

Dezentrale Ventilatoren in zentralen raumlufttechnischen Anlagen – Messtechnische Validierung berechneter Ventilatorleistung

Niklas Alsen, Tobias Klimmt, Jens Knissel

Fachgebiet Technische Gebäudeausrüstung, Universität Kassel, Kassel

Kurzfassung

Mechanische Lüftungsanlagen sind ein zentrales Element energieeffizienter, nachhaltiger Gebäude. Die Luftförderung erfolgt bei zentralen Lüftungsanlagen üblicherweise über einen Zuluft- und einen Abluftventilator in der Lüftungszentrale.

Jeder Zentralventilator erzeugt eine Druckdifferenz, die sich an dem Widerstand des ungünstigsten Stranges orientiert. Zum Aufteilen des Gesamtvolumenstroms auf die einzelnen Gebäudebereiche wird die Druckdifferenz in den anderen Strängen gezielt abgedrosselt. Die Abdrosselung stellt eine Art „Energievernichtung“ dar, der kein direkter Nutzen gegenübersteht und die zumindest theoretisch vermieden werden kann bzw. sollte.

Mit dem hier vorgestellten Ansatz soll die Luftförderung in zentralen RLT-Anlagen durch den Einsatz dezentraler Ventilatoren energieeffizienter realisiert werden. Dabei wird die Druckdifferenz zur Luftförderung durch dezentrale Ventilatoren an dem Ort und in der Höhe erzeugt, wie sie zum Lufttransport erforderlich ist. Auf Drosselorgane wie Volumenstromregler wird im Dezentrale-Ventilatoren-System (dVt-System) verzichtet.

Im vorliegenden Artikel wird anhand von Messungen an einer Versuchsanlage gezeigt, dass die berechneten Einsparpotenziale im praktischen Betrieb auftreten und reproduzierbar sind.

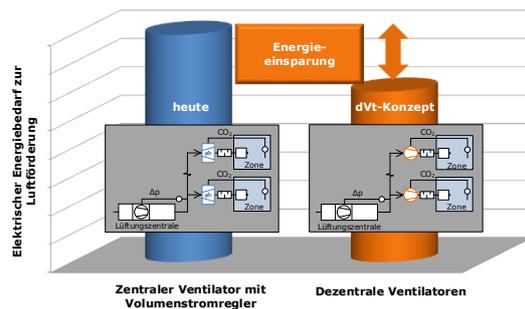


Abb.1 Elektrischer Energiebedarf zur Luftförderung bei zentralen RLT-Anlagen

1. Ausgangssituation

Lüftungsanlagen sichern einerseits die für die Nutzung erforderliche Luftqualität. Andererseits können sie in Verbindung mit einer Wärmerückgewinnung einen relevanten Beitrag zur Reduktion des Energieaufwands zur Beheizung von Gebäuden leisten. Um eine tatsächliche Primärenergieeinsparung durch mechanische Lüftungsanlagen zu erreichen, muss der Aufwand zur Luftförderung gegenüber der erzielten Brennstoffeinsparung gering sein.

Ab dem 01.01.2016 müssen neue Lüftungsanlagen mit Zu- und Abluft gemäß EU-Verordnung Nr. 1253/2014 [1] grundsätzlich mit einem Wärmerückgewinnungssystem ausgestattet werden. Zudem werden indirekt Anforderungen an die elektrische Ventilatorleistung durch die Definition der maximalen „inneren spezifischen Ventilatorleistung“ gestellt. Außerdem müssen Lüftungsanlagen mit einem Zuluftvolumenstrom ab 4000 m³/h laut Energie-Einsparverordnung [2] über eine selbstständige Regelung der Volumenströme in Abhängigkeit von thermischen

und stofflichen Lasten oder der Zeit verfügen, wenn der Zuluftvolumenstrom der versorgten Räume $9 \text{ m}^3/\text{h je m}^2_{\text{NGF}}$ übersteigt (z.B. in Sitzungszimmern, Klassenzimmern, Arztpraxen, etc.).

Derzeit werden zur Anpassung des Volumenstroms regelbare Klappen (sog. Variabel-Volumenstromregler, s. Abb. 2) eingesetzt. Diese modifizieren den Strömungswiderstand in dem entsprechenden Strang so lange, bis sich der gewünschte Volumenstrom einstellt. Über die Anpassung der Volumenströme an den Bedarf wird trotz der stattfindenden Drosselung eine Reduktion beim Stromverbrauch erzielt. Voraussetzung ist, dass die Drehzahl des Ventilators an den reduzierten Volumenstrom angepasst wird.

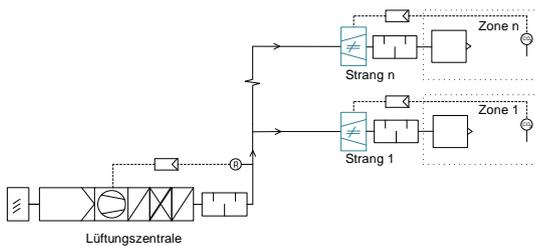


Abb. 2 Stand der Technik: zentrale Lüftungsanlage mit Variabel-Volumenstromreglern (VSR-System)

Eine weitere Reduktion des Stromaufwandes zur Luftförderung wäre möglich, wenn auf die Drosselung verzichtet werden könnte.

2. dVt-Ansatz

Beim hier untersuchten Einsatz von dezentralen Ventilatoren in zentralen Lüftungsanlagen soll eine bedarfsgerechte, raum- bzw. zonenweise Lüftung ohne die „Energievernichtung“ durch Drosselung realisiert werden. Die dezentral platzierten Ventilatoren bauen die zur Luftförderung erforderliche Druckerhöhung an dem jeweiligen Ort in der erforderlichen Höhe auf (s. Abb. 3). Dadurch kann der elektrische Energieaufwand zur Luftförderung wesentlich reduziert werden.

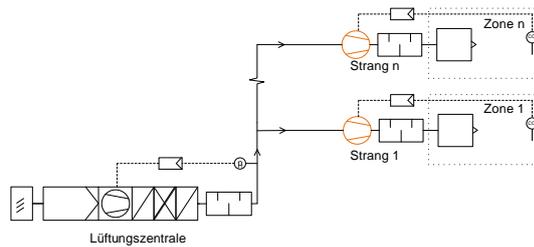


Abb. 3 Zentrale Lüftungsanlage mit dezentralen Ventilatoren (dVt-System)

Einsetzbar ist das dVt-Konzept in zentralen Lüftungsanlagen und bietet besondere Vorteile bei bedarfsgerechter Lüftung zur gleichzeitigen Versorgung unterschiedlicher Nutzerprofile. Durch eine direkte Anpassung der Ventilatorrehzahl an variable Anforderungen hinsichtlich Druck und Volumenstrom und eine schnelle Reaktionszeit der Ventilatoren bietet das dVt-Konzept dabei zusätzliche Vorteile hinsichtlich der Regelfähigkeit. Die Nutzung des dVt-Ansatzes ist bei der Sanierung von Bestandsgebäuden möglich.

3. Energieeffizienzpotenzial

Es ist nicht selbstverständlich, dass mit dem dVt-System eine Energieeinsparung erzielt werden kann, da es neben den Vorteilen auch prinzipbedingte Nachteile gibt. So werden statt zwei großen zentralen Ventilatoren viele kleine dezentrale Ventilatoren eingesetzt. Kleinere Ventilatoren haben aber i.d.R. einen schlechteren Wirkungsgrad.

Zur Abwägung der energetischen Vor- und Nachteile werden im Folgenden exemplarisch die erforderlichen Ventilatorleistungen bei verschiedenen Teillast-Volumenstromanteilen für

- ein System mit Zentralventilator und Variabel-Volumenstromreglern mit konstantem Vordruck nach Abb. 2 und
- ein System mit Zentralventilator und dezentralen Ventilatoren nach Abb. 3

verglichen.

3.1 Berechnung der Ventilatorleistung

Grundsätzlich benötigen Ventilatoren elektrische Energie, um mit einem bestimmten Wirkungsgrad

einen Luftvolumenstrom zu fördern und dabei Druckverluste im System zu überwinden.

$$P_{el} = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p}{\eta} \quad (1)$$

P_{el}	Elektrische Ventilatorleistung [W]
\dot{V}	Volumenstrom [m^3/s]
Δp	Druckerhöhung des Ventilators entsprechend Druckverlusten im Kanalnetz [Pa]
η	Wirkungsgrad [%]

In den betrachteten Lüftungssystemen ergibt sich aus Gl. (1) mit den Druckverlusten in den von den jeweiligen Ventilatoren zu versorgenden Kanalabschnitten:

$$P_{VSR} = \frac{\dot{V} \cdot (\Delta p_z + \Delta p_{N,VSR}^*)}{\eta_z} \quad (2)$$

$$P_{dvt} = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_z}{\eta_z} + \frac{\dot{V} \cdot \overline{\Delta p_{N,dvt}}}{\eta_{dvt}} \quad (3)$$

Δp_z	Druckverluste bis zum Drucksensor (v.a. Lüftungszentrale) [Pa]
$\Delta p_{N,VSR}^*$	Konstant zu haltender Druck entsprechend den Auslegungs-Druckverlusten ab dem Drucksensor bis zum hydraulisch ungünstigsten Strang im System mit Volumenstromreglern (Verteilnetz) [Pa]
$\overline{\Delta p_{N,dvt}}$	Druckverluste ab dem Drucksensor im System mit dezentralen Ventilatoren (Volumenstromgewichteter Mittelwert über alle Stränge des Verteilnetzes) [Pa]
η_z	Wirkungsgrad des Zentralventilators [%]
η_{dvt}	Wirkungsgrad der dezentralen Ventilatoren [%]

Der dargestellte Ansatz entspricht für das System mit Volumenstromreglern und konstantem Vordruck der Berechnung nach DIN V 18599-3 [3], wobei die Wirkungsgrade für die weiteren Berechnungen mit dem Teillast-Volumenstromanteil variiert werden. Die dargestellten Berechnungsansätze zur Bestimmung der Drücke und Wirkungsgrade auch bei Teillast wurden in [4] beschrieben. Das vollständige Rechenmodell wird voraussichtlich im Jahr 2016 im Rahmen einer Dissertation veröffentlicht.

3.2 Messung der Ventilatorleistung

Die Ventilatorleistung sollte nicht nur theoretisch bestimmt, sondern auch messtechnisch validiert

werden. Daher wurde am Fachgebiet Technische Gebäudeausrüstung der Universität Kassel zur direkten Gegenüberstellung der Lüftungssysteme ein RLT-Versuchsstand errichtet (siehe Abb. 4):

Auf ein modular aufgebautes Zentralgerät mit Wärmerückgewinnung folgen ein Verteiler bzw. Sammler mit 3 Strängen zur Versorgung von drei getrennten Lufträumen mit wahlweise Umluft oder Außenluft.

In jedem der Stränge sind parallel ein Variabel-Volumenstromregler und ein dezentraler Ventilator mit Absperrklappe installiert. Es ist somit möglich, das herkömmliche VSR-System und das neu zu untersuchende dVt-System unter identischen Randbedingungen messtechnisch zu untersuchen und zu vergleichen.

Der Volumenstromsollwert wird für beide Systeme vorgegeben, wobei der Ist-Volumenstrom von einer Messstelle im jeweiligen Strang gemessen wird und das Steuersignal für den Volumenstromregler bzw. den dezentralen Ventilator entsprechend nachgeregelt wird.

Die Zentralventilatoren halten beim VSR-System einen Vordruck von 155 Pa, was dem Minimalwert entspricht, um die Auslegungsvolumenströme einhalten zu können. Beim dVt-System beträgt der Vordruck 0 Pa, sodass lediglich die Druckverluste in der Lüftungszentrale ausgeglichen werden.

In allen nachfolgend dargestellten Messreihen wird der Sollvolumenstrom jeden Raumes über den Zeitraum von 1h kontinuierlich von 100% auf 0% abgesenkt. Dargestellt sind sekundlich aufgezeichnete Messwerte.

Es wird folgende Messtechnik eingesetzt:

- Volumenstrommessung: Messkreuze Schako MKA und Drucksensoren der Sensirion SDP1000-L05 (einzeln kalibriert), Messunsicherheit $\pm 10 \text{ m}^3/\text{h}$
- Leistungsmessung: Stromzähler ABB A42 112-100 und A42 552-100 (Genauigkeitsklasse 1 bzw. 0,5 S), Messunsicherheit $\pm 1,5 \text{ W}$

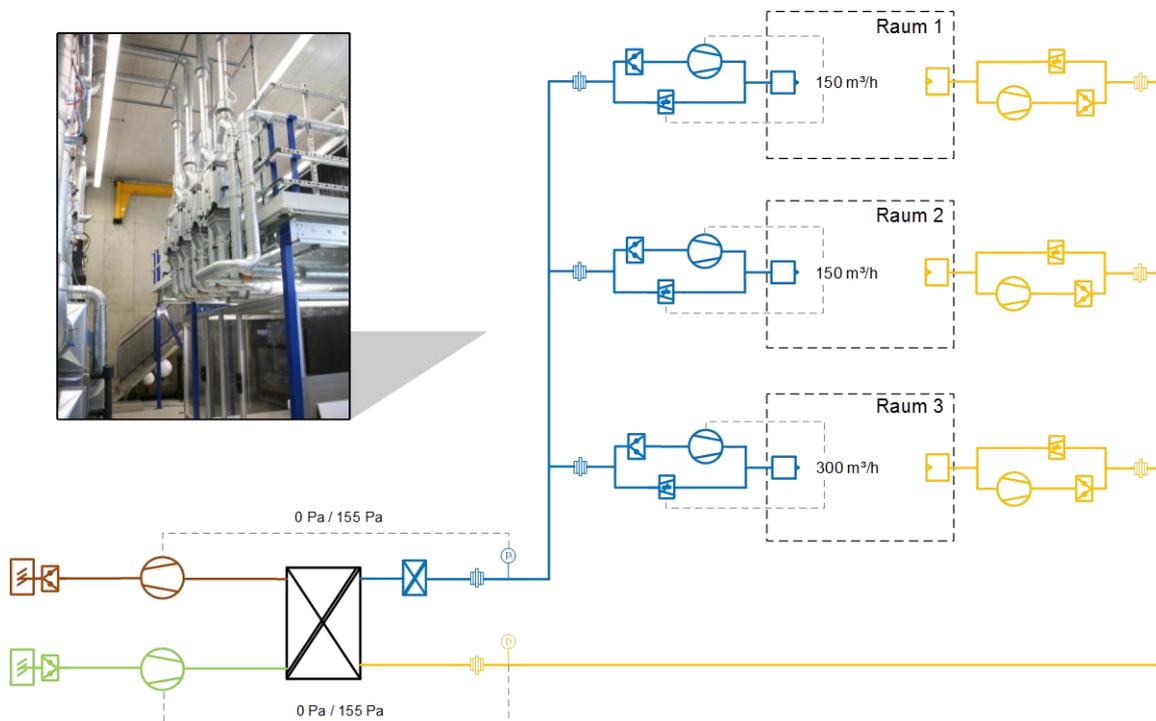


Abb. 4 Schema des RLT-Versuchsstands mit wahlweisem Betrieb von dVt- oder VSR-System. Foto: Ansicht auf die Testräume

In Abb. 5 ist die gemessene elektrische Ventilatorleistung beider Lüftungssysteme – aufgetragen über dem jeweiligen Sollvolumenstrom – dargestellt (grüne und gelbe Punkteschar).

Dabei zeigt sich das charakteristische Teillastverhalten beider Systeme: Während beim Auslegungsvolumenstrom die Ventilatorleistung in beiden Systemen ähnlich hoch ist, fällt sie bei einer Reduzierung des Sollvolumenstroms vom Auslegungsvolumenstrom in Teillast-Volumenströme im dVt-System deutlich schneller ab und bleibt auf einem geringeren Niveau als die Ventilatorleistung beim VSR-System. Dieses bessere Teillastverhalten ist auf die im dVt-System systematisch vermiedenen Drosselvorgänge zurückzuführen.

Des Weiteren sind in Abb. 5 die berechneten Werte der elektrischen Ventilatorleistung für beide Systeme dargestellt (grün und rot gestrichelte Linien). Diese wurden unter der Prämisse erstellt, dass nur Randbedingungen in die Berechnung einfließen sollten, die auch im Rahmen einer gründlichen Fachplanung hätten

bekannt sein können. Insbesondere basiert die Berechnung auf:

- Auslegungsvolumenströme
- Druckverlustberechnungen mit Kanalnetzgeometrie und bekannten Einbauten
- Ventilator Kennfeld zur Ermittlung des maximalen Wirkungsgrades bei der berechneten Netzkennlinie

Die Auswertung zeigt, dass die Leistungsberechnung sowohl im dVt-System, als auch im VSR-System den grundsätzlichen Verlauf der tatsächlich gemessenen Leistung widerspiegelt.

Voraussetzungen dafür sind eine sorgfältige Berechnung der Druckverluste im Kanalnetz und gut dokumentierte Wirkungsgrade der Ventilatoren in der jeweiligen Einbausituation. Werden diese Voraussetzung nur in Teilen erfüllt und wird stattdessen zunehmend mit Standardwerten gerechnet, kann die absolute Höhe der berechneten Werte stark variieren, was im vorliegenden Fall zu größeren Abweichungen von den Messwerten führen würde.

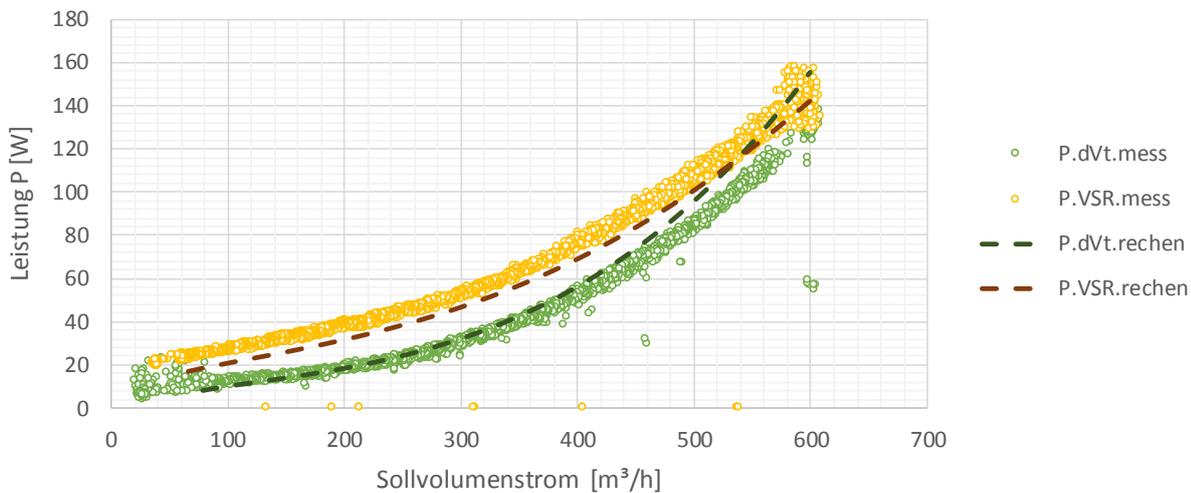


Abb. 5 Messergebnisse der Ventilatorleistung von VSR-System und dVt-System sowie Vergleich mit berechneten Werten unter Annahme von planerisch bekannten Randbedingungen

Wirtschaftlichkeitsberechnungen und Energiebedarfsberechnungen, bei denen die absolute Höhe des Energiebedarfs eine große Rolle spielt, unterliegen dann einer großen Unsicherheit. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass in diesen Fällen dennoch ein relativer Vergleich der Systeme untereinander möglich ist.

Im Detail fällt im Vergleich von berechneter und gemessener Leistung auf, dass im VSR-System die berechnete Leistung etwas geringer ausfällt und im dVt-System die gemessene Leistung v.a. bei hohen Volumenströmen höher ausfällt als berechnet. Die Messunsicherheit ist zu gering, um die Abweichung zu erklären, sodass im realen Aufbau gegenüber der Berechnung von teilweise abweichenden Randbedingungen ausgegangen werden kann.

Es werden im nächsten Schritt daher erstens die in der Berechnung angesetzten Auslegungsdruckverluste den gemessenen Werten angeglichen, um Unsicherheiten aufgrund der Kanalnetzberechnung zu eliminieren. Zweitens wurde noch während der Inbetriebnahme des RLT-Versuchsstands deutlich, dass der modulare Aufbau des Zentralgerätes zwar Vorteile hinsichtlich der Installation von individuellen Messstellen und z.B. den für den Versuchsstand hergestellten Ventilatorboxen

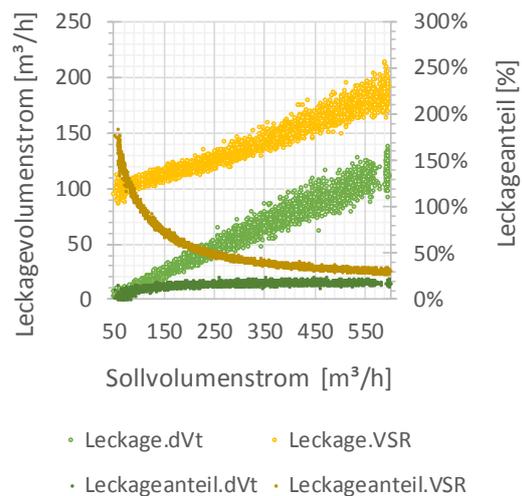


Abb. 6 Leckagevolumenstrom (absolute Werte in hellen Farbtönen linke Achse und als Anteil in dunklen Farbtönen rechte Achse)

aufweist, dafür aber an mehreren Stellen (z.B. Heiz-/Kühlregister und Anschlüsse der Ventilatorboxen) Leckagen auftreten. Wo zugänglich, wurden diese abgedichtet, was jedoch nicht restlos möglich war.

Über eine Luftmengenbilanz kann aus der Differenz zwischen am Ventilator mittels Einlaufdüse gemessenem Volumenstrom und in die Testräume eintretendem Volumenstrom (Messkreuze) der Leckagevolumenstrom ermittelt werden. Im Ergebnis – siehe Abb. 6 – wurden

überaus hohe Leckageraten von 30% im VSR-System und 20% im dVt-System (jeweils beim Auslegungsvolumenstrom von 600 m³/h) deutlich. Leckageraten in dieser Höhe sollten sicherlich nicht repräsentativ sein, verdeutlichen jedoch die Empfehlung, ausschließlich druckgeprüfte Zentralgeräte und Einbauten zu verwenden.

Aus Abb. 5 lässt sich auch im Allgemeinen ableiten, dass die Leckagevolumenströme im VSR-System prinzipbedingt höher ausfallen, als im dVt-System. Weil im VSR-System stets noch der für das Kanalnetz benötigte Vordruck aufrechterhalten werden muss, fallen auch bei kleinsten Sollvolumenströmen noch hohe Leckagevolumenströme an. Im vorliegenden Fall übersteigt der Leckagevolumenstrom den Sollvolumenstrom um das bis zu zweifache. Im dVt-System fällt der Leckagevolumenstrom dagegen bis auf Null ab, wobei der Leckageanteil näherungsweise konstant bleibt.

Die Leistungsberechnung aus Abb. 5 nach Gl. (2) und (3) soll nun unter der Annahme wiederholt werden, dass wie beschrieben die Auslegungsdruckverluste und die Leckagevolumenströme bekannt sind. Dabei wurde für die Leckagerate eine lineare Steigerung

der Leistung der Zentralventilatoren angenommen:

$$P_{VSR} = \frac{f_L \cdot \dot{V} \cdot (\Delta p_Z + \Delta p_{N,VSR}^*)}{\eta_z} \quad (4)$$

$$P_{dVt} = \frac{f_L \cdot \dot{V} \cdot \Delta p_Z}{\eta_z} + \frac{\dot{V} \cdot \overline{\Delta p_{N,dVt}}}{\eta_{dVt}} \quad (5)$$

f_L Faktor zur Berücksichtigung der Leckage
= 1 + Leckageanteil gemäß Abb. 6

Der lineare Zusammenhang ergibt sich für den Fall, dass die Leckagen in der Nähe der Zentralventilatoren auftreten und in allen darauffolgenden Komponenten keine Steigerung des Volumenstroms und somit keine signifikante Erhöhung der jeweiligen Druckverluste stattfindet.

Es zeigt sich in Abb. 7, dass unter Berücksichtigung von realen Randbedingungen die Ventilatorleistungen sowohl des VSR-Systems als auch des dVt-Systems nahezu idealtypisch abgebildet werden können. Verbleibende Abweichungen sind auf im Detail abweichende Wirkungsgrade und auf nicht quadratisch abfallende Druckverluste in der Lüftungszentrale zurückzuführen. Diese Einflüsse spielen aber eine untergeordnete Rolle.

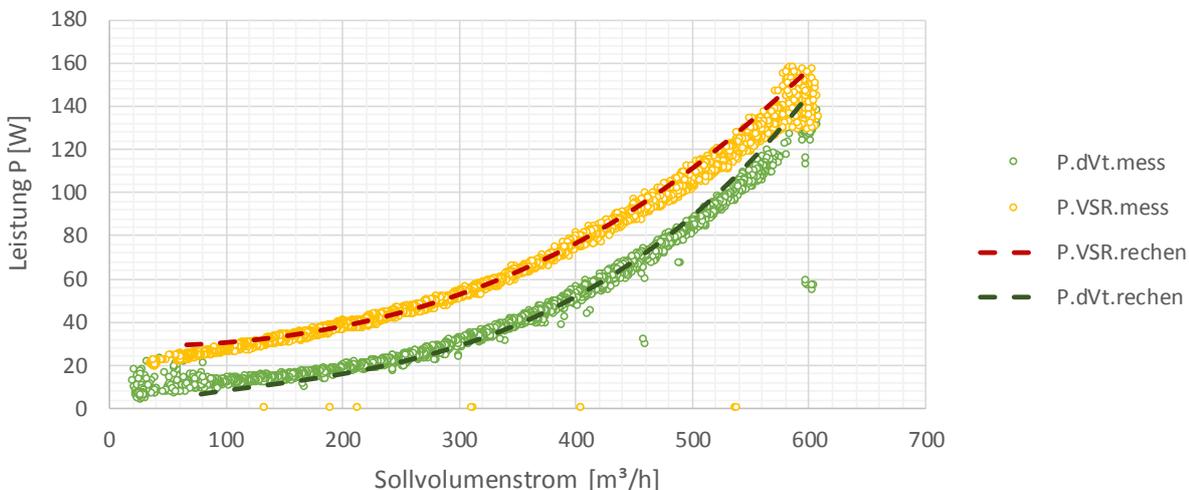


Abb. 7 Messergebnisse der Ventilatorleistung von VSR-System und dVt-System sowie Vergleich mit berechneten Werten unter Annahme von bekannten Leckagevolumenströmen und Auslegungs-Druckverlusten

3.3 Schlussfolgerungen

Für weitgehend dichte Anlagen sind die in Abb. 4 dargestellten Kurven der berechneten Ventilatorleistung durchaus charakteristisch. Die absolute Höhe der Leistung hängt dabei von den Druckverlusten im jeweiligen Kanalnetz ab. Auch spielt die Verteilung der Druckverluste im Kanalnetz eine Rolle auf die benötigte Leistung.

Neueste Untersuchungen im Forschungsprojekt zeigen zudem, dass gegenüber den eingesetzten Prototypen nochmals deutliche Wirkungsgradverbesserungen möglich sind, wenn anstelle von in einer rechteckigen Ventilatorbox eingebauten Radialventilatoren die neueste Generation von (Axial-)Rohrventilatoren eingesetzt wird: Es entfallen die bei Radialventilatoren bauartbedingten Umlenkungsdruckverluste und die Wirkungsgrade sind als gleichwertig anzusehen. Der Anwendungsbereich der Rohrventilatoren ist allerdings derzeit auf Verteilnetze bis ca. 250 Pa Druckverlust beschränkt.

Weiterhin wurde deutlich, dass im vorliegenden Fall Leckagen zu einer erheblichen Verlustleistung führen, wobei die Leckageverluste im dVt-System aufgrund niedriger Drücke geringer ausfallen als im VSR-System. Die Leckagen entstanden trotz fachmännischer Planung und Ausführung und sind zum einen auf undichte Komponenten und zum anderen auf individuell angefertigte Anschlussstellen zurückzuführen. Die Autoren empfehlen daher im Rahmen der Fachplanung möglichst vollständig standardisierte und nachweislich druckgeprüfte Zentralgeräte zu verwenden.

Die Höhe der Energieeinsparung hängt neben den o.g. Einflussfaktoren wesentlich von der Häufigkeitsverteilung der Teillast-Volumenstromanteile während der Nutzungsphase ab. Dies kann sich je nach Nutzungsart stark unterscheiden. Erste Abschätzungen deuten auf einen um 10 bis 40 % geringeren Energiebedarf zur Luftförderung des dVt-Systems gegenüber dem System mit Variabel-Volumenstromreglern und konstantem Vordruck hin. Nach Anwendungsfällen

differenzierte Untersuchungen des energetischen und wirtschaftlichen Einsparpotenzials werden derzeit durchgeführt und voraussichtlich im Jahr 2016 im Rahmen einer Dissertation veröffentlicht.

4. Kosten

Der Einsatz des dVt-Konzeptes wird Auswirkungen auf die Kosten einer Lüftungsanlage haben, da sich Investitions-, Wartungs- und Energiekosten verändern. Investive Mehrkosten entstehen durch die dezentralen Ventilatoren. Einsparungen ergeben sich auf der anderen Seite durch den Verzicht auf die Variabel-Volumenstromregler. Vermutlich liegen bei den Investitionskosten die Einsparung und der Mehraufwand in einer ähnlichen Größenordnung.

Auch im Bereich der Wartungskosten ist beim Einsatz von dezentralen Ventilatoren nach aktuellem Wissensstand mit keinem substanziellen Mehraufwand des dVt-Systems gegenüber dem Einsatz von Variabel-Volumenstromreglern zu rechnen.

Der wesentliche Kostenunterschied wird im Bereich der Energiekosten liegen. Da der Energiebedarf der Luftförderung einen hohen Anteil des Gesamtverbrauchs von mechanisch belüfteten Gebäuden ausmacht [5], hat die prognostizierte Reduzierung der Energiekosten durch das dVt-System einen deutlichen Einfluss auf die gesamten Gebäude-Betriebskosten.

5. Ausblick

Nachdem die Funktionsweise und das Einsparpotenzial anhand eines physikalisch-mathematischen Modells sowie anhand von messtechnischen Untersuchungen unter Beweis gestellt wurden, wird als abschließende Phase im aktuellen Forschungsprojekt ein Bürogebäude mit einer bestehenden Lüftungsanlage auf das dVt-System umgerüstet. Zudem soll ein Planungsleitfaden veröffentlicht werden.

6. Förderung und Projektpartner

Das Forschungsprojekt wird unter Leitung des Fachgebiets Technische Gebäudeausrüstung der Universität Kassel gemeinsam mit folgenden Partnern durchgeführt:

- ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG
- Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP)
- innovaTec Energiesysteme GmbH

U N I K A S S E L
V E R S I T Ä T

 **Fraunhofer**
IBP

innovaTec
ENERGIESYSTEME
GmbH

ebmpapst

Gefördert wird das Projekt durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags.



Referenzen

- [1] Verordnung (EU) Nr. 1253/2014 der Kommission vom 7. Juli 2014 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Lüftungsanlagen
- [2] Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV) Bundesgesetzblatt Jahrgang 2007 Teil I Nr. 34, Bonn, Juli 2007
- [3] DIN V 18599-3: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 3: Nutzenergiebedarf für die energetische Luftaufbereitung. Ausgabe 2011-12-00
- [4] Alsen N., Klimmt T., Knissel J.: Dezentrale Ventilatoren in zentralen raumluftechnischen Anlagen – Berechnungen zur energetischen Vorteilhaftigkeit. In: GI –

GebäudeTechnik|InnenraumKlima 01/2015, München, 2015

- [5] Knissel, J.: Energetische Gebäuediagnose bei bestehenden Nicht-Wohngebäuden. In HLH 9/2011, Düsseldorf, 2011