

Wie viele andere Bereiche steht auch die Lüftungstechnik durch die fortschreitende Integration digitaler Technologien am Beginn einer tiefgreifenden Transformation. Die Vernetzung von ohnehin vorhandenen Sensoren und weiteren Anlagenkomponenten ermöglicht, auch Lüftungsanlagen zunehmend mit Künstlicher Intelligenz (KI) zu betreiben.

Bis zu 42 % Energieeinsparung

Künstliche Intelligenz in der Lüftungstechnik

In der Lüftungstechnik gibt es aktuell rasante Fortschritte. Ausgehend vom Internet of Things (IoT) und vernetzten Zentralmanagementsystemen erstrecken sich diese über Datenanalyse- und Machine-Learning-Algorithmen zur Optimierung des Energieverbrauchs bis zu Cloud-Computing-Lösungen, die eine Echtzeit-Datenverarbeitung für prädiktive Wartung, Automatisierung und digitale Zwillinge erlauben. Als Hersteller von Lüftungs- und Klimageräten arbeitet die Hansa Klimasysteme GmbH, Saterland, bereits seit 2018 an solchen Systemen, und wird dabei unter anderem durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt gefördert. Für die Schwimmbadlüftung ist seit 2023 mit dem modelprädiktiven KI-Regler „etaSmart“ ein marktreifes Produkt erhältlich. Ausgehend von dessen Technologie können kurzfristig weitere Potenziale in der Lüftungstechnik erschlossen werden.

Ausgangslage

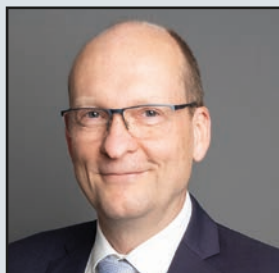
Lüftungsgeräte verfügen je nach Anwendung über unterschiedliche Ausstattungsmerkmale. Bei einer komplexen Lüftungsaufgabe, wie sie zum Beispiel in Museen und Schwimmbädern vorliegt, ist deshalb auch eine komplexe Regelstrategie notwendig, um die geforderten Sollwerte auch

bei unterschiedlichen Randbedingungen einzuhalten.

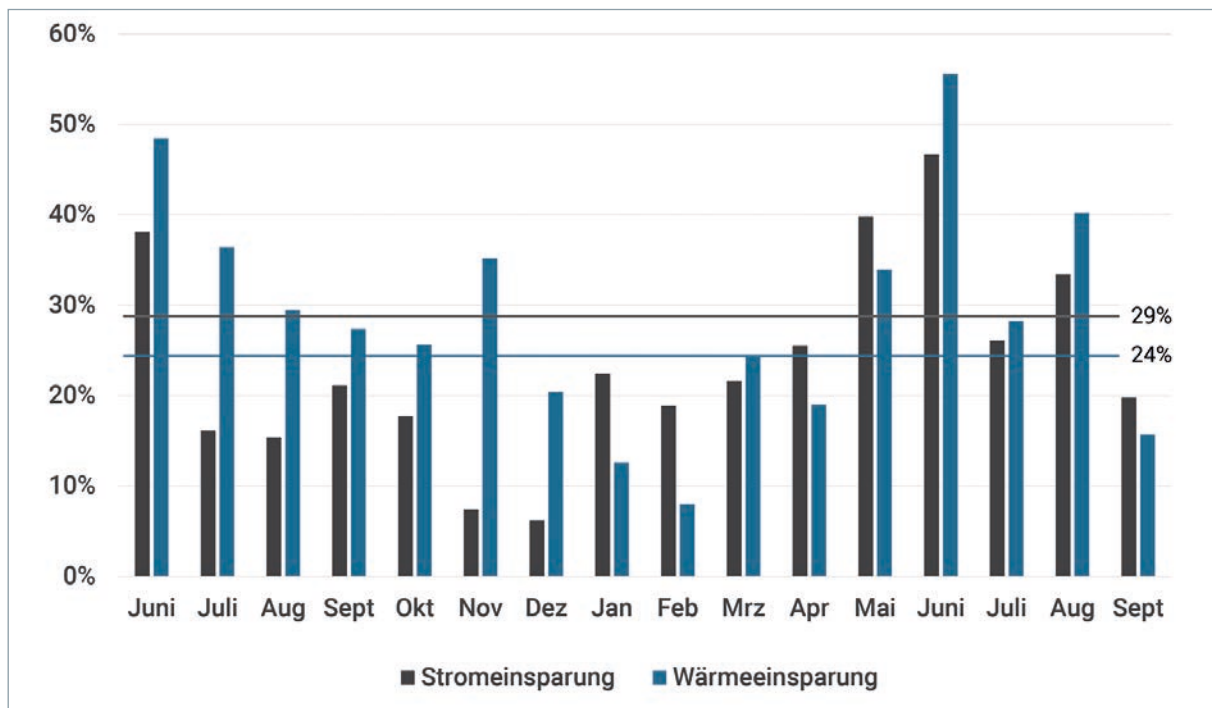
Derzeitige Regelungsstrategien zeichnen sich meist durch „Best Practice“-Ansätze aus: Basierend auf jahrelanger Erfahrung wird die Betriebsart des Gerätes definiert und durch Variation bekannter und handhabbarer Parameter auf die Sollwerte geregelt. So lassen sich zwar die gewünschten Sollwerte einstellen, es ist aber nicht gesagt, dass damit auch die effizienteste Betriebsart gewählt wird, da das Gerät nicht in allen Abhängigkeiten betrachtet wird. Insbesondere bleiben dabei die Interaktion mit dem Gebäude und auf andere Zonen wirkenden Geräte unberücksichtigt.

Zur Veranschaulichung: Für ein Schwimmbadlüftungsgerät gilt zum Beispiel, dass die gewünschte Hallenluftkondition durch verschiedene Kombinationen von Umluftverhältnis, Außenluftmischungsverhältnis, Integration einer Wärmepumpe (wenn vor-

AUTOR



Dr.-Ing. Matthias Lamping,
Geschäftsleiter der Hansa Klimasysteme GmbH, Saterland
(Abb. © Hansa Klimasysteme)



Energieeinsparungen im Schwimmbad Ramsloh, ermittelt durch intermittierenden, tagweisen Betrieb konventioneller Regler/KI-Regler in den Jahren 2021 und 2022 (Abb. @ Hansa Klimasysteme)

handen), Luftvolumenstrom und Lufterhitzerleistung erreicht werden kann. Allein die Klappenstellungen spielen jedoch schon eine zentrale Rolle bei der Bestimmung des Gesamtströmungswiderstands des Gerätes.

Änderungen der Klappenpositionen wirken sich indes nicht nur auf die Heiz- und Entfeuchtungsleistung der Anlage aus, sondern beeinflussen auch erheblich den Stromverbrauch der Ventilatoren. Dagegen ermöglicht der zusätzliche Betrieb einer Wärmepumpe, die Wärmeenergie der Fortluft nach der Wärmerückgewinnung (WRG) im Verdampfer aufzunehmen und im Kondensator zum Heizen abzugeben. Das geht jedoch mit einem höheren Stromverbrauch einher. Der energetisch effizienteste Betriebspunkt lässt sich somit nur bestimmen, wenn zusätzlichen zu den aktuellen Luftzuständen auch die Ventilatoren- und Wärmepumpenkennlinien sowie die aktuelle Außenwetterlage berücksichtigt wird. Zusätzlich sind die Energiepreise zu beachten.

Die Herausforderung besteht

also darin, einen guten Kompromiss zwischen Klimatisierungskosten und Komfortniveau zu finden. Es geht darum, wie viel man für eine bestimmte Komfortverbesserung zu investieren bereit ist. Es kann nämlich vorkommen, dass der Betrieb des Lüftungssystems bei voller Kapazität keine signifikante Verbesserung des Komfortniveaus gegenüber dem Teillastbetrieb bewirkt, aber die Energiekosten deutlich erhöht. Genauso muss darauf geachtet werden, dass zwei oder mehr Geräte, die auf eine Lüftungszone wirken, nicht gegeneinander oder mit unterschiedlichen Sollwerten arbeiten.

Dies sind Aufgabenstellungen, die mit konventionellen Reglern nicht gelöst werden können. Die zentrale Frage lautet daher, welcher Betriebsmodus bei einem spezifischen Heiz- und Entfeuchtungsbedarf unter bestimmten Wetterbedingungen und der jeweiligen Badbelegung optimal ist. Dies lässt sich nur durch den Einsatz eines Anlagenmodells in einem modellbasierten prädiktiven Regelsystem beantworten.

Optimale Regelung

Im Gegensatz zu konventionellen Regelansätzen sind modellprädiktive Regler (MPC) für die zuvor beschriebenen Aufgabenstellungen sehr gut geeignet. Die modellprädiktive Regelung nutzt mathematische Modelle zur Vorhersage zukünftiger Systemverhalten, was eine proaktive Anpassung der Steuerung ermöglicht und somit die Effizienz, Stabilität und Robustheit in dynamischen Systemen verbessert.

Sehr wichtig sind dabei die Modelle, die in einem MPC zum Einsatz kommen. Denn auch hier gilt: „Shit in, shit out“. Wenn die Modelle nicht in der Lage sind, das Verhalten des Gesamtsystems hinreichend gut abzubilden, dann ist der Regler auch nicht in der Lage, das System proaktiv möglichst optimal zu regeln. Deshalb wurde im Zuge unserer Regler-Entwicklung geprüft, mit welchem Ansatz die Modellierung am zielführendsten ist. Für eine möglichst effiziente Betriebsweise müssen die Anlage, das Gebäude und dessen Nutzung zusammen

betrachtet werden. Deshalb wurden Geräte- und Gebäudemodelle jeweils als physikkonsistentes neuronales Netz (KI-Ansatz) und als physikbasiertes Modell entwickelt. Dabei stellte sich heraus, dass das Gerätemodell besser als physikbasiertes Modell auszuführen ist, während das Gebäudemodell wegen der höheren Komplexität als neuronales Netz ausgeführt werden sollte.

Im Detail besteht unser Regelsystem aus einem zweistufigen Regler. Die übergeordnete Ebene umfasst einen MPC-Regler, dessen Gebäudemodell wie zuvor beschrieben ein neuronales Netzwerk ist, das auf einer speziellen Netzwerkarchitektur basiert. Diese Architektur ermöglicht es, ein Netz zu trainieren, dessen Verhalten mit einem physikalisch basierten Modell übereinstimmt. Durch die Betrachtung vergangener Datenfolgen kann das Modell zukünftige Zeitreihen der Hallentemperatur und Luftfeuchtigkeit aus früheren Ausgangswerten sowie aus vormaligen Werten anderer Zeitreihen wie Heizung, Entfeuchtung, Wetterbedingungen und Belegung vorhersagen. Die lokale Ebene besteht aus MPC-Reglern mit den jeweiligen Gerä-

temodellen. Diese erhalten den von der oberen Ebene vorgegebenen Heiz- und Entfeuchtungsbedarf und bestimmen daraus die optimalen Steuersignale für die Geräte.

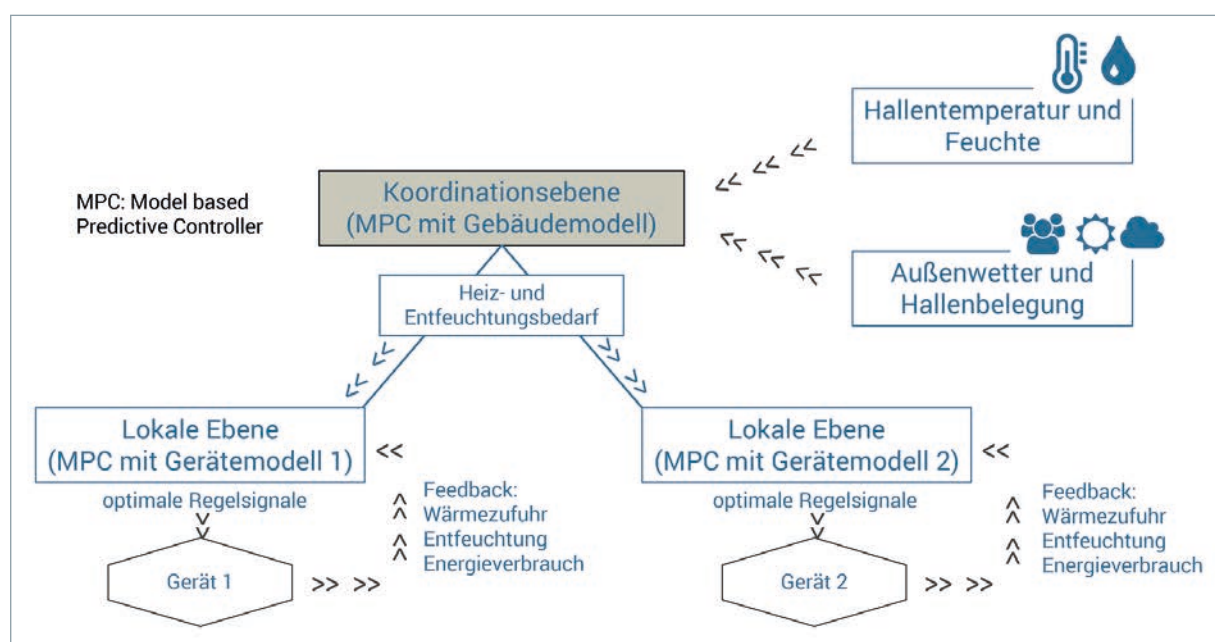
Das physikbasierte Gerätemodell basiert auf einem Widerstandsmodell. Analog zu einem elektrischen Schaltkreis werden Klappen, Register und die WRG als Widerstände dargestellt, während die Ventilatoren die antreibende Kraft liefern. Die Kennlinien werden anhand von Experimenten ermittelt, aus denen die Widerstandswerte der einzelnen Elemente und Klappen berechnet werden. Sobald alle Parameter bekannt sind, wird das Strömungsnetzwerk iterativ gelöst (berechnet). Anschließend werden Wärme- und Feuchtebilanzen entsprechend berechnet. In dieser Ausgestaltung verwendet der MPC das Modell des Systems, um dessen Verhalten vorherzusagen und diese Informationen zur Lösung eines Optimierungsproblems heranzuziehen.

Die Implementierung erfolgt, indem der MPC-Regler auf einem Industrie-PC (IPC) ausgeführt wird, der parallel zur konventionellen DDC-Steuerung (Direct Di-

gital Control) betrieben wird. Alle erforderlichen Daten und Sollwerte werden von der DDC an den IPC übertragen. Der IPC berechnet die optimalen Steuersignale und sendet sie zurück an die DDC.

Einsparpotenziale in Schwimmbädern

Das System wurde bislang in 15 Schwimmbädern implementiert und hat – abhängig von Anlagentyp und Wetterbedingungen – durchschnittlich etwa 20 % Energieeinsparung für die Lüftungsanlage erzielt. Am besten untersucht wurde die Schwimmhalle in Ramsloh, wo das System auch entwickelt und über 16 Monate im intermittierenden Betrieb die Unterschiede des Energieverbrauches zwischen konventionellem und MPC-Regler ermittelt wurden. „Mit 24 % mittlerer Stromeinsparung respektive 29 % mittlerer Wärmeeinsparung zeigt sich das enorme Potenzial dieses Ansatzes“, sagt dazu Stefan Krebstakies, Leiter des Servicepartners etaTECH. Die Kombination aus physikbasierten Modellen und physikkonsistenten



Übersicht der modellprädiktiven Regelstrategie (MPC) (Abb. @ Hansa Klimasysteme)

neuronalen Netzen erlaubt somit eine bisher unerreichte genaue Vorhersage von Heiz-, Entfeuchtungs- und Lüftungsbedarf.

Darüber hinaus bietet die vorhandene Systemarchitektur, bestehend aus IPC, MPC-Regler, kontinuierlicher Datenaufzeichnung und umfassenden Sensordaten, ideale Voraussetzungen für die prädiktive Wartung. Da die Anlagenmodelle permanent parallel zum realen Betrieb ausgeführt werden, funktionieren sie als Digitaler Zwilling der Lüftungsanlage. Durch den kontinuierlichen Vergleich zwischen modelliertem Normalbetrieb und real gemessenen Betriebsdaten lassen sich Abweichungen vom Normalzustand frühzeitig erkennen. Dies ermöglicht eine vorausschauende Wartungsplanung, die Verschleiß oder Anomalien im System erkennt, bevor sie zu Effizienzverlusten oder Ausfällen führen. Wir arbeiten derzeit aktiv an dieser Funktion. Erste vielversprechende Ergebnisse liegen vor.

Integrierte MPC-Zonenregelung

Nach den vielversprechenden Ergebnissen bei der Hallenbadlüftung wurde etaSmart für die Lüftungsregelung eines Mehrzonen-Gebäudes erweitert, in dem jede Zone über einen eigenen Volumenstromregler verfügt. In solchen Systemen funktioniert das Luftleitungsnetz als variabler Widerstand und hat einen großen Einfluss auf den Gesamtenergieverbrauch. Die simultane Erfüllung optimaler Komfortbedingungen in allen Zonen bei gleichzeitig energieeffizientem Betrieb von Lüftungsanlage und Volumenstromreglern stellt eine komplexe Optimierungsaufgabe dar, die ein ganzheitliches Modell des gesamten Systems erfordert. „Deshalb wurde das Luftlei-

tungsnetz mithilfe tiefer neuronaler Netzwerke modelliert und in das zentrale Lüftungsmodell integriert“, erklärt dazu Hossein Rezazadeh, Entwicklungsingenieur im Bereich Advanced Control Systems bei Hansa Klimasysteme. Parallel dazu wurden die einzelnen Zonen durch physikalisch konsistente neuronale Netzwerke abgebildet, die Heiz-, Kühl-, Entfeuchtungs- und Lüftungsbedarf präzise vorhersagen.

Eine zentrale Herausforderung bei der Steuerung von Mehrzonen-Systemen besteht darin, dass physikalische Einschränkungen eine vollständige Sollwertverfolgung in allen Zonen häufig verhindern, insbesondere wenn unterschiedliche Sollwerte pro Zone vorliegen. Unser Ansatz zielt darauf ab, einen optimalen Kompromiss zwischen den Komfortanforderungen der einzelnen Zonen und dem übergeordneten Ziel der Energieeinsparung zu erzielen. Durch die intelligente Verteilung von Heizung, Lüftung und Entfeuchtung auf die einzelnen Zonen wird der Energieverbrauch minimiert, während gleichzeitig ein akzeptables Komfortniveau gewährleistet bleibt.

Optimale Druckverhältnisse

Bei einem konventionellen Lüftungssystem zentraler Bau- und Betriebsweise muss durch entsprechende Auslegung sichergestellt werden, dass stets ausreichend Druck vorhanden ist, damit die Zuluft alle Räume erreicht – einschließlich solcher, die weit vom Ventilator entfernt liegen. Daher erzeugen die Ventilatoren einen konstanten Druck über das gesamte Luftnetz. Um den Luftstrom in den einzelnen Räumen zu steuern, werden häufig Drosselklappen eingesetzt. Das Abdrosseln der Luft verursacht jedoch Energieverluste, da der

Ventilator dann mehr Druck erzeugen muss, als tatsächlich benötigt wird.

Optimieren lassen sich solche Systeme mit einer Kombination aus MPC-Regelung und variablem Vordruck. Ein integriertes Modell des Lüftungsnetzes und der Ventilatoren dient dabei als Basis für die Echtzeitberechnung des optimalen Drucks des zentralen Ventilators. Von Vorteil ist dabei vor allem Folgendes: Jede Zone erhält die exakt benötigte Luftmenge, während der Energieverbrauch weiter reduziert wird, da der zentrale Druck nur so hoch eingestellt wird, wie es tatsächlich erforderlich ist – sich also am aktuell maximal erforderlichen Druck im Lüftungssystem orientiert.

In einem ersten Kundenprojekt wurde vor kurzem etaSmart mit integrierter Zonenregelung in einem Schwimmbad in Betrieb genommen, bei dem das zentrale Schwimmbadgerät drei Zonen versorgt. Mit unserer Regelung wird der Luftleitungsdruck dynamisch eingeregelt, sodass dieser um 60 bis 100 Pa niedriger liegt als mit konventioneller Regelung. Erste Ergebnisse zeigen Energieeinsparungen von 25 % für den Stromverbrauch und 42 % für die Wärme.

Fazit: Insgesamt bietet MPC-Zonenregelung mit Modellierung der Luftleitungen durch neuronale Netze damit großes Potenzial für den Einsatz in Mehrzonen-Gebäuden wie Büros, Schulen, Kinos oder anderen Einrichtungen, in denen eine zentrale Lüftungsanlage mit regelbarem Luftleitungsnetz mehrere Zonen mit unterschiedlichen Anforderungen versorgt. Die hier vorgestellten Ansätze zeigen: KI in der Lüftungstechnik ist bereits da und wird dazu beitragen, durch verschiedenste Ansätze Lüftungssysteme deutlich effizienter betreiben zu können. *