

Effizienz im Teillastbetrieb

Einsparung von Elektroenergie in RLT-Anlagen durch optimierte Anzahl der Ventilatoren

Neben dem Auslegungspunkt sind besonders in Teillastbetriebsfällen weitere Einspareffekte in raumluftechnischen Anlagen und Geräten relevant.

Im ersten Fachbericht „Elektroenergieeinsparung durch optimierte Anzahl der verwendeten Ventilatoren“ (erschieden in HLH BD. 75 (2024) Nr. 09) wurden die Stellschrauben und Möglichkeiten für die optimale Auslegung im Auslegungspunkt bereits aufgezeigt. Im zweiten Teil betrachten wir die Optimierungsmöglichkeiten der Effizienz im Teillastbetrieb.

TEXT: Christoph Kaup und Lukas Thomas

Die bedarfsgerechte Regelung der Volumenströme ermöglicht es, Energie einzusparen. Heute werden meist drehzahlregelte Systeme eingesetzt, die CO₂ als Surrogat und Messgröße für die Belegungsdichte eines Raumes verwenden. Bei einer voll turbulenten Strömung verändert sich der Druckabfall in den Anlagen im Verhältnis zum Quadrat der Luftgeschwindigkeit.

$$\Delta p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \zeta \cdot w^x$$

mit:

- ρ : Luftdichte in kg/m³
- ζ : Widerstandsbeiwert
- w : Luftgeschwindigkeit in m/s (analog zur Luftmenge)
- x : Exponent, $x = 2$ turbulente Strömung und $x = 1$ laminare Strömung

Da sich die Leistungsaufnahme P_m proportional zur Luftmenge und zum Druckabfall ändert, folgt:

$$P_{m_v} / P_{m_a} = (w_v / w_a)^y = (q_{vv} / q_{va})^y$$



Drehzahlgeregeltes Mehrventilatorensystem. Foto: Howatherm

- mit:
- P_{m_a} : Leistungsaufnahme bei Auslegungsvolumenstrom in kW
- P_{m_v} : Leistungsaufnahme bei variablem Volumenstrom in kW
- w_a : Luftgeschwindigkeit bei Auslegung in m/s
- w_v : variable Luftgeschwindigkeit in m/s
- q_{va} : Luftmenge bei Auslegung

- q_{vv} : variable Luftmenge in m³/s
- y : Exponent, $y = 3$ turbulente Strömung und $y = 2$ laminare Strömung

Es werden im Folgenden zwei Teillastbetriebszustände betrachtet. Zum einen der Betriebsfall mit variabler Druckverlustkennlinie der Anlage (Bild 1). Die Druckdifferenz wurde mit einem mittleren Exponenten von $x = 1,7$ berechnet, der einen üblichen Mittelwert zwischen turbulenter und laminarer Strömung darstellt.

Die Nutzung von vier Ventilatoren ermöglicht es, die verschiedenen Betriebszustände mit unterschiedlichen Kombinationen zu realisieren. Die Tabelle 1 zeigt, dass es sinnvoll ist, die Anlage ab 40 000 m³/h und darunter, mit drei Ventilatoren zu betreiben anstatt mit vier Ventilatoren.

Unter 20 000 m³/h wäre ein Betrieb mit zwei Ventilatoren energetisch sinnvoller. Die mögliche Energieeinsparung im Teillastbetrieb liegt zwischen fünf und acht Prozent. Mit der Reduzierung der verwendeten Ventilatoren könnte der nutzbare Teillastbereich von 30 000 auf 20 000 m³/h erweitert werden.

Wenn die Anlagenkennlinie einen konstanten Druckanteil von beispielsweise 200 Pa (zum Beispiel Volumenstromregler mit konstantem Vordruck) berücksichtigt, ergibt sich eine Druckkennlinie gemäß **Bild 2**.

In diesem Fall wäre es sinnvoll, die Anlage ab 40 000 m³/h mit drei Ventilatoren zu betreiben anstatt mit vier Ventilatoren. Ab einer Leistung von 25 000 m³/h wären zwei Ventilatoren effektiver und ab einer Leistung von 10 000 m³/h sogar nur ein Ventilator. Mit dieser Reduzierung könnte der Regelbereich von 20 000 m³/h mit vier Ventilatoren auf 10 000 m³/h erweitert werden (**Tabelle 2**).

Die erreichbare Energieeinsparung liegt im Teillastbetrieb bei etwa sechs bis 19 Prozent (vergleiche **Bild 3** und **Bild 4**).

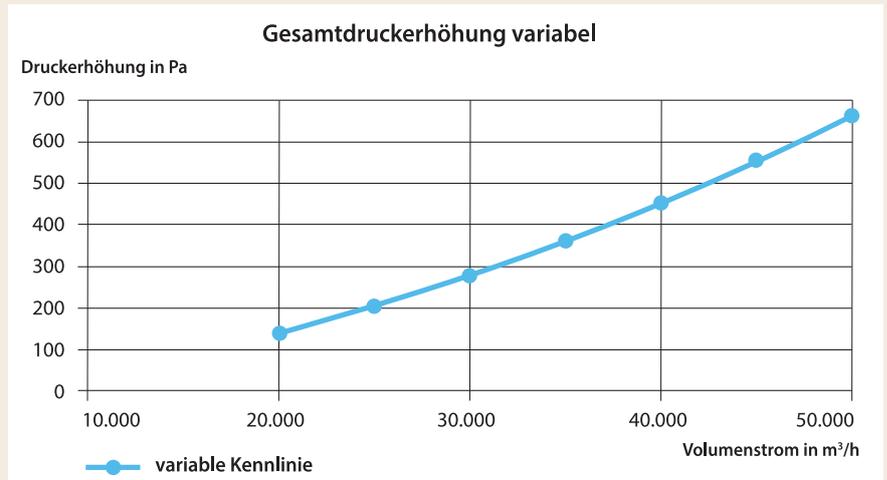


Bild 1: Variable Druckverlustkennlinie bei variablem Volumenstrom mit $x = 1,7$. Grafik: Howathern

| V | $\Delta P_{var.}$ | 4. Ventilator | | | 3. Ventilator | | | 2. Ventilator | | |
|---------------------|-------------------|-----------------|-------|----------------------|-----------------|-------|----------------------|-----------------|-------|----------------------|
| | | η_{System} | Pm | Pm _{System} | η_{System} | Pm | Pm _{System} | η_{System} | Pm | Pm _{System} |
| [m ³ /h] | [Pa] | [%] | [kW] | [kW] | [%] | [kW] | [kW] | [%] | [kW] | [kW] |
| 50 000 | 664 | 61,7 | 3,794 | 15,176 | | | | | | |
| 45 000 | 555 | 58,4 | 3,010 | 12,040 | | | | | | |
| 40 000 | 454 | 54,4 | 2,354 | 9,416 | 57,8 | 2,980 | 8,940 | | | |
| 35 000 | 362 | 53,2 | 1,738 | 6,952 | 56,3 | 2,135 | 6,405 | 49,9 | 3,585 | 7,170 |
| 30 000 | 279 | 51,9 | 1,136 | 4,544 | 52,8 | 1,505 | 4,515 | 46,4 | 2,543 | 5,086 |
| 25 000 | 204 | | | | 50,1 | 0,965 | 2,895 | 45,4 | 1,582 | 3,164 |
| 20 000 | 140 | | | | | | | 42,9 | 0,920 | 1,840 |

| Ventilatoren | | Optimum | | Standard | | Einsparung | |
|--------------|---------------------|-------------------|---------------|--------------------|---------------|--------------------|-------------|
| in Betrieb | V | $\Delta P_{var.}$ | $\eta_{opt.}$ | Pm _{opt.} | $\eta_{opt.}$ | Pm _{opt.} | ΔPm |
| Anzahl | [m ³ /h] | [Pa] | [%] | [kW] | [%] | [kW] | [kW] |
| 4 | 50 000 | 664 | 61,7 | 15,176 | 61,7 | 15,176 | |
| 4 | 45 000 | 555 | 58,4 | 12,040 | 58,4 | 12,040 | |
| 3 | 40 000 | 454 | 57,8 | 8,940 | 54,4 | 9,416 | 0,476 |
| 3 | 35 000 | 362 | 56,3 | 6,405 | 53,2 | 6,952 | 0,547 |
| 3 | 30 000 | 279 | 52,8 | 4,515 | 51,9 | 4,544 | 0,029 |
| 3 | 25 000 | 204 | 50,1 | 2,895 | | | |
| 2 | 20 000 | 140 | 42,9 | 1,840 | | | |

Tabelle 1: Auslegung mit variabler Anzahl von Ventilatoren bei variablem Druck.

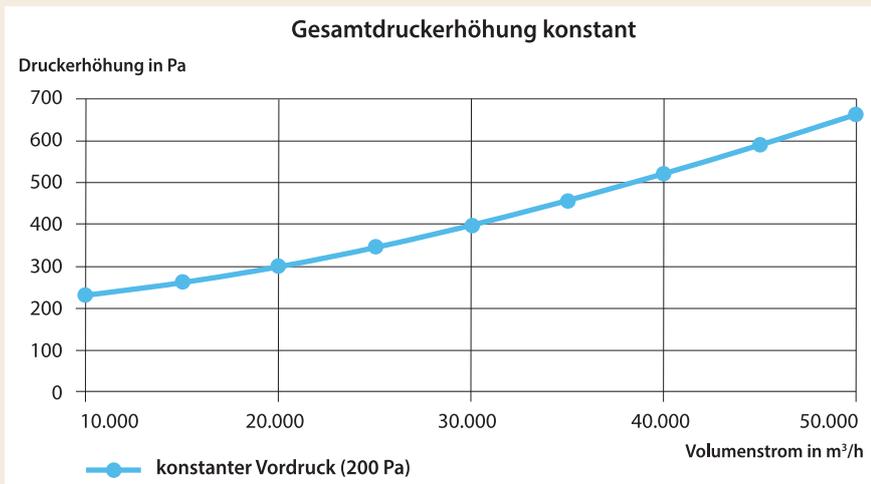


Bild 2: Druckverlustkennlinie bei variablem Volumenstrom mit $x = 1,7$ plus 200 Pa konstantem Druckanteil. Grafik: Howatherm

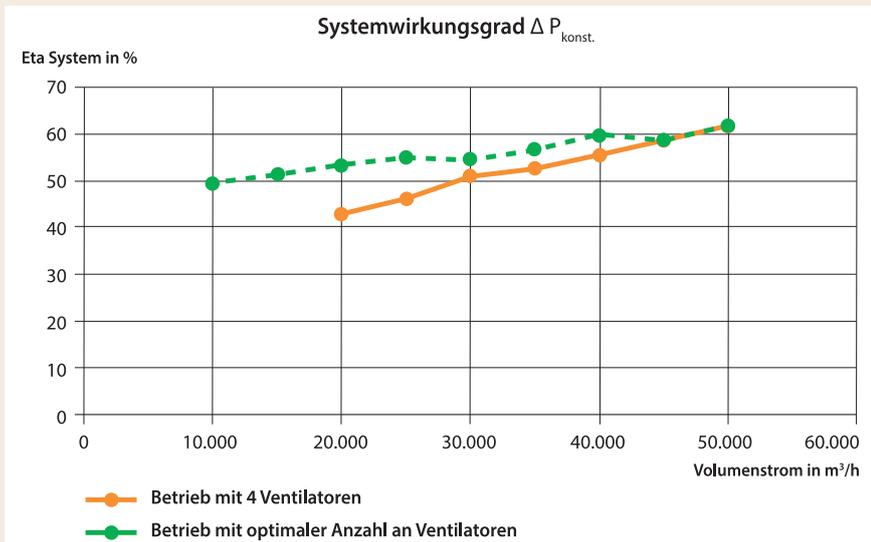


Bild 3: Wirkungsgradvergleich bei unterschiedlicher Anzahl von Abluftventilatoren. Grafik: Howatherm

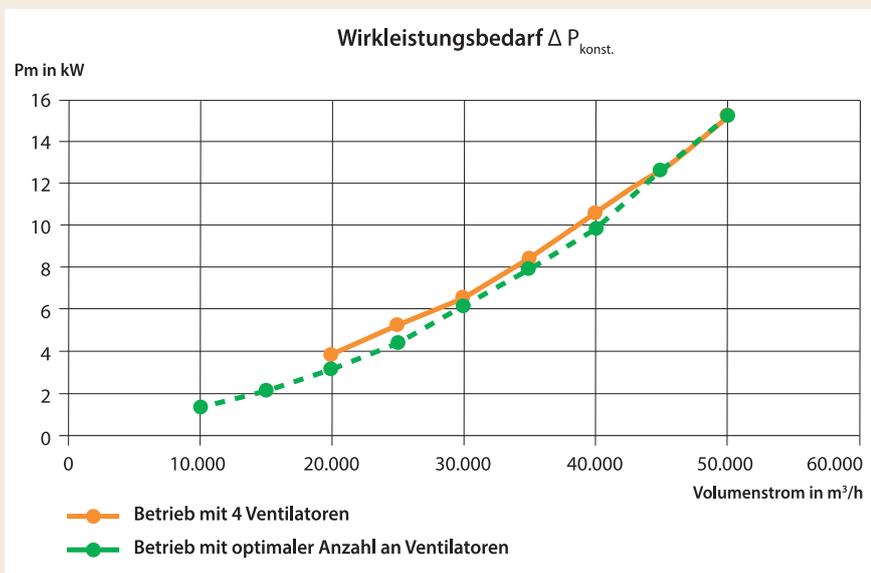


Bild 4: Aufgenommene Leistung bei unterschiedlicher Anzahl von Abluftventilatoren. Grafik: Howatherm

Die Schwierigkeit beim Umsetzen dieser Logik in eine allgemein gültige Regelstrategie für die Optimierung des Mehrventilatorensystems liegt in der genauen Vorhersage der Betriebskennwerte.

Für jede Konfiguration muss auf Basis der gemessenen Betriebsparameter die optimale Ventilatorkombination gefunden werden. Hierzu müssten sämtliche Kennfelder der verwendeten Ventilatoren hinterlegt werden. Ein einfaches Umschalten allein auf Basis der Volumenstromkennwerte ist nicht zielführend, da auch der Gesamtdruck eine große Rolle spielt.

Die Bestimmung der optimalen Kombination erfolgt in dieser Betrachtung auf Basis bivariater Polynome, die aus einer mathematischen Modellierung der Strömungsmaschine abgeleitet werden. Diese Polynome basieren auf den Eingangsgrößen Volumenstrom q_v und statische Druckerhöhung Δp und werden je nach Anwendung und zu modellierender Größe gebildet. Sie ermöglichen eine präzise Berechnung verschiedener Betriebsgrößen und liefern somit eine fundierte Grundlage für die Optimierung des Betriebs von Ventilatorsystemen.

Für die eingesetzte Ventilatoreinheit werden zunächst Messdaten realer Betriebszustände herangezogen oder aus bestehenden Datenbanken abgeleitet. Anschließend erfolgt eine nichtlineare, multiple Regressionsanalyse, mit der die unbekanntenen Koeffizienten der bivariaten Polynome bestimmt werden. Dadurch entsteht ein mathematisches Modell, das es erlaubt, die relevanten abhängigen Größen – wie Wirkungsgrad, Drehzahl und/oder Schalleistungspegel – für jeden möglichen Betriebspunkt mit einer Genauigkeit von rund $\pm 2\%$ zu berechnen. Die multiple Regressionsgüte aR^2 der Vorhersagen liegt je nach betrachteter Größe bei etwa 0,997 bis 0,999.

Insbesondere erlaubt das Modell für jeden Betriebspunkt die Vorhersage der zu erwartenden Systemwirkungsgrade für alle möglichen Ventilatorkombinationen. Auf dieser Grundlage kann dann durch einen Maximalwertvergleich die optimale Anzahl an Ventilatoren bestimmt werden, die gleichzeitig in Betrieb gesetzt werden sollten, um den bestmöglichen Systemwirkungsgrad für die Ventilatoren als Gesamtsystem zu erzielen.

Darüber hinaus kann das Verfahren auch zur Optimierung anderer Betriebsgrößen eingesetzt werden. Beispielsweise lässt sich der Schalleistungspegel L_w be-

rechnen, sodass die Betriebsweise mit der geringsten Schallemission ermittelt werden kann. Ebenso kann eine Multi-Kriterien-Optimierung erfolgen, bei der sowohl Effizianzforderungen als auch Schallpegel in die Auswahl einfließen, um eine anwendungsspezifisch optimale Lösung zu gewährleisten.

Die Umschaltung zwischen den verwendeten Ventilatoren ist durchaus komplex, da eine Rückströmung bei abgeschalteten Ventilatoren ebenso wie ein Absinken des Anlagenvolumenstroms und -drucks zu

vermeiden sind. Neben dem Einsatz aktiver Regelklappen kommt insbesondere dem Zusammenspiel zwischen Klappen- und Ventilatorsteuerung beim In- und Außerbetriebsetzung einzelner oder mehrerer Ventilatoren eine große Bedeutung zu.

Beim Zuschalten von Ventilatoren müssen die im Betrieb verbleibenden Ventilatoren in ihrer Drehzahl reduziert werden, während die zuzuschaltenden Ventilatoren gegen geschlossene Klappen anfahren müssen, bis die Druckdifferenz zwischen den Ventilatoren nahezu ausge-

glichen ist. Die Klappen der zugeschalteten Ventilatoren müssen dann sukzessive geöffnet werden.

Umgekehrt muss der aus dem Betrieb genommene Ventilator langsam in der Drehzahl reduziert werden, während die in Betrieb bleibenden Ventilatoren in Ihrer Drehzahl langsam angehoben werden, um den Betriebspunkt konstant zu halten.

Die Klappen des außer Betrieb zu nehmenden Ventilators werden dann druckgeregelt geschlossen. Ziel ist es, den Volumenstrom stetig zu ändern.

| V | ΔP_{var} | ΔP_{konst} | 4. Ventilator | | | 3. Ventilator | | | 2. Ventilator | | | 1. Ventilator | | |
|--------|------------------|--------------------|-----------------|-------|----------------------|-----------------|-------|----------------------|-----------------|-------|----------------------|-----------------|-------|----------------------|
| | | | η_{System} | Pm | Pm _{System} |
| [m³/h] | [Pa] | | [%] | [kW] | [kW] |
| 50000 | 664 | 200 | 61,7 | 3,794 | 15,176 | | | | | | | | | |
| 45000 | 588 | 200 | 58,9 | 3,161 | 12,644 | | | | | | | | | |
| 40000 | 518 | 200 | 55,5 | 2,629 | 10,516 | 59,8 | 3,277 | 9,831 | | | | | | |
| 35000 | 453 | 200 | 52,9 | 2,104 | 8,416 | 56,7 | 2,641 | 7,923 | | | | | | |
| 30000 | 395 | 200 | 51,1 | 1,628 | 6,512 | 54,4 | 2,052 | 6,156 | 54,3 | 3,063 | 6,126 | | | |
| 25000 | 343 | 200 | 46,1 | 1,304 | 5,216 | 52,5 | 1,534 | 4,602 | 55,1 | 2,181 | 4,362 | | | |
| 20000 | 298 | 200 | 42,9 | 0,962 | 3,848 | 49,8 | 1,120 | 3,360 | 53,4 | 1,559 | 3,118 | | | |
| 15000 | 260 | 200 | | | | | | | 51,3 | 1,059 | 2,118 | 47,0 | 2,339 | 2,339 |
| 10000 | 230 | 200 | | | | | | | | | | 49,4 | 1,304 | 1,304 |

| Ventilatoren | | | Optimum | | Standard | | Einsparung | |
|--------------|--------|------------------|---------------|--------------------|---------------|--------------------|-------------|-------------|
| in Betrieb | V | ΔP_{var} | $\eta_{opt.}$ | Pm _{ppt.} | $\eta_{opt.}$ | Pm _{ppt.} | ΔPm | ΔPm |
| Anzahl | [m³/h] | [Pa] | [%] | [kW] | [%] | [kW] | [kW] | [%] |
| 4 | 50000 | 664 | 61,7 | 15,176 | 61,7 | 15,176 | | |
| 4 | 45000 | 588 | 58,9 | 12,644 | 58,9 | 12,644 | | |
| 3 | 40000 | 518 | 59,8 | 9,831 | 55,5 | 10,516 | 0,685 | 6,5 |
| 3 | 35000 | 453 | 56,7 | 7,923 | 52,9 | 8,416 | 0,493 | 5,9 |
| 3 | 30000 | 395 | 54,4 | 6,156 | 51,1 | 6,512 | 0,356 | 5,5 |
| 2 | 25000 | 343 | 55,1 | 4,362 | 46,1 | 5,216 | 0,854 | 16,4 |
| 2 | 20000 | 298 | 53,4 | 3,118 | 42,9 | 3,848 | 0,730 | 19,0 |
| 2 | 15000 | 260 | 51,3 | 2,118 | | | | |
| 1 | 10000 | 230 | 49,4 | 1,304 | | | | |

Tabelle 2: Auslegung mit unterschiedlicher Anzahl von Ventilatoren bei konstantem Druckanteil.

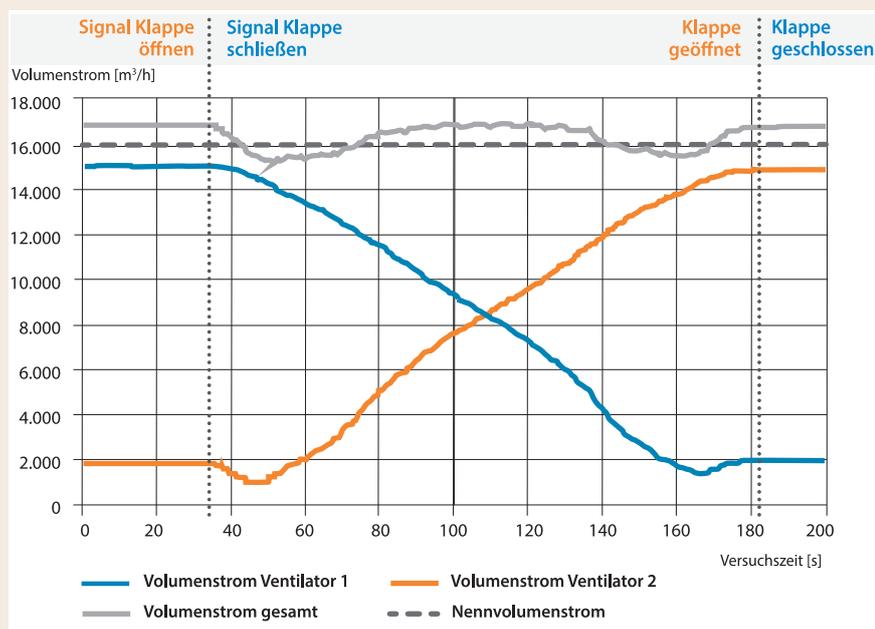


Bild 5: Volumenstrom-Messung Umschaltvorgang bei laufendem Betrieb von zwei Ventilatoren.
Grafik: Howatherm

Die Situation auf der Zuluftseite der betrachteten Anlage ist eine andere, da im Auslegungspunkt nur ein Ventilator energetisch optimal ist (siehe auch Fachbericht „Elektroenergieeinsparung durch optimierte Anzahl der verwendeten Ventilatoren“, erschienen in HLH BD.75 (2024) Nr. 09). Wenn die Anlage jedoch oft im Teillastbereich betrieben wird, könnten ebenfalls vier Einzelventilatoren verwendet werden. Damit würde im Auslegungspunkt die aufgenommene Leistung zwar von 19,5 auf 19,9 kW um rund 0,4 kW steigen, aber im Teillastbetrieb könnte der Energiebedarf analog zur Abluft um bis zu 0,9 kW gesenkt und der Regelbereich signifikant erweitert werden.

Umschaltvorgänge im Versuch

Am Beispiel eines Redundanzbetriebs soll ein nahezu vollständiger Umschaltvorgang im laufenden Betrieb gezeigt werden. In diesem Versuch werden zwei Ventilatoren mit 630 mm Laufraddurchmesser und einem Motor mit jeweils 7,5 kW Leistung komplett umgeschaltet. **Bild 5** zeigt den Umschaltvorgang von Ventilator 1 (blaue Linie) auf Ventilator 2 (orange Linie). Die graue Linie zeigt den resultierenden Volumenstrom. Die Schwankung der Regelung zwischen den Umschaltvorgängen lag zwischen 15 200 m³/h und 16 900 m³/h, also jeweils 800 m³/h unter

beziehungsweise über dem Nennvolumenstrom von 16 000 m³/h. Die Regelabweichung lag damit bei +5,8 Prozent beziehungsweise bei minus -5,1 Prozent.

Bessere Resultate bezüglich der Regelgüte können beim Zu- oder Abschalten einzelner Ventilatoren eines Mehrventilatorsystems erwartet werden, da die vollständige Umschaltung zwischen zwei Ventilatoren den ungünstigsten Fall darstellt.

Resümee

Bei der Verwendung von mehreren Ventilatoren, die sinnvollerweise bei einer Anzahl von maximal vier bis sechs Ventilatoren liegt, können diese im Teillastbetrieb mit verschiedenen Kombinationen vorteilhaft genutzt werden, also nicht unbedingt immer mit der vollen Anzahl. So kann beispielsweise mit einem System von vier Ventilatoren im jeweiligen Betriebszustand ein energetisches Optimum erreicht werden, das im Teillastbetrieb gegenüber der vollen Anzahl der ausgelegten Ventilatoren bis zu 20 Prozent an Energie einsparen kann.

Diese Betriebsweise ist allerdings nicht einfach zu erreichen, da die Anlagen größtenteils nicht bei jedem Umschaltvorgang ausgeschaltet und neu angefahren werden können. Daher müssen die Umschaltvorgänge gegen geschlossene Klappen realisiert werden. Hierfür ist eine präzise abgestimmte Regelung von Druck und Drehzahl erforderlich, um Schwan-

kungen im geforderten Volumenstrom zu vermeiden.

Auch ist die Berechnung der Betriebskennwerte komplex, da sie einerseits eine ausreichende Genauigkeit erfordert und andererseits regelungstechnisch einfach zu realisieren sein muss, um eine Umsetzung auf gängigen Controllern zu ermöglichen. Die Regelung des hier betrachteten energieoptimierten Ventilatorsystems kann in Bezug auf die übergeordnete Gebäudeleittechnik als Blackbox verstanden werden, da im Vergleich zur Umsetzung ohne Optimierung keine weitere Anbindung notwendig ist und so kein zusätzlicher Aufwand entsteht.

Neben den erläuterten Energieeinsparungen kann mit einer optimalen Kombination der verwendeten Ventilatoren der Regelbereich weiter nach unten erweitert werden. Beispielsweise kann statt im Regelbereich von 33 bis 100 Prozent des Ventilatorsystems im Bereich von 16 bis 100 Prozent betrieben werden.

Bereits im ersten Fachbericht zu diesem Thema konnte gezeigt werden, dass die Auswahl der optimalen Anzahl an Ventilatoren für eine Anlage von zahlreichen Einflussfaktoren abhängig ist. Während der Fokus dort auf dem Nennbetriebspunkt der Anlage lag, wird im aktuellen Artikel der Betrachtungsrahmen um den gesamten Betriebsbereich erweitert – insbesondere unter Berücksichtigung von Teillastzuständen. Zeigen sich im Betrieb signifikante Teillastphasen, kann eine höhere Ventilatoranzahl als ursprünglich im Auslegungspunkt als optimal erachtet sinnvoll sein. Dies ermöglicht nicht nur eine Erweiterung des Regelbereichs, sondern erlaubt auch die Nutzung von teilweise erheblichen Energieeinsparpotenzialen durch das gezielte Abschalten einzelner Ventilatoren. ■

DIE AUTOREN

Prof. Dr.-Ing. Dr. rer. pol. Christoph Kaup

ist Honorarprofessor am Umwelt-Campus Birkenfeld der Hochschule Trier und Geschäftsführer der Howatherm Klimatechnik GmbH, Brücken.

Lukas Thomas, M.Sc.

ist Projektleiter Forschung und Entwicklung sowie Assistent der Produktleitung der Howatherm Klimatechnik GmbH, Brücken, Dozent am Umwelt-Campus Birkenfeld.