** Energieautarke Schalter und Sensoren nutzen die Umgebung als Energiequelle. Dadurch arbeiten sie unabhängig von Kabeln oder Batterien und lassen sich auch an schwer zugänglichen Stellen platzieren. Einmal in Betrieb, müssen sie nicht gewartet werden und liefern die benötigten Rohdaten für ein digitales Flächenmanagement.

Diese Eigenschaft erfüllen batterie-lose Funk-sensoren, die Licht, Bewegung oder Temperaturunterschiede in ihrer unmittelbaren Umgebung als Energiequelle nutzen. Bei dieser Form von Energy Harvesting „ernten“ so genannte Energiewandler kleinste Energiemengen für den Betrieb und die Funkkommunikation von Sensoren, Schaltern oder auch Aktoren. Für jede Umgebungsenergie gibt es einen entsprechend angepassten Wandler. Ein elektrodynamischer Energiegenerator gewinnt allein aus Bewegung Energie, beispielsweise durch das Drücken eines Schalters. Innenlicht lässt sich über kleine Solarzellen bereits ab 50 Lux für elektrische Spannung nutzen (siehe **Bild 3**). Bei der Energieernte aus Temperaturdifferenzen kann die Kombination aus einem Thermowandler und einem Spannungsverstärker Temperaturunterschiede von bereits zwei Grad Celsius in nutzbaren Strom umsetzen. Ein integrierter Langzeitenergiespeicher sorgt bei Bedarf für einen ausreichend großen Energievorrat, der auch tagelange Perioden mit fehlender Umgebungsenergie überbrückt.

Funksensoren lassen sich sowohl in Neubauten als auch im Bestand flexibel ohne Verkabelung verteilen. Für einen 360 Grad-Blick in Echtzeit auf die Raumnutzung werden jedoch eine Menge Sensoren benötigt. In größeren Komplexen können das mehrere Tausend sein. Deshalb sollten die Komponenten nicht nur kabellos, sondern auch wartungsfrei sein.

Im Gebäude liefern solche batterie- und damit wartungsfreien Sensoren zahlreiche Parameter wie Temperatur, Feuchtigkeit, Lichtstärke, Anwesenheit, Personenaktivität und Gerätebeschleunigung oder geöffnete bzw. geschlossene Türen, Fenster und Schränke. Mithilfe dieser

## Flächennutzungsmanagement



**Bild 4:** Unauffällig verteilte Sensoren erfassen unterschiedliche Informationen zur Nutzung von Büromöbeln, Geräten und Räumen oder zu Aktivitäten. Sie dienen als Basis für ein genaues Profil, das Optimierungspotenziale aufzeigen kann.

Daten lassen sich detaillierte Nutzungsmuster des Gebäudes, des Personals und des Inventars erstellen. Diese spiegeln den tatsächlichen Bedarf und bilden die Grundlage für eine effiziente, energiesparende Flächennutzung und damit zusammenhängende Services.

### 1.2 Cloud-Plattform

Die nächste Ebene eines Digitalisierungssystems sind IoT-Plattformen, entweder als lokale oder Cloud-Lösung. Letztere bietet diverse Vorteile: Kunden müssen die benötigte IT-Infrastruktur nicht im eigenen Gebäude bereitstellen und betreiben, zudem können sie Synergie-Effekte der Anbieter nutzen. Ein Cloud-System ist hoch flexibel und lässt sich jederzeit nach Bedarf ausbauen. Dieser zukunftsorientierte Ansatz geht einher mit höchstmöglicher Datensicherheit.

Die Plattform speichert die erfassten Sensordaten, gewährleistet einen sicheren Datenzugriff und ermöglicht die Analyse der Informationen. Das schließt auch die Auswertung historischer Daten im Vergleich zu aktuellen Entwicklungen mit ein. Sie dient dadurch als zentrales Steuerungssystem, das verschiedenste Applikationen abbilden kann und sich für individuelle Anforderungen einrichten lässt.

### 1.3 Applikation

Die Applikation verknüpft die Daten zu Prozessen und steuert diese. Mithilfe von Visualisierungssoftware lassen sich die Informationen auswerten und daraus entsprechende Maßnahmen ableiten. Die Zukunft liegt in der Integration mit Organisations- und Managementsystemen. Die Firma THING TECHNOLOGIES beispielsweise verknüpft die Informationen mit einem Buchungssystem.

### 1.4 Systemintegration

Der Systemintegrator definiert die Gesamtsystemspezifikation und bringt im entscheidenden Schritt alle vier Ebenen zusammen. Er hat die herausfordernde Aufgabe, das System zu planen und alle Komponenten so zusammenzuführen, dass sie verschiedene Geschäftsmodelle abbilden. Dabei ist die Interoperabilität der einzelnen Bausteine eine zentrale Voraussetzung. Ein Digitalisierungssystem besteht aus Komponenten verschiedener Hersteller und sollte unbedingt mit offenen Standards arbeiten. Diese vielschichtigen Partnerschaften zeichnen die heutigen Lösungen aus. Das Ziel dabei ist eine intelligente Datenanalyse über beispielsweise lernende Systeme, die sich am Kundennutzen orientieren und sich jederzeit flexibel ändern oder erweitern lassen. In Zukunft können sie außerdem nahtlos an vorhandene Gebäudeautomationssysteme angebunden werden, um auch bereits vorhandene Gebäudeinformationen zentral zusammenzuführen und weiterreichende Analysen zu ermöglichen.

## 2. Workplace Management

Die entscheidende Frage für Facility Manager und Kunden bei der Digitalisierung ist: Was mache ich nun konkret mit den Daten? Die Antworten darauf sind so umfangreich wie die Flächennutzung in unseren Gebäuden. Mit Hinblick auf den eingangs diskutierten Wert der Mitarbeiterbindung betrachten wir hier die verschiedenen Anwendungen für eine Büroarbeitsfläche.

Ein Schlagwort hierzu ist Workplace Management. Dabei soll die Fläche den Menschen dienen, die sie nutzen, und ihnen eine optimale Arbeitsumgebung bieten. Für Facility Manager bedeutet das laut FM – Die Möglichmacher, Dienstleistungen zu entwickeln, die „über Technik, Energie und Sauberkeit“



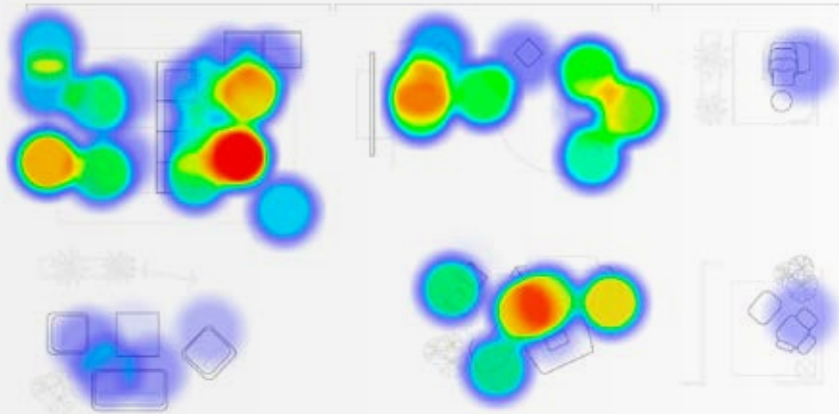
## Durchatmen mit gutem Gewissen

Entdecken Sie die passivhaus-zertifizierten Wohnungslüftungsgeräte von Systemair.

- Hochintelligent und energiesparend
- Gegenstrom- oder Rotationswärmetauscher
- Für Wohnflächen unterschiedlichster Größe
- Mit flexiblen Kanalsystemen für jeden Einbau
- Luftqualität per App von unterwegs regeln







**Bild 5:** Eine sogenannte Heatmap zeigt Aktivitäten über einen bestimmten Zeitraum hinweg. Intelligente Systeme nutzen diese Informationen zusammen mit dem historischen Verlauf, um Rückschlüsse auf die Nutzung der Fläche zu ziehen. (Quelle: T-Systems)

hinausgehen. Sie positionieren sich damit als wichtiger Partner von Arbeitgebern im Wettbewerb um hochqualifizierte Mitarbeiter.

### 2.1 Energieeffizienter Betrieb

Eine gut quantifizierbare Basisfunktion ist sicherlich die automatisierte Steuerung von Licht, Temperatur oder Luftqualität anhand der aktuellen Raumnutzung. Anwesenheitssensoren in Besprechungsräumen (siehe **Bild 4**) beispielsweise schalten das Licht aus, wenn alle das Zimmer verlassen haben. Ähnliche Sensoren können aber auch darauf hinweisen, dass die ersten Mitarbeiter an bestimmten Tagen nicht vor 8 Uhr das Büro betreten und am Freitag ab 15 Uhr ganze Stockwerke unbesetzt sind. Dadurch kann das System die Heizzeiten entsprechend anpassen. Der Klassiker bei der Heizungssteuerung ist auch hier: Fenster auf – Heizung aus. Dabei darf aber der individuelle Wohlfühlfaktor nicht außer Acht gelassen werden. Der Mitarbeiter muss bei Bedarf über einen Schalter oder eine App die Heizung oder die Klimaanlage an seinem Arbeitsplatz weiterhin regeln können.

### 2.2 Ressourcenverwaltung

Eine Kernaufgabe des Flächenmanagements in Büros ist es, die vorhandenen Ressourcen optimal zu nutzen. Ein wichtigster Service für Mitarbeiter ist in diesem Zusammenhang ein Buchungssystem für Besprechungsräume. Dabei können sie direkt über ihren Kalender in Echtzeit sehen, ob ein gebuchter Raum tatsächlich belegt ist und welche Alternativen er nutzen kann. Das spart unnötige Fußwege und sorgt gleichzeitig für weniger Leerstand.

Denkt man dieses Prinzip weiter, lässt es sich auf die Ressource „Mitarbeiter“ ausweiten. Belegungssensoren (Tisch/Stuhl) an Arbeitsplätzen (**Bild 4**) erlauben beispielsweise die Einführung eines Hotdesking-Konzepts. Dabei buchen die Mitarbeiter von Zuhause ihren Arbeitsplatz im Büro für die Zeit, die sie anwesend sind. Das ermöglicht flexible Arbeitszeiten mit Home Office kombiniert mit freier Arbeitsplatzwahl. Zudem lässt sich erkennen, ob ein Kollege für ein persönliches Gespräch vor Ort ist. Das sind alles Kriterien, die auf dem Wunschzettel vieler Mitarbeiter weit oben stehen. Gleichzeitig kann ein Unternehmen von vorneherein mit weniger festen Plätzen planen und dadurch kostenintensive Fläche sparen. Das unterstützt auch das Ergebnis einer Untersuchung, nach der an einem durchschnittlichen Arbeitstag etwa 37 Prozent der Arbeitnehmer nicht im Büro anwesend sind.<sup>3</sup>

### 2.3 Personenzählung

Neben der personengenauen Erfassung an einzelnen Sitzplätzen oder in Meetingräumen können Aktivitätssensoren an der Raumdecke (siehe **Bild 4**) Daten liefern, die auf die Aktivität der anwesenden Personen über einen gewissen Zeitraum hinweg hinweisen. Im Gegensatz zu Kameras ist der Einsatz solcher Sensoren datenschutzrechtlich nicht bedenklich. Mithilfe verteilter solar-versorgter Aktivitäts-Tracker lassen sich bereits direkt einfache Heatmaps der Personenaktivitäten in einem Gebäude generieren (siehe **Bild 5**). Ist ein großer Besprechungsraum

<sup>3</sup> Quelle: Steelcase

beispielsweise von nur wenigen Personen besetzt, können diese in einen kleineren umziehen, falls eine größere Gruppe den Raum benötigt. Bei einem Alarm ist zudem sofort sichtbar, in welchem Gebäudebereich sich noch Personen aufhalten. Das IoT-Unternehmen THING TECHNOLOGIES hat einen Algorithmus entwickelt, der aus den Nutzungs- und Aktivitätsprofilen des Sensors sogar ableitet, wie viele Leute sich etwa in einem Raum aufhalten. Der Algorithmus berechnet daraus die Auslastung der Räume und erstellt zusammen mit historischen Daten ein genaues Nutzungsprofil. Weniger gut ausgelastete Stellen wie zum Beispiel ein abgelegener Besprechungsraum können aufgewertet, die Größe angepasst oder eine völlig neue Verwendung der Fläche angedacht werden.

#### 2.4 Personalplanung

Das Personal für Reinigung und Technik ist ebenfalls eine planbare Ressource. Sensordaten dienen dabei als Basis, um einen optimierten und klar dokumentierten Reinigungszyklus anhand des tatsächlichen Bedarfs abzuleiten. Gleichzeitig liefern die Daten dem Facility Manager die Bestätigung, dass die nötigen Arbeiten ausgeführt wurden. Für die technischen Anlagen können Daten wichtige Prognosen liefern, anhand derer nötige Wartungsarbeiten vorausschauend geplant werden können. Die Nutzungshäufigkeit der Fahrstühle oder Leistungsschwankungen bei Heizung und Klima dienen hier als messbare Größen. Anhand dieser Zahlen lassen sich unnötige Ausfälle vermeiden und gleichzeitig die Wartungsarbeiten so organisieren, dass sie die Büromitarbeiter möglichst wenig oder gar nicht beeinträchtigen.

#### 2.5 Verfügbarkeit und Nutzung von Geräten

Digitales Flächenmanagement umfasst aber auch die Geräte im Büro wie Drucker, Beamer oder Kaffeeautomaten (siehe **Bild 4**). Über Funkensoren, die beispielsweise Vibrationen erfassen, lässt sich die Verfügbarkeit und Nutzungsdauer der Geräte prüfen. Damit spart sich der Mitarbeiter einen überflüssigen Gang zum Drucker, wenn das System meldet, dass dieser gerade mit einem Auftrag belegt ist. Gleichzeitig können die Geräte auf ihre Auslastung hin bewertet werden. Als Folge kann der Drucker an einen anderen, besser zugänglichen Platz gestellt werden. Der bis dato ungenutzte Beamer zieht in einen anderen Besprechungsraum um oder umgekehrt wird

nach etlichen Stunden Betriebsdauer vorsorglich die Birne gewechselt.

### 3. Ausblick: Investitionsentscheidungen

Die Digitalisierung von Gebäuden, auch IoT (Internet der Dinge) genannt, ist ein komplexes Zusammenspiel vieler Kompetenzen, das auf offenen Schnittstellen und interoperablen Standards basiert. Die Flexibilität batterieloser Funksensoren und der Fortschritt lernender Systeme und Künstlicher Intelligenz erlauben es, die erfassten Daten für zahllose Anwendungen nutzbringend auszuwerten und individuelle Optimierungsprozesse bedarfsgerecht umzusetzen. Aus Investitionssicht bedeutet das für Unternehmen, sie können ihre Flächen und Ressourcen optimal anhand des tatsächlichen Bedarfs nutzen und planen. Historische Daten liefern die nötigen Informationen, um gezielter zukünftige Investitionsentscheidungen zu treffen. Beispielsweise, welche Geräte neu angeschafft werden müssen oder um die Räume auf die Belegschaft abzustimmen. Der höchste Gewinn für ein Unternehmen ist die Mitarbeiterzufriedenheit und -produktivität durch einen attraktiven Arbeitsplatz, mit dem es sich deutlich von der Konkurrenz im Wettbewerb um begehrte Fachkräfte abhebt. Hier liegen die Zukunft und der große Nutzen der Digitalisierung.

#### i | AUTOREN VITA



ARMIN ANDERS


Mitgründer der EnOcean GmbH

|           |  |
|-----------|--|
| seit 2012 | Vice President Business Development  |
| 2002-2012 | Vice President Product Management und Application Engineering der EnOcean GmbH                                   |
| 2000-2002 | Venture Manager der Siemens Technology Accelerator GmbH  |
| 1995-2000 | Projektleiter für die Siemens Zentralabteilung Technik   |
| 1990-1995 | Marketing Manager für Mikrocontroller bei der Siemens AG   |
| 1985-1990 | Studium der Elektrotechnik mit Schwerpunkt Informations- und Kommunikationstechnik an der Universität Karlsruhe. |


**Kontakt** E-Mail: [info@enocean.com](mailto:info@enocean.com)  
Tel: 089-6734689-0



**i** | KONTAKT



DAGMAR JÄHNIG  
d.jaehnig@aee.at



CHRISTIAN FINK  
c.fink@aee.at

# „Digitaler Zwilling“ soll die Regelung von Gebäudetechnik erleichtern

*Ein in Echtzeit simulierter „Digitaler Zwilling“ könnte Gebäude künftig über ihren gesamten Nutzungszeitraum hindurch begleiten. Damit soll es möglich sein, mit der gleichen Anzahl an Sensoren im Gebäude mehr Informationen über den Gebäudestatus zu bekommen und damit die Regelqualität zu verbessern. Das von AEE INTEC, Gleisdorf, geleitete Sub-Projekt ist Teil von „Arrowhead Tools“, dem größten EU-Projekt zur Digitalisierung in der Industrie.*

Wenn in etwa einem Jahr das neue R&D-Bürogebäude von Infineon Technologies Austria in Villach in Betrieb geht, wird das rund 20.000 m<sup>2</sup> große Gebäude von seinem „Digitalen Zwilling“ begleitet werden. Der Zwilling ist eine Gebäudesimulation, die alle wichtigen Regelgrößen der Haustechnik abbilden soll. Als eines von 20 Tools soll er im Rahmen des Projektes „Arrowhead Tools“ entwickelt werden, dem mit insgesamt 91 Millionen Euro und 81 Partnern größten EU-Projekt zur Digitalisierung in der Industrie, das Anfang Mai gestartet ist. Für die Projektleitung des digitalen Zwillings ist das AEE – Institut für Nachhaltige Technologien (AEE INTEC) in Gleisdorf, Österreich, verantwortlich. Neben AEE INTEC und Infineon zählt bei der Entwicklung des digitalen Zwillings auch EQUA Solutions

(Schweden/Schweiz) – die Gebäudesoftware-Schmiede, aus deren Haus zum Beispiel auch das Simulationsprogramm IDA ICE stammt – zu den Kernpartnern.

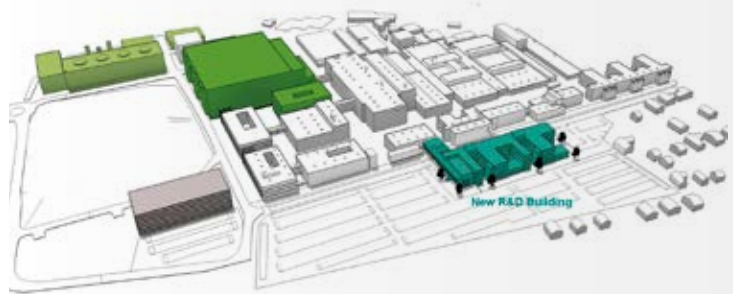
Im Rahmen von Arrowhead Tools soll der Digitale Zwilling nicht nur entwickelt, sondern in Echtzeit mit den Messdaten aus dem Gebäude gekoppelt werden. So sollen Realität und Simulation stetig miteinander abgeglichen werden. Dafür sind die Laborräume, Großraumbüros und Besprechungsräume des Bürogebäudes mit spezieller Sensorik ausgestattet. „Der Abgleich ist vor allem am Anfang wichtig. Für zukünftige Umsetzungen ist das Ziel, durch den digitalen Zwilling, mehr Informationen über das Gebäude zur Verfügung zu haben, um die Regelung

der Haustechnik zu optimieren“, sagt Dagmar Jähmig, Projektleiterin bei AEE INTEC. Hilfreich ist das vor allem bei Werten, die man wegen des hohen Aufwandes so gut wie nie misst, wie die operative Raumtemperatur. Ähnlich wie die gefühlte Temperatur beim Wetterbericht gibt sie das tatsächliche Temperaturempfinden der Nutzerinnen und Nutzer besser wieder als die reine Lufttemperatur. Maßgeblich ist dafür zum Beispiel die Oberflächentemperatur der Wände im Raum. Doch der digitale Zwilling liefert nicht nur mehr und aussagekräftigere Daten, sondern erlaubt es auch, diese im Voraus zu kalkulieren und so zum Beispiel schneller auf Wetter- oder Nutzungsänderungen zu reagieren.

Christian Fink, Bereichsleiter Thermische Energietechnologien und hybride Systeme bei AEE INTEC, sieht den Digitalen Zwilling als eine konsequente Weiterentwicklung im Zuge der Digitalisierung der Bau- und TGA-Branche und als eine Art nächsten Schritt im Building Information Modeling (BIM). „Beim Building Information Modeling wurde zunächst die Planung weitgehend digitalisiert, um effizienter im Prozess zu sein und Fehler in den Abläufen zu minimieren. Im nächsten Schritt begleitet der digitale Zwilling das reale Gebäude durch seine gesamte Lebensdauer hindurch. Funktioniert die Kopplung mit dem digitalen Abbild wie geplant, kann der Energieverbrauch sowie der Komfort für Nutzerinnen und Nutzer in automatisierter Form optimiert werden“.

## Über AEE INTEC

AEE – Institut für Nachhaltige Technologien (AEE INTEC) mit Sitz in Gleisdorf wurde 1988 als außeruniversitäre Forschungseinrichtung gegründet. Es ist heute eines der führenden Institute im Bereich angewandter Forschung. AEE INTEC arbeitet gemeinsam mit Industriepartnern an der stetigen Weiterentwicklung von Energieversorgungstechnologien und



**Bild 1:** Standorterweiterung Infineon Villach mit neuem R&D Gebäude im Vordergrund  
Copyright: Infineon Austria



**Bild 2:** Gruppenbild Kick-Off Meeting in Göteborg, Mai 2019  
Copyright: Arrowhead Tools



**Bild 3:** Kick-Off Meeting in Göteborg, Mai 2019: Dagmar Jähmig (AEE INTEC) und Daniel Donesch (Infineon)  
Copyright: AEE INTEC

Systemen in Niedrigenergie-, Nullenergie- und Plusenergiegebäuden sowie deren Verbund in Siedlungen, Quartieren und Städten. Darüber hinaus beschäftigt sich AEE INTEC mit der Entwicklung von Energiespeichern, deren systemischen Integration sowie mit Themen der Energieeffizienzsteigerung und der Integration von erneuerbaren Energieträgern in der Fernwärme als auch in produzierenden Betrieben. In diesen Gebieten entwickelt AEE INTEC nicht nur Komponenten und Systeme, sondern unterstützt auch Organisationen und Unternehmen bei der Umstellung auf eine nachhaltige und effiziente Energieversorgung. AEE INTEC beschäftigt rund 65 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter.

## KONTAKT

AEE – Institut für Nachhaltige Technologien  
Feldgasse 19  
8200 Gleisdorf  
www.aee-intec.at



*Komfort-Innenverschluss für den  
LTM Thermo-Lüfter – und der Lärm bleibt draußen!*

# Dezentrale Wohnraumlüftung – Vergangenheit und Zukunft

In der Vergangenheit hat die Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung in Deutschland stetig an Bedeutung gewonnen. Gesetze wie die Energieeinsparverordnung EnEV oder die Anforderung an die Gebäudedichtheit machen die kontrollierte Lüftung zu einem wichtigen Baustein der Gebäudeplanung. Mit ihr lässt sich zum einen der Energiebedarf des Hauses senken und zum anderen der Schutz vor Feuchteschäden sicherstellen. Auch die Gebäudesicherheit wird erhöht, denn die frische Luft kann in den Raum einströmen, ohne dass Fenster geöffnet werden müssen. Seit mehreren Jahren steigt die Marktentwicklung der dezentralen Wohnraumlüftung enorm an. Im Jahre 2016 konnte eine Steigerung von 21 % verzeichnet werden. Die Anwendungen sind vielfältig und finden ihren Einsatz sowohl in Mehrfamilienhäusern als auch in Einfamilienhäusern. Gerade im Sanierungsfall ist die Installation ohne das aufwändige Verlegen von Luftkanälen einfach zu realisieren. Mit Einzelraumlüftern kann sowohl im Neubau als auch im Gebäudebestand das vorgeschriebene Lüftungskonzept nach DIN 1946-6 realisiert werden. Zulassungen durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) bestätigen die Umsetzung und Einhaltung aktueller technischer Normen und Vorgaben.

## **Zentral oder dezentral**

Die generelle Unterscheidung bei Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung beruht auf der Einteilung

in zentrale und dezentrale Systeme. Bei Zentralanlagen wird immer ein Kanalsystem vom Lüftungsgerät zu den einzelnen Räumen verlegt; die zu belüftenden Räume werden mit Luftventilen ausgestattet, über die sie mit Luft aus dem Lüftungsgerät versorgt werden. Bei dezentralen Systemen werden die einzelnen Lüfter in der Außenwand der zu belüftenden Räume positioniert.

Eine weitere Unterscheidung innerhalb der dezentralen Lösungen mit WRG teilt die Produkte in Geräte mit Kreuzgegenstrom-Wärmeübertrager und Geräte mit Pendelbetrieb. Lüftungsgeräte mit Pendelbetrieb wechseln in einer voreingestellten Frequenz ihre Luft- richtung. Da sie immer paarweise betrieben werden, wird dadurch eine perfekte Durchströmung der Wohneinheit sichergestellt. Die Steuerung erfolgt über eine zentrale Bedieneinheit und sorgt somit für die richtige Einstellung in jeder Lebenssituation – durch die Verwendung von zwei Steuerungen kann eine Wohneinheit z. B. in zwei eigenständige Zonen aufgeteilt werden.

Innerhalb der Gruppe der Pendellüfter können weitere Aufteilungen je nach Gerätetechnik vorgenommen werden. Ein wesentlicher Unterschied liegt in der Art des Wärmespeichers: Während einige Geräte mit einem keramischen Wärmetauscher arbeiten und diesen waagrecht anordnen, verfügt der LTM Thermo-Lüfter über einen senkrecht angeordneten Aluminium-Wärmespeicher – die Ableitung von Kondensat sowie der hygienische Betrieb sind somit sichergestellt, denn Aluminium lässt sich problemlos reinigen.



**Bild 1:** LTM Thermo-Lüfter – zwei Gerätevarianten für vielfältige Anwendungen



**Bild 2:** Die Aluminium-Wärmespeicher für den LTM Thermo-Lüfter – hocheffiziente Wärmerückgewinnung, leicht zu reinigen, hygienisch unbedenklich

Anzeige

Das Funktionsprinzip LTM Thermo-Lüfter ist so einfach wie genial. Im ersten Schritt befördert der Ventilator die verbrauchte und warme Luft für 40 bzw. 50 Sekunden (je nach Thermo-Lüfter Modell) ins Freie; dabei wird die Wärme an die Aluminium-Wärmespeicher abgegeben. Nun dreht der Ventilator seine Richtung um und die kalte und frische Außenluft wird über die warmen Speicherpakete in den Wohnraum geführt. Durch den paarweisen Betrieb erfährt die Wohneinheit eine komplette Durchlüftung und ist immer im Gleichgewicht von Zu- und Abluft. Der LTM Thermo-Lüfter 1230 zum Beispiel arbeitet mit Zu- und Abluft-Volumenströmen von 18–65 m<sup>3</sup>/h je Gerät in der Betriebsart Thermo-Lüftung. Im Querlüftungsbetrieb kann das Gesamtfördervolumen bis zu 130 m<sup>3</sup>/h betragen. Dabei beträgt die elektrische Leistungsaufnahme für die Grundlüftung gerade einmal 2 Watt (TL 200-50).

### Normen und Gesetze

Architekten, Planer und Fachhandwerker von Wohngebäuden müssen die unterschiedlichsten Normen und Regelwerke einhalten. Laut der von der Bundesregierung verabschiedeten Energieeinsparverordnung muss Energie in Wohngebäuden eingespart werden. Zusätzlich wird unter §6 die Anforderung an die Luftdichtheit und den Mindestluftwechsel reglementiert.

„Der **LTM Thermo-Lüfter** ist Teil des neuen Teams.“

Burkhard Max, Geschäftsführer

**Unsere Familie wächst aus Überzeugung:  
LTM Thermo-Lüfter gehört jetzt zu tecalor**

- ∴ Komfortlüftungssystem mit Wärmerückgewinnung als dezentrale Wohnraumlüftung
- ∴ Geeignet für Neubau und Sanierung

Unternehmenskultur ist bei uns Familienkultur. Gemeinsam arbeiten wir an innovativen Produkten und Systemlösungen mit der festen Überzeugung:  
**Wärme wird grün.**

[www.tecalor.de](http://www.tecalor.de)

**tecalor**  
Wärme wird grün



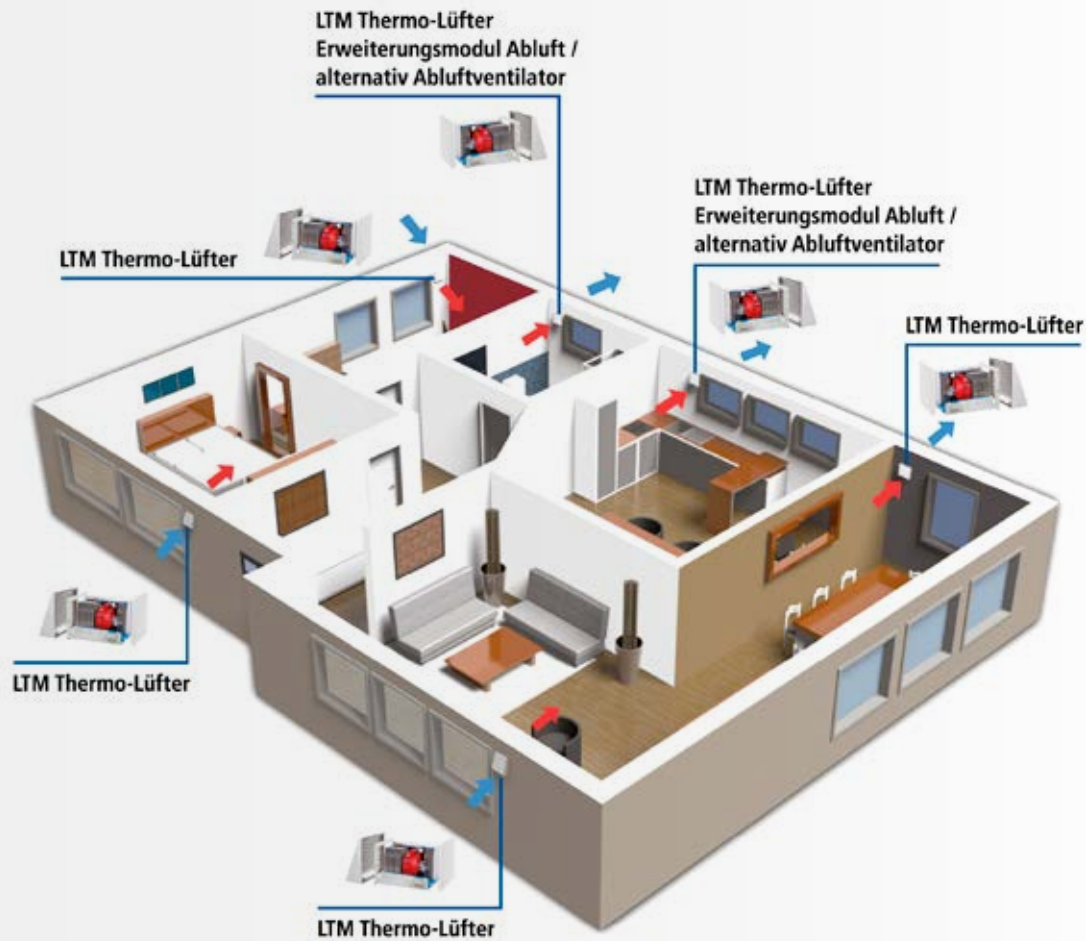


Bild 3: Beispiel-Positionierung mit LTM Thermo-Lüfter

Dieser Mindestluftwechsel wird mittels der DIN 1946-6 „Lüftung von Wohnungen“ berechnet. Das Ergebnis wird in einem sogenannten Lüftungskonzept ausgewiesen und ist bei Baugenehmigung zu erfüllen. Ist hiernach eine Lüftungstechnische Maßnahme erforderlich, so ist die Auslegung der Ventilatorleistung nach „Nennlüftung“ zu projektieren. Zusätzlich ist eine abgesenkte und intensive Lüfterstufe sicherzustellen. Im Energiepass senkt der Wärmerückgewinnungsgrad den Primärenergiebedarf; so werden Energieeffizienzklassen des Gebäudes leichter erreicht und Förderkriterien unterschritten. Durch die Projektierung von Lüftungsanlagen ist der Gebäudeschutz vor Feuchteschäden sichergestellt. Dabei ist darauf zu achten, dass die Lüftungsgeräte die vorgeschriebene bauaufsichtliche Zulassung (DIBt) aufweisen.

Für den ordnungsgemäßen und normativen Betrieb ist die Erstellung eines Lüftungskonzepts von entscheidender Bedeutung. Jeder Wohnraum wie Wohnzimmer, Küche, Schlaf- und Kinderzimmer sowie Arbeits- oder Gästezimmer erhält einen LTM Thermo-Lüfter. Falls

durch die Raumaufteilung keine gerade Anzahl von Einzelgeräten erzielt werden kann, besteht entweder die Möglichkeit mittels Halblastgeräten eine gerade Anzahl zu schaffen und somit druckneutral zu arbeiten oder dies wird durch Regelungsanpassung gewährleistet. Für die Auslegung des Lüftungskonzepts nach DIN 1946-6 (EnEV) ist immer der Luftvolumenstrom im alternierenden Betrieb unter Berücksichtigung des normativen Schalldruckpegels in Ansatz zu bringen.

Das Badezimmer kann über einen reinen Abluftventilator entlüftet werden, um darüber die geruch- und feuchtebelastete Luft ins Freie abzuführen. Alternativ kann auch hier ein LTM Thermo-Lüfter installiert und mittels einem Erweiterungsmodul „Abluft“ betrieben werden. In diesem Fall fungiert das Gerät bei Bedarf als reiner Ablüfter und wenn das Bad ohne Belastung ist, als Pendellüfter mit WRG. Die Firma tecalor, mit der die LTM zum September 2019 verschmolzen ist, unterstützt mit ihrer Fachabteilung ihre Fachpartner bei der normgerechten Auslegung und Planung ihrer Projekte.





In der Fakultät Gebäudetechnik und Informatik der Fachhochschule Erfurt ist zum 01.10.2020 für den Studiengang Gebäude- und Energietechnik die

## Lösungen für hohe (Schallschutz-) Ansprüche

Mit dem Komfort-Innenverschluss für die Thermo-Lüfter-Familie bietet tecalor eine ideale Lösung für lärmbelastete Bauvorhaben. Der elegante Abschluss für die Rauminnenseite ermöglicht mittels der integrierten, innenliegenden Schalldämmung eine zusätzliche Reduzierung des Umgebungslärms um bis zu 8 dB<sup>1</sup>. Die Kombination mit der entsprechenden Fassadenlösung kann in Fällen mit hohen Schallschutzanforderungen schon eine ausreichende Reduzierung bewirken und erleichtert die Entscheidung für ein dezentrales Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung. Die LTM Thermo-Lüfter werden durch diese Weiterentwicklung auch bei Projekten mit Vorgaben eines Lärmschutzgutachtens zur allerersten Wahl und die Gebäude erfahren durch aktiven Lärmschutz eine attraktive Aufwertung.

## Mehr als Komfortgewinn

Spricht man von Schimmelrisiko in schlecht belüfteten Räumen, so ist aus Sicht des Immobilienbesitzers vor allem die Schädigung der Baustoffe ein gravierendes Problem. Aus Sicht der Bewohner jedoch gehen mit Schimmel ernsthafte gesundheitliche Risiken einher. Schimmelpilze und deren Sporen gehören zu den gefährlichsten Innenraumallergenen und können eine Vielzahl von Krankheiten und allergischen Reaktionen auslösen. Wer mit kontrollierter Wohnungslüftung der Schimmelbildung vorbeugt, betreibt also gleichzeitig aktiven Gesundheitsschutz. Auch Pollenallergiker können aufatmen, denn Spezialfilter für den LTM Thermo-Lüfter halten die Pollen draußen.

<sup>1</sup> In Anlehnung an das Vergleichsverfahren für Gebäudemessungen nach DIN EN ISO 717-1:2006

## KONTAKT

tecalor GmbH  
Lüchtringer Weg 3  
37603 Holzminde  
Fon: 05531/99068-95082  
Fax: 05531/99068-95712  
E-Mail: [info@tecalor.de](mailto:info@tecalor.de)  
[www.tecalor.de](http://www.tecalor.de)

## Professur für Gebäudeautomation

### (1 Stelle, Besoldungsgruppe W2, Kennziffer G15)

zu besetzen.

Die Stelle steht unbefristet zur Verfügung. Bei der ersten Berufung in ein Professorenamt erfolgt die Beschäftigung grundsätzlich auf Zeit befristet auf drei Jahre. Das Verfahren zur Umwandlung des Beamtenverhältnisses auf Zeit in ein Beamtenverhältnis auf Lebenszeit entnehmen Sie bitte § 86 Abs. 2 Thüringer Hochschulgesetz (ThürHG).

Die Inhaberin/Der Inhaber der Stelle soll die Lehre in den Bachelor- und Masterstudiengängen der Fachrichtung Gebäude- und Energietechnik vertreten, insbesondere im Fachgebiet Gebäudeautomation in den Modulen Elektrotechnik und Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik. Es wird erwartet, dass zusätzliche Wahl- und Wahlpflichtmodule angeboten werden. Die Bereitschaft zur fakultätsübergreifenden Zusammenarbeit wird vorausgesetzt.

Erwartet werden neben einem einschlägigen technischen Studium im Fachgebiet sowie einer Promotion und der pädagogischen Befähigung, der Nachweis mehrjähriger beruflicher Praxis im Fachgebiet. Darüber hinaus werden Kenntnisse in der Messdatenerfassung und -verarbeitung erwartet. Ein Engagement in der angewandten Forschung und der aktiven Beteiligung in der Selbstverwaltung wird ebenso erwartet. Internationale Erfahrungen sind wünschenswert sowie die Bereitschaft die Lehre auch in englischer Sprache durchzuführen.

Über die Stellenbeschreibung hinaus sind die Aufgaben in § 83 ThürHG festgelegt. Insbesondere wird die Mitarbeit in den Hochschulgremien, bei der Weiterentwicklung der Lehre und der Pflege internationaler Kontakte erwartet. Die allgemeinen Einstellungsvoraussetzungen ergeben sich aus § 84 ThürHG. Einzelheiten hierzu können im Internet unter [www.fh-erfurt.de](http://www.fh-erfurt.de) nachgelesen werden.

Wir wünschen uns mehr Frauen in Lehre und Forschung an unserer Hochschule und freuen uns daher besonders über Bewerbungen von Interessentinnen. Schwerbehinderte werden bei gleicher Eignung bevorzugt eingestellt.

Die Bewerbungsunterlagen sind in Kopie einzureichen. Nach Abschluss des Auswahlverfahrens werden die Unterlagen nicht berücksichtigter Bewerberinnen/Bewerber vernichtet. Bei gewünschter Rücksendung bitten wir um Beilage eines ausreichend frankierten Rückumschlages. Durch die Bewerbung entstehende Kosten werden nicht erstattet.

Rektor der Fachhochschule Erfurt  
Altonaer Straße 25, Postfach 45 01 55  
99051 Erfurt

E-Mail: [rektorat@fh-erfurt.de](mailto:rektorat@fh-erfurt.de)  
<http://www.fh-erfurt.de>

Wir verarbeiten die von Ihnen übermittelten personenbezogenen Daten nach § 27 ThürDSAnpUG-EU.

# Wie hat sich die DIN 1946 bis heute weiter entwickelt?

## Einleitung

Bis Ende der 80-iger Jahre war die DIN 1946 eine für die Planung und Realisierung von raumluftechnischen Anlagen sowohl in ihrer praxisgerechten Aussagekraft als auch in ihrem inhaltlichen Umfang als eine wichtige Norm zu werten.

DIN 1946, auch als VDI-Lüftungsregeln bezeichnet, enthält in ihrer Struktur mehrere Blätter :

- Blatt 1: Grundlagen für raumluftechnische Anlagen und Freie Lüftungssysteme
- Blatt 2: gesundheitstechnische Anforderungen an raumluftechnische Anlagen
- Blatt 3: Klimatisierung von Personenkraftwagen und Lastkraftwagen
- Blatt 4: Raumluftechnische Anlagen in Gebäuden und Räumen des Gesundheitswesens
- Blatt 6: Lüftung von Wohnungen
- Blatt 7: Raumluftechnische Anlagen in Laboratorien

Diese Blätter wurden entsprechend aus fachlicher Sicht oder auf Grund neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse) notwendigerweise aktualisiert.

Sowohl für Blatt 1 als auch insbesondere bei Blatt 2 ergaben sich im Rahmen der Anpassung an die europäische Normung Aktualisierungen beim Inhalt und bei der Nummerierung.

Im Folgenden wird der Versuch unternommen, die Weiterentwicklung des Inhaltes der Norm, speziell Blatt 1 und Blatte 2 aufzuzeigen, ohne detailliert auf Änderungen der Inhalte einzugehen. Die Daten der Veröffentlichung werden hinsichtlich der zeitlichen Zuordnung aufgezeigt.

## DIN 1946 Blatt 1 und folgende

Blatt 1 erschien bereits 03/1951 und wurde 04/1960 und 10/1988 überarbeitet.

Die Norm gilt als Grundlage für raumluftechnische Anlagen und für Freie Lüftungssysteme. Sie enthält wichtige Begriffe der Raumluftechnik und erläutert die Aufgaben, die Klassifikation, die Systeme und die Baueinheiten raumluftechnischer Anlagen. Ferner enthält diese Norm Hinweise über die Aufgaben von Freien Lüftungssystemen und erläutert die Systeme und die Bauelemente der Freien Lüftung. Schließlich sind hier

Darstellungen, Einheiten, Formelzeichen und graphische Symbole, wie sie in der Raumluftechnik verwendet werden, aufgeführt.

Eine Ablösung erfolgte mit der DIN EN 12792 „Lüftung von Gebäuden .Symbole, Terminologie und graphische Symbole; Deutsche Fassung“, (Ausgabe: 01/2004 (Ersatz für DIN 1946 T. 1 von 10/1988)).

## DIN 1946 Blatt 2 und folgende

Die Norm erschien erstmalig: 04/1960 und erschien 01/1983 und 01/1994 als aktueller Weißdruck mit dem Inhalt „Gesundheitstechnische Anforderungen an raumluftechnische Anlagen hinsichtlich der Behaglichkeit von Personen bei leichter Tätigkeit im Aufenthaltsbereich von Räumen. Systeme der freien Lüftung werden nicht erfasst, da wegen der Abhängigkeit von den Außenbedingungen die gewünschte Luftqualität und Behaglichkeit nicht immer erreicht werden können.

Das Blatt wurde durch DIN EN 13779 „Lüftung von Nichtwohngebäuden –Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlsysteme“ (Ausgaben 05/2005 und 07/2009) bzw. DIN SPEC 13779 von 12 /2009 „ Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlsysteme – Nationaler Anhang zu DIN EN 13779:2007-09“ national untersetzt.

Im weiteren europäischen Normungsverfahren wurde DIN EN 13779 durch die DIN EN 15251 „Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumlufqualität, Temperatur, Licht und Akustik“ mit den Ausgaben von 08/2007 und 12/2012 ergänzt abgelöst. Als nationaler Anhang wurde die VDI 4706 „Kriterien für das Raumklima (VDI-Lüftungsregeln) als Entwurf (Ausgabe:08/2009; 04.2011) ergänzt.

Im Rahmen der Bewertung der Gebäudeeffizienz und der technischen Anlagen wurden DIN EN 15251 und DIN EN 13779 durch die DIN EN 16798 Bl. 1 und DIN EN 16798 Bl. 3 ersetzt. Während DIN EN 16798 Bl. 3 „Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden - Teil 3: Lüftung von Nichtwohngebäuden – Leistungsanforderungen an Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und

Raumkühlsysteme (Module M5-1, M5-4)“ als Weißdruck seit 11/2017 (deutsche Fassung) vorliegt, ist Bl. 1 gegenwärtig nur als Entwurf in der Fassung von 10/2017 „Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden – Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; – Module M1-6; Deutsche und Englische Fassung“ verfügbar (seit 05/2019 gibt es die englische Endfassung des Blattes 1, die deutsche Fassung wird zeitnah erscheinen).

### Schlussfolgerungen

Neue Erkenntnisse zu den Inhalten der Norm wurden notwendiger Weise in der Vergangenheit eingearbeitet. Dass sich dadurch der Umfang erhöhen kann, ist plausibel.

Es ist jedoch die Tendenz zu erkennen, dass die Norm als praktikables Arbeitsmittel immer mehr zu einer wissenschaftlichen Unterlage wird. Dies betrifft auch die o.g. Blätter der Norm.

Einen erheblichen Einfluss auf die Inhalte als auch auf die Zuordnung (strukturelle Bezeichnung) hat die europäische Normungsarbeit. Deutsche Aspekte werden i.A. in den nationalen Anhängen dokumentiert

Die vorliegenden europäischen Normen (DIN EN) haben einen Umfang erreicht, der für den Anwender (Planer, Ausführenden, Bauherrn) inhaltlich kaum noch überschaubar ist und es kann deshalb zwangsläufig in der Praxis zu Rechtsunsicherheiten bei der Gewährleistung von geschuldeten Leistungen bei Raumlufttechnischen Anlagen führen.



**Hochschule Esslingen**  
University of Applied Sciences

Nah an Mensch und Technik.

Die Fakultät Gebäude-Energie-Umwelt der Hochschule Esslingen sucht eine\* einen

**Professorin\* Professor (W2)**

für das Lehrgebiet  
„Sanitärtechnik“  
(Kennziffer GU-P-1922)

Die Einstellungsvoraussetzungen für Professor\*innen sind neben einem abgeschlossenen Hochschulstudium, pädagogischer Eignung und der Promotion (mit einer Gesamtbewertung besser als „rite“) in § 47 Landeshochschulgesetz geregelt.

Bewerber\*innen müssen bereit sein, Grundlagenvorlesungen und Vorlesungen in fachlich benachbarten Gebieten sowie Aufgaben in der Selbstverwaltung der Hochschule zu übernehmen und sollten in der Lage sein, Lehrveranstaltungen in englischer Sprache durchzuführen.

Bei gleicher Eignung werden schwerbehinderte Bewerber/-innen bevorzugt berücksichtigt.

Die vollständige Ausschreibung finden Sie unter:

[www.hs-esslingen.de/professuren](http://www.hs-esslingen.de/professuren)



**i** | AUTOREN  
VITA



Prof. em. Dr.-Ing. ACHIM TROGISCH

|             |   |
|-------------|---|
| 1963 – 1964 | Motorenbauer  |
| 1964 – 1969 | Studium der TGA, TU Dresden   |
| 1969 – 1972 | Assistent auf dem Gebiet der Bauklimatik, TU Dresden  |
| 1973        | Promotion   |
| 1973 – 1990 | Mitarbeiter, Abteilungsleiter, Fachbereichsleiter, ILK Dresden  |
| 1990 – 1995 | Niederlassungsleiter Dresden der HL-Technik AG München  |
| 1996        | Professur, Fakultät Maschinenbau, LG TGA, HTW Dresden   |
| 2009        | Beendigung der Lehrtätigkeit  |
| Seit 2009   | Ruhestand   |
| Seit 2005   | Vorsitzender des Fördervereins für Luft- und Kältetechnik   |
|             | Vorstandsmitglied im Förderverein HTW, Förderverein Ingenieurausbildung HTW-TU Dresden  |
|             | Autor und Mitautor zahlreicher Fachbücher, Autor von ca. 300 Fachartikeln, Lehrtätigkeit in der Weiterbildung der Ingenieurkammer und Architektenkammer Sachsen |

Kontakt

E-Mail: [achim.trogisch@htw-dresden.de](mailto:achim.trogisch@htw-dresden.de)