

Universität Kassel
Fachbereich Architektur Stadtplanung Landschaftsplanung
Fachgebiet Technische Gebäudeausrüstung

**Energetische und wirtschaftliche Bewertung
von dezentralen Ventilatoren
in zentralen Lüftungsanlagen**

Niklas Alsen

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

Gutachter der Dissertation:
1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jens Knissel
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Anton Maas

Datum der Einreichung: 30. Dezember 2016
Datum der Disputation: 13. Juni 2017

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Fragestellung und methodisches Vorgehen.....	4
1.2	Aktuelle Forschungslage und bisherige Umsetzungen von semizentraler Lüftung	7
1.2.1	Forschungsberichte zu semizentraler Lüftung	7
1.2.2	Bisherige Umsetzungen in der Praxis	8
2	Technische Konzeption des dVt-Systems	11
2.1	Stand der Technik.....	12
2.1.1	Konstant-Volumenstrom-Systeme	12
2.1.2	Variabel-Volumenstrom-Systeme mit Variabel-Volumenstromreglern.....	13
2.1.3	Dezentrale außenwandintegrierte Lüftungssysteme	14
2.2	Forschungsansatz: Variabel-Volumenstrom-System mit dezentralen Ventilatoren.....	17
3	Elektrische Ventilatorleistung der Lüftungssysteme	22
3.1	Berechnung der Ventilator-Druckerhöhung	25
3.1.1	Ventilator-Druckerhöhung beim Auslegungsvolumenstrom	25
3.1.2	Druckverluste bei Teillast-Volumenströmen	26
3.1.3	Ventilator-Druckerhöhungen der Variabel-Volumenstrom-Systeme	27
3.1.4	Randbedingungen zur Berechnung der erforderlichen Druckerhöhung	32
3.1.5	Gegenüberstellung von dVt und VSR-System bei Standardrandbedingungen...	36
3.2	Modell der Ventilator-Wirkungsgrade	37
3.2.1	Grundsätze des Berechnungsansatzes unter Berücksichtigung von Betriebspunkten	37
3.2.2	Maximaler Wirkungsgrad bei voller Drehzahl	40
3.2.3	Wirkungsgradverringerng bei Teillast-Drehzahlen	41
3.2.4	Einfluss von Überdimensionierungen.....	44
3.2.5	Standardrandbedingungen für die vergleichende Bewertung	45
3.2.6	Zusammenfassung.....	50
3.3	Darstellung der Ventilatorleistung von dVt und VSR-System bei Standardrandbedingungen	51
3.4	Validierung der Leistungsberechnung.....	54
3.4.1	Messtechnik	55
3.4.2	Gemessene Ventilatorleistung gegenüber Berechnung mit vollständig planerisch bestimmten Randbedingungen.....	59
3.4.3	Berücksichtigung von Leckagevolumenstrom und realen Auslegungsdruckverlusten.....	62
4	Energetische Bewertung bei nutzungsbezogener Betrachtung	67
4.1	Mittlerer Außenluftvolumenstrom nach DIN V 18599	68
4.2	Nutzungsabhängige Tagesprofile mit stündlicher Auflösung	71
4.3	Jahres-Ventilatorenergiebedarf bei Standardrandbedingungen.....	76

4.4 Ventilatorenergiebedarf bei Variation der Standardrandbedingungen.....	80
4.4.1 Einfluss des Auslegungsdruckverlustes	80
4.4.2 Einfluss des Netzfaktors	81
4.4.3 Einfluss der Druckverhältniszahl	83
4.4.4 Einfluss der maximalen Ventilatorwirkungsgrade.....	84
4.4.5 Einfluss einer Überdimensionierung von Ventilatoren.....	86
4.4.6 Einfluss des Druckexponenten.....	88
4.4.7 Einfluss der Betriebsdauer	89
4.5 Unterschiede der Energiebedarfsberechnung zur Berechnung nach DIN V 18599	90
4.6 Konstante Leistungsanteile von sonstigen Verbrauchern.....	94
4.7 Nutzenergiebedarf der thermischen Luftaufbereitung.....	96
4.8 Primärenergetisches Einsparpotenzial.....	100
5 Wirtschaftliche Bewertung des dVt-Systems	103
5.1 Kostenermittlung	104
5.1.1 Investitionskosten	104
5.1.2 Inspektions- und Wartungskosten.....	107
5.1.3 Energiekosten.....	109
5.2 Bewertung gegenüber Konstant-Volumenstrom-System	112
5.3 Bewertung gegenüber Volumenstromregler-System	117
5.4 Hinweise zur Systemwahl bei individuell festgelegten Randbedingungen.....	122
6 Anlagenbezogene Bewertung des dVt-Systems.....	124
6.1 Exemplarische Büro- und Verwaltungsgebäude	125
6.2 Ventilatorleistung und -energiebedarf bei Überlagerung mehrerer Nutzungsarten ...	127
6.3 Methodische Fragestellungen	129
6.3.1 Anlagenbezogene vs. nutzungsbezogene Berechnung.....	129
6.3.2 Mittlere jährliche Nutzungstage.....	132
6.4 End- und Primärenergiebedarf der exemplarischen Büro- und Verwaltungsgebäude	135
7 Zusammenfassung und Fazit.....	137
8 Anhang.....	144
8.1 Druckverlustberechnungen.....	144
8.2 24h-Lüftungsprofile.....	157
8.3 Kostenermittlungen	158
8.4 Parametervariationen zur Wirtschaftlichkeitsberechnung.....	162
8.5 Strangschemata der exemplarischen Büro- und Verwaltungsgebäude	163
9 Literaturverzeichnis	168

Verzeichnis der Formelzeichen

Lateinische Buchstaben

<i>Zeichen</i>	<i>Bedeutung</i>	<i>Einheit SI</i>
A	Fläche	m ²
d	Durchmesser	m
l	Länge	m
p	Druck	Pa
P	el. Leistung	W
Re	Reynoldszahl	-
v	Geschwindigkeit	m/s
V	Volumen	m ³
\dot{V}	Volumenstrom	m ³ /s

Griechische Buchstaben

<i>Zeichen</i>	<i>Bedeutung</i>	<i>Einheit SI</i>
Δ	Differenz	
η	Wirkungsgrad	-
λ	Rohrreibungszahl	-
ρ	Dichte	kg/m ³
ζ	Widerstandsbeiwert eines Einzelwiderstands	-

Indizes

<i>Zeichen</i>	<i>Bedeutung</i>
*	Auslegungs... (i.d.R Druck oder Volumenstrom)
0	Kanalabschnitt vom Außenluftdurchlass bis zu einem Strang
a	jährlich
A	Auslass
d	dynamisch
dim	betrifft Dimensionierung von Ventilatoren
dz	betrifft dezentrale Ventilatoren
EW	Verluste durch Einzelwiderstände
g	Gesamt(-druck)
GL	Grundlüftung
h	stündlich

i	Laufindex (allgemein)
L	Leckage
m	mittel
N	auf das Verteilnetz bezogen
NNT	Nichtnutzungstage
p	primärenergetisch
R	Verluste durch Reibung
s	statisch
z	betrifft Zentralventilator
Z	auf die Lüftungszentrale (inkl. Außen und Fortluftnetz) bezogen

Abkürzungsverzeichnis

<i>Zeichen</i>	<i>Bedeutung</i>
BP	Betriebspunkt
dVt	dezentrale Ventilatoren
dVt-System	VVS-Anlage mit dezentralen Ventilatoren
deAL	Dezentrale in die Außenwand integrierte Lüftungsgeräte
EC-Motor	Electronically communicated Motor (bürstenloser Gleichstrommotor)
EC-Ventilator	Drehzahlvariabler Ventilator mit EC-Motor
EnEV	Energieeinsparverordnung
KVS-Anlage	Konstant-Volumenstrom-Anlage
KW	Kapitalwert
NGF	Nettogrundfläche
VVS-Anlage	Variabel-Volumenstrom-Anlage
u	Standardunsicherheit
U	Erweiterte Standardunsicherheit
VSR	Volumenstromregler
VSR-System	VVS-Anlage mit Variabel-Volumenstromreglern
SFP	Spezifische Ventilatorleistung
zVt	zentrale Ventilatoren

1 Einleitung

Mechanische Lüftungsanlagen sind ein zentrales Element energieeffizienter, nachhaltiger Gebäude. Sie sorgen einerseits für eine Abfuhr von Luftverunreinigungen und Feuchte aus Gebäuden und sichern damit die für die Nutzung erforderliche Luftqualität. Andererseits können sie in Verbindung mit einer Wärmerückgewinnung einen entscheidenden Beitrag zur Reduktion des Energieaufwands zur Beheizung leisten.

Wichtig für eine möglichst hohe Primärenergieeinsparung ist, dass der Aufwand zur Luftförderung der mechanischen Lüftungsanlage möglichst gering ist. So hat der elektrische Energiebedarf zur Luftförderung in der Primärenergiebilanz aufgrund des Primärenergiefaktors von Strom ein deutliches Gewicht.

Der energetische wie auch regelungstechnische Vorteil von dezentralen Antriebsorganen ist aus dem Bereich der dezentralen Heizungsumwälzpumpen bereits bekannt [Richter u. a. 2005; Eberl, Schade, Sinnesbichler 2010]. Die Anwendung regelungstechnischer Mechanismen, die sich stets am aktuellen Bedarf orientieren, ist in der Lüftungstechnik von hoher Relevanz, da die Luftförderung einen deutlichen Anteil zum Gesamtverbrauch von mechanisch belüfteten Gebäuden beiträgt. Dabei sind die regelungstechnischen Aufgaben der Luftverteilung bei bedarfsabhängiger Volumenstromregelung anspruchsvoll.

Derzeit wird in zentralen Lüftungsanlagen üblicherweise ein zentraler Ventilator zur Luftförderung eingesetzt. Die von ihm aufgebaute Druckdifferenz wird zum Aufteilen des Gesamtvolumenstroms auf die einzelnen Gebäudebereiche bzw. Räume gezielt abgedrosselt, z. B. durch Variabel-Volumenstromregler. Variabel-Volumenstromregler sind elektromotorisch betriebene Klappen, die aufgrund eines gemessenen Ist-Volumenstroms und eines Vergleichs mit dem Soll-Volumenstrom den Klappenwinkel verändern. Dadurch wird der Druckverlust der Klappe gezielt verändert und somit der Luftvolumenstrom per Drosselung verringert. Dieser Drosselvorgang ist energetisch ineffizient und führt zu unerwünschten Rückkopplungen bei der Luftverteilung. Die Folge ein unnötig hoher energetischer Aufwand für die Luftförderung und eine ggf. schlechte Einzelraumversorgung.

Der innovative Ansatz im vorliegenden Promotionsvorhaben besteht darin, die Druckdifferenz für die Luftförderung durch dezentrale Ventilatoren an der Stelle und in der Höhe aufzubauen, wie es für die Luftförderung erforderlich ist. Dazu ersetzen dezentrale Ventilatoren die Variabel-Volumenstromregler. Der zentrale Ventilator kompensiert lediglich die Druckverluste, die in der Lüftungszentrale, d.h. bis zum dargestellten Drucksensor auftreten. Dieser Ansatz wird mit dVt-Konzept bezeichnet und ist in Abbildung 1.1 zusammen mit dem heute üblichen Variabel-Volumenstrom-System (VVS) mit Variabel-Volumenstromreglern (VSR) dargestellt. Während die technische Konzeption der Lüftungssysteme im nachfolgenden Kapitel 2 weitergehend erläutert wird, ist die Quantifizierung der in der Abbildung 1.1 angenommenen Energieeinsparung neben der Bewertung der Wirtschaftlichkeit eine Kernfrage der vorliegenden Forschungsarbeit.

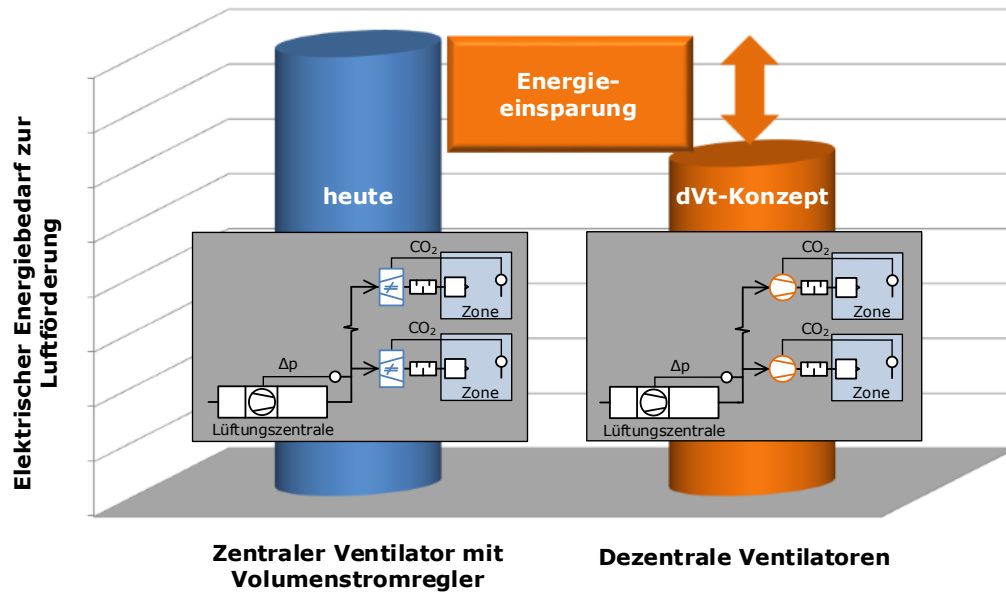


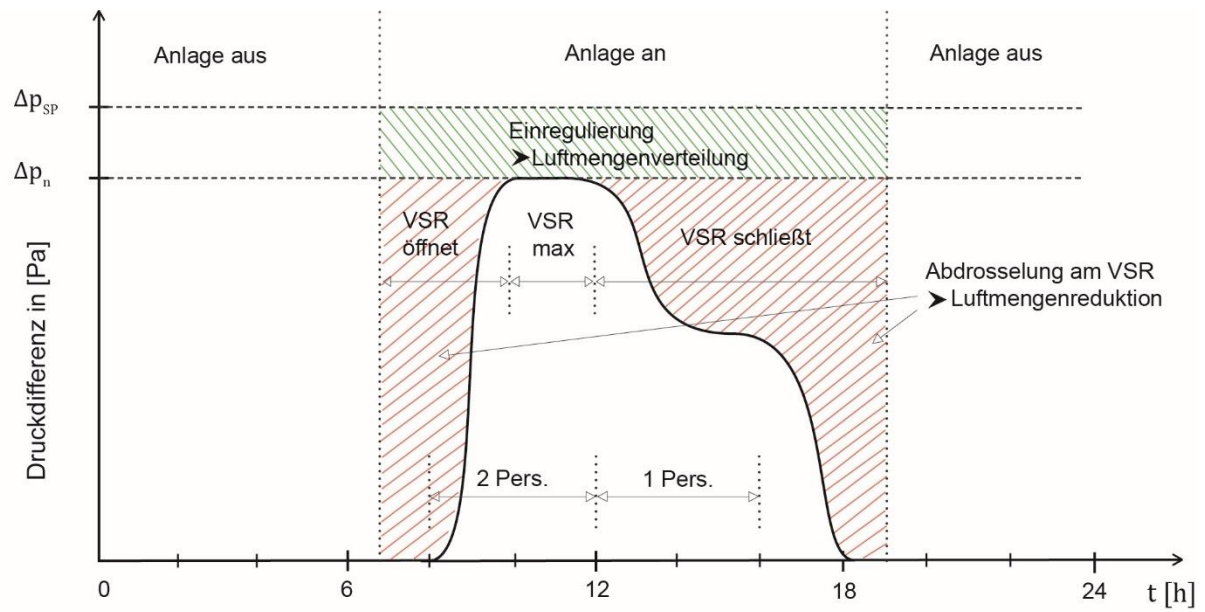
Abbildung 1.1: Dezentrale-Ventilatoren-Konzept gegenüber heute üblichen Anlagen mit Variabel-Volumenstromreglern [s. Alsen, Klimmt, Knissel 2015]

Erste durchgeführte Untersuchungen in [Alsen, Knissel 2013] zeigen zwei Drosselvorgänge in VVS-Anlagen mit Volumenstromreglern und verdeutlichen somit das Energieeinsparpotenzial:

1. Drosselung zur Einstellung der gewünschten Volumenstromverteilung, d.h. zum Luftmengenabgleich (analog zum hydraulischen Abgleich bei Heizungsanlagen)
2. Drosselung als Regelprinzip zur Luftmengenreduzierung (analog zum Regeleingriff von Thermostatventilen)

Während die Drosselung zur Luftmengenverteilung immer auftritt (Drosselvorgang 1), wenn ein Strang Luft erfordert und dieser nicht am Schlechtpunkt liegt, fällt die Drosselung durch Volumenstromregler nur im Teillastfall an (Drosselvorgang 2). Abbildung 1.2 veranschaulicht diesen Zusammenhang am Beispiel eines 2-Personenbüros im Tagesverlauf, welches von 8:00 Uhr bis 12:00 Uhr voll und anschließend nur noch mit einer Person belegt ist. Bei voller Belegung wird im Büro nach kurzer Zeit eine kritische CO₂-Konzentration erreicht, sodass der zugehörige Volumenstromregler nach kurzer Zeit so weit öffnet, dass der Nennvolumenstrom erreicht wird. Nachdem um 12 Uhr eine Person den Raum verlässt, erhöht der Volumenstromregler den Strömungswiderstand so lange, bis sich im Raum ein der Belastung entsprechender Volumenstrom einstellt.

Bereits diese einleitende Darstellung verdeutlicht, dass die Energieeinsparung durch das dVt-Konzept entscheidend vom vorliegenden Kanalnetz, der Betriebsweise sowie der Nutzung des Gebäudes abhängt. Die Einsparung wird umso größer sein, je mehr die Volumenstromregler zur Luftmengenverteilung drosseln müssen.



- Δp_{sp} : Druckerhöhung des Ventilators zum Schlechtpunkt der Lüftungsanlage
- Δp_n : Nenndruck des betrachteten Stranges
- VSR: Volumenstromregler

Abbildung 1.2: Drosselvorgänge in VVS-Anlagen [Alsen, Knissel 2013]

1.1 Fragestellung und methodisches Vorgehen

Im Verlauf der vorliegenden Arbeit soll zunächst methodisch die Frage geklärt werden, wie der elektrische Energiebedarf eines Lüftungssystems mit dezentralen Ventilatoren zur Luftförderung in zentralen raumluftechnischen Anlagen (dVt-System) möglichst detailliert und doch verallgemeinerbar berechnet werden kann. Um den errechneten Energiebedarf zu bewerten, ist zu klären, wie die Höhe des Energiebedarfs gegenüber anderen Lüftungssystemen (Konstant-Volumenstrom-Systeme, Systeme mit Variabel-Volumenstromreglern, dezentrale außenwandintegrierte Lüftungssysteme) einzuschätzen ist. Daraus ergeben sich zwei zentrale Fragen:

- Was sind typische energetische Einsparpotenziale des dVt-Systems?
- Wie ist das dVt-System wirtschaftlich einzuschätzen?

Die Antworten sollen dazu beitragen, sinnvolle Einsatzgebiete und wichtige Einsatzrandbedingungen des dVt-Systems gegenüber den ansonsten üblichen Lüftungssystemen zu identifizieren.

Abbildung 1.3 zeigt den Aufbau und die Entwicklung der vorliegenden Arbeit mit ihren vier aufeinander aufbauenden Themenstellungen:

1. Zunächst wird der Grundgedanke der technischen Konzeption des dVt-Konzeptes beschrieben und in den Kontext des in der Literatur beschriebenen Standes der Technik gestellt (Kapitel 1: „*Einleitung*“). Die wichtigsten System- und Regelvarianten werden zusammen mit den üblichsten Alternativ- bzw. Vergleichssystemen in Kapitel 2: „*Technische Konzeption des dVt-Systems*“ beschrieben. Als eine von mehreren Stufen einer etwaigen Markteinführung – mit Produktentwicklung und entsprechenden Feldtests – dienen Arbeiten am RLT-Versuchsstand, welche in Kapitel 3: „*Elektrische Ventilatorleistung der Lüftungssysteme*“ aufgeführt sind.
2. Zur energetischen Bewertung wird nach der Erläuterung der technischen Konzeption in Kapitel 3: „*Elektrische Ventilatorleistung der Lüftungssysteme*“ die elektrische Ventilatorleistung des dVt-Systems in Abhängigkeit von den zuvor beschriebenen System- und Regelvarianten sowie den unterschiedlichen Vergleichssystemen berechnet. Neben neu zu definierenden mathematischen Ansätzen zur Leistungsberechnung, werden die in der Literatur bestehenden Modelle zur Berechnung von Druckverlusten und Wirkungsgraden zum Teil erheblich an die beschriebenen Lüftungssysteme angepasst und mit aktuellen Randbedingungen aus empirischen und praxisnahen Untersuchungen ergänzt. Abschließend findet eine Validierung der Leistungsberechnung anhand des bereits erwähnten RLT-Versuchsstands statt. Auf diesem Kernstück der gesamten Arbeit aufbauend, findet in Kapitel 4: „*Energetische Bewertung bei nutzungsbezogener Betrachtung*“ die energetische Bewertung auf Basis von stündlich definierten Lüftungsprofilen für eine Vielzahl von Nutzungsarten statt. Alle wichtigen Parameter des Rechenmodells werden dabei hinsichtlich ihrer Sensitivitäten bewertet. Abschließend findet in Kapitel 4 eine primärenergetische Bewertung (d.h. eine Bewertung des gesamten nicht-erneuerbaren Ressourceneinsatzes) statt, in die neben der elektrischen Ventilatorleistung auch eine Abschätzung von konstanten Leistungsanteilen sonstiger Verbraucher der Raum- bzw. Zonenregelung sowie der Energiebedarf zur thermischen Luftaufbereitung einfließen.

3. Die Ergebnisse der energetischen Bewertung dienen als Grundlage für die wirtschaftliche Bewertung nach Kapitel 5: „*Wirtschaftliche Bewertung des dVt-Systems*“, wofür neben den Energiekosten zusätzlich Investitions- und Wartungskosten je nach System- und Regelvariante veranschlagt werden. Die wirtschaftliche Bewertung findet anschließend auf Basis des Kapitalwerts, des internen Zinsfußes und der dynamisch berechneten Amortisationsdauer statt. Das Ergebnis dient unter anderem dazu, im Rahmen einer etwaigen Produktentwicklung wirtschaftlich tragfähige Konzepte für unterschiedliche Einsatzbereiche aufzuzeigen.
4. Während die Bewertungen in Kapitel 4 und 5 darauf abzielen, möglichst verallgemeinerbare Aussagen zur energetischen und wirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit unter klar definierten, möglichst typischen Randbedingungen zu treffen, wird im Rahmen der anlagenbezogenen Bewertung in Kapitel 6: „*Anlagenbezogene Bewertung des dVt-Systems*“ der Fokus auf die Einzelfallbewertung gelegt. Dafür wird das Rechenmodell um eine Methodik zur nutzungsartenübergreifenden Berechnung ergänzt, wodurch es möglich ist, die energetische Bewertung für individuelle Gebäudekonstellationen durchzuführen. Die anlagenbezogene Bewertung wird auf vier reale, exemplarische Büro- und Verwaltungsgebäude angewendet, um ein exemplarisches Einsparpotenzial zu ermitteln. Ferner wird geprüft, inwieweit die Ergebnisse der anlagenbezogenen Bewertung gegenüber den Ergebnissen der nutzungsartenbezogenen Bewertung neue allgemeingültige Rückschlüsse ermöglichen. Perspektivisch dient die anlagenbezogene Bewertung dazu, bei wissenschaftlichen Monitorings an realen Gebäuden gemessene Verbräuche von Lüftungssystemen rechnerisch zu plausibilisieren, zu bewerten und zusätzlich den Energiebedarf von nicht ausgeführten Alternativsystemen zu bestimmen.

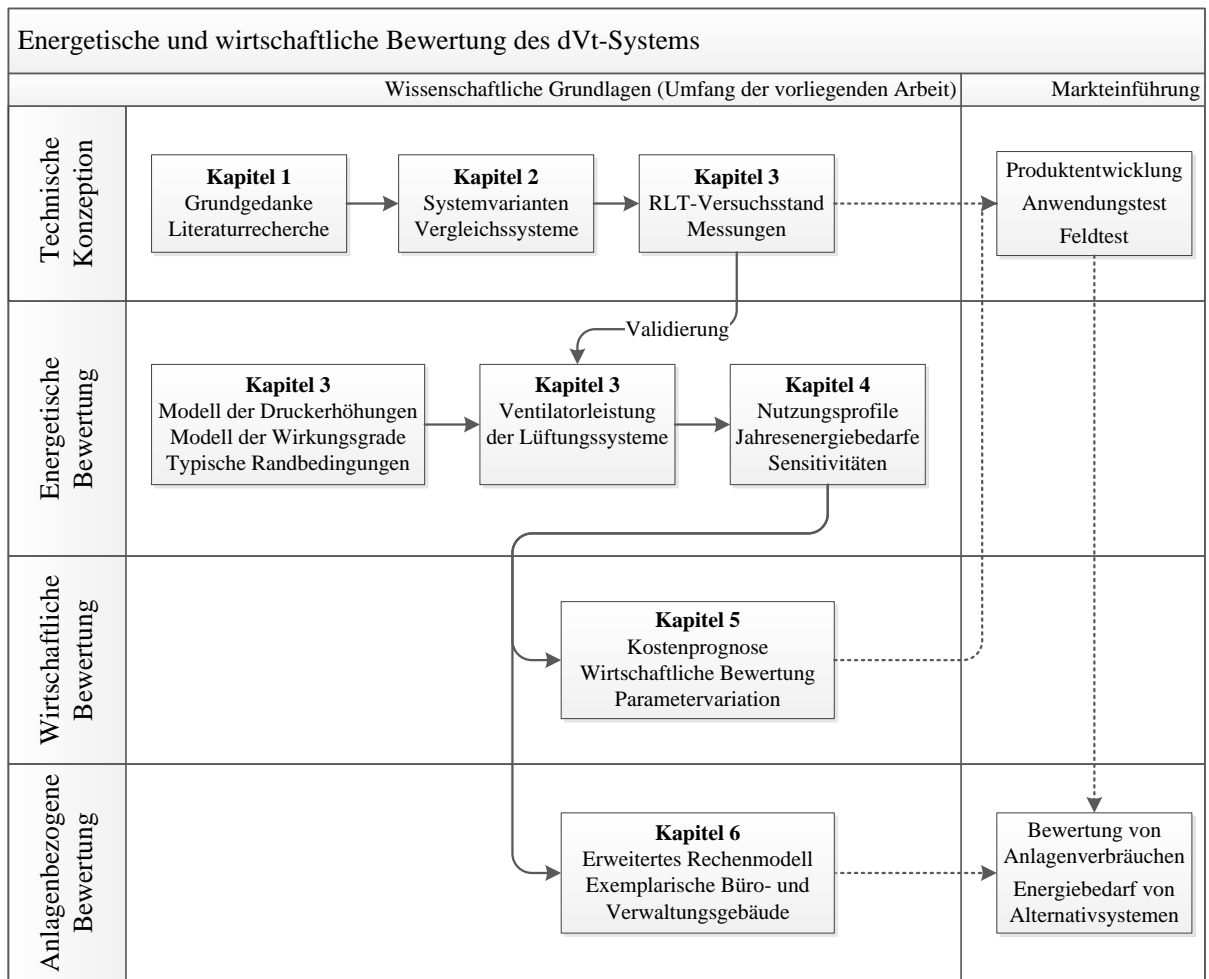


Abbildung 1.3: Übersicht zum Aufbau und zur Entwicklung der vorliegenden Arbeit

1.2 Aktuelle Forschungslage und bisherige Umsetzungen von semizentraler Lüftung

Die Luftförderung über dezentrale Ventilatoren ist in Nicht-Wohngebäuden bisher noch nicht systematisch untersucht worden. Entsprechend ist das Konzept in den Standardwerken der technischen Gebäudeausrüstung bzw. Lüftungstechnik (z.B. [Pistohl 2009], [Recknagel, Sprenger 2011] und [Rietschel, Fitzner 2008]) nicht zu finden.

In der Praxis werden – selten – dezentrale Schubventilatoren eingesetzt, um bei Netzen mit hohen Druckverlusten besonders weit von der Lüftungszentrale entfernt liegende Bereiche mit Luft zu versorgen. Diese Schubventilatoren stellen aber lediglich eine punktuelle Ergänzung in Systemen mit zentralen Ventilatoren dar. Anzutreffen ist der Einsatz von Ventilatoren im Kanalnetz z.B. vereinzelt in besonders großen Versorgungssystemen, z.B. in Krankenhäusern. Die Ventilatoren versorgen hier einzelne große Gebäudebereiche [Hörner, Schmidt 2011, S. 113]. Die Luftverteilung innerhalb der Gebäudebereiche erfolgt durch Abdrosseln der vom Ventilator aufgebauten Druckerhöhung, so dass derartige Anlagen mit konventionellen Systemen vergleichbar sind.

1.2.1 Forschungsberichte zu semizentraler Lüftung

Das dVt-Konzept ist für den Einsatz in Nichtwohnggebäuden gedacht. Dennoch soll nachfolgend auch der Stand der Forschungslage für den Einsatz in Wohngebäuden beschrieben werden, da es unter dem Begriff „semizentrale Lüftung“ insbesondere im Bereich von mehrgeschossigen Wohngebäuden, vorrangig bei Passivhaussystemen, bereits Praxiserfahrungen gibt. Die Luftverteilung innerhalb von Wohnräumen geschieht weiterhin durch Abdrosseln am Lüftungsauslass.

Als erstes öffentlich gefördertes Gebäude im Geschosswohnungsbau in Passivhaus-Standard sind die Passivhäuser Marbachshöhe detailliert im Rahmen der CEPHEUS-Projektinformationen Nr. 15 und 16 im Protokollband 17 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser und des Tagungsbands zur 4. Passivhaus Tagung in Kassel 2000 dokumentiert [Feist 2000; Feist 2007b].

In den darauffolgenden Jahren wurde insbesondere im österreichischen Raum die Verwendung von semizentralen Lüftungsanlagen beschrieben. So waren im Jahr 2010 von insgesamt 102 Mehrfamilienhäusern mit Komfortlüftungsanlagen 24 Lüftungsanlagen als semizentrale Systeme installiert [Kapferer u. a. 25.02.2011, S. 18]. Mit Förderung des österreichischen Bundesministeriums für Verkehr, Innovationen und Technologien wurde vom Verein komfortlüftung.at¹ im Jahr 2011 die Reihe „Komfortlüftungsinfo“ herausgegeben, die u.a. einen „Planungsleitfaden für Wohnungslüftungen im Mehrfamilienhaus (MFH)“ [Leitzinger 2011] enthält, in dem u.a. die wichtigsten Charakteristika sowie Vor- und Nachteile von semizentralen Lüftungssystemen in Mehrfamilienhäusern beschrieben werden. Nachfolgend werden die Erfahrungen aus o.g. Pilotprojekten näher beschrieben.

¹ Die Mitglieder des Vereins komfortlüftung.at sind österreichische Energieberatungsstellen und -agenturen, Forschungseinrichtungen und Einzelpersonen (Stand 2013).

1.2.2 Bisherige Umsetzungen in der Praxis

Die zwei Passivhäuser Marbachshöhe [Feist 2007b, 92ff.] wurden im Mai/Juni des Jahres 2000 im Rahmen des sozialen Wohnungsbaus als erste mehrgeschossige Passivhausbauten in Deutschland errichtet. Es handelt sich um hochwärmegedämmte Massivbauten mit fünf Vollgeschossen.

Je Wohneinheit wurden elektronisch kommutierte (EC) Gleichstromventilatoren mit vorwärtsgekrümmten Laufrädern und Konstant-Volumenstromregelung verwendet, die ohne Messeinrichtung im Luftkanal auskommen. Der Wirkungsgrad lag (nur) bei 24%. Hervorgehoben werden signifikant niedrigere Investitions- und Wartungskosten gegenüber einer Lösung mit Volumenstromreglern.

Die Ventilatoren wurden zusammen mit Schalldämpfern (Länge 1 m, DN 125) sowie zuluftseitigen Heizregistern in Versorgungsschächten installiert. Zusätzlich wurden in der abgehängten Decke je Ventilator eine Rückschlagklappe (DN 125 mit Gummiauflage und Federzug) verwendet, deren Leckluftstrom gemäß DIN 18017 besser als 0,01 m³/h bei einer Druckdifferenz von 50 Pa ist. Den Angaben zufolge konnte nur ein Anbieter ausfindig gemacht werden, der Rückschlagklappen in der geforderten Qualität und Abmessung herstellte. Die Klappen wurden ohne den vorgesehenen Federzug, aber dafür mit senkrechter Drehachse verbaut, um gemessene Druckverluste von bis zu 70 Pa bei 150 m³/h in normaler Einbausituation zu verringern.

Der Volumenstrom kann vom Wohnungsflur aus in zwei Stufen geschaltet werden. Dort wird auch die gewünschte Raumtemperatur eingestellt. Zudem ist eine Intensivlüftung über einen Taster in der Küche zu betätigen. Auf Serviceebene kann der Volumenstrom der Lüfterstufen in Schritten von 15 m³/h variiert werden. Ein Abschalten der Lüftung ist nur über den Sicherungskasten möglich.

In der Lüftungszentrale sieht das Lüftungskonzept v.a. Komponenten für die Wärmerückgewinnung vor: Einen Gegenstrom-Luft/Luft-Wärmetauscher mit Bypass-Klappen für den Sommerfall sowie eine Kondensatleitung, ein elektrisch beheiztes Frostschutz-Vorheizregister sowie Filter auf der Außen- und Abluftseite. Es wurde kein Ventilator in der Lüftungszentrale vorgesehen.

Der westlich gelegene Baukörper wurde messtechnisch umfangreich ausgestattet und analysiert. Allerdings lag der Schwerpunkt auf der Erfassung einer Wärmebilanz. Es wurden bei allen Lüftungsanlagen Temperaturen und nur an einer Anlage auch Volumenströme gemessen [Pfluger, Feist 2001]. Die Auswertung der Volumenstrommessungen ergab einen Zuluftüberschuss von bis zu 20 %, obwohl volumenstromkonstante Ventilatoren in den Wohneinheiten eingesetzt wurden [Pfluger, Feist 2001, S. 56]. Die Ursache dieser Disbalance wird nicht näher erläutert, lässt jedoch auf eine nicht optimal funktionierende Ventilatorregelung schließen. Ein Gespräch mit dem Planer des Systems (Joachim Otte von der Fa. Innovatec energiesysteme kassel gmbh) ergab, dass nachträglich ein Zentralventilator eingebaut wurde, da die dezentralen Ventilatoren offenbar die erforderlichen Drücke nur schlecht aufbauen konnten und es Akustikprobleme gab. Die Probleme wurden durch den nachträglichen Einbau eines Schubventilators behoben.

Eine komplette Systemlösung bot der österreichische Hersteller „Drexel und Weiß“ mit einem Zentralgerät „Aerosmart centro“ und dezentralen Geräten „Aerosmart micro“ im 2010er Pro-

duktkatalog an, wurde jedoch im 2013er Produktkatalog durch eine Lösung mit Volumenstromreglern mit einer variablen Regelung des Vordrucks abgelöst. Die semizentrale Lösung wird auch in [Feist 2007a, S. 95–100] beschrieben. Der Hersteller machte auch auf Nachfrage keine Angabe zu den Gründen für den Systemwechsel.

Die Ventilatoren des „Aerosmart micro“ sind ebenso wie im Pilotprojekt der Passivhäuser Marbachshöhe mit Gleichstromventilatoren mit Konstant-Volumenstromregelung ausgestattet und sind in drei Stufen regelbar. Der Einsatz von Abluftfiltern der Klasse G4 und Schalldämpfern ist ähnlich wie bei den Passivhäusern Marbachshöhe. Eine Berechnung des Ventilatorwirkungsgrads mit Angaben bei Nennlüftung ergibt einen geringen Wirkungsgrad von 20 %².

Der wesentliche Unterschied zwischen dem System der Fa. Drexel und Weiss zu o.g. Pilotprojekt ist, dass neben dezentralen Ventilatoren auch ein zentraler Ventilator (in der Lüftungszentrale) vorhanden ist. Das Zentralgerät regelt dabei auf einen konstanten Überdruck im Zuluftkanal und einen konstanten Unterdruck im Abluftkanal, wobei die Drucksensoren im Steigschacht nahe dem Zentralgerät angeordnet sind. Zudem waren verschiedene Konfigurationen mit einem zentralen und/oder dezentralen Heizregistern vorgesehen. Eine Luftmengenregelung konnte u.a. über einen CO₂-Sensor im Abluftkanal bedarfsbasiert erfolgen.

Im 2013er Produktkatalog wurden die dezentralen Ventilatoren des „Aerosmart micro“ durch die sog. „v-box“ abgelöst. Die „v-box“ entspricht einem System mit Volumenstromreglern mit einer variablen Anpassung des Vordrucks: „Die Regelung der [zentralen] Ventilatoren erfolgt über den Volumenstrom der vboxen. Dafür werden die Daten aus allen Wohnungen ausgewertet und die optimale Drehzahl automatisch an die gesamt benötigte Luftmenge angepasst.“ [drexel und weiss energieeffiziente haustechniksysteme gmbh 2013, S. 36]. Als Vorteil werden u.a. die Möglichkeit von Volumenströmen ab 30 m³/h, ein geringer Wartungsaufwand (kein Filterwechsel in der Wohnung) und eine gute Akustik hervorgehoben [drexel und weiss energieeffiziente haustechniksysteme gmbh 2011, S. 1].

HINWEIS: Das VSR-System mit variablem Vordruck wird in Abschnitt 2.1.2 beschrieben.

Es lassen sich einige Erfahrungswerte und Tendenzen aus dem Einsatz von semizentraler Lüftung in mehrgeschossigen Wohngebäuden ableiten. So gibt es einen klaren Trend bei den verwendeten Komponenten:

- Die dezentrale Einheit besteht jeweils aus einem Ventilator mit Konstantvolumenstrom-Regelung, einem oder mehreren Schalldämpfern, einem Filter und einer Rückschlagklappe.
- Die zentrale Einheit enthält neben den üblichen Komponenten zur Luftaufbereitung insbesondere auch einen zentralen Ventilator zum Ausgleich der Druckverluste in der Lüftungszentrale.

Bezüglich eines zentralen Ventilators werden klare Aussagen in den Studien der Reihe „Komfortlüftungsinfo“ getroffen: So wird im Abschnitt „Was würden die Bauträger und PlanerInnen heute anders machen?“ aufgeführt, dass semizentrale Systeme immer mit Stützventilator

² Ergibt sich aus einer Leistung von 12,5 W bei der Nennluftmenge von 120 m³/h und 75 Pa Druckerhöhung (25 Pa intern und 50 Pa extern).

geplant werden sollten, „da die dezentralen Geräte normalerweise den Druck nicht mehr aufbringen können, bzw. es beim Ausschalten eines Geräts zur Geruchsübertragung kommen kann (meist trotz Rückschlag oder Brandrauchklappe).“ [Verein komfortlüftung.at 2011, S. 4]. Als planerischer Hinweis wird empfohlen, die Möglichkeit der Geruchsübertragung z.B. durch „Regelung auf +5 Pa am Ende des Stranges.“ [Greml, Kapferer, Leitzinger 2011, S. 36] zu verhindern.

Die o.g. Ausführungen zum Stand der Technik bei semizentraler Lüftung zeigen auch, dass bislang noch kein Einsatz des Systems in anderer Nutzung als Wohnnutzung dokumentiert ist. Dadurch ergeben sich andere Volumenstrom- und Druckbereiche, die untersucht werden müssen. Auch sind die normativen Anforderungen neu zu bewerten.

Eine wichtige Fragestellung ist zudem, welche Ventilatorwirkungsgrade die dezentralen Einheiten erreichen können. In den genannten Projekten lagen diese zum Teil deutlich unter 25%, was gegenüber Systemen mit Zentralventilator und Volumenstromreglern einen deutlichen Effizienzverlust bedeutet.

2 Technische Konzeption des dVt-Systems

Nachfolgend wird – im Anschluss an eine Darstellung der entsprechend des aktuellen technischen Stands derzeit eingesetzten Lüftungssysteme – der Forschungsansatz des Dezentrale-Ventilatoren-Systems hinsichtlich des technischen Aufbaus und unter Berücksichtigung unterschiedlicher System- und Regelvarianten dargestellt.

Die technische Konzeption des dVt-Systems wurde im Rahmen des vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Forschungsprojekts „Einsatz von dezentralen Ventilatoren zur Luftförderung in zentralen RLT-Anlagen insbesondere bei Nicht-Wohngebäuden“ (Förderkennzeichen: 03ET1200A) am Fachgebiet Technische Gebäudeausrüstung der Universität Kassel von Tobias Klimmt M.Eng. und dem Autor dieser Arbeit unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Jens Knissel entwickelt.

Die gemeinsam erarbeiteten Inhalte der technischen Konzeption sind die Grundlage für die energetische und wirtschaftliche Bewertung des dVt-Systems und weiterführende Betrachtungen zu Einsatzrandbedingungen und weiteren Fragestellungen zur Regelung des dVt-Systems [Klimmt o. J.].

2.1 Stand der Technik

Gegenwärtig sind sowohl Konstant-Volumenstrom-Systeme (KVS-Anlagen) als auch Variabel-Volumenstrom-Systeme (VVS-Anlagen) weit verbreitet. Diese Systeme bilden die Ausgangslage und damit den Vergleichsmaßstab für den Forschungsansatz des dVt-Systems und werden nachfolgend hinsichtlich ihrer Funktionsweise und ihrer Einsatzgebiete – auch in Bezug auf die Anforderungen der Energieeinsparverordnung (EnEV 2014) – erläutert.

2.1.1 Konstant-Volumenstrom-Systeme

In KVS-Anlagen wird während der Nutzungszeit (sowie ggf. bereits vor Beginn der Nutzung, um Gebäudeemissionen zu entfernen) ein konstanter Volumenstrom gefahren. Zur korrekten Verteilung der Luft auf die unterschiedlichen Räume ist eine Einregulierung im Sinne eines hydraulischen Abgleichs nötig, wozu ggf. Konstant-Volumenstromregler eingesetzt werden (Drosselvorgang 1 nach Abbildung 1.2). Durch den konstanten Auslegungs-Volumenstrom wird in vielen Betriebssituationen mehr gelüftet, als eigentlich notwendig wäre. Dies hat u.a. erhöhte Energieverbräuche zur Folge. Daher grenzt die Energieeinsparverordnung in §15, Abs. 3, Satz 1 (Stand: 06-2016) das Einsatzgebiet von KVS-Anlagen ein:

„Beim Einbau von Anlagen nach Absatz 1 Satz 1 [Anm.: raumluftechnischen Anlagen, die für einen Volumenstrom der Zuluft von wenigstens 4 000 Kubikmeter je Stunde ausgelegt sind] in Gebäude und bei der Erneuerung von Zentralgeräten oder Luftkanalsystemen solcher Anlagen müssen diese Anlagen mit Einrichtungen zur selbsttätigen Regelung der Volumenströme in Abhängigkeit von den thermischen und stofflichen Lasten oder zur Einstellung der Volumenströme in Abhängigkeit von der Zeit ausgestattet werden, wenn der Zuluftvolumenstrom dieser Anlagen je Quadratmeter versorgter Nettogrundfläche, bei Wohngebäuden je Quadratmeter versorgter Gebäudenutzfläche neun Kubikmeter pro Stunde überschreitet.“

Ab einer bestimmten Größe der Gesamtanlage (4000 m³/h Auslegungsvolumenstrom) und einer gewissen Höhe des Zuluftvolumenstroms je m²_{NGF} (9 m³/h je m²_{NGF}) ist eine KVS-Anlage daher bei Einbau und Erneuerung nicht zulässig. Im Umkehrschluss ist sie bei kleineren Anlagen und bei Anlagen mit geringem Volumenstrom je m²_{NGF} zulässig und aufgrund des geringeren technischen Aufwands mit den damit verbundenen geringeren Investitionskosten als marktüblich anzusehen. KVS-Anlagen werden daher erstens üblicherweise dort eingesetzt, wo der wirtschaftliche Nutzen (Energieeinsparung) nicht groß genug ist, um die Investitionskosten für ein Variabel-Volumenstrom-System zu amortisieren.

Das Konstant-Volumenstrom-System entspricht zweitens dann dem Stand der Technik, wenn die Luftmengen der einzelnen Räume nicht zuverlässig anhand der Emissionslasten geregelt werden können, weil diese z.B. nicht bekannt sind oder korrekt erfasst werden können. So heißt es weiter in der Energieeinsparverordnung in §15, Abs. 3, Satz 2 (Stand: 10-2015):

Satz 1 gilt nicht, soweit in den versorgten Räumen auf Grund des Arbeits- oder Gesundheitsschutzes erhöhte Zuluftvolumenströme erforderlich sind oder Laständerungen weder messtechnisch noch hinsichtlich des zeitlichen Verlaufes erfassbar sind.“

2.1.2 Variabel-Volumenstrom-Systeme mit Variabel-Volumenstromreglern

In VVS-Anlagen mit VSR wird der Druck im Hauptkanal

- entweder bei allen Teillast-Volumenströmen auf einen fest eingestellten Wert geregelt (konstanter Vordruck) oder
- die Druckerhöhung durch ein sog. Kanaldruckmanagement bestimmt, bei dem die benötigte Druckerhöhung aus den jeweiligen Klappenstellungen der VSR berechnet wird (variabler Vordruck) (Details in [Kober, Müller 2013, 252ff.])

Im Fall des konstanten Vordrucks ergibt sich der Sollwert des Vordrucks aus dem Druckverlust des strömungstechnisch am ungünstigsten gelegenen Strangs *bei Auslegungsvolumenstrom* und im Fall des variablen Vordrucks ergibt sich der Vordruck aus dem Druckverlust des jeweils am ungünstigsten liegenden Strangs *bei Teillastvolumenstrom*. Dadurch fallen die Drosselverluste bei konstantem Vordruck im Mittel deutlich höher aus, als bei variablem Vordruck. Eine Drosselung findet jedoch in beiden Systemen statt.

Die Regelung mit konstantem Vordruck hat den Vorteil, dass im Prinzip keine Vernetzung der Volumenstromregler mit einem System der Gebäudeautomation vorhanden sein muss. Dies setzt jedoch voraus, dass dezentral ein Sollwert vorgegeben wird (z.B. Präsenzmelder, CO₂-Sensoren mit integrierem Regler oder Bedarfstaster). Weiterhin ist – typischerweise vor dem ersten Kanalabzweig – ein Drucksensor vorzusehen, der den Kanaldruck gegen Umgebung misst. Die Ventilatorregelung muss die Ventilator Drehzahl dann so anpassen, dass stets der vorab berechnete konstante Vordruck gehalten wird. Somit steht für alle Betriebszustände ausreichend Druck im Kanal zur Verfügung, der von den Variabel-Volumenstromreglern dann bedarfsweise gedrosselt wird.

Die Regelung auf einen variablen Vordruck setzt eine Vernetzung aller Variabel-Volumenstromregler voraus, die aber in vielen Fällen ohnehin gegeben ist. Allerdings müssen die Volumenstromregler ihre jeweilige Klappenstellung ausgeben können, was nur mit einem Teil der auf dem Markt erhältlichen Produkte möglich ist. Weiterhin verursachen die zusätzlichen Datenpunkte für die Signalverarbeitung der Klappenstellung zusätzliche Kosten.

Ein weiterer Vorteil – neben den oben beschriebenen systematisch geringeren Vordrücken bei Teillast – ist, dass im System mit variablem Vordruck kein Sollwert des Vordrucks vorgegeben werden muss, da dieser durch Regelung anhand der Klappenwinkel automatisch gefunden wird. Somit entfällt eine potenzielle Fehlerquelle, z.B. in Bezug auf unnötig hohe Sicherheitszuschläge. Auch auf den entsprechenden Drucksensor vor dem ersten Kanalabzweig kann verzichtet werden.

In der vorliegenden Arbeit wird – aufgrund der großen Verbreitung – das Variabel-Volumenstrom-System mit konstantem Vordruck derzeit noch als übliches Vergleichssystem angesehen. Es ist jedoch möglich, dass das System mit variablem Vordruck an Bedeutung gewinnen wird.

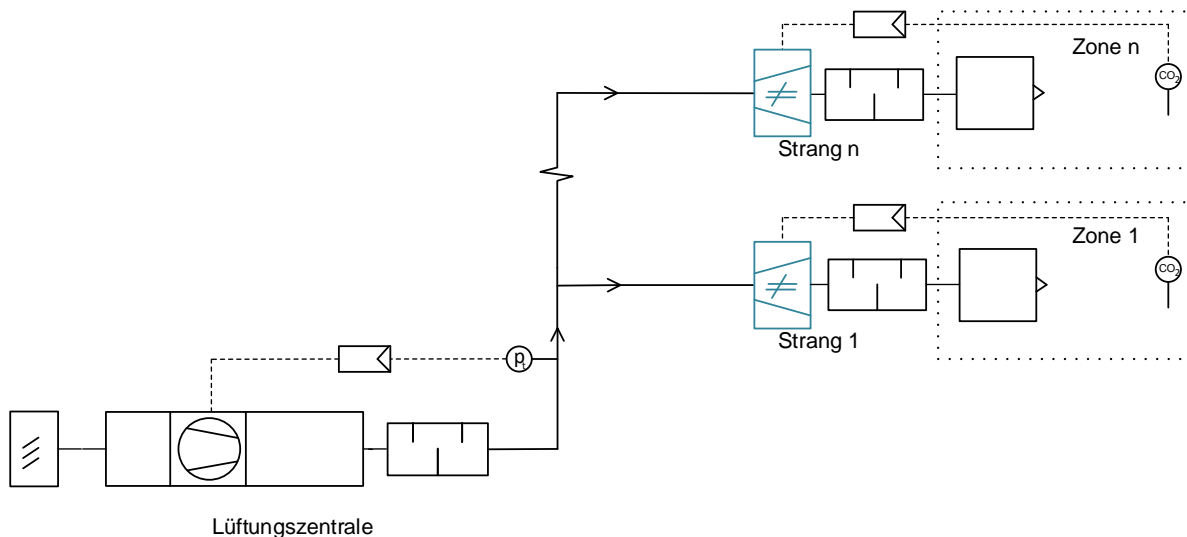


Abbildung 2.1: Schema eines Variabel-Volumenstrom-Systems mit zonenweiser Regelung des Volumenstroms durch Variabel-Volumenstromreglern und konstanten Vordruck im Verteilnetz

2.1.3 Dezentrale außenwandintegrierte Lüftungssysteme

Unter dezentralen außenwandintegrierten Lüftungssystemen (deAL-Systeme) werden im Allgemeinen raumweise installierte Lüftungsanlagen verstanden, die nicht an ein zentrales Lüftungssystem angebunden sind.

Übliche Installationen für kleinere Volumenströme (z.B. Büronutzungen) sind Brüstungsgeräte oder Unterflurgeräte [Hirn 2009]. Auch aus dem Bereich der Wohngebäude ist eine Vielzahl an kompakten Lösungen für kleine Volumenströme auf dem Markt vorhanden. Bei höheren Luftvolumenströmen (z.B. Klassenzimmer) werden größere Installationen benötigt, die als Stand-, Wand-, oder Deckengerät ausgeführt werden [Hellwig, Hackl, Nocke 2015].

Im Unterschied zu den vorgenannten zentralen Systemen und dem dVt-System findet die Luftaufbereitung (Wärmerückgewinnung, Heizen, Kühlen, Be- und Entfeuchten, Luftfiltration) vollständig dezentral statt. Da die Komponenten zur Luftaufbereitung für jedes Gerät einzeln installiert werden müssen, steigt der Installationsaufwand gegenüber zentralen Installationen mit einer zunehmenden Anzahl an Luftbehandlungsfunktionen deutlich an. Ebenso wird die Wartung der Komponenten raumweise fällig, was z.B. in Bezug auf den Filterwechsel einen deutlichen Mehraufwand bedeutet.

Im vom BMWi geförderten Forschungsprojekt *DeAL – Evaluierung dezentraler außenwandintegrierter Lüftungssysteme* (Förderkennzeichen 0327386B) werden die Vorteile der außenwandintegrierten Lüftungssysteme gegenüber zentralen Lüftungssystemen folgendermaßen zusammengefasst [Mahler u. a. 2008; Hirn 2009]:

- Energieeinsparung durch bedarfsgerechte Regelung (mit ähnlicher spezifischer Ventilatorleistung wie bei zentraler Lüftungstechnik)
- Individuelle Lüftung und Temperierung der Räume
- Höhere Nutzerzufriedenheit
- Raum- bzw. zonengenaue verbrauchsgerechte Kostenabrechnung möglich
- Bei Neubauten: Geringerer Flächen- und Raumbedarf, keine Versorgungsschächte für Luftleitungen und Brandschutzklappen

Während die ersten drei Vorteile auch vollständig mit dem dVt-System erreichbar sind, kann eine verbrauchsgerechte Kostenabrechnung mit dem dVt-System nur anteilsweise für den Stromverbrauch der dezentralen Ventilatoren erreicht werden. Der Stromverbrauch der zentralen Ventilatoren müsste ggf. anteilig z.B. entsprechend des Energieverbrauchs der dezentralen Einheiten oder anhand des geförderten Luftvolumens aufgeteilt werden.

Der systembedingte Vorteil von außenwandintegrierten Lüftungssystemen mit geringerem Flächendarf und einem verringerten Bedarf an Luftleitungen, Versorgungsschächten und Brandschutzklappen wird von den Autoren der *DeAL*-Studie insofern eingeschränkt, als dass die höhere Flächeneffizienz

- nur bei Neubauvorhaben auftritt,
- wenn nicht ohnehin eine zentrale Lüftung mit zugehörigen Technikzentralen benötigt wird (genannt wurden Fälle mit Tiefgaragenentlüftung oder zentralen Lüftungsanlagen für innenliegende Räume) und
- die dezentrale Lüftung von Beginn der Planung an zwischen Architektur und Gebäudetechnik abgestimmt wird.

In diesen Fällen ist durch den Verzicht auf die zentrale Lüftungstechnik und die gute Flächeneffizienz mit einer guten Kostenstruktur zu rechnen. Als weiterer Vorteil sollte hervorgehoben werden, dass es im Bestand einige Anwendungsgebiete geben dürfte, bei sich denen im Zusammenhang mit einer Fenster- und/oder Fassadenerneuerung ein außenwandintegriertes Lüftungssystem auch in Gebäude integrieren lässt, in denen zuvor keine Lüftung installiert war. Bei zentralen Lüftungssystemen ist dies aufgrund der nicht vorgesehenen Versorgungsschächte usw. in Sanierungsfällen nicht immer möglich. Für diese Anwendungsgebiete können außenwandintegrierte Lüftungssysteme als nahezu einzige Alternative gegenüber einer reinen Fensterlüftung angesehen werden.

Als Nachteile von außenwandintegrierten Lüftungssystemen wird in [Hirn 2009] gesehen:

- Teilweise Probleme mit Lärm und Zugluft
- Be- und Entfeuchtung aufwendig
- Aufwand für Wartung und Filterwechsel
- Wärmerückgewinnung relativ aufwendig
- Einfluss von Winddruck und Außentemperaturen an der Gebäudehülle auf die Funktion der Geräte
- Höherer Stromverbrauch bei nicht-bedarfsabhängiger Regelung

Hinzu kommt, dass auch in deAL bei kalten Außentemperaturen Kondensat entsteht, was einen Kondensatablauf und weitere Maßnahmen zur Enteisung erforderlich machen kann. Alle genannten Nachteile können mit zentraler Lüftungstechnik besser gelöst werden.

Als eindeutige Vorteile verbleiben eine zonengenaue Stromkostenabrechnung und eine unter günstigen Umständen bessere Flächeneffizienz, sowie diejenigen Sanierungsfälle in denen nur der Einsatz von außenwandintegrierten Lüftungsgeräten überhaupt den Einsatz einer kontrollierten Lüftung mit Wärmerückgewinnung ermöglicht.

In der o.g. Literatur wird angegeben, dass sich eine Energieeinsparung bei bedarfsabhängiger Regelung ergibt. Die Fragestellung wurde jedoch nur hinsichtlich der Einsparung thermischer Energie detailliert untersucht. Die Frage der Stromeinsparung wurde dagegen bisher eher ru-

dimentär beantwortet [Hirn 2009]: „*Beim Primärenergieverbrauch liegen die 10 untersuchten Gebäude, verglichen mit anderen EnBop-Projekten, im guten Mittelfeld. ... [Sie verbrauchen] tendenziell weniger Strom als moderne Bürogebäude mit vergleichbarem Komfort*“. Da die Bewertung des Stromverbrauchs nur auf Gebäudeebene vorgenommen wurde und nur in einem Fall eine separate messtechnische Erfassung des Lüftungsstromverbrauchs der Gebäude dokumentiert ist, lassen sich keine genaueren Aussagen diesbezüglich treffen.

HINWEIS: Im einzigen vermessenen Bauvorhaben lag der Gesamt-SFP-Wert (Zu- und Abluft) bei ca. 1200 ... 1700 W/(m³ s) und damit in der Größenordnung von typischen zentralen Lüftungsanlagen. Der Wert wurde als zu hoch eingeschätzt, vermutlich da typische Herstellerangaben im Forschungsprojekt 600 ... 800 W/(m³ s) betragen. Die vermeintlich zu hohen Werte seien auf einen Defekt der Lüfter und einen zu hohen geförderten Volumenstrom zurückzuführen. [Mahler u. a. 2008, S. 36]

Weiterhin wurde im Rahmen der thermischen Simulation eines exemplarischen 3-Personenbüros mit 150 m³/h Luftvolumenstrom auch der elektrische Energiebedarf berechnet. Im Ergebnis wird eine Reduzierung des Energiebedarfskennwerts der Luftförderung von 13,2 kWh/(m² a) auf 3,1 kWh/(m² a) und somit ein Einsparpotenzial von 76% angegeben. Dies ist aber nur für folgende Randbedingungen gültig:

- Geringe elektrische Leistungsaufnahme des außenwandintegrierten Lüftungsgeräts mit einem Gesamt-SFP (Zu- und Abluft) von 612 W/(m³ s). Dies entspricht der SFP-Klasse 1.
- Es gibt keine Mindestlüftung, Grundlüftung oder Vorspülung bei Personenabwesenheit zur Beseitigung von Gebäudeemissionen, was nicht normkonform ist (siehe Abschnitt 4.2), aber zu deutlichen Energieeinsparungen führt.
- Das Büro ist nur sechs Stunden pro Tag belegt (nur dann läuft die Lüftung)
- Das Vergleichssystem ist ein Konstant-Volumenstrom-System mit 14 Stunden täglicher Laufzeit und einem Gesamt-SFP von 1800 W/(m³ s)

Unter diesen – in der Praxis durchaus möglichen – Randbedingungen sind die außenwandintegrierten Geräte aus energetischer Sicht sicherlich sehr vorteilhaft. Allerdings wird in der Studie nicht der messtechnische Nachweis gebracht, dass die Herstellerangaben bezüglich der Ventilatorleistung in der Praxis reproduziert werden. Außerdem sollten die normativen Anforderungen zur Beseitigung von Gebäudeemissionen bei Personenabwesenheit auch von den außenwandintegrierten Geräten erfüllt werden. Als Vergleichssystem bieten sich vor allem die zentralen Variabel-Volumenstrom-Systeme mit Volumenstromreglern (VSR-System) oder mit dezentralen Ventilatoren (dVt-System) und einer CO₂-geführten Bedarfsregelung an. Unter diesen Randbedingungen ist eine Neubewertung des Einsparpotenzials an elektrischer Energie wünschenswert und wird in Abschnitt 4.3 durchgeführt.

2.2 Forschungsansatz: Variabel-Volumenstrom-System mit dezentralen Ventilatoren

Der Aufbau des dVt-Systems ist in großen Teilen deckungsgleich mit dem VSR-System mit konstantem Vordruck. Es gibt zwei Unterschiede, die den Kern des Konzeptes ausmachen:

- Die Volumenstromregler werden durch dezentrale Ventilatoren ersetzt
- Der Vordruck wird auf 0 Pa gegenüber Umgebung geregelt

In der Konsequenz gleichen die zentralen Ventilatoren nur noch die Druckverluste bis zum Drucksensor aus (v.a. Komponenten der Lüftungszentrale) und die neu hinzugekommenen dezentralen Ventilatoren die Druckverluste von dort bis zum Luftdurchlass in der Zone.

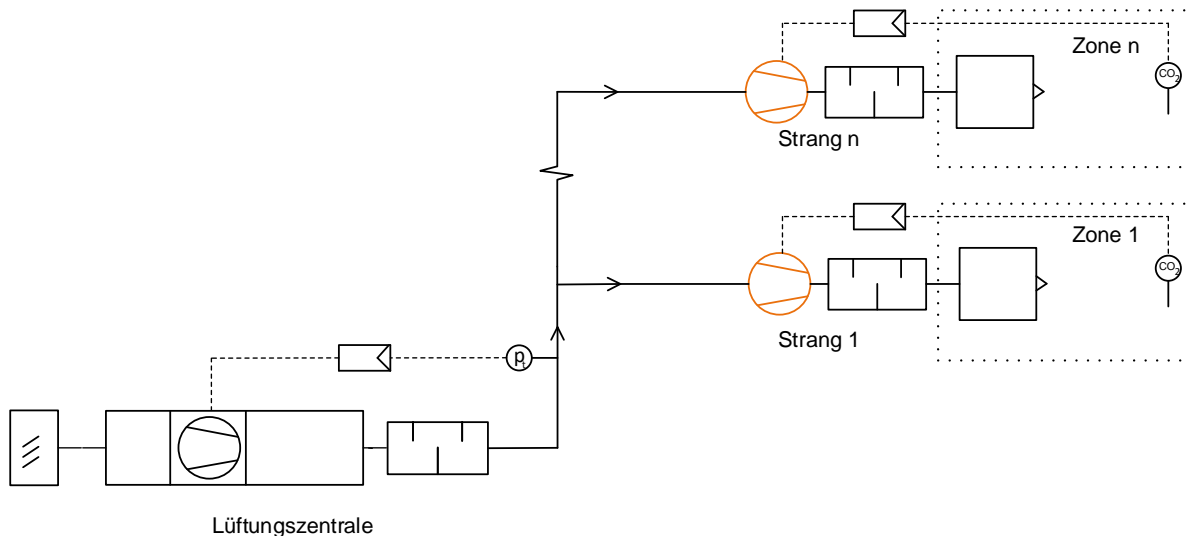


Abbildung 2.2: Schema eines Variabel-Volumenstrom-Systems mit zonenweiser Regelung des Volumenstroms durch dezentrale Ventilatoren

Zur weiteren Beschreibung des dVt-Systems soll nun der Fokus vom Gesamtsystem auf einen einzelnen Raum bzw. eine einzelne Lüftungszone gelegt werden. Dazu werden nachfolgend vier Regelvarianten (V+K dezentral/zentral und G+D dezentral/zentral) und drei Systemvarianten (1a, 1b und 1c) beschrieben. Die Darstellungen dienen zunächst dem Systemverständnis und der späteren Zuordnung von Energie- und Investitionskosten zur jeweiligen Ausführung des dVt-Systems. Die System- und Regelvarianten wurden im Rahmen des dVt-Forschungsprojekts definiert und werden in [Klimmt o. J.] im Rahmen eines Promotionsvorhabens ausführlich diskutiert und analysiert.

Die *Regelvarianten* bestimmen zunächst über die Art der Regelung des Volumenstroms außerhalb der Betriebszeit. In Bezug auf die eingesetzten Komponenten ist dabei die Unterscheidung, ob je dezentralem Ventilator eine Absperriklappe vorhanden ist oder ob auf diese verzichtet wird:

- Regelvariante **Vorspülung und Klappe (V+K, siehe Abbildung 2.3)**: Wenn eine Absperriklappe eingesetzt wird, schließt diese außerhalb der Betriebszeit und der Volumenstrom in der Zone ist Null. Vor Beginn einer Nutzung wird eine sogenannte Vorspülung der Lüftungszone vorgenommen, um etwaige Gebäudeemissionen zu entfernen.

- Regelvariante **Grundlüftung** und **Drehzahlregelung (G+D)**, siehe Abbildung 2.4): Wenn keine Absperrklappe eingesetzt wird, muss der Ventilator auch außerhalb der Betriebszeit auf einer i.d.R. minimalen Stufe laufen, um Fehlströmungen zu vermeiden. Im Gegenzug entfällt die Vorspülung vor Beginn der Nutzungszeit, sodass die Nutzungszeiten für die Regelung nicht unbedingt bekannt sein müssen.

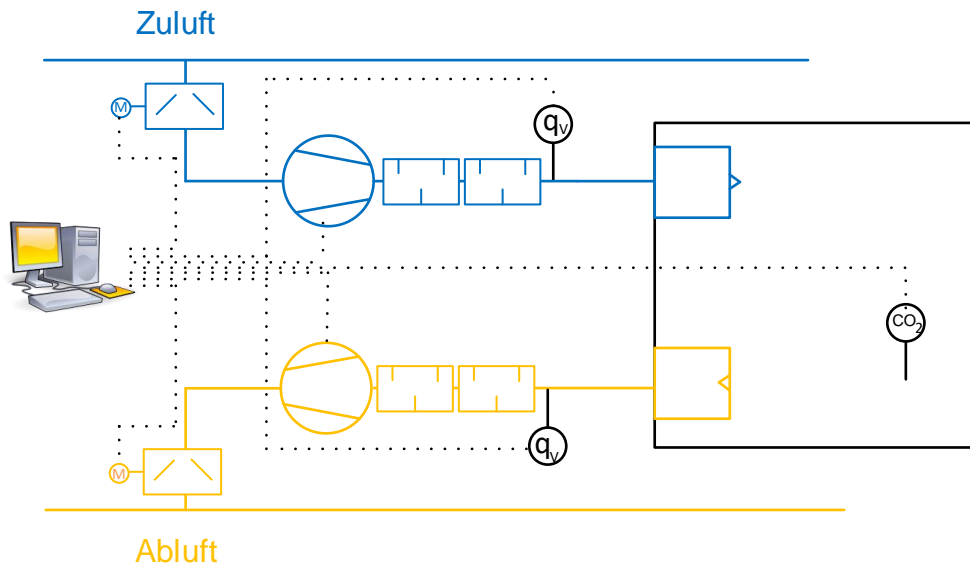


Abbildung 2.3: Ausschnitt einer einzelnen Lüftungszone mit Zu- und Abluftkanalnetz und Komponenten der Regelvariante Vorspülung und Klappe mit zentraler Regelung (Regelvariante V+K zentral) in der Systemvariante 1a

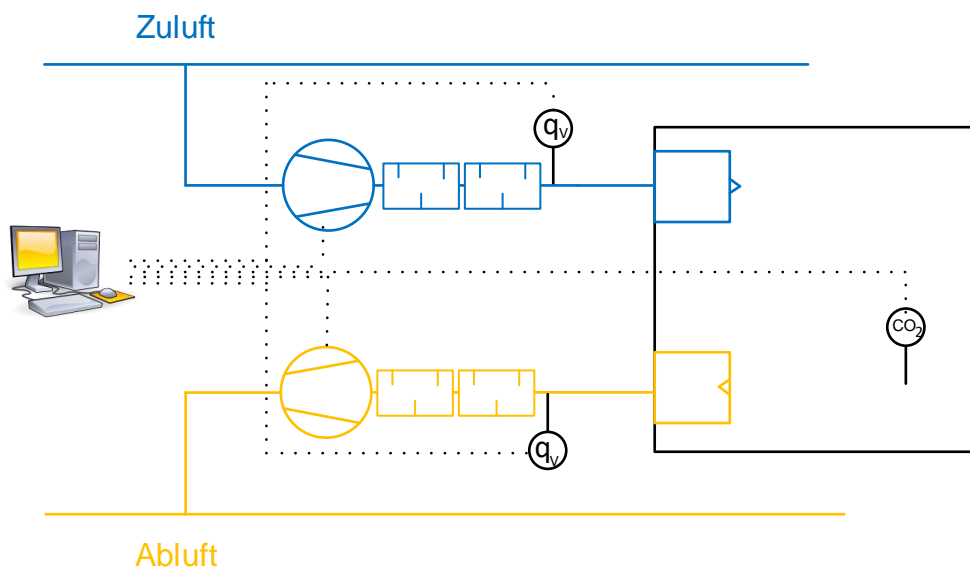


Abbildung 2.4: Ausschnitt einer einzelnen Lüftungszone mit Zu- und Abluftkanalnetz und Komponenten der Regelvariante Grundlüftung und Drehzahlregelung mit zentraler Regelung (G+D zentral) in der Systemvariante 1a

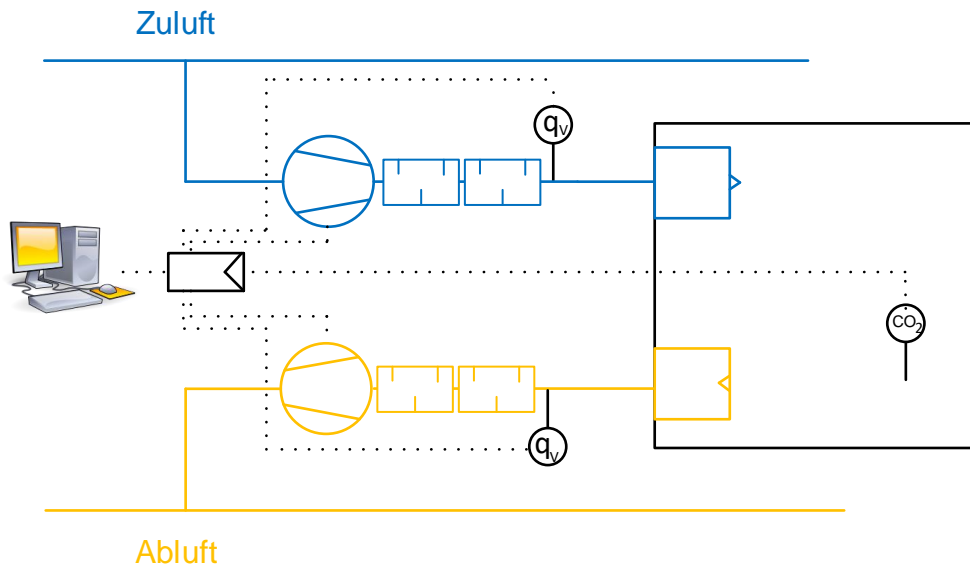


Abbildung 2.6: Ausschnitt einer einzelnen Lüftungszone mit Zu- und Abluftkanalnetz und Komponenten der Regelvariante Grundlüftung und Drehzahlregelung mit dezentraler Regelung (G+D dezentral) in der Systemvariante 1a

Die *Systemvarianten* hängen in erster Näherung von den Gegebenheiten des Kanalnetzes ab. Hintergrund ist, dass Zu- und Abluftventilatoren stets dieselben Volumenströme fördern, d.h. ausgeglichen sein sollten. Dadurch soll vermieden werden, dass sich im Raum ein Über- oder Unterdruck aufbaut, der zu störenden Drucksituationen beim der Betätigung von Türen, Strömungsgeräuschen an Türschlitten sowie In-/Exfiltrationsvolumenströmen durch die Außenfassade führen könnte.

Die Auswahl der jeweiligen Systemvariante hat einen deutlichen Einfluss auf die Investitionskosten. Es sollte daher jeweils die kostengünstigste Variante gewählt werden, die die technischen Voraussetzungen hinsichtlich des ausgeglichenen Drucks erfüllt. Die Systemvariante 1a benötigt die meiste Messtechnik und ist in allen Kanalnetzen einsetzbar. Bei den Systemvarianten 1b und 1c können kostengünstigere bzw. weniger Komponenten eingesetzt werden, allerdings nur wenn das Kanalnetz dies zulässt (siehe nachfolgend).

In allen Systemvarianten wird der Zuluftventilator so geregelt, dass ein CO_2 -Grenzwert eingehalten wird. Die Unterscheidung liegt dann darin, wie der Abluftventilator geregelt wird:

- In der Systemvariante 1a wird der Zuluftvolumenstrom gemessen und der Abluftventilator so geregelt, dass der Abluftvolumenstrom genau dem Zuluftvolumenstrom entspricht. Dies ist erforderlich, wenn ungleiche Druckverluste im Zu- und Abluftkanalnetz (ab Drucksensor) herrschen. Aufgrund der vorhandenen Volumenstrommessung ist diese Systemvariante in Abbildung 2.3 bis Abbildung 2.6 dargestellt.
- In der Systemvariante 1b wird das Steuersignal des Zuluftventilators auch an den Abluftventilator übertragen. Dies ist bei näherungsweise gleichen Druckverlusten von Zu- und Abluftkanalnetz (ab Drucksensor) möglich. Es wird dann anstelle einer qualitativ hochwertigen Volumenstrommessung je dVt lediglich ein einfacher Sensor benötigt, der die Strömungsrichtung detektiert, um ggf. Maßnahmen zur Vermeidung von Fehlströmungen einzuleiten (i.d.R. durch die Drehzahlregelung).

- In der Systemvariante 1c wird nur ein Abluftventilator für mehrere gleichartige Lüftungszone verwendet (siehe Abbildung 2.7). Dabei ist der Ansatz, die Zuluftvolumenströme raumweise zu messen und zu addieren oder direkt strangweise zu summieren. Der Abluftventilator wird dann auf den so bestimmten Zuluftvolumenstrom geregelt.

Eine detailliertere Analyse der genannten Varianten und ihrer Einsatzrandbedingungen wird in [Klimmt o. J.] durchgeführt.

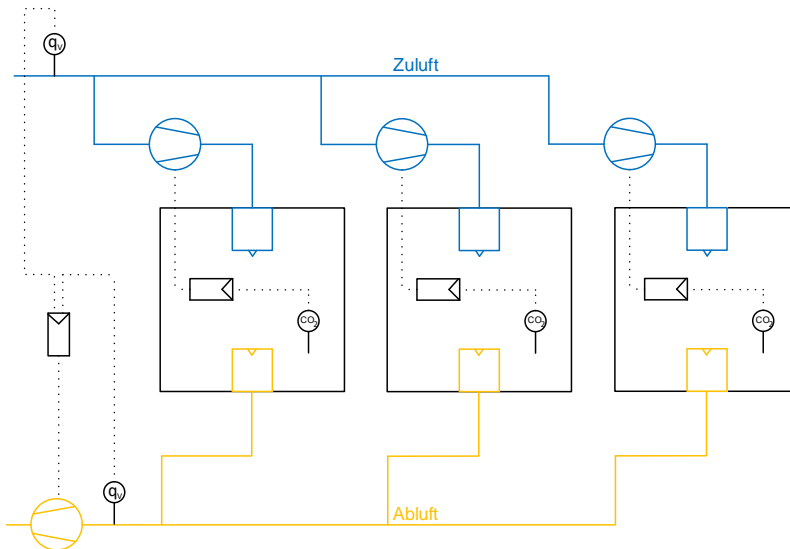


Abbildung 2.7: Systemvariante 1C mit einem auf den summierten Zuluftvolumenstrom (hier als gemeinsame Messung) geregelten Abluftventilator (schematische Darstellung nach [Klimmt o. J.]

3 Elektrische Ventilatorleistung der Lüftungssysteme

Die Leistung eines Ventilators berechnet sich als Produkt von gefördertem Volumenstrom und der aufzubringenden Druckdifferenz zwischen Saug- und Druckseite geteilt durch den Ventilatorwirkungsgrad [DIN V 18599-3, S. 25]:

$$P = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p}{\eta} \quad 3.1$$

\dot{V}	Volumenstrom [m ³ /s]
Δp	Druckerhöhung des Zuluft- oder Abluftventilators beim jeweiligen Volumenstrom [Pa]
η	Gesamtwirkungsgrad von Ventilator, Übertragungssystem, Motor und Drehzahlregelung [%]

HINWEIS 1: Die Berechnung nach Gl. 3.1 ist ausreichend, um die Ventilatorleistung von Konstant-Volumenstrom-Systemen zu bestimmen. Wird lediglich eine Drehzahlregelung des Zentralventilators ohne eine raumweise Volumenstromregelung vorgenommen oder soll die Leistung von dezentralen außenwandintegrierten Lüftungsgeräten (deAL) berechnet werden ist der Ansatz ebenfalls geeignet. Es müssen dann lediglich der Druckverlust in Abhängigkeit vom Volumenstrom – wie in Abschnitt 3.1.2 beschrieben – und der Wirkungsgrad an die Teillast-Betriebszustände angepasst werden.

HINWEIS 2: Als Druckerhöhung des Ventilators kann

- entweder nur der statische Anteil der Druckerhöhung
- oder die Gesamtdruckerhöhung (Summe von dynamischem und statischem Anteil)

in der Leistungsberechnung angesetzt werden. Entsprechend muss sich der Ventilatorwirkungsgrad, welcher mit der nach η umgestellten Gl. 3.1 aus gemessenen Werten berechnet wird, ebenfalls nur auf die statische Druckerhöhung oder auf die Gesamtdruckerhöhung beziehen. Im Modell der Ventilator-Wirkungsgrade nach Abschnitt 3.2 wird erstere Möglichkeit gewählt, wie es bei Herstellerangaben üblich ist.

Für VVS mit raumweiser Regelung muss der Ansatz aus Gl. 3.1 erweitert werden. Sowohl im in Abschnitt 2.1.2 beschriebenen System mit Volumenstromreglern und konstantem Vordruck, als auch im in Abschnitt 2.2 beschriebenen Dezentrale-Ventilatoren-System kann die Ventilatorleistung als Summe von zwei Anteilen betrachtet werden:

$$P_{VSR,dVt} = P_Z + P_N \quad 3.2$$

$P_{VSR,dVt}$	Ventilatorleistung eines Lüftungssystems mit Variabel-Volumenstromreglern oder dezentralen Ventilatoren [W]
P_Z	Ventilatorleistung für Kanalnetz und Zentralgerät bis zum Drucksensor [W]
P_N	Ventilatorleistung für Kanalnetz ab dem Drucksensor [W]

Die Lage der Teilabschnitte (und damit die Aufteilung der Druckverlustanteile) wird „durch die Position des Kanaldruckfühlers bestimmt“ (siehe [DIN V 18599-3, S. 26]).

Der erste Anteil berücksichtigt die Druckverluste, welche in der Lüftungszentrale und im Kanalnetz bis zum Drucksensor anfallen (vgl. Abbildung 2.1, S. 14 und Abbildung 2.2, S. 17). Die treibende Kraft zur Überwindung dieses Druckverlustanteils ist jeweils der Zentralventilator.

Der zweite Anteil berücksichtigt die Druckverluste, die ab dem Drucksensor (vgl. Abbildung 2.1, S. 14 und Abbildung 2.2, S. 17) – also im Verteilnetz – anfallen. Im VSR-System ist die treibende Kraft ebenfalls der Zentralventilator, jedoch wird der Kanaldruck durch die Regelung auf einen konstanten Vordruck auf einem konstanten Wert gehalten. Im dVt-System

werden die Druckverluste im Verteilsystem individuell durch die dezentralen Ventilatoren überwunden.

Aus Gl. 3.1 und 3.2 ergibt sich mit den jeweiligen Drücken und Wirkungsgraden:

$$P_{VSR} = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_Z}{\eta_Z} + \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_{N,max}^*}{\eta_Z} \quad 3.3$$

$$P_{dVt} = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_Z}{\eta_Z} + \frac{\dot{V} \cdot \overline{\Delta p_N}}{\eta_{dVt}} \quad 3.4$$

Δp_Z	Druckverluste bis zum Drucksensor (v.a. Lüftungszentrale) nach Gl. 3.17, S. 29 [Pa]
$\Delta p_{N,max}^*$	Druckverluste bei \dot{V}^* ab dem Drucksensor (d.h. im Verteilnetz) bis zum hydraulisch ungünstigsten Strang im System mit Variabel-Volumenstromreglern nach Gl. 3.18, S. 29 [Pa]
$\overline{\Delta p_N}$	Mittlere Druckverluste ab dem Drucksensor (Mittelwert über alle Stränge des Verteilnetzes) nach Gl. 3.26, S. 31 [Pa]
η_Z	Wirkungsgrad des Zentralventilators nach Gl. 3.40 bis 3.43, S. 50 [%]
η_{dVt}	Wirkungsgrad der dezentralen Ventilatoren nach Gl. 3.40 bis 3.44, S. 50 [%]

Der Volumenstrom \dot{V} hängt davon ab, wie viel Außenluft die versorgten Zonen benötigen. Dieser kann bei bedarfsabhängiger Lüftung im Zeitverlauf an die jeweilige Nutzungsintensität angepasst und somit je nach Bedarf reduziert werden. In Abschnitt 4.2 werden auf stündlichen Werten basierende Nutzungsprofile erstellt, die typische Nutzungsarten beschreiben. Anhand dieser Nutzungsprofile können dann Energiebedarfe für verschiedene Lüftungssysteme und Nutzungsarten berechnet werden.

Die Druckerhöhung $\Delta p_{N,max}^*$ entspricht den Druckverlusten des Kanalnetzes, welches der jeweilige Ventilator versorgt. Diese werden anhand des Volumenstroms beim Auslegungszustand \dot{V}^* mit einer Kanalnetzberechnung für den Strang mit den höchsten Druckverlusten bestimmt. Bei Lüftungsanlagen mit variablen Volumenströmen verringert sich der Druckverlust näherungsweise quadratisch mit einer Verringerung des Volumenstroms und wird ggf. durch variable Klappenwiderstände oder dezentrale Ventilatoren sowie Kanaldruckreglungen weitergehend beeinflusst. Die Berechnung der Druckverluste bei konstanten und variablen Volumenströmen wird in Abschnitt 3.1 behandelt.

Die in der vergleichenden Bewertung verwendeten Ventilatorwirkungsgrade beruhen auf einer Querschnittsanalyse von rückwärtsgekrümmten Radialventilatoren und Rohrventilatoren mit EC-Motor der Firma ebm-papst bzw. Systemair, welche den aktuellen Stand der Technik abbilden. Insbesondere für das dVt-Konzept ist der direkt an das Laufrad angebrachte Motor inkl. Drehzahlregelung von besonderer Bedeutung. Aus Messdaten wird ein Wirkungsgradmodell abgeleitet, welches in Abschnitt 3.2 beschrieben wird.

Zum Vergleich des Energiebedarfs von Lüftungsanlagen mit unterschiedlich hohen Auslegungs-Volumenströmen ist es sinnvoll, die Ventilatorleistung auf diesen zu beziehen. Durch diese Normierung werden charakteristische Systemunterschiede hinsichtlich des Leistungsbedarfs im Vergleich sichtbar und es wird eine Bewertung der Systemeffizienz möglich. Diese beinhaltet sowohl den Einfluss von Druckverlusten und Ventilator-Wirkungsgraden:

$$P_{0,VSR} = \frac{P_{VSR}}{\dot{V}^*} \quad 3.5$$

$$P_{0,dVt} = \frac{P_{dVt}}{\dot{V}^*} \quad 3.6$$

$P_{0,VSR}$	Normierte Ventilatorleistung im VSR-System
$P_{0,dVt}$	Normierte Ventilatorleistung im dVt-System
P_{VSR}	Ventilatorleistung im VSR-System nach Gl. 3.3
P_{dVt}	Ventilatorleistung im dVt-System nach Gl. 3.4
\dot{V}^*	Auslegungs-Volumenstrom

Beim Auslegungsvolumenstrom entspricht die nach Gl. 3.5 und 3.6 berechnete normierte Ventilatorleistung der sog. spezifischen Ventilatorleistung bzw. *specific fan power* (kurz: SFP) nach [DIN EN 13779].

3.1 Berechnung der Ventilator-Druckerhöhung

Ein Ventilator muss einen bestimmten statischen Druck aufbauen, um einen Luftvolumenstrom durch ein mit Druckverlusten behaftetes Kanalnetz zu fördern. Der Druck ist die treibende Kraft analog der elektrischen Spannung in der Elektrotechnik. Steigt die auch mit Presung bezeichnete Druckerhöhung des Ventilators, so steigt der geförderte Volumenstrom und umgekehrt. Um zu bestimmen, welchen Druck ein Ventilator aufbringen muss, damit der gewünschte Volumenstrom durch ein Kanalnetz gefördert wird, wird für diesen Volumenstrom eine Kanalnetzrechnung durchgeführt. Die Druckerhöhung des Ventilators muss dann gerade so groß sein, wie die Druckverluste beim Auslegungsvolumenstrom.

Die durch das Kanalnetz und dessen Einbauten entstehenden Druckverluste in der Lüftungsanlage hängen im Wesentlichen davon ab, mit welcher Geschwindigkeit die hydraulischen Widerstände durchströmt werden. Im Rahmen einer Kanalnetzrechnung werden die Druckverluste beim Auslegungsvolumenstrom \dot{V}^* für alle Stränge berechnet. Konventionelle Zentralventilatorsysteme werden für den Strang mit den höchsten Druckverlusten ausgelegt. Die Grundzüge der Kanalnetzrechnung wird nachfolgend erläutert, um daraus die in dieser Arbeit durchgeführte Modellierung der Ventilator-Druckerhöhung bei Auslegungsbedingungen und Teillast-Volumenströmen abzuleiten (für Berechnungsvorschriften und Auslegungskriterien siehe [VDI 2078]).

3.1.1 Ventilator-Druckerhöhung beim Auslegungsvolumenstrom

Statische Druckverluste werden in längenbezogene Druckverluste Δp_R und in Druckverluste durch Einzelwiderstände Δp_{EW} unterschieden, welche mit den im jeweiligen Kanalabschnitt herrschenden Strömungsgeschwindigkeiten und Widerstandsbeiwerten berechnet werden. Alle Abschnitte eines Stranges werden anschließend summiert. Hinzu kommt der dynamische Druck $\Delta p_{d,A}^*$ am Auslass des jeweiligen Stranges, wo die Luft mit dem dynamischen Druck das Kanalnetz verlässt [Hörner, Schmidt 2011]:

$$\Delta p_g^* = \overbrace{\sum \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho}{2} v^2 + \sum \zeta \cdot \frac{\rho}{2} v^2}^{\Delta p_{st}^*} + \overbrace{\frac{\rho}{2} v_A^2}^{\Delta p_{d,A}^*} \quad 3.7$$

Δp_g^*	Gesamtdruckverlust beim Auslegungs-Volumenstrom \dot{V}^* [Pa]
Δp_{st}^*	Summe aller statischen Druckverluste [Pa]
Δp_R^*	Summe der statischen Druckverluste in geraden Kanalabschnitten [Pa]
Δp_{EW}^*	Summe der statischen Druckverluste durch Einzelwiderstände [Pa]
$\Delta p_{d,A}^*$	Dynamische Druckverluste am Luftauslass [Pa]
λ	Rohrreibungszahl [-]
ζ	Widerstandszahl des jeweiligen Einbaus etc. [-]
l	Länge des Kanalabschnitts [m]
d	Durchmesser des Kanalabschnitts [m]
ρ	Dichte von Luft [kg/m ³]
v	Luftgeschwindigkeit im jeweiligen Kanalabschnitt bzw. Einbau [m/s]
v_A	Luftgeschwindigkeit am Auslass [m/s]

Zur Auslegung von Ventilatoren wird herstellereitig typischerweise nicht die Gesamtdruckerhöhung (statischer und dynamischer Druck), sondern die statische Druckerhöhung in Datenblättern angegeben. Dabei wird unterschieden, ob die Einbausituation in ein Lüftungsgerät,

welche zu sog. internen Druckverlusten führt, berücksichtigt ist oder nicht. Die nach Abzug der internen Druckverluste zur Verfügung stehende Druckerhöhung wird mit externer statischer Druckerhöhung bzw. Pressung bezeichnet.

Wie hoch die externe statische Druckerhöhung ist, die beim Auslegungs-Volumenstrom vom Ventilator erbracht werden muss, um die Druckverluste im Kanalnetz zu überwinden, muss durch eine Kanalnetzberechnung in Anlehnung an Gl. 3.7 berechnet werden. Dabei sollte berücksichtigt werden, dass an verschiedenen Stellen des Kanalnetzes dynamischer Druck durch Diffusoren in statischen Druck (sog. Druckrückgewinn, s. [Hörner, Schmidt 2011]) oder auch durch Düsen statischer Druck in dynamischen Druck umgewandelt wird.

Der statische Druck, der vom Ventilator aufgebracht werden muss, entspricht dem Gesamtdruckverlust abzüglich des dynamischen Drucks am Ventilator:

$$\Delta p_{st,V}^* = \Delta p_g^* - \Delta p_{d,V}^* \quad 3.8$$

$\Delta p_{st,V}^*$	Statische Druckerhöhung am Ventilator beim Auslegungs-Volumenstrom \dot{V}^* [Pa]
Δp_g^*	Gesamtdruckverlust beim Auslegungs-Volumenstrom \dot{V}^* [Pa]
$\Delta p_{d,V}^*$	Dynamischer Druck am Ventilator bzw. Ventilatorgehäuse beim Auslegungs-Volumenstrom [Pa]

HINWEIS 1: Soll lediglich die externe Druckerhöhung bestimmt werden, beinhaltet der Gesamtdruckverlust nicht die Druckverluste innerhalb des Lüftungsgeräts (interne Druckverluste).

HINWEIS 2: Der dynamische Druck am Ventilator ist aufgrund von:

$$\Delta p_{d,V} = \frac{\rho}{2} v_V^2 = \frac{\rho}{2} \left(\frac{\dot{V}}{A_V} \right)^2 \quad 3.9$$

$\Delta p_{d,V}$	Dynamischer Druck am Ventilator [Pa]
v_V	Luftgeschwindigkeit am Ventilator [m/s]
\dot{V}	Vom Ventilator geförderter Volumenstrom [m ³ /s]
A_V	Druckseitig von \dot{V} durchströmte Querschnittsfläche des Ventilators [m ²]

mit der Geometrie des Ventilators verknüpft. Bei den untersuchten Radialventilatoren liegen die Luftgeschwindigkeiten am Ventilatoraustritt bei ca. 3 - 10 m/s. Kleine Baugrößen mit geringen Volumenströmen liegen dabei eher im unteren Bereich des Spektrums, während typische Zentralventilatoren eher im oberen Bereich liegen. Es ergeben sich nach Gl. 3.9 dynamische Drücke im Bereich von 5 – 60 Pa. (Radialventilatoren der Fa. ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG, Serie RadiCal, Angabe aus Messprotokollen).

Ist der dynamische Druck am Auslass kleiner als am Ventilator, d.h. $\Delta p_{d,A}^* < \Delta p_{d,V}^*$, wird über das gesamte Kanalnetz mehr dynamischer Druck in statischen Druck umgewandelt, als andersherum. Es findet also ein Druckrückgewinn statt. Bei Luftauslässen mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten am Auslass, z.B. Quellluftauslässen, ist der dynamische Druckverlust vernachlässigbar gering. Es ergibt sich dann ein maximales Potenzial von ca. 60 Pa durch den dynamischen Druckrückgewinn.

HINWEIS 3: EDV-basierte Auslegungsprogramme berechnen Abschnittsweise die zuvor beschriebenen gegenseitigen Umwandlungen von statischem und dynamischem Druck, und geben die vom Ventilator bereitzustellende, statische Druckerhöhung $\Delta p_{st,V}^*$ bei Auslegungsbedingungen an. Diese wird nachfolgend kurz mit Δp^* bezeichnet und wird mit dem entsprechend berechneten Wirkungsgrad für die Berechnung von elektrischen Leistungen verwendet.

3.1.2 Druckverluste bei Teillast-Volumenströmen

Für den Teillastfall, also den Betrieb der Lüftungsanlage bei einem kleinerem als dem Auslegungs-Volumenstrom, ist die in Gl. 3.7 ersichtliche quadratische Abhängigkeit der Druckverluste von der Strömungsgeschwindigkeit entscheidend. Da sich die mittlere Strömungsgeschwindigkeit

schwindigkeit in einem Rohr durch $v = \dot{V}/A$ proportional zum Volumenstrom verhält, bedeutet eine Verringerung des Volumenstroms nach Gl. 3.7 eine quadratische Verringerung der Druckverluste. Dieser Zusammenhang ist bekannt als „Proportionalitäts-Gesetz“ [Hörner, Schmidt 2011, S. 241]:

$$\frac{\Delta p}{\Delta p^*} = \left(\frac{\dot{V}}{\dot{V}^*}\right)^2 \quad 3.10$$

Δp	Druckverluste bei Teillast-Volumenströmen [Pa]
Δp^*	Druckverluste beim Auslegungs-Volumenstrom [Pa]
\dot{V}	Teillast-Volumenstrom [m ³ /s]
\dot{V}^*	Auslegungs-Volumenstrom [m ³ /s]
\dot{V}/\dot{V}^*	Teillast-Volumenstromanteil [%]

Durch Umstellen nach Δp ergibt sich der Druckverlust eines Kanalnetzes und seiner Einbauten für beliebige Teillastvolumenströme:

$$\Delta p = \Delta p^* \cdot \left(\frac{\dot{V}}{\dot{V}^*}\right)^2 \quad 3.11$$

Der quadratische Zusammenhang (Exponent $n = 2$) gilt nicht uneingeschränkt, da sich Abweichungen bei laminarer Strömung ergeben, wie sie z.B. in Luftfiltern auftreten kann (siehe [Recknagel, Sprenger 2011, DVD S. 360]). Bei rein laminarer Strömung liegt der Exponent bei 1, d.h. $\Delta p \sim v$. Zur Berechnung der Auslegungs-Druckverluste nach Gl. 3.7 wird dies durch eine detaillierte Berechnung der Rohrreibungszahl λ berücksichtigt. Diese wird bei laminarer Strömung nach Gl. 3.12 berechnet (hier für ein Kreisrohr nach [Esdorn, Rietschel 1994, S. 455]):

$$\lambda = \frac{64}{Re} \sim v^{-1} \quad 3.12$$

λ	Rohrreibungszahl [-]
Re	Reynoldszahl [-]
v	Luftgeschwindigkeit [m/s]

Der verwendete Exponent 2 ist daher lediglich als typische Näherung für Netze mit geringen Anteilen an laminarer Strömung zu verstehen. So wurden exemplarisch im Rahmen einer detaillierten Druckverlustberechnung einer Bestandsanlage Druckexponenten für verschiedene Lüftungskomponenten bestimmt [Waldmann 2015, S. 103–106]. Die geringsten Werte ergaben sich beim Luftfilter (1,1), gefolgt vom Plattenwärmeübertrager (1,7) und verschiedenen Klappen und Lüftungsgittern (1,8 – 1,9) bis hin zu Schalldämpfern (2). In der vorliegenden Arbeit wird der übliche Wert von 2 verwendet. Um die Auswirkung dieser Vereinfachung zu bewerten, wird im Rahmen der Parametervariation in Abschnitt 4.1.5 der Einfluss von geringeren Druckexponenten dargestellt.

3.1.3 Ventilatordruckerhöhungen der Variabel-Volumenstrom-Systeme

Nachfolgend werden die erforderlichen Ventilator-Druckerhöhungen der drei Variabel-Volumenstrom-Systeme beschrieben:

- VVS-Anlagen mit Variabel-Volumenstromreglern (VSR-System)
- VVS-Anlagen mit außenwandintegrierten Lüftungssystemen (deAL-System)
- VVS-Anlagen mit dezentralen Ventilatoren (dVt-System)

Die Ansätze dienen als Eingangsgrößen für die Leistungsberechnung und können im Allgemeinen z.B. für die Berechnung von Netzkennlinien eingesetzt werden.

VVS-Anlagen mit Variabel-Volumenstromreglern (VSR-System)

Wie in Gl. 3.3 hergeleitet, wird die elektrische Ventilatorleistung folgendermaßen berechnet:

$$P_{VSR} = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_Z}{\eta_Z} + \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_{N,max}^*}{\eta_Z} \quad 3.13$$

\dot{V}	Teillast-Volumenstrom [m ³ /s]
Δp_Z	Druckverluste bis zum Drucksensor bei \dot{V} (v.a. Lüftungszentrale) [Pa]
$\Delta p_{N,max}^*$	Druckverluste ab dem Drucksensor bis zum hydraulisch ungünstigsten Strang im System mit Variabel-Volumenstromreglern bei \dot{V}^* (Verteilnetz) [Pa]
η_Z	Wirkungsgrad des Zentralventilators bei \dot{V} [%]

Die Summe der Druckverluste vom Außenluftdurchlass bis zum Drucksensor Δp_Z^* und vom Drucksensor bis zum Luftauslass am hydraulisch ungünstigsten gelegenen Luftdurchlass des Verteilnetzes Δp_N^* entsprechen beim Auslegungsvolumenstrom dem Druckverlust Δp^* :

$$\Delta p^* = \Delta p_Z^* + \Delta p_{N,max}^* \quad 3.14$$

Δp^*	Statische Druckverluste der Gesamtanlage entsprechend erforderlicher Auslegungsdruck-erhöhung des Zentralventilators bei \dot{V}^* [Pa]
Δp_Z^*	Druckverluste bis zum Drucksensor bei \dot{V}^* (v.a. Lüftungszentrale) [Pa]
$\Delta p_{N,max}^*$	Druckverluste ab dem Drucksensor bis zum hydraulisch ungünstigsten Strang im System mit Variabel-Volumenstromreglern bei \dot{V}^* (Verteilnetz) [Pa]

Eine in [DIN V 18599-3] eingeführte Kenngröße ist die Druckverhältniszahl f_p . Diese beschreibt den druckkonstanten Anteil $\Delta p_{N,max}^*$ am Gesamtdruckverlust. Damit ergibt sich:

$$\Delta p_{N,max}^* = f_p \cdot \Delta p^* \quad 3.15$$

$$\Delta p_Z^* = (1 - f_p) \cdot \Delta p^* \quad 3.16$$

f_p	Druckverhältniszahl nach DIN V 18599-3 (Anteil der Druckverluste ab Drucksensor) [-]
-------	--

VVS-Anlagen mit Variabel-Volumenstromreglern und *konstantem Vordruck* zeichnen sich dadurch aus, dass auch bei Teillast-Volumenströmen im Verteilnetz ein konstanter Druck aufrechterhalten wird. Dies wird über eine Drehzahlregelung des Zentralventilators erreicht. Die typische Lage des Drucksensors ist in Abbildung 2.1 (Seite 14) dargestellt. Der Sollwert der Konstantdruckregelung wird nach der Höhe der Druckverluste des nachgelagerten Kanalnetzes beim Auslegungsvolumenstrom berechnet und entsprechend eingestellt. Die Drehzahl des Zentralventilators wird so geregelt, dass der eingestellte Vordruck aufrechterhalten wird. Auf diese Weise steht in allen Betriebszuständen ausreichend Kanaldruck zur Verfügung, um alle Räume mit dem geforderten Volumenstrom zu versorgen. Die [DIN V 18599-7, S. 25] nennt einen Standardwert von 40% des Auslegungsdruckverlustes als konstant zu haltenden Druck ($f_p = 0,4$).

Dieser Vordruck wird je nach Teillast-Betriebszustand der VVS-Anlage unterschiedlich abgebaut (vgl. Abbildung 1.2):

- Bei großem Volumenstrom gibt es geringe Druckverluste im VSR (Klappe weit geöffnet), aber hohe Druckverluste in den übrigen Komponenten (Schalldämpfer, Auslass, u.a.)
- Bei geringem Volumenstrom gibt es große Druckverluste im VSR (Klappe weit geschlossen) und geringe Druckverluste in den übrigen Komponenten.

In jedem Fall wird der Vordruck, bei Standardwerten 40% des Auslegungsvolumenstroms, vollständig als konstante Größe über Volumenstromregler und das übrige Kanalnetz abgebaut. Die verbleibenden 60% der Druckverluste entstehen in der Lüftungszentrale und im dem Drucksensor vorgelagerten Kanalnetz. Dieser Anteil verringert sich entsprechend Gl. 3.11 bei Teillastvolumenströmen quadratisch.

Für das System mit Variabel-Volumenstromreglern und konstantem Vordruck werden die in Gl. 3.3 (bzw. 3.13) angegebenen Druckerhöhungen daher wie folgt berechnet:

$$\Delta p_z = \left(\frac{\dot{V}}{\dot{V}^*}\right)^2 \cdot (1 - f_p) \cdot \Delta p^* \quad 3.17$$

$$\Delta p_{N,max}^* = f_p \cdot \Delta p^* \quad 3.18$$

Δp^*	Druckverluste der Gesamtanlage bei \dot{V}^* [Pa]
Δp_z	Druckverluste bis zum Drucksensor (v.a. Lüftungszentrale) [Pa]
$\Delta p_{N,max}^*$	Druckverluste bei \dot{V}^* ab dem Drucksensor (d.h. im Verteilnetz) bis zum hydraulisch ungünstigsten Strang im System mit Variabel-Volumenstromreglern [Pa]
f_p	Druckverhältniszahl nach DIN V 18599-3 (Anteil der Druckverluste ab Drucksensor) [-]
\dot{V}/\dot{V}^*	Teillast-Volumenstromanteil [-]

HINWEIS: Eine Möglichkeit zur Verringerung des Kanaldrucks wird durch Systeme mit *variablem Vordruck* erreicht. Diese wurden in Abschnitt 2.1.2 beschrieben. Wie weit ein entsprechendes Kanaldruckmanagement den Vordruck im Mittel senken kann, hängt maßgeblich davon ab, ob ein oder mehrere Volumenstromregler einen hohen Druck benötigen oder ob für alle der Vordruck abgesenkt werden kann. Dies zu bewerten würde die gleichzeitige Betrachtung mehrerer stochastisch erstellter Nutzungsprofile erfordern und kann mit der vorliegenden Methodik nicht abgedeckt werden.

VVS-Anlagen mit außenwandintegrierten Lüftungssystemen (deAL-System)

Bei deAL-Systemen entfällt der Druckverlust des Kanalnetzes Δp_N , da dieses nicht vorhanden ist. Die Druckverhältniszahl (Anteil des Kanalnetzes am Gesamt-Auslegungsdruckverlust) ist für diese Systeme daher $f_p = 0$. Es ergibt sich mit angepassten Indizes:

$$P_{VSR} = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_{deAL}}{\eta_{deAL}} \quad 3.19$$

\dot{V}	Teillast-Volumenstrom [m ³ /s]
Δp_{deAL}	Druckverluste der dezentralen außenwandintegrierten Geräte [Pa]
η_{deAL}	Wirkungsgrad des Ventilators bei \dot{V} [%]

$$\Delta p_{deAL} = \left(\frac{\dot{V}}{\dot{V}^*}\right)^2 \cdot \Delta p_{deAL}^* \quad 3.20$$

Δp_{deAL}^*	Druckverlust des dezentralen außenwandintegrierten Geräts bei \dot{V}^* [Pa]
\dot{V}/\dot{V}^*	Teillast-Volumenstromanteil [-]

VVS-Anlagen mit dezentralen Ventilatoren (dVt-System)

Die elektrische Ventilatorleistung wird im dVt-System folgendermaßen berechnet (s. Gl. 3.4):

$$P_{dvt} = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_z}{\eta_z} + \frac{\dot{V} \cdot \overline{\Delta p_N}}{\eta_{dvt}} \quad 3.21$$

\dot{V}	Teillast-Volumenstrom [m ³ /s]
Δp_z	Druckverluste bis zum Drucksensor bei \dot{V} (v.a. Lüftungszentrale) [Pa]
$\overline{\Delta p_{N,dvt}}$	Druckverluste ab dem Drucksensor im System mit dezentralen Ventilatoren bei \dot{V} (Mittelwert über alle Stränge des Verteilnetzes) [Pa]
η_z	Wirkungsgrad des Zentralventilators [%]
η_{dvt}	Wirkungsgrad der dezentralen Ventilatoren [%]

Die Berechnung der erforderlichen Druckerhöhung des Zentralventilators Δp_z erfolgt ebenso wie im VSR-System, da im entsprechenden Abschnitt identische Druckverluste und Volumenströme auftreten, die vom Zentralventilator überwunden werden müssen.

Zur Berechnung der Druckverluste im Verteilnetz kann im dVt-System berücksichtigt werden, dass dort – anders als in Systemen mit Volumenstromreglern – keine Drosselvorgänge auftreten. Dazu müssen bei der Berechnung von $\overline{\Delta p_N}$ zwei Aspekte berücksichtigt werden:

1. Die Druckerhöhung der dVt beim Auslegungsvolumenstrom entspricht einem Mittelwert über alle Stränge und nicht dem Druckverlust des hydraulisch ungünstigsten Strangs. Dadurch entfällt Drosselvorgang 1 nach Abbildung 1.2 (Seite 3).
2. Es entstehen keine Drosselverluste im Teillastbetrieb, da kein Vordruck benötigt wird. Dadurch entfällt Drosselvorgang 2 nach Abbildung 1.2 (Seite 3).

Zu 1: Vermeidung der Drosselung zum Luftmengenabgleich

Im dVt-System muss nur der Ventilator, der den hydraulisch ungünstigsten Strang versorgt, den maximal im Verteilnetz benötigten Druck $f_p \cdot \Delta p^*$ aufbringen. Alle anderen dezentralen Ventilatoren müssen definitionsgemäß einen geringeren Auslegungsdruckverlust überwinden, da sie nicht am Schlechtpunkt liegen. Die Reduktion auf die mittlere erforderliche Druckerhöhung wird durch den sog. Netzfaktor f_N ausgedrückt:

$$\overline{\Delta p_N^*} = f_p \cdot f_N \cdot \Delta p^* \quad 3.22$$

$\overline{\Delta p_N^*}$	Mittelwert der Druckverluste ab dem Drucksensor bei \dot{V}^* (Mittelwert über alle Stränge des Verteilnetzes) [Pa]
Δp^*	Druckverluste der Gesamtanlage bei \dot{V}^* [Pa]
f_N	Netzfaktor (volumenstromgewichteter Faktor zur Ermittlung der mittleren Druckverluste im Verteilnetz gegenüber dem hydraulisch ungünstigsten Strang) [-]
f_p	Druckverhältniszahl nach DIN V 18599-3 (Anteil der Druckverluste ab Drucksensor) [-]

Der Netzfaktor wird bei Auslegungsbedingungen als volumenstromgewichteter Mittelwert über alle Stränge des Verteilnetzes berechnet:

$$f_N = \frac{\sum_i \dot{V}_i^* \Delta p_{N,i}^*}{\dot{V}^* \Delta p_{N,max}^*} \quad 3.23$$

$\Delta p_{N,i}^*$	Auslegungsdruckverlust ab Drucksensor für Strang i [Pa]
$\Delta p_{N,max}^*$	Auslegungsdruckverlust ab dem Drucksensor für den hydraulisch ungünstigsten Strang [Pa]
\dot{V}_i^*	Auslegungsvolumenstrom im Strang i [m ³ /s]
\dot{V}^*	Gesamt-Auslegungsvolumenstrom [m ³ /s]

Im Teillastfall stellt dieser Ansatz bei unterschiedlichen Teillast-Nutzungsprofilen (vgl. Abschnitt 4.2) eine Vereinfachung dar, da der Netzfaktor mit den Druckverlusten und Volumenströmen des Auslegungsfalls berechnet wird. Der Netzfaktor kann entweder für jede Lüftungsanlage individuell berechnet werden, oder es werden typische Werte angenommen. Einige Beispiele für die Berechnung von Netzfaktoren sind in Abschnitt 3.1.4: *Randbedingungen zur Berechnung der erforderlichen Druckerhöhung* aufgeführt.

Zu 2: Vermeidung der Drosselung beim Regeleingriff von Volumenstromreglern

Da es im dVt-System keinen konstant oder variabel zu haltenden Vordruck gibt, der im Teillastbetrieb abgedrosselt werden müsste, kann auch im Bereich des Kanalnetzes eine quadratische Abhängigkeit des Drucks auf eine Volumenstromänderung nach Gl. 3.11 angesetzt werden. Es ist daher:

$$\overline{\Delta p_{N,dVt}} = \left(\frac{\dot{V}}{\dot{V}^*}\right)^2 \cdot \overline{\Delta p_{N,dVt}^*} \quad 3.24$$

$\overline{\Delta p_{N,dVt}}$	Druckverluste ab dem Drucksensor im System mit dezentralen Ventilatoren bei \dot{V} (Mittelwert über alle Stränge des Verteilnetzes) [Pa]
$\overline{\Delta p_{N,dVt}^*}$	Druckverluste ab dem Drucksensor im System mit dezentralen Ventilatoren bei \dot{V}^* (Mittelwert über alle Stränge des Verteilnetzes) [Pa]
\dot{V}/\dot{V}^*	Teillast-Volumenstromanteil [%]

Zusammengefasst werden die in Gl. 3.4 (bzw. 3.21) angegebenen Druckerhöhungen des dVt-Systems wie folgt berechnet:

$$\Delta p_Z = \left(\frac{\dot{V}}{\dot{V}^*}\right)^2 \cdot (1 - f_p) \cdot \Delta p^* \quad 3.25$$

$$\overline{\Delta p_N} = \left(\frac{\dot{V}}{\dot{V}^*}\right)^2 \cdot f_p \cdot f_N \cdot \Delta p^* \quad 3.26$$

Δp^*	Druckverluste der Gesamtanlage bei \dot{V}^* [Pa]
Δp_Z	Druckverluste bis zum Drucksensor (v.a. Lüftungszentrale) [Pa]
$\overline{\Delta p_N}$	Mittelwert der Druckverluste ab dem Drucksensor bei \dot{V} (Mittelwert über alle Stränge des Verteilnetzes) [Pa]
\dot{V}/\dot{V}^*	Teillast-Volumenstromanteil [-]
f_N	Netzfaktor (volumenstromgewichteter Faktor zur Ermittlung der mittleren Druckverluste im Verteilnetz gegenüber dem hydraulisch ungünstigsten Strang) [-]
f_p	Druckverhältniszahl nach DIN V 18599-3 (Anteil der Druckverluste ab Drucksensor) [-]

HINWEIS: Dem Berechnungsansatz nach Gleichung 3.26 liegt die Annahme zugrunde, dass sich alle Stränge gleichermaßen im Teillastbetrieb befinden. Dies entspricht der in diesem Kapitel nutzungsbezogenen Bewertung.

Sollen Betriebszustände betrachtet werden, bei denen Zonen, z.B. aufgrund von verschiedener Belegung oder Nutzung im Tagesverlauf unterschiedlich hohe Teillastvolumenströme anfordern, ist eine detailliertere Betrachtung der Druckverluste in den einzelnen Abschnitten des Kanalnetzes nötig. Ein Ansatz dazu wird in Kapitel 6 dargestellt. Alternativ bietet es sich für eine detailliertere Analyse an, das Kanalnetz vollständig in Zeitschritt-Simulationen abzubilden, um z.B. auch das dynamische Betriebsverhalten zu analysieren.

3.1.4 Randbedingungen zur Berechnung der erforderlichen Druckerhöhung

Für die Berechnung der Ventilator-Druckerhöhung sind drei Parameter nötig:

- Der Druckverlust der Gesamtanlage Δp^* beim Auslegungsvolumenstrom \dot{V}^* ,
- die Druckverhältniszahl f_p und
- der Netzfaktor f_N

Auslegungsdruckverlust und Druckverhältniszahl

Typische Größenordnungen des Auslegungsdruckverlusts und der Druckverhältniszahl für zentrale Lüftungsanlagen können der [DIN V 18599-7], der [DIN EN 13779] und aus [Beck 2000] entnommen werden (vgl. Tabelle 3.1):

- Die DIN V 18599-7 nennt als in Deutschland gültige Vornorm zur Berechnung des Energiebedarfs von Lüftungsanlagen Druckverluste in Höhe von 960 Pa bzw. 750 Pa (Zuluft bzw. Abluft) bei einer Druckverhältniszahl von $f_p = 0,4$ für Zu- und Abluft. Diese Standardwerte werden sowohl für Bestands- als auch für Neuanlagen angewendet.
- Die DIN EN 13779 dient im Wesentlichen als Planungs- und Auslegungsnorm für Neuanlagen und definiert Klassen der spezifischen Ventilatorleistung (SFP). Als Standard-SFP-Klasse für Anlagen mit Wärmerückgewinnung werden die Klasse SFP 4 für Zuluftventilatoren und SFP 3 für Abluftventilatoren genannt. Beim jeweiligen Klassenmittel und einem Ventilatorwirkungsgrad von 60% ergeben sich Standard-Druckverluste der Gesamtanlage von 975 Pa für Zuluft und 600 Pa für Abluft. Weiterhin werden in der DIN EN 13779 die Druckverluste des Luftleitungssystems in den Kategorien niedrig, mittel und hoch angegeben. Das Verhältnis der mittleren Druckverluste des Luftleitungssystems gegenüber den Standard-Druckverlusten der Gesamtanlage beträgt $f_p = 0,31$ für Zuluft und $f_p = 0,33$ für Abluft.
- Edgar Beck führte im Rahmen seiner im Jahr 2000 veröffentlichten Promotion eine Umfrage mit 11 deutschen und 4 weiteren europäischen Herstellern durch und ermittelte so typische Druckverluste der einzelnen Komponenten eines Lüftungszentralgeräts und des Zu- bzw. Abluftkanals. Aus diesen Angaben konnten *übliche* Druckverluste für ein „Referenzgerät Deutschland mit Wärmerückgewinnung“ für das Jahr 1997 bestimmt werden, welche bei 1187 Pa bzw. 957 Pa liegen (Zuluft bzw. Abluft). Weiterhin werden minimale und maximale Werte sowohl für die Gesamtanlage, als auch für das Luftleitungssystem angegeben. Die üblichen Druckverluste des Luftleitungssystems betragen laut Beck 643 Pa für Zuluft und 601 Pa für Abluft. Das Verhältnis der üblichen Druckverluste des Luftleitungssystems gegenüber den üblichen Druckverlusten der Gesamtanlage beträgt daher $f_p = 0,54$ für Zuluft und $f_p = 0,63$ für Abluft. Die von Beck ermittelten Druckverluste und die daraus abgeleiteten Druckverhältniszahlen spiegeln heute einen ca. 20 Jahre alten Anlagenbestand wider (Stand 2016).

Tabelle 3.1: Zusammenstellung typischer Druckverluste und Druckverhältniszahlen der [DIN V 18599-7], [DIN EN 13779] und [Beck 2000] (aus anderen Größen abgeleitete Werte wie angemerkt)

grün: typische/übliche Druckverhältniszahl gemäß der jeweiligen Quelle (Standard)

Zuluft		Druckverluste des Luftleitungssystems			Abluft		Druckverluste des Luftleitungssystems				
Druckverlust der Gesamtanlage	DIN V 18599-7	384 Pa ^{*1}			Druckverlust der Gesamtanlage	DIN V 18599-7	300 Pa ^{*1}				
	960 Pa	0,40				750 Pa	0,40				
	DIN EN 13779 ^{*2}	Niedrig	Mittel	Hoch		DIN EN 13779 ^{*2}	Niedrig	Mittel	Hoch		
		200 Pa	300 Pa	600 Pa			100 Pa	200 Pa	300 Pa		
	SFP 2	375 Pa	0,53	0,80		1,60	SFP 2	375 Pa	0,27	0,53	0,80
	SFP 3	600 Pa	0,33	0,50		1,00	SFP 3 (Standard) ^{*3}	600 Pa	0,17	0,33	0,50
	SFP 4 (Standard) ^{*3}	975 Pa	0,21	0,31		0,62	SFP 4	975 Pa	0,10	0,21	0,31
	SFP 5	1500 Pa	0,13	0,20		0,40	SFP 5	1500 Pa	0,07	0,13	0,20
	SFP 6	3750 Pa	0,05	0,08		0,16	SFP 6	3750 Pa	0,03	0,05	0,08
	Beck 2000	min.	üblich	max.		Beck 2000	min.	üblich	max.		
	250 Pa	643 Pa	1800 Pa		198 Pa	601 Pa	1485 Pa				
min.	494 Pa	0,51	1,30	3,64	min.	408 Pa	0,49	1,47	3,64		
üblich	1187 Pa	0,21	0,54	1,52	üblich	957 Pa	0,21	0,63	1,55		
max.	2793 Pa	0,09	0,23	0,64	max.	2080 Pa	0,10	0,29	0,71		

*1 Druckverlust des Luftleistungssystems mit Druckverhältniszahl berechnet

*2 Druckverlust der Gesamtanlage aus Mittelwerten der jeweiligen SFP-Kategorie mit $\eta=0,6$ berechnet

*3 Standardwert EN 13779 Tabelle D.2 für Zuluft bzw. Abluft mit WRG

Zusammenfassend lässt sich feststellen, die Druckverluste der Gesamtanlage nach DIN V 18599 vergleichsweise gut mit den Standard-SFP-Klassen der DIN EN 13779 übereinstimmen, zumal in obiger Diskussion nur die jeweiligen Klassenmittel betrachtet wurden. Die Druckverhältniszahl der DIN V 18599 liegt etwas höher als nach DIN EN 13779 ermittelt. Die Untersuchungen von Beck zeigen jedoch, dass im Anlagenbestand mit deutlich höheren Druckverhältniszahlen zu rechnen ist, was auf vergleichsweise hohe Druckverluste in den Luftleitungssystemen zurückzuführen ist. Für die energetische Bewertung des dVt-Systems und der Vergleichssysteme werden aufgrund obiger Ergebnisse die Standardwerte der DIN V 18599 verwendet, welche mittlere Verhältnisse für Neu- und Bestandsanlagen gut abbilden.

- $\Delta p^* = 960$ Pa für Zuluftanlagen und 750 Pa für Abluftanlagen
- $f_p = 0,4$

In Bezug auf **dezentrale außenwandintegrierte Lüftungssysteme** (deAL) werden weder in der DIN V 18599 noch in typischen Herstellerangaben Druckverluste angegeben. Grundsätzlich müssen von den deAL dieselben Aufgaben übernommen werden, wie in zentralen Lüftungsanlagen innerhalb der Lüftungszentrale (Filtern, Heizen, Kühlen und Wärmerückgewinnung). Wenn die Annahme getroffen wird, dass in den deAL aufgrund dessen ähnliche Druckverluste auftreten, kann überschlägig der Anteil der Lüftungszentrale an den Gesamtdruckverlusten anhand der typischen Druckverhältniszahl von $f_p = 0,4$ abgeschätzt werden:

$$\Delta p_z^* = (1 - f_p) \cdot \Delta p^* \quad 3.27$$

Δp_z^*	Auslegungsdruckverlust der Lüftungszentrale (inkl. Druckverlusten für Kanalnetz bis Drucksensor) [Pa]
Δp^*	Auslegungsdruckverlust der Gesamtanlage [Pa]
f_p	Druckverhältniszahl [-]

Demnach ergibt sich aus den in Tabelle 3.1 angegebenen (und aus der DIN EN 13779 abgeleiteten) Druckverlusten für deAL ein Druckverlust von

- 470 Pa, wenn die Standard-SFP-Kategorie (Mittelwert von 975 Pa Zuluft und 600 Pa Abluft, d.h. $(1 - f_p) \cdot 788$ Pa) und
- 295 Pa, wenn jeweils die nächstbessere SFP-Kategorie (Mittelwert von 600 Pa Zuluft und 375 Pa Abluft, d.h. $(1 - f_p) \cdot 488$ Pa)

in der Berechnung angesetzt wird. Zur weiteren Eingrenzung von typischen Druckverlusten in deAL ist ein indirekter Rückschluss aus Herstellerangaben über die spezifische Ventilatorleistung möglich, wenn ein Wirkungsgrad angenommen wird:

$$\Delta p^* = SFP \cdot \eta^* \quad 3.28$$

Δp^*	Auslegungs-Druckverlust [Pa]
SFP	Spezifische Ventilatorleistung [W/(m ³ s)]
η^*	Wirkungsgrad bei Auslegungsbedingungen

Die in [Mahler u. a. 2008] angegebenen Herstellerangaben des spezifischen Ventilatorleistung liegen je Ventilator zwischen 300 und 600 W/(m³ s). Weitere Produktrecherchen für Geräte der Volumenstromklasse um 100 m³/h ergeben ähnliche Werte (Angaben jeweils beim maximalen Volumenstrom):

- GF-Sol-Air, Typ CVS Jumbo: 250 W/(m³ s)
- Meltem, Typ WRG-S/K: 650 W/(m³ s)
- LTG, Typ FVM: 405 W/(m³ s)

Bei einem typischen Wirkungsgrad von 35% für aktuelle EC-Ventilatoren bei 100 m³/h (siehe Abschnitt 3.2.2) ergeben sich so Druckverluste von ca. 90 bis 230 Pa. Bei verschmutzten Filtern ist mit höheren Werten zu rechnen.

Insgesamt scheint der aus der gegenüber den Standardwerten nächstbesseren SFP-Kategorie mit abgeleitete Wert von:

$$\Delta p_{deAL}^* = 295 \text{ Pa}$$

als ein sinnvoller Mittelwert zwischen den in der Normung üblichen Angaben und den Herstellerangaben mit sauberen Filtern. Wünschenswert wäre eine Überprüfung der Werte im Rahmen eines Feldtests.

Netzfaktor

Da der Netzfaktor f_N in der Literatur bislang nicht eingeführt ist, liegen keine Standardwerte vor. Prinzipiell ergeben sich:

- kleine Werte des Netzfaktors, wenn an einem oder an mehreren Strängen viel Druck zum Luftmengenabgleich abgedrosselt werden muss, besonders wenn diese Stränge gleichzeitig große Volumenströme führen.
- große Werte des Netzfaktors, wenn in sehr symmetrisch aufgebauten Kanalnetzen wenig Drosselung zum Luftmengenabgleich nötig ist.
- der Maximalwert 1, wenn nur ein Strang vorhanden ist oder alle Stränge identische Auslegungs-Druckverluste aufweisen.

Statistisch repräsentative Mittel- und Extremwerte könnten durch die Auswertung einer großen Anzahl an vollständigen Kanalnetzrechnungen durchgeführt werden. Eine entsprechende Datengrundlage liegt nicht vor. Exemplarisch wurden im Rahmen von Masterarbeiten [Kailing 2013; Shahbandeh 2014; Waldmann 2015] von insgesamt 7 Lüftungskanalnetzen in drei Hochschulgebäuden der Universität Kassel Druckverlustberechnungen durchgeführt. Bei den Gebäuden handelt es sich mit dem Zentrum für Umweltbewusstes Bauen (ZUB) um ein Büro- und Seminargebäude aus dem Jahr 2001, sowie mit den Gebäuden Ingenieurwissenschaften 1 und Ingenieurwissenschaften 3 um technische Institutsgebäude aus den Jahren 1994 und 1983.

Bei den untersuchten Gebäuden liegt der Netzfaktor zwischen 0,70 und 0,81. Darauf basierend wird folgende Standardrandbedingung festgelegt:

- $f_N = 0,75$ (mit Parametervariation: 0,6 und 0,9)

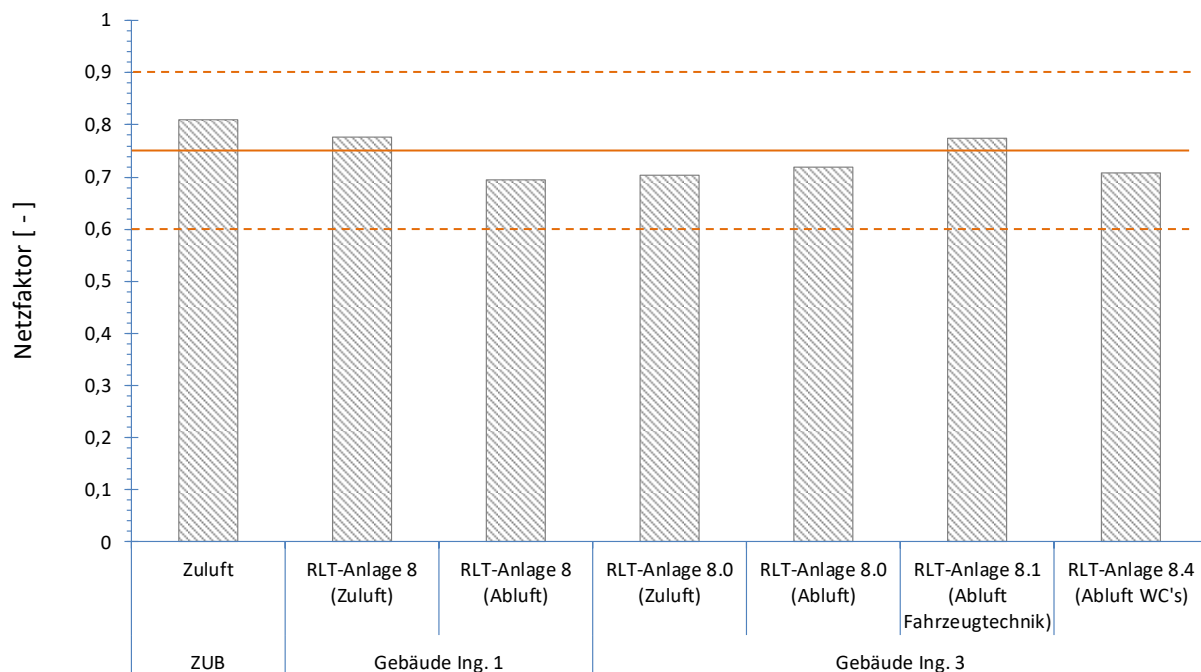


Abbildung 3.1: Netzfaktor in exemplarischen Bestandsgebäuden der Universität Kassel

3.1.5 Gegenüberstellung von dVt und VSR-System bei Standardrandbedingungen

In Abbildung 3.2 sind die nach Gleichung 3.17 und 3.18 (VSR-System) beziehungsweise 3.25 und 3.26 (dVt-System) berechneten Druckerhöhungen über dem Teillast-Volumenstromanteil \dot{V}/\dot{V}^* dargestellt. Es werden die beschriebenen Standardrandbedingungen verwendet:

- $\Delta p^* = 960 \text{ Pa}$
- $f_p = 0,4$
- $f_N = 0,75$ (nur dVt-System)
- $n = 2$ (Druckexponent)

Im VSR-System ist deutlich erkennbar, dass bei Teillast-Betriebszuständen ein überwiegender Anteil der Druckerhöhung des Ventilators zur Aufrechterhaltung des konstanten Vordrucks $\Delta p_{N,VSR}$ benötigt wird. Anders im dVt-System: Dort sinkt die erforderliche Druckerhöhung bei Teillast-Betriebszuständen stark ab, da ein konstanter Vordruck nicht existiert. Weiterhin ist die mittlere Druckerhöhung (definiert über den Netzfaktor f_N) im dVt-System auch beim Auslegungsvolumenstrom geringer als im Vergleichssystem, in welchem die Druckerhöhung für den hydraulisch ungünstigsten Strang ausgelegt ist.

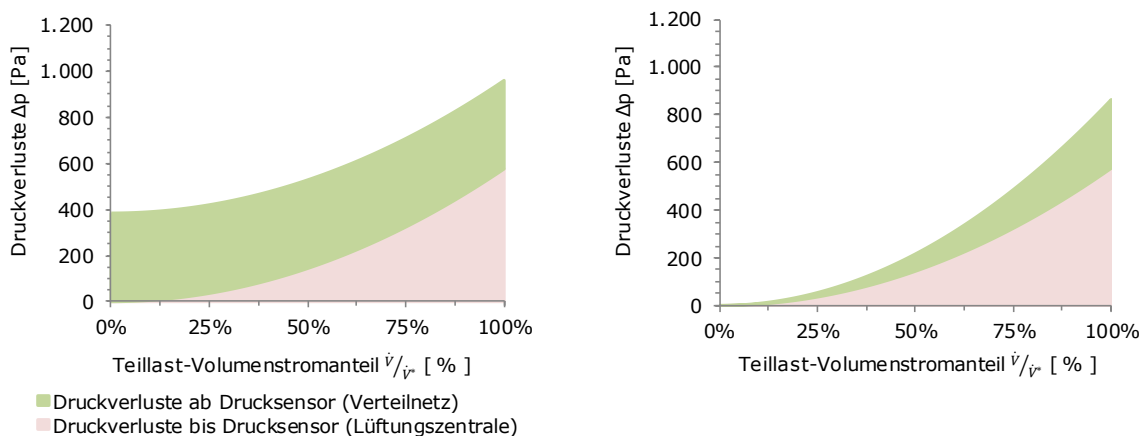


Abbildung 3.2: Erforderliche Druckerhöhungen bei verschiedenen Teillast-Volumenstromanteilen im System mit Variabel-Volumenstromreglern und konstantem Vordruck (links) und im System mit dezentralen Ventilatoren (rechts) [vgl. Alsen, Klimmt, Knissel 2015].

HINWEIS: Im Rahmen der Validierung der Leistungsberechnung (nachfolgendes Abschnitt 3.4) wurden am Teststand des Fachgebiets Technische Gebäudeausrüstung auch Messungen der Ventilatordruckerhöhungen (diese entsprechen den Druckverlusten in Lüftungszentrale und Kanalnetz) an einem dVt- und einem VSR-Referenzsystem durchgeführt. Diese bestätigen die Verläufe der in Abbildung 3.2 dargestellten Ventilatordruckerhöhungen. Für die Lüftungszentrale liegt der Druckexponent mit $n = 1,6$ etwas niedriger als in Berechnung angenommen, sodass die realen Messwerte ein etwas lineareres Verhalten aufweisen, als oben dargestellt. Dies ist auf die in Abschnitt 3.1.2 diskutierten Anteile laminarer Strömung zurückzuführen.

3.2 Modell der Ventilator-Wirkungsgrade

Der Ventilatorwirkungsgrad gibt an, welcher Anteil der eingesetzten elektrischen Leistung in hydraulische Leistung umgesetzt werden kann. Die hydraulische Leistung bezieht sich nachfolgend, wie in Kapitel 3 einleitend beschrieben, auf das Produkt von statischer Druckerhöhung des Ventilators und gefördertem Volumenstrom. Es werden sämtliche Verlustanteile, inkl. denen des Motors, berücksichtigt. Nicht berücksichtigt ist die Einbausituation der Ventilatoren, die als resultierender interner Druckverlust behandelt wird.

3.2.1 Grundsätze des Berechnungsansatzes unter Berücksichtigung von Betriebspunkten

Ein Betriebspunkt wird grundsätzlich dadurch charakterisiert, dass ein Ventilator bei einer bestimmten Drehzahl einen bestimmten Volumenstrom fördert und einen bestimmten Druck aufbaut. Je nach Betriebspunkt muss der Wirkungsgrad des Ventilators individuell berechnet werden. Nachfolgend werden vier Betriebspunkte definiert, die den Betriebsbereich charakterisieren, der im vorliegenden Kapitel verwendet wird:

$$BP_{max} = f(\Delta p_{max}, \dot{V}_{max}, n_{max}, \eta_{max}) \quad 3.29$$

Betriebspunkt auf Netzkennlinie mit bestem Wirkungsgrad bei maximaler Ansteuerung

$$BP^* = f(\Delta p^*, \dot{V}^*, n^*, \eta^*) \quad 3.30$$

Betriebspunkt bei Auslegungsbedingungen

$$BP = f(\Delta p, \dot{V}, n, \eta) \quad 3.31$$

Beliebiger Betriebspunkt zwischen BP_{min} und BP^* (Arbeitsbereich)

$$BP_{min} = f(\Delta p_{min}, \dot{V}_{min}, n_{min}, \eta_{min}) \quad 3.32$$

Betriebspunkt auf Netzkennlinie mit bestem Wirkungsgrad bei minimaler Ansteuerung

In Abbildung 3.3 ist das Kennfeld eines exemplarischen Ventilators mit den Kennlinien minimaler und maximaler Ansteuerung dargestellt. Die in grün dargestellte Netzkennlinie liegt im Wirkungsgradoptimum der jeweiligen Ansteuerung. Auf dieser Kennlinie liegen die oben definierten Betriebspunkte.

Es hat sich herausgestellt, dass der optimale Wirkungsgrad der betrachteten EC-Ventilatoren i.d.R. im Bereich der maximalen Steuerspannung liegt, also bei BP_{max} . Die maximalen Wirkungsgrade werden in Abschnitt 3.2.2: *Maximaler Wirkungsgrad bei voller Drehzahl* näher beschrieben.

Die Reduzierung des Wirkungsgrads gegenüber dem optimalen Wirkungsgrad bei der jeweiligen Steuerspannung liegt im vorliegenden Beispiel bei weniger als 10 %, wenn die Betriebspunkte innerhalb des Bereichs liegen, der in Abbildung 3.3 von den beiden orangefarbenen Netzkennlinien aufgespannt wird.

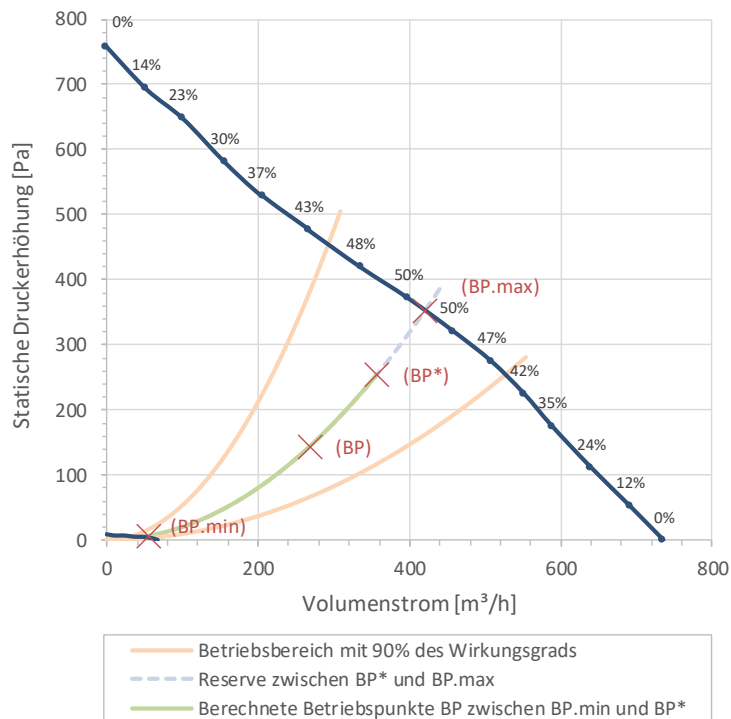


Abbildung 3.3: Charakteristische Betriebspunkte im Modell der Ventilator-Wirkungsgrade bei quadratischer Form der Netzkennlinie (hier: ebm papst EC-Ventilator K3G175RC0503)

Wirkungsgradreduzierungen lassen sich in drei Ursachengruppen einteilen, die einzeln oder gemeinsam auftreten können:

1. Drehzahlreduzierung bei Netzkennlinie mit quadratischem Verlauf

Oft liegen bei der Drehzahlregelung von Ventilatoren Netzkennlinien mit näherungsweise quadratischem Verlauf vor. Von den betrachteten Lüftungssystemen betrifft dies das dVt-System und die deAL-Systeme. Der Wirkungsgrad sinkt bei einer geringeren Drehzahl als der Drehzahl im Wirkungsgradoptimum (siehe Abschnitt 3.2.3: *Wirkungsgradverringering bei Teillast-Drehzahlen*). Dieser Effekt tritt auf, wenn:

- a. Ein Ventilator bei Auslegungsbedingungen größer als benötigt dimensioniert wird (siehe Abschnitt 3.2.3.2: Einfluss von Überdimensionierungen) und/oder wenn
- b. Bei bedarfsabhängiger Regelung Teillast-Volumenströme angefordert werden.

Diese Effekte führen zu Betriebspunkten *BP*, die sich auf der in Abbildung 3.3 grün gekennzeichneten Netzkennlinie mit optimalem Wirkungsgrad bewegen.

2. Drehzahlreduzierung bei Netzkennlinie mit konstantem Anteil

Ein anderes Teillastverhalten des Wirkungsgrads ergibt sich, wenn eine Konstantdruckregelung bei Teillast-Volumenströmen in einem Teil des Netzes einen konstanten Vordruck erfordert und somit eine Abweichung von der quadratischen Netzkennlinie erzwungen wird (vgl. Abbildung 3.2 (Seite 36), VSR-System mit konstantem Vordruck). Die Konstantdruckregelung führt zu Betriebspunkten *BP*, die sich auf einer wie in Abbildung 3.4 dargestellten Netzkennlinie bewegen.

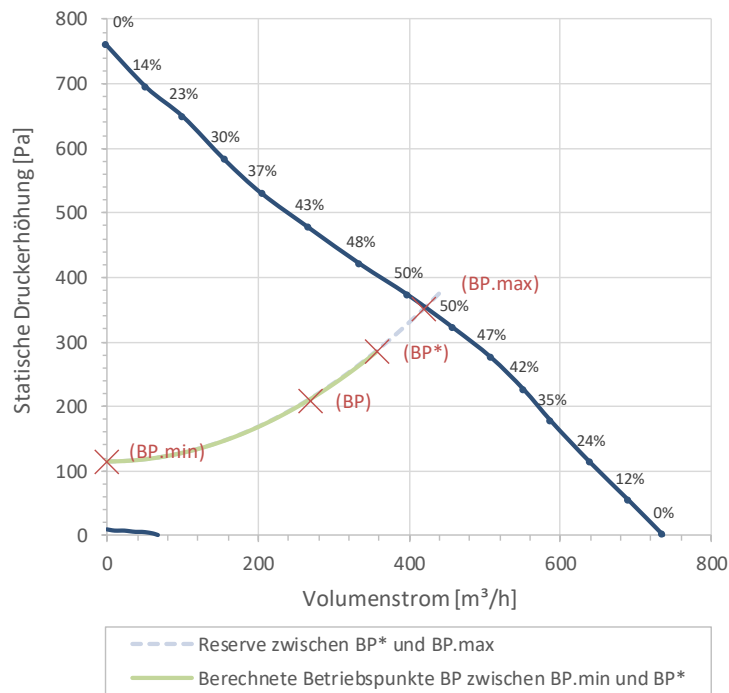


Abbildung 3.4: Charakteristische Betriebspunkte im Modell der Ventilator-Wirkungsgrade bei Netzkennlinie mit konstantem Anteil (hier: ebm papst EC-Ventilator K3G175RC0503)

3. Keine optimale Auslegung des Ventilators bei Auslegungsbedingungen

Der Wirkungsgrad sinkt auch, wenn für die Druckverluste eines Kanalnetzes kein optimal passender Ventilator verwendet wird (Stichworte „unpassende Auslegung“ oder „kein besserer Ventilator verfügbar“). In diesem Fall liegt der Auslegungsbetriebspunkt BP^* abseits der in Abbildung 3.3 grün gekennzeichneten Netzkennlinie mit optimalem Wirkungsgrad.

In nachfolgenden energetischen Bewertungen werden diese Betriebspunkte nicht berücksichtigt, da angenommen wird, dass ein passendes Angebot an Ventilatoren vorhanden ist und diese entsprechend bestmöglich eingesetzt werden. Die Annahme betrifft sowohl das dVt-System, als auch die konventionellen Vergleichssysteme.

In der Konsequenz können die absoluten Verbräuche von realen Anlagen geringfügig höher liegen, als die berechneten Bedarfe. Lüftungssysteme mit hohem elektrischem Energiebedarf (z.B. KVS-Anlagen) können dadurch gegenüber VVS-Anlagen etwas zu vorteilhaft bewertet werden. Die Ergebnisse der energetischen und wirtschaftlichen Bewertung des dVt-Systems sind diesbezüglich als konservativ zu bewerten. Deutliche Auswirkungen sind jedoch erst bei sehr unpassenden Auslegungen zu erwarten, von denen nicht systematisch ausgegangen wird.

3.2.2 Maximaler Wirkungsgrad bei voller Drehzahl

Der maximale statische Wirkungsgrad der untersuchten Ventilatoren verbessert sich bei ansteigenden Baugrößen von ca. 39% beim kleinsten Modell der Serie RadiCal der Fa. ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG auf bis zu 65%. Dies ist auf unterschiedlich hohe Teilwirkungsgrade sowohl des Motors, als auch des Laufrades zurückzuführen:

Tabelle 3.2: Teilwirkungsgrade von zwei Ventilatoren in unterschiedlicher Baugröße

	K3G133-RA0103	K3G560-AP2301
Max. Rotorwirkungsgrad	58%	73%
Max. Motorwirkungsgrad	67%	90%
St. Gesamtwirkungsgrad	39%	65%

Es zeigt sich, dass die Entwicklung der maximalen Wirkungsgrade hinreichend gut mit dem im jeweiligen Betriebspunkt geförderten Volumenstrom korreliert: Je größer der Volumenstrom im optimalen Betriebspunkt ist, umso höher ist typischerweise auch der maximale Wirkungsgrad. Abbildung 3.5 zeigt diesen Zusammenhang für die Radialventilatoren RadiCal und V3G Rohrventilatoren prioAir EC. Die Daten entstammen Messprotokollen und dem „ebm-papst Produktselector 2011“, einem Auslegungsprogramm des Herstellers ebm-papst Mulfingen GmbH.

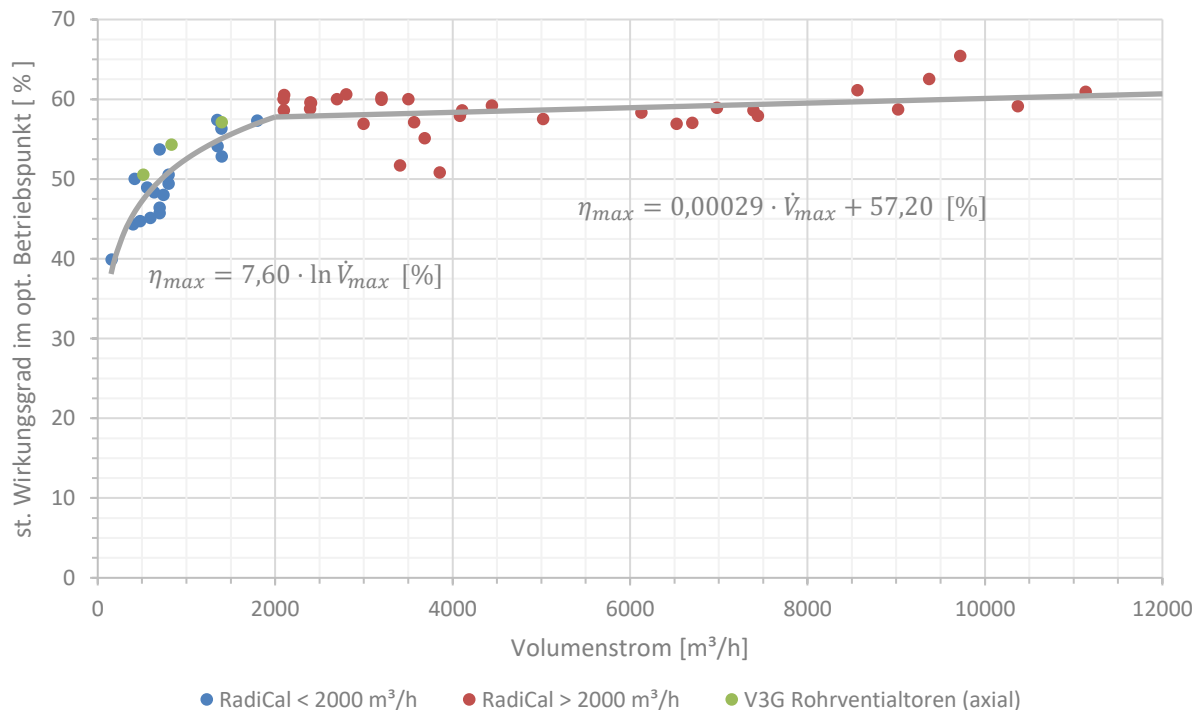


Abbildung 3.5: Maximaler statischer Wirkungsgrad von Radialventilatoren der Serie „RadiCal“ des Ventilatorherstellers ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG sowie Rohrventilatoren prioAir EC Firma Systemair GmbH

Bei der Analyse der Datenpunkte hat es sich als zweckmäßig herausgestellt, diese in zwei Bereiche aufzuteilen:

- Bei Volumenströmen im optimalen Betriebspunkt bis ca. 2000 m³/h steigt der maximale Wirkungsgrad zunächst schnell an und flacht dann ab. Dieser Zusammenhang lässt sich als Funktion des natürlichen Logarithmus darstellen.
- Bei Volumenströmen im optimalen Betriebspunkt ab ca. 2000 m³/h steigt der maximale Wirkungsgrad nur noch langsam und im Mittel linear an.

Mit dieser Aufteilung können folgende Regressionsgleichungen angegeben werden:

$$\eta_{max} = 7,60 \cdot \ln(\dot{V}_{max}) [\%] \quad | \quad \dot{V}_{max} < 2.000 \text{ m}^3/\text{h} \quad 3.33$$

$$\eta_{max} = 0,00029 \cdot \dot{V}_{max} + 57,20 \% \quad | \quad \dot{V}_{max} > 2.000 \text{ m}^3/\text{h} \quad 3.34$$

η_{max} Maximaler Wirkungsgrad eines Ventilators [%]

\dot{V}_{max} Volumenstrom im Betriebspunkt mit maximalem Wirkungsgrad [m³/h]

Beide Regressionen sind in Abbildung 3.5 eingezeichnet. Es ist erkennbar, dass es für einzelne Ventilatoren Abweichungen von bis zu 7,5 Prozentpunkten gibt. Dies kann z.B. daran liegen, dass bei gleichem Volumenstrom unterschiedlich starke Motoren eingesetzt werden, um unterschiedliche Druckbereiche abzudecken. Im Einzelfall ist es daher ratsam, die Datenblattangaben des jeweils verwendeten Ventilators zu verwenden. Für die von einzelnen Ventilatoren losgelöste energetische Bewertung geben die angegebenen Regressionsgleichungen dagegen typische Mittelwerte an und sind daher gut geeignet.

3.2.3 Wirkungsgradverringern bei Teillast-Drehzahlen

Teillast-Volumenströme werden nach dem aktuellen Stand der Technik über eine Reduzierung der Drehzahl erreicht. Wie einleitend beschrieben, ergibt sich eine unterschiedliche Wirkungsgradreduzierung, je nachdem, ob die Netzkennlinie quadratisch verläuft (insbesondere ohne Konstantdruckregelung) oder einen konstanten Anteil aufweist (mit Konstantdruckregelung im VSR-System).

3.2.3.1 Wirkungsgradverringern bei Netzkennlinie mit quadratischem Verlauf

Der Verlauf der Reduzierung des Ventilatorwirkungsgrads bei Teillast-Drehzahlen kann durch eine sog. sigmoide bzw. logistische Funktion beschrieben werden. Dabei geht der Wirkungsgrad bei der maximalen Drehzahl gegen 100 % des optimalen Wirkungsgrads (keine Verschlechterung) und bei minimaler Drehzahl gegen 0 % des optimalen Wirkungsgrads. Eine allgemeine Darstellung der logistischen Funktion lautet [Müller o. J.]:

$$\frac{\eta}{\eta_{max}} = A + \frac{C}{\left(1 + T \cdot e^{-B \cdot \left(\frac{n}{n_{max}} - M\right)}\right)^{1/T}} \quad 3.35$$

$\frac{\eta}{\eta_{max}}$	Wirkungsgradverhältnis des zu berechnenden Betriebspunkts BP ggü. BP _{max}
$\frac{n}{n_{max}}$	Drehzahlanteil des zu berechnenden Betriebspunkts BP ggü. BP _{max}
A	Basis
C	Sprunghöhe
T	Symmetrie
B	Steilheit
M	Wendestelle

Als Variable wird der Drehzahlanteil n/n_{max} verwendet, für den die Wirkungsgradverringereung berechnet werden soll. Der Drehzahlanteil n/n_{max} kann bei der Netzkennlinie mit quadratischem Verlauf entsprechend den Proportionalitätsgesetzen auch als Teillast-Volumenstromanteil \dot{V}/\dot{V}_{max} ausgedrückt werden. Die Basis ist einheitlich 0 und die Sprunghöhe einheitlich 1, da sich die Wirkungsgradreduktion auf einen Wertebereich von 0 % bis 100 % des optimalen Wirkungsgrads bezieht.

Die Symmetrie, Steilheit und Wendestelle unterscheiden sich von Ventilator zu Ventilator und können z.B. anhand des Excel-Solvers über die Minimierung der Fehlerquadrate bestimmt werden. Als Datengrundlage für nachfolgende Betrachtungen wurden 9 Ventilatoren der Serie RadiCal des Herstellers ebm-papst ausgewertet. Für jeden der Ventilatoren wurde das Ventilatorkennfeld für wenigstens 5 Steuerspannungen (d.h. unterschiedlichen Teillast-Drehzahlen) auf dem Teststand des Herstellers vermessen. Für jede Steuerspannung bzw. Teillast-Drehzahl wurde der Arbeitspunkt mit dem optimalen Wirkungsgrad identifiziert und mit dem maximalen Wirkungsgrad des Ventilators ins Verhältnis gesetzt. Somit ergibt sich die Wirkungsgradreduzierung η/η_{max} als Funktion der Teillast-Drehzahl n/n_{max} bzw. des Teillast-Volumenstromanteils \dot{V}/\dot{V}_{max} .

Abbildung 3.6 zeigt die identifizierten Verringerungen des Wirkungsgrads für verschiedene Ventilatoren mit den zugehörigen logistischen Funktionen. Drei davon werden in den nachfolgenden Untersuchungen als „typisch“ für folgende Volumenstrombereiche angenommen:

- K3G133-RA0103 „schlechtes Teillastverhalten“: Für Auslegungsvolumenströme von 120 bis 350 m³/h
- K3G-175-RC0503 „mittleres Teillastverhalten“: Für Auslegungsvolumenströme von 350 bis 1.000 m³/h
- K3G-450-AQ2401 „gutes Teillastverhalten“: Für Auslegungsvolumenströme ab 1000 m³/h

Für die angegebenen Ventilatoren gelten die in Tabelle 3.3 angegebenen Regressionsparameter der Gl. 4.2 zur Berechnung der Teillast-Wirkungsgrade.

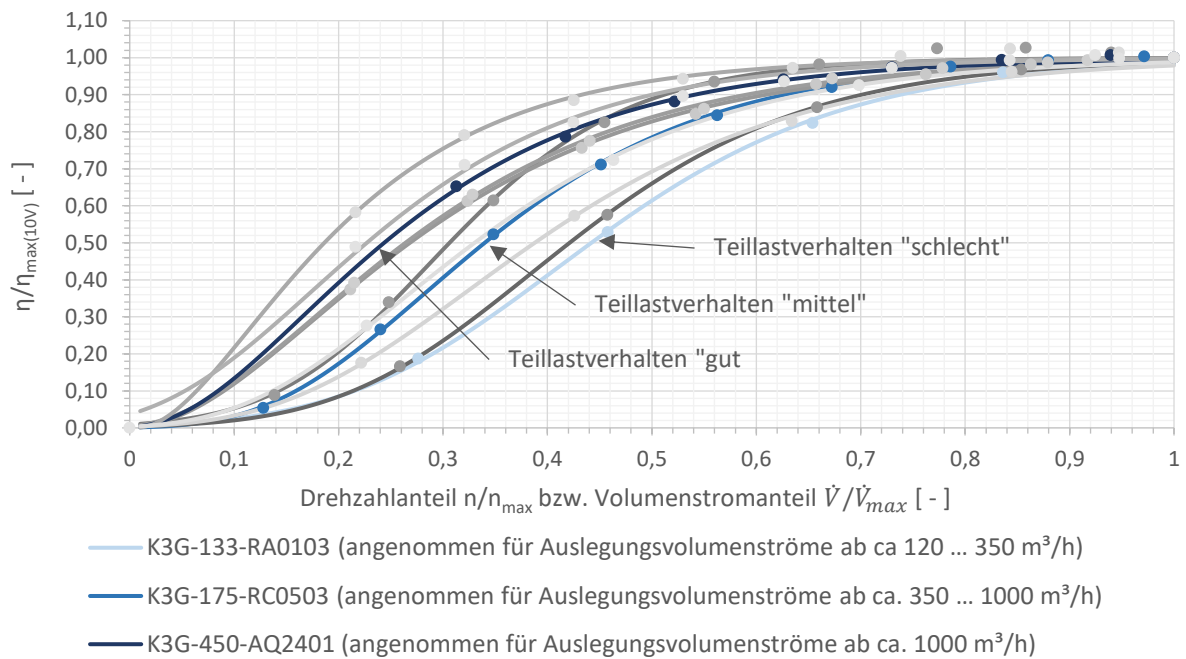


Abbildung 3.6: Verringerung des Ventilatorwirkungsgrads bei Teillast-Drehzahlen (Netzkenlinie mit quadratischem Verlauf)

Tabelle 3.3: Regressionsparameter zur Berechnung von Teillast-Wirkungsgraden bei Netzkenlinien mit quadratischem Verlauf

Auslegungsvolumenstrom		A	C	T	B	M
120 ... 350 m ³ /h	„schlecht“	0	1	0,3768	6,7536	0,4076
350 ... 1000 m ³ /h	„mittel“	0	1	-0,0260	6,5267	0,2824
> 1000 m ³ /h	„gut“	0	1	-0,3290	6,0171	0,1642

Die prinzipielle Ursache des Verlaufs ist, dass sich die hydraulische Leistung (der Nutzen) bei Teillast-Drehzahlen entsprechend den Proportionalitätsgesetzen mit der dritten Potenz verringert, während der Aufwand Verlustanteile enthält, die sich nur linear oder gar nicht verringern [siehe Eck 2003, S. 29–30]. Dies ist z.B. bei Verlusten durch Reibung und bei Standby-Verlusten der Fall. Da diese Verlustanteile bei kleinen Laufrädern und Motoren gegenüber der hydraulischen Leistung im Verhältnis zunehmen, ergeben sich die in Abbildung 3.6 dargestellten schlechteren Teillast-Charakteristika der kleineren Ventilatorbaugrößen.

3.2.3.2 Wirkungsgradverringern bei Netzkenlinie mit konstantem Anteil

Einerseits führt die Form der Netzkenlinie bei einer Reduzierung des Volumenstroms zu einer höheren Drehzahl, als bei einer quadratischen Form der Netzkenlinie. Dies führt zu einem geringeren Wirkungsgradabfall als bei einer quadratischen Netzkenlinie. Andererseits verschlechtert sich nicht nur der Motorwirkungsgrad, sondern ebenfalls der Wirkungsgrad des Laufrades. Letzteres ist bei einer quadratischen Netzkenlinie nur unwesentlich der Fall.

Zur Quantifizierung der Wirkungsgradverringern wurde wiederum die in Abbildung 3.6 verwendete Auswahl an Ventilatoren (ab Baugröße mit DN 225, um Zentralventilatoren zu

repräsentieren) herangezogen. Dazu wurden die Ventilator-Kennfelder einer Regressionsanalyse unterzogen und die Verringerung des Wirkungsgrads gegenüber dem jeweils maximalen Wirkungsgrad berechnet. Die Analyse wurde für Netzkennlinien mit unterschiedlich hohen Anteilen des konstant zu haltenden Drucks durchgeführt (ausgedrückt durch eine Variation der Druckverhältniszahl in Höhe von 0,2 , 0,4 und 0,6), wobei *keine* wesentlichen Abweichungen zu beobachten waren. Für den genannten Bereich an Druckverhältniszahlen ist es daher zulässig, einen mittleren Wert zu verwenden. Abbildung 2.6 zeigt das Teillastverhalten für die betrachteten Ventilatoren bei der mittleren Druckverhältniszahl 0,4.

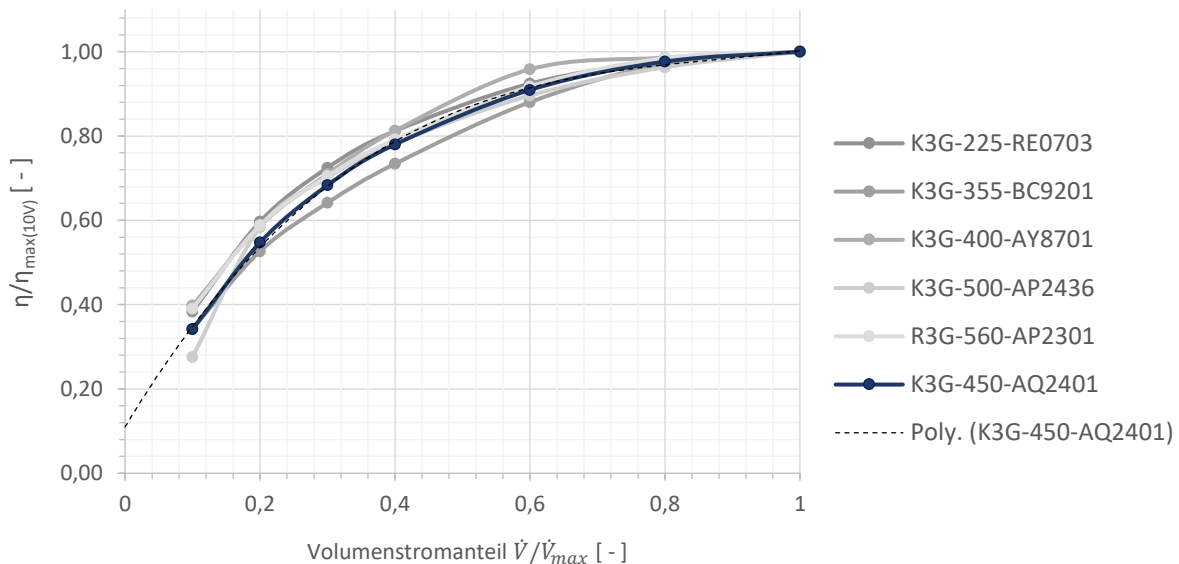


Abbildung 3.7: Verringerung des Ventilatorwirkungsgrads bei Teillast-Volumenstromanteilen (Netzkennlinie mit konstantem Druckanteil entsprechend Abbildung 3.4)

Wird wiederum der Ventilator K3G-450-AQ2401 (blaue Kennlinie) als typischer Mittelwert angesetzt, ergibt sich bei einem polynomischen Regressionsansatz folgende Regressionsgleichung:

$$\frac{\eta}{\eta_{max}} = 1,0695 \cdot \left(\frac{\dot{V}}{\dot{V}_{max}}\right)^3 - 2,8323 \cdot \left(\frac{\dot{V}}{\dot{V}_{max}}\right)^2 + 2,655 \cdot \frac{\dot{V}}{\dot{V}_{max}} + 0,11 \quad 3.36$$

$\frac{\eta}{\eta_{max}}$ Wirkungsgradverhältnis des zu berechnenden Betriebspunkts BP ggü. BP_{max}

$\frac{\dot{V}}{\dot{V}_{max}}$ Volumenstromanteil des zu berechnenden Betriebspunkts BP ggü. BP_{max}

Die angegebene Regressionsgleichung charakterisiert somit das Teillastverhalten insbesondere der Zentralventilatoren im VSR-System mit konstantem Vordruck und kann als typisch angesehen werden.

3.2.4 Einfluss von Überdimensionierungen

Wie einleitend beschrieben, ist eine der Ursachen für Wirkungsgradreduzierungen, dass Ventilatoren bereits bei Auslegungsbedingungen im Teillast-Betriebsbereich, d.h. bei Teillast-Drehzahlen arbeiten.

Um zu berücksichtigen, dass der Auslegungsbetriebspunkt bereits im Teillast-Drehzahlbereich eines Ventilators liegt, muss eine Angabe zur Höhe der Auslegungsdrehzahl bzw.

zum Auslegungsvolumenstrom in der Berechnung ergänzt werden. Dazu wird der Faktor $f_{dim} = \dot{V}^*/\dot{V}_{max}$ eingeführt (bei quadratischer Netzkennlinie entspricht dies aufgrund der Proportionalitätsgesetze n^*/n_{max}), der angibt, welcher Anteil des maximal möglichen Volumenstroms im Auslegungszustand benötigt wird. Es ist dann:

$$\frac{\dot{V}}{\dot{V}_{max}} = f_{dim} \cdot \frac{\dot{V}}{\dot{V}^*} \quad 3.37$$

f_{dim}	Dimensionierungsfaktor, $f_{dim} = \dot{V}^*/\dot{V}_{max}$
\dot{V}	Volumenstrom in Teillast-Betriebspunkt
\dot{V}^*	Volumenstrom im Auslegungs-Betriebspunkt
\dot{V}_{max}	Volumenstrom im Betriebspunkt mit optimalem Wirkungsgrad

Wenn bei Auslegungsbedingungen keine Überdimensionierung vorliegt (d.h. $\dot{V}^* = \dot{V}_{max}$), ist $f_{dim} = 1$ und es gibt keine Wirkungsgradverringering.

3.2.5 Standardrandbedingungen für die vergleichende Bewertung

Der maximale Wirkungsgrad wird in Abschnitt 3.2.2 für vergleichende Berechnungen als Funktion des Auslegungs-Volumenstroms angegeben. Dazu wird je nach Auslegungs-Volumenstrom ein Teillast-Verhalten *gut*, *mittel* oder *schlecht* zugeordnet (siehe Abbildung 3.6 für quadratische Netzkennlinien und Abbildung 3.7 für Netzkennlinien mit konstantem Anteil). Abschließend kann eine Überdimensionierung der Ventilatoren über den Dimensionierungsfaktor f_{dim} berücksichtigt werden.

Die mit diesen Einflussgrößen ermittelten Wirkungsgradkennlinien sollen nachfolgend für verschiedene Raumnutzungsarten dargestellt, da diese einen maßgeblichen Einfluss auf die Höhe des Auslegungsvolumenstroms haben. Dazu werden exemplarische Nutzungsarten ausgewählt, die typische Anwendungsbereiche des dVt-Systems darstellen.

In der DIN V 18599-10 werden für verschiedene Nutzungsarten Werte des hygienischen Außenluftvolumenstroms je m^2_{NGF} genannt. Übliche Flächen je belüfteter Zone können aus [Lichtmeß 2010, S. 245] entnommen werden, sodass typische Größenordnungen des hygienischen Außenluftvolumenstroms für verschiedene Nutzungsarten identifiziert werden können. In Tabelle 3.4 wird der hygienische Außenluftvolumenstrom für diejenigen Nutzungen aufgeführt, für die im Referenzgebäude der Energieeinsparverordnung (EnEV 2014) eine Bedarfsregelung mit VSR und konstantem Vordruck vorgesehen ist. Es handelt sich dabei um Nutzungen mit einem Zuluftvolumenstrom von mehr als $9 \text{ m}^3/\text{h}$ je m^2_{NGF} . Bei diesen besteht bei Einbau oder Erneuerung die Pflicht, die Anlagen mit Einrichtungen „zur selbsttätigen Regelung der Volumenströme in Abhängigkeit von den thermischen und stofflichen Lasten oder zur Einstellung der Volumenströme in Abhängigkeit von der Zeit“ auszustatten, soweit der Gesundheits- und Arbeitsschutz es erlaubt und Laständerungen messtechnisch oder hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs erfassbar sind (EnEV 2014 §15, Abs. 3). Zusätzlich sind Büronutzungen als häufig anzutreffenden Einsatzbereich aufgeführt.

Aus den so identifizierten Nutzungsarten mit den dazu bestimmten typischen Auslegungsvolumenströmen werden nach Gl. 3.33 und Gl. 3.34 die maximalen Wirkungsgrade der dezentralen Ventilatoren bestimmt. Diese sind zusammen mit dem jeweiligen Teillastverhalten ebenfalls in Tabelle 3.4 dargestellt. Im Rahmen der Parametervariation als Funktion der Ventilatorleistung über dem Teillastvolumenstromanteil in Abschnitt 4.4 werden die maximalen Wirkungsgrade der dezentralen Ventilatoren für den Ausgangsfall und die Parametervariationen anhand der drei farblich hervorgehobenen Nutzungsarten bestimmt:

- Besprechungs, Sitzungs- oder Seminarraum (Ausgangsfall)
- Gruppenbüro (Parametervariation 1)
- Klassenzimmer (Parametervariation 2)

Tabelle 3.4: Mindestaußenluftvolumenstrom und resultierende Wirkungsgrade der dVt für verschiedene Nutzungsarten

	$\dot{V}_A^* \left[\frac{m^3}{h} \text{ je } m^2 \right]$	$A_{NGF} [m^2]^{*1)}$	$\dot{V}^* \left[\frac{m^3}{h} \right]$	$\eta_{dz,max} [\%]$	Teillastverhalten
Einzelbüro	4	18	72	33%	schlecht
Gruppenbüro	4	36	144	38%	schlecht
Besprechung/Sitzung/Seminar	15	36	540	48%	mittel
Großraumbüro	6	144	864	51%	mittel
Klassenzimmer	10	100	1000	52%	gut
Fitnessraum	12	200 ^{*2)}	2400	58%	gut
Restaurant	18	144	2592	58%	gut
Foyer (Theater etc.)	25	144	3600	59%	gut
Hörsaal	30	200	6000	59%	gut
Kantine	18	400	7200	59%	gut
Zuschauerbereich (Theater etc.)	40	200	8000	60%	gut

*1) [Lichtmeß 2010, S.245]

*2) eigene Annahme

Der maximale Wirkungsgrad des *Zentralventilators* wird für alle Nutzungsarten einheitlich mit 60% angenommen. Dies entspricht für einen weiten Volumenstrombereich dem Ansatz nach Abbildung 3.5 und wird auch z.B. in [DIN V 18599-7] entsprechend verwendet. Erst bei Volumenströmen kleiner 2.000 m³/h ergibt sich ein deutlicher Abfall des Wirkungsgrads der Zentralventilatoren.

Beim Thema einer „*typischen*“ *Überdimensionierung* liegen nur in geringem Ausmaß gesicherte Angaben vor. Im Rahmen der Untersuchungen zur Teilenergiekennwerte-Methode des Instituts Wohnen und Umwelt (IWU) wurde jedoch an 157 RLT-Anlagen – wie in Abbildung 3.8 dargestellt – die elektrische Leistungsaufnahme auf der maximalen Betriebsstufe gemessen und mit der auf dem Typenschild angegebenen Nennleistung (entspricht der Auslegungleistung) verglichen.

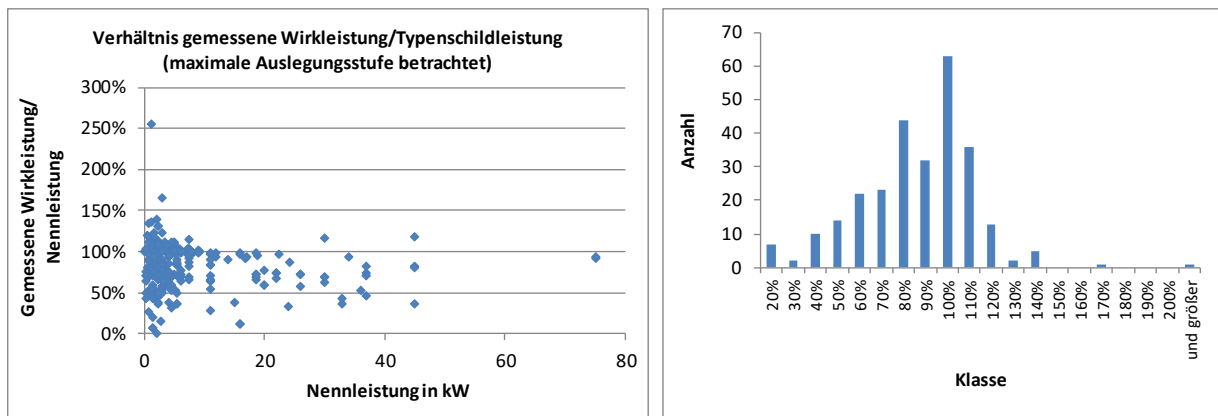


Abbildung 3.8: Querschnittsanalyse des IWU mit gemessenen Werten der Wirkleistung von Lüftungsanlagen auf höchster Betriebsstufe gegenüber deren Typenschildleistung (entspricht Nennleistung bzw. Auslegungsleistung). Eigene Darstellung in Anlehnung an [Hörner, Bagherian, Jedek 2014, S. 95–99].

Die statistische Auswertung ergab, dass bei einer großen Bandbreite im Mittel die gemessene Leistung bei 82 % der ausgelegten Nennleistung lag [Hörner, Bagherian, Jedek 2014, S. 95–99]. Gegenüber der Typenschildleistung geringere gemessene Leistungen lassen sich durch geringere Druckverluste im Kanalnetz erklären, die daher rühren können, dass diese entweder von vornherein zu hoch berechnet waren oder die Anlage nicht den vorgesehenen Volumenstrom fördert und daher große Leistungsreserven hat. Auch führt der aus hygienischen Gesichtspunkten regelmäßig erforderliche Filterwechsel zu geringeren Druckverlusten und damit elektrischen Leistungen.

Eine Auffälligkeit in der Querschnittsanalyse des IWU ist die Vielzahl der Messungen, bei denen die gemessene Leistung größer als die Nennleistung ist. Eine größere Leistung wird erforderlich, wenn mehr Volumenstrom gefördert werden muss oder Druckverluste höher sind als ursprünglich vorgesehen. Dass die Motoren diese, die Typenschildleistung übersteigende Leistung liefern können, deutet darauf hin, dass die eingesetzten Motoren über die Nennleistung hinausgehende Reserven bieten. Dies scheint plausibel, da z.B. laut [Rietschel, Fitzner 2008, S. 267] Asynchronmotoren üblicherweise so ausgelegt werden, dass Sie bei 70 bis 80 % der Nennleistung die besten Wirkungsgrade erreichen (es wird von einer entsprechenden Überdimensionierung ausgegangen).

Die Messdaten des IWU können zur Bestimmung eines typischen Dimensionierungsfaktors verwendet werden. Dazu sind jedoch zunächst weitere Umrechnungen und Definitionen notwendig. Der Dimensionierungsfaktor ist anhand der Drehzahl bei Auslegungsbedingungen zur maximal möglichen Drehzahl definiert. Anhand der Proportionalitätsgesetze kann die Berechnung ebenfalls mit Volumenströmen, Drücken oder Leistungen durchgeführt werden.

$$f_{dim} = \frac{n^*}{n_{max}} = \frac{\dot{V}^*}{\dot{V}_{max}} = \left(\frac{\Delta p^*}{\Delta p_{max}} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{P^*}{P_{max}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad 3.38$$

Die reale benötigte Leistung bei Auslegungsbedingungen entspricht der gemessenen Wirkleistung bei maximaler Betriebsstufe. Die maximale Leistung wird nachfolgend in Anlehnung an [Rietschel, Fitzner 2008, S. 267] anhand der Nennleistung bzw. Typenschildleistung abgeschätzt, indem angenommen wird, dass diese im Mittel 75% der maximalen Leistung beträgt. Die entsprechend aufbereiteten Leistungsverhältnisse sind in Abbildung 3.9 dargestellt.

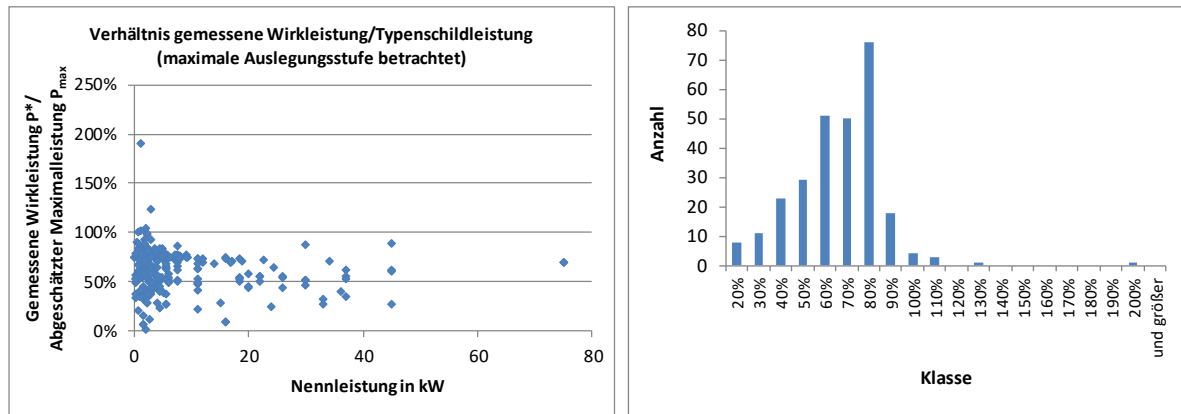


Abbildung 3.9: Querschnittsanalyse des IWU mit gemessenen Werten der Wirkleistung von Lüftungsanlagen auf höchster Betriebsstufe gegenüber der abgeschätzten Maximalleistung. Eigene Darstellung in Anlehnung an [Hörner, Bagherian, Jedek 2014, S. 95–99].

Bis auf wenige Ausnahmen liegt die gemessene Leistung unterhalb der abgeschätzten Maximalleistung. In den übrigen Fällen kann eine ungewöhnlich hohe Maximalleistung, ein nachträglicher Motorwechsel oder ein Messfehler vorgelegen haben. Anhand einer Auswertung der kumulierten Häufigkeit, wird nachfolgend der Median (die Hälfte aller Messungen lag oberhalb und die andere Hälfte der Messungen unterhalb des Medians) als in der Praxis typisches Verhältnis von real benötigter zu maximaler Leistung, sowie das 10 %- und das 90 %-Quantil berechnet (80% aller Messungen lagen innerhalb dieses Bereichs, jeweils 10 % lagen ober- und unterhalb):

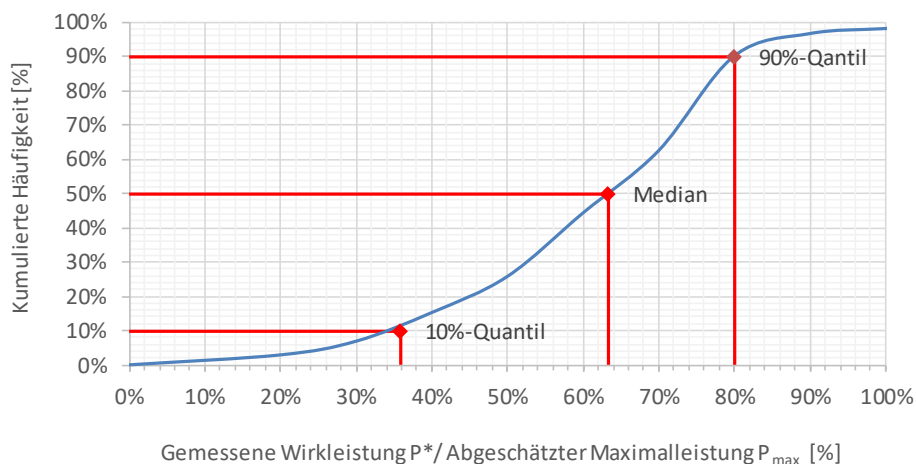


Abbildung 3.10: Bestimmung von typischen Werten des Verhältnisses von gemessener Leistung bei maximaler Betriebsstufe zur Maximalleistung des Motors

Anhand von Gl 3.38 kann nun der Dimensionierungsfaktor für einen typischen Wert (Standardwert) und für die Parametervariation bestimmt werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.5 aufgeführt:

$$f_{dim} = \left(\frac{P^*}{P_{max}} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{P_{Mess.IWU}}{P_{Nenn}/75\%} \right)^{\frac{1}{3}} \quad 3.39$$

f_{dim} Dimensionierungsfaktor
 $P^* = P_{Mess}$ Gemessene Leistung bei Auslegungsbedingungen (maximale Betriebsstufe)
 P_{max} Maximale Leistung abgeschätzt in Anlehnung an [Rietschel, Fitzner 2008, S. 267]
 P_{Nenn} Nennleistung (entspricht Dimensionierung gemäß Typenschildleistung)

Tabelle 3.5: Typische Werte des Dimensionierungsfaktors

	P^*/P_{max}	f_{dim}
10%-Quantil (untere Grenze der Parametervariation)	0,36	0,71
Median (typischer Wert)	0,63	0,86
90%-Quantil (obere Grenze der Parametervariation)	0,80	0,93

3.2.6 Zusammenfassung

Zusammenfassend wird der Teillast-Wirkungsgrad wie folgt berechnet:

$$\eta = \eta_{max} \cdot \frac{\eta}{\eta_{max}} \quad 3.40$$

η_{max} Wirkungsgrad im Betriebspunkt mit maximalem Wirkungsgrad und maximaler Ansteuerung [%]

$\frac{\eta}{\eta_{max}}$ Wirkungsgradverhältnis des zu berechnenden Betriebspunkts BP ggü. BP_{max} nach Gl. 3.43 [-]

Dabei kann η_{max} für jeden Ventilator individuell bestimmt werden oder mit folgenden Gleichungen angenähert werden (siehe Abbildung 3.5, zugrunde liegen jeweils strömungsoptimierte Radialventilatoren mit rückwärtsgekrümmten Laufrädern und Axial-Rohrventilatoren inkl. EC-Motor):

$$\eta_{max} = 7,71 \frac{\%}{m^3/h} \cdot \ln(\dot{V}_{max}) - 1,23 \% \quad | \quad \dot{V}_{opt} < 2.000 m^3/h \quad 3.41$$

$$\eta_{max} = 0,00029 \frac{\%}{m^3/h} \cdot \dot{V}_{max} + 57,20 \% \quad | \quad \dot{V}_{opt} > 2.000 m^3/h \quad 3.42$$

\dot{V}_{max} Volumenstrom im Betriebspunkt mit maximalem Wirkungsgrad [m³/h]

Für das Wirkungsgradverhältnis bei Teillast wird bei Netzkennlinien mit quadratischem Verhalten (dVt-System, deAL) die folgende Gleichung verwendet (siehe Abbildung 3.6):

$$\frac{\eta}{\eta_{max}} = \frac{1}{\left(1 + T \cdot e^{-B \cdot \left(f_{dim} \cdot \frac{\dot{V}}{\dot{V}^*} - M\right)}\right)^{1/T}} \quad 3.43$$

$\frac{\eta}{\eta_{max}}$ Wirkungsgradverhältnis des zu berechnenden Betriebspunkts BP ggü. BP_{max}

$\frac{\dot{V}}{\dot{V}^*}$ Volumenstrom des zu berechnenden Betriebspunkts BP ggü. BP*

f_{dim} Dimensionierungsfaktor, $f_{dim} = n^*/n_{max}$

T Symmetrie

B Steilheit

M Wendestelle

Dabei können die Parameter T, B und M anhand von Messdaten und mittels Minimierung der Fehlerquadrate berechnet oder die Anhaltswerte aus Tabelle 3.3 verwendet werden. Der Dimensionierungsfaktor beträgt bei Standardrandbedingungen $f_{dim} = 0,86$ oder kann anhand von Auslegungsdaten mit Gl. 3.38 berechnet werden.

Bei Netzkennlinien mit konstantem Anteil aufgrund einer Konstantdruckregelung (VSR-System) wird folgende Gleichung für das Teillastverhalten verwendet (siehe Abbildung 3.7):

$$\frac{\eta}{\eta_{max}} = 1,0695 \cdot \left(f_{dim} \cdot \frac{\dot{V}}{\dot{V}^*}\right)^3 - 2,8323 \cdot \left(f_{dim} \cdot \frac{\dot{V}}{\dot{V}^*}\right)^2 + 2,655 \cdot f_{dim} \cdot \frac{\dot{V}}{\dot{V}^*} + 0,11 \quad 3.44$$

3.3 Darstellung der Ventilatorleistung von dVt und VSR-System bei Standardrandbedingungen

Die elektrische Ventilatorleistung des dVt-Systems wird nachfolgend dem Leistungsbedarf des VSR-Systems mit konstantem Vordruck gegenübergestellt. Den systematischen Unterschied zwischen dem dVt-System und dem VSR-System stellen die unterschiedlichen erforderlichen Druckerhöhungen in Kombination mit den dazu erforderlichen Wirkungsgraden dar. Diese Einflüsse werden nachfolgend mit den nach Gl. 3.5 und Gl. 3.6 normierten Werte betrachtet:

- Die systembedingt unterschiedlichen Druckerhöhungen nach Abschnitt 3.1
- Die Wirkungsgradberechnungen nach Abschnitt 3.2

Mit den so bestimmten Leistungen wird zudem die prozentuale Einsparung als deren Differenz bezogen auf die Leistung des VSR-Systems berechnet. Dabei ist es unerheblich, ob normierte oder absolute Leistungswerte verwendet werden:

$$E_{dVt/VSR} = \frac{P_{VSR} - P_{dVt}}{P_{VSR}} = \frac{P_{0,VSR} - P_{0,dVt}}{P_{0,VSR}} \quad 3.45$$

Dieses Vorgehen zur Berechnung der normierten Leistungen zeigt Abbildung 3.11, worin u.a. die Standardrandbedingungen sowie deren Variationen aufgeführt werden:

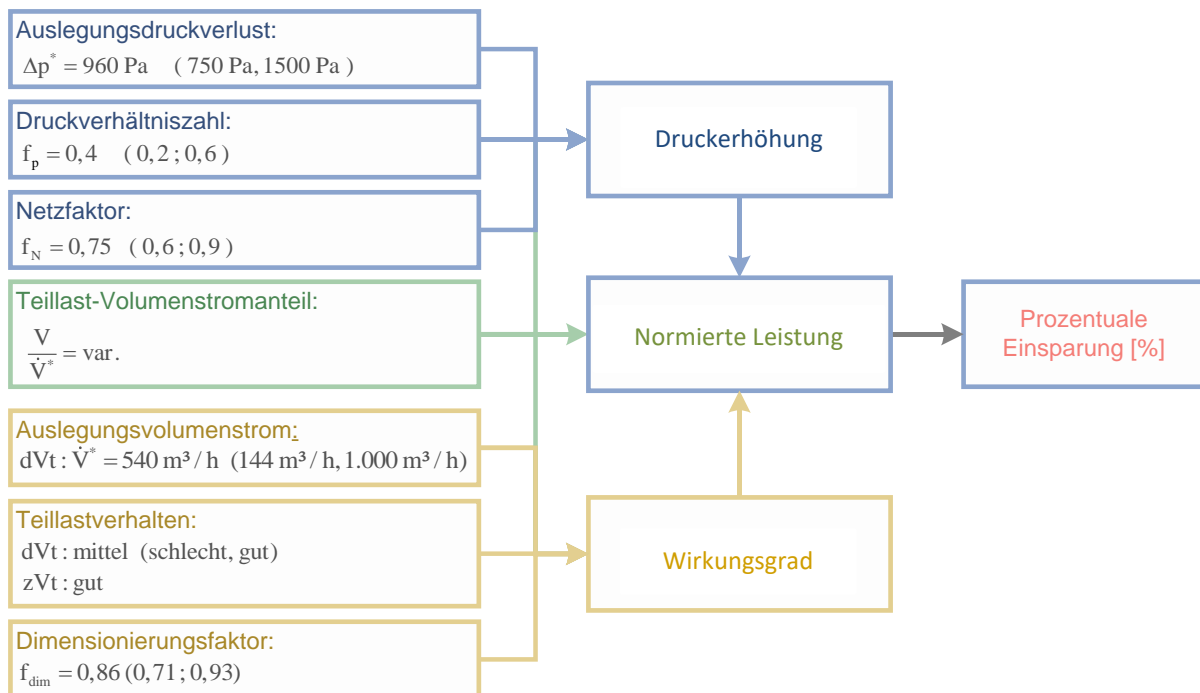


Abbildung 3.11: Schematische Darstellung des Rechengangs und der Standardrandbedingungen zur Berechnung von normierter Leistung und prozentualer Einsparung (Werte in Klammern zeigen nachfolgend durchgeführte Parametervariationen)

Die Berechnung ergibt den in Abbildung 3.12 dargestellte Verlauf der normierten Leistung:

- Das in grün dargestellte dVt-System zeigt einen Verlauf, bei dem die Leistung – ausgehend vom Auslegungsvolumenstrom – überproportional abfällt. Die Begründung für den überproportionalen Abfall liegt maßgeblich in der quadratischen Verringerung der Druckverluste.
- Beim in rot dargestellten VSR-System sinkt die elektrische Leistung mit einer geringeren Steigung als beim dVt-System, aber ebenfalls überproportional. Der benötigte konstante Vordruck führt auch bei geringen Teillast-Volumenstromanteilen zu einem erhöhten Bedarf an hydraulischer Leistung. Diese führt zu einem über den gesamten Teillast-Betriebsbereich höheren Bedarf an elektrischer Leistung als im dVt-System.

Weiterhin ist ersichtlich, dass – trotz erheblich geringeren Leistungen im Teillastbereich – die spezifische Ventilatorleistung (SFP-Wert, bei Teillast-Volumenstromanteil $\dot{V}/\dot{V}^* = 1$) von beiden Systemen nahezu gleich hoch ausfällt. Somit ist der auf den Auslegungszustand bezogene SFP-Wert kein geeigneter Maßstab zur Bewertung und zum Vergleich von Variabel-Volumenstrom-Systemen.

Die prozentuale Einsparung nach Gl. 3.45 ist in Abbildung 3.13 dargestellt. Es zeigt sich unter den genannten Randbedingungen in weiten Teilen ein nahezu linearer Anstieg der Einsparung mit abflachendem Verlauf bei geringen Teillast-Volumenstromanteilen. Dabei ist bei hohen Teillast-Volumenstromanteilen bzw. Volllast nur mit einer Einsparung von wenigen Prozent durch das dVt-System gegenüber dem VSR-System mit konstantem Vordruck zu rechnen. Unter bestimmten Umständen können sich bei hohen Teillast-Volumenstromanteilen auch Mehrverbräuche ergeben (siehe nachfolgende Parametervariationen). Mit abnehmendem Teillast-Volumenstromanteil steigt die prozentuale Einsparung dann bis auf 80%.

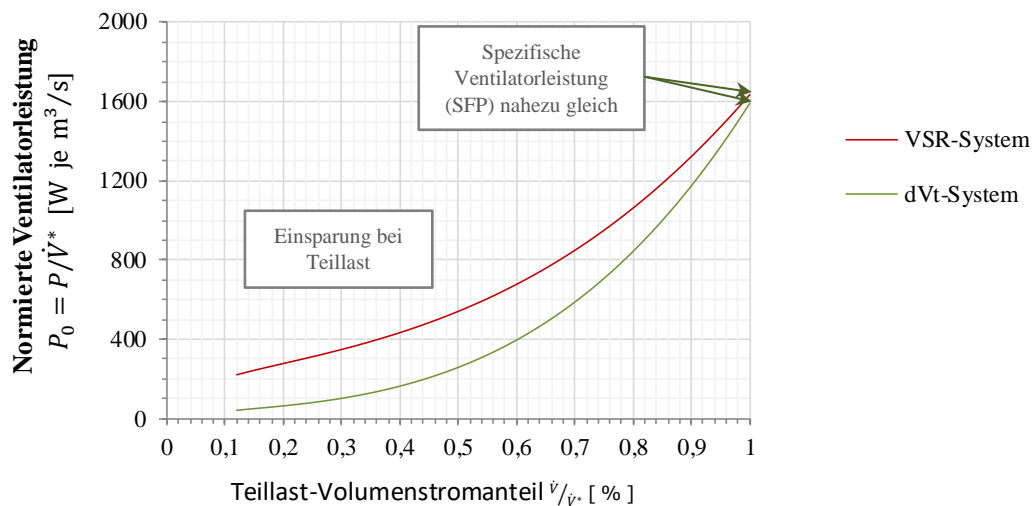


Abbildung 3.12: Normierte Ventilatorleistung von ZVS und dVt bei Teillast-Volumenströmen

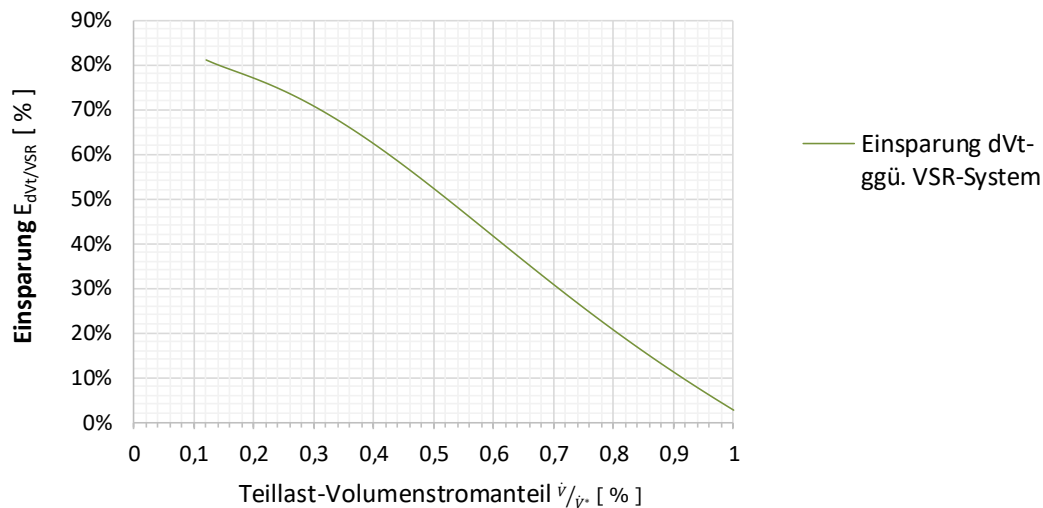


Abbildung 3.13: Prozentuale Einsparung im dVt ggü. VSR-System

Die Häufigkeit der einzelnen Teillast-Volumenstromanteile hat eine entscheidende Auswirkung auf den zur Lüftung erforderlichen Tages- und Jahresenergiebedarf und wird in Kapitel 4 für die exemplarischen Nutzungsarten mit stündlich definierten Tagesprofilen ausgewertet.

Der Einfluss und die Bedeutung der einzelnen Berechnungsgrößen wird im Zusammenhang mit der Berechnung des Jahresenergiebedarfs in Abschnitt 4.4 bewertet:

- Abschnitt 4.4.1: Einfluss des Auslegungsdruckverlustes
- Abschnitt 4.4.2: Einfluss des Netzfaktors
- Abschnitt 4.4.3: Einfluss der Druckverhältniszahl
- Abschnitt 4.4.4: Einfluss der maximalen Ventilatorwirkungsgrade
- Abschnitt 4.4.5: Einfluss einer Überdimensionierung von Ventilatoren
- Abschnitt 4.4.6: Einfluss des Druckexponenten
- Abschnitt 4.4.7: Einfluss der Betriebsdauer

3.4 Validierung der Leistungsberechnung

Das im vorliegenden Kapitel 3 beschriebene Modell zur Berechnung der elektrischen Ventilatorleistung soll nachfolgend messtechnisch validiert werden. Dazu wurde am RLT-Versuchsstand des Fachgebiets Technische Gebäudeausrüstung der Universität Kassel ein Versuchsaufbau mit folgenden Merkmalen umgesetzt (siehe Abbildung 3.14):

- Auf ein modular aufgebautes Zentralgerät mit Wärmerückgewinnung folgt ein Verteiler bzw. Sammler mit 3 Strängen zur Versorgung von drei getrennten Lufträumen mit wahlweise Umluft oder Außenluft (Testraum 1 und 2 mit im Auslegungsfall jeweils 150 m³/h und den Luftraum der Halle mit 300 m³/h).
- In jedem der Stränge sind parallel ein Variabel-Volumenstromregler und ein dezentraler Ventilator mit Absperrklappe installiert. Es somit möglich, das herkömmliche VSR-System oder 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. Der Sollwert der Abluft entspricht dabei dem Istwert der Zuluft (Master-Slave-Regelung).
- In allen Strängen und nach dem Lüftungszentralgerät sind jeweils eine Irisblende installiert, um die Druckverluste der jeweiligen Kanalabschnitte individuell anpassen zu können. Die Irisblenden sind in der vorliegenden Versuchsreihe in der Art fest eingestellt, dass eine typische Verteilung der Druckverluste im Kanalnetz erreicht wird (Druckverhältniszahl $f_p = 0,4$ und Netzfaktor $f_n = 0,75$).
- Weitere Komponenten wie ein Heiz-/Kühlregister, eine Rezirkulation der Außenluft inkl. elektrischem Nachheizregister zur Frostfreihaltung der WRG im Winterfall sowie ein Bypass zur Umgehung der Wärmerückgewinnung im Sommerfall spielen keine aktive Rolle im vorliegenden Versuchsaufbau.

In allen nachfolgend dargestellten Messreihen wurde der Sollvolumenstrom von jedem Raum über den Zeitraum von 1h kontinuierlich von 100% auf 0% abgesenkt. Dargestellt sind die sekundlich aufgezeichneten Messwerte.

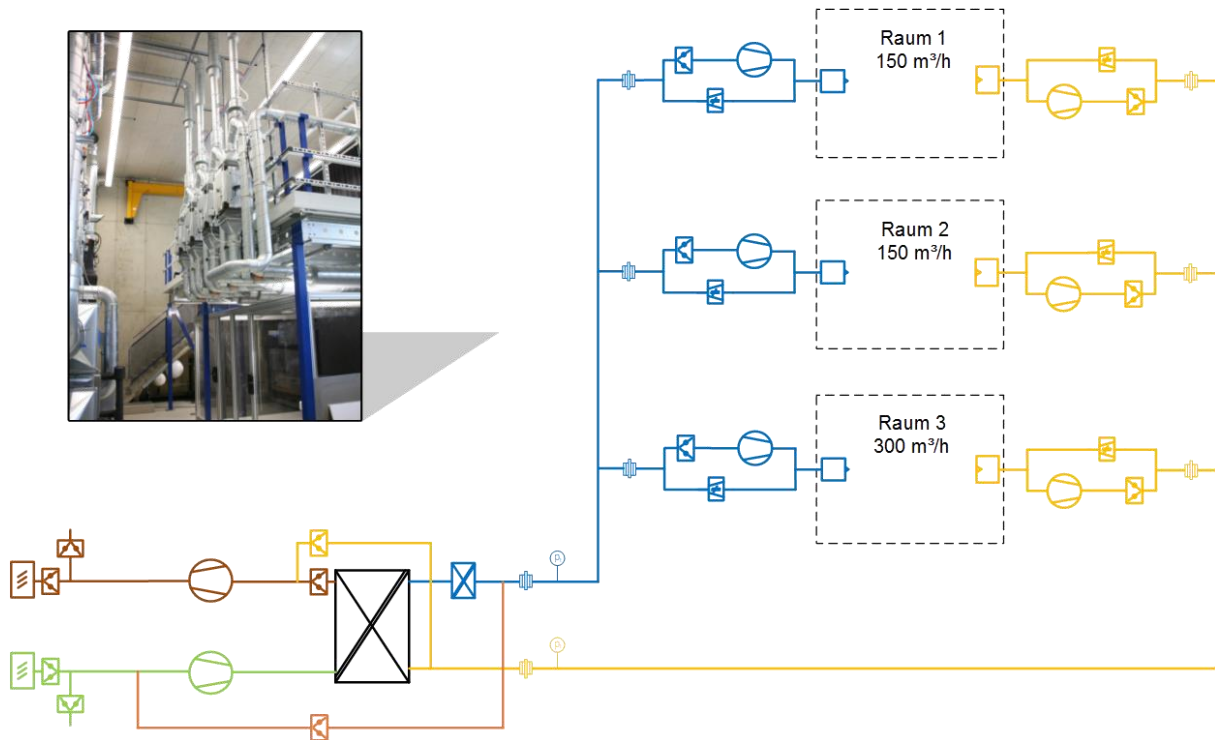


Abbildung 3.14: Schematische Darstellung und Foto des RLT-Versuchsstands des Fachgebiets Technische Gebäudeausrüstung [Alsen, Klimmt, Knissel 2016]

3.4.1 Messtechnik

Es wird folgende Messtechnik eingesetzt:

- Volumenstrommessung: Messkreuze der Fa. Schako, Typ MKA und Drucksensoren der Fa. Sensirion Typ SDP1000-L05 mit analogem 0,25 – 5 V Ausgangssignal
- Leistungsmessung: Stromzähler der Firma ABB, Modell A42 112-100 und A42 552-100 mit digitaler Modbus-Schnittstelle.

Während die Messwerte der Leistungsmessung direkt vom Zähler ausgegeben werden, muss zur Bestimmung des Volumenstroms zunächst das analoge 0,25 – 5 V Ausgangssignal des Drucksensors in die Einheit Pa umgerechnet werden und aus dem so bestimmten Druck mittels Messkreuzkonstante der Volumenstrom berechnet werden:

$$\Delta p = a \cdot U + b \tag{3.46}$$

Δp Wirkdruck des Messkreuzes [Pa]
 U Analoges Ausgangssignal des Drucksensors [V]
 a, b Lineares und konstantes Glied gemäß Kalibrierung

$$\dot{V} = k \cdot \sqrt{\Delta p} \tag{3.47}$$

\dot{V} Volumenstrommesswert [m³/h]
 Δp Wirkdruck des Messkreuzes [Pa]
 k Messkreuzkonstante gemäß Herstellerangaben

Zur Betrachtung der Messunsicherheit wird nachfolgend der Ansatz des Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetzes verwendet, wie er z.B. in der [DIN EN 16211] *Luftvolumenstrommessung in Lüftungssystemen* verwendet wird. Gemäß der Norm wird die Standardunsicherheit der Messung anhand von folgendem Ansatz bestimmt:

$$u_m = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \quad 3.48$$

u_m	Standardunsicherheit der Messung
u_1	Standardunsicherheit des Messgerätes
u_2	Standardunsicherheit des Verfahrens
u_3	Standardunsicherheit der Ablesung

Für die Berechnung nach Gl. 3.48 sollen Standardunsicherheiten mit einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von etwa 68 % verwendet werden. Sind nur die maximalen Fehlergrenzen bekannt, kann die Standardunsicherheit folgendermaßen abgeschätzt werden:

$$u_i = \frac{\text{max. Fehler}}{\sqrt{3}} \quad 3.49$$

In der abschließenden Bewertung der Messunsicherheit wird die sog. erweiterte Messunsicherheit mit einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95% für normalverteilte Standardunsicherheiten wie folgt berechnet:

$$U_m = 2 \cdot u_m \quad 3.50$$

U_m	Erweiterte Standardunsicherheit der Messung mit einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95%
u_m	Standardunsicherheit der Messung mit einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von 68%

In Anlehnung an das geschilderte Verfahren wird nun die erweiterte Messunsicherheit für die Druck- und die daraus resultierende Volumenstrommessung berechnet.

Unsicherheit der Druckmessung

- Unsicherheit des Messgeräts u_1 : Für alle Drucksensoren wurde mit einem Kalibrier-Druckmessgerät eine einheitliche Kalibrierkennlinie gemäß Gl. 3.46 erstellt. Für jeden Sensor wurde dann die maximale Abweichung vom realen Wert (laut Kalibrier-Druckmessgerät) festgestellt und dokumentiert. Dieser liegt betragsmäßig je nach Sensor bei 0,3 bis 4,5 % vom Messwert und wird für jeden Sensor i individuell $f_{u1,i}$ berücksichtigt.

$$u_1 = \frac{f_{u1,i} \cdot \Delta p}{\sqrt{3}} \quad 3.51$$

$f_{u1,i}$	Maximale prozentuale Abweichung des jeweiligen Sensors i [%]
Δp	Messwert des Drucksensors [Pa]

- Unsicherheit des Verfahrens u_2 : Für die Druckmessung ist keine grundsätzliche Unsicherheit aufgrund des Messverfahrens bekannt.

- Unsicherheit der Ablesung u_3 : Entspricht der Genauigkeit der Eingangsklemme des Messsystems und beträgt beim 0,01% des Messbereichsendwerts von 5V. Die Auswirkung auf die Druckberechnung wird entsprechend des Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetzes aus der ersten (partiellen) Ableitung und der Standardunsicherheit der Ablesung berechnet:

$$u_3 = \frac{\partial \Delta p}{\partial U} \cdot \frac{\Delta U}{\sqrt{3}} = a \cdot \frac{0,01\% \cdot 5V}{\sqrt{3}} \quad 3.52$$

$\frac{\partial \Delta p}{\partial U}$	Ableitung der Druckberechnung Gl. 3.46 nach Spannungssignal U [Pa/V]
ΔU	Maximale Abweichung des Spannungssignals [Pa]
a	Lineares Glied der Druckberechnung nach Gl. 3.46 [Pa/V]

Mit diesen Angaben kann die Standard-Messunsicherheit der Messung $u_{\Delta p, m}$ für jeden Druckmesswert nach 3.48 berechnet werden:

$$u_{\Delta p, m} = \sqrt{\left(\frac{f_{u1, i} \cdot \Delta p}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(a \cdot \frac{0,01\% \cdot 5V}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad 3.53$$

Unsicherheit der Volumenstromberechnung

- Unsicherheit des Messgeräts u_1 : Die messtechnisch erfasste Größe zur Volumenstromberechnung nach Gl. 3.47 ist der Druckmesswert mit der Standard-Messunsicherheit $u_{\Delta p, m}$. Um den Einfluss auf den Volumenstrom zu berechnen, muss wiederum die erste Ableitung nach dem Druck verwendet werden:

$$u_1 = \frac{\partial \dot{V}}{\partial \Delta p} \cdot u_{\Delta p, m} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot \Delta p^{-1/2} \cdot u_{\Delta p, m} \quad 3.54$$

$\frac{\partial \dot{V}}{\partial \Delta p}$	Ableitung der Volumenstromberechnung Gl. 3.47 nach Spannungssignal U [m³/h/Pa]
$u_{\Delta p, m}$	Standard-Messunsicherheit der Druckberechnung [Pa]
Δp	Druckmesswert zur Volumenstromberechnung [Pa]

- Unsicherheit des Verfahrens u_2 : Im Rahmen von umfangreichen Vorversuchen wurde das Messkreuz MKA (in kleinster Baugröße) mit unterschiedlichen Beruhigungsstrecken mit einem sog. Laminar Flow Element (LFE, max. Unsicherheit: 0,76 m³/h) als Referenzmessgerät verglichen. Dieses gibt aufgrund seiner laminaren Charakteristik ein lineares Wirkdrucksignal aus, bei welchem keine Unschärfen aufgrund eines etwaigen Umschwungs von turbulenter zu laminarer Strömung o.ä. zu erwarten sind. Dabei wurde anhand der Messabweichung des Messkreuzes zum LFE und der Unsicherheit in der Referenzmessung eine Standard-Messunsicherheit für das Messkreuz festgestellt, die bei geringen Wirkdrücken stark ansteigt:

$$u_2 = 0,0802 \cdot \Delta p^{-0,469} \cdot \dot{V} \quad 3.55$$

Δp	Druckmesswert zur Volumenstromberechnung [Pa]
\dot{V}	Volumenstrommesswert [m³/h]

- Unsicherheit der Ablesung u_3 : Bereits bei in der Standard-Messunsicherheit der Druckberechnung berücksichtigt.

Mit diesen Angaben kann die Standard-Messunsicherheit der Messung $u_{\dot{V},m}$ für jeden Volumenstrommesswert nach 3.47 berechnet werden:

$$u_{\dot{V},m} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot k \cdot \Delta p^{-1/2} \cdot u_{\Delta p,m}\right)^2 + \left(0,0802 \cdot \Delta p^{-0,469} \cdot \dot{V}\right)^2} \quad 3.56$$

In nachfolgenden Abbildungen wird die elektrische Leistung i.d.R. über dem summierten Volumenstrom der einzelnen Stränge $\dot{V}_{ges.Raum}$ aufgetragen (zu den Testräumen und zur Halle). Die Messunsicherheit der Gesamtsumme beträgt laut Gaußschen Fortpflanzungsgesetz:

$$u_{\dot{V}_{ges.Raum},m} = \sqrt{\left(u_{\dot{V}_{TR1},m}\right)^2 + \left(u_{\dot{V}_{TR2},m}\right)^2 + \left(u_{\dot{V}_{H},m}\right)^2} \quad 3.57$$

Abschließenden wird die erweiterte Messunsicherheit mit einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95% nach Gl. 3.50 berechnet:

$$U_{\dot{V}_{ges.Raum},m} = 2 \cdot u_{\dot{V}_{ges.Raum},m}$$

$U_{\dot{V}_{ges.Raum},m}$ Erweiterte Standardunsicherheit der über die Stränge zu den Testräumen und zur Halle summierten Volumenstrommessungen mit einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95%

$u_{\dot{V}_{ges.Raum},m}$ Standardunsicherheit mit einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von 68%

Unsicherheit der Leistungsmessung

Für die Leistungsmessung werden zwei verschiedene Stromzählertypen mit unterschiedlichen Messunsicherheiten eingesetzt:

- Zentralventilatoren: ABB A42 112-100 mit Genauigkeitsklasse 1
- Dezentrale Ventilatoren: ABB A42 552-100 mit Genauigkeitsklasse 0,5 S

Wie in Tabelle 3.6 dargestellt, haben die Stromzähler ab Strömen von 20 mA bzw. 50 mA auch bei kapazitiven oder induktiven Anteilen eine definierte Genauigkeit von mindestens 1% bezogen auf den Messwert. Bei kleineren Messwerten ist die Genauigkeit nicht weiter definiert.

Tabelle 3.6: Messunsicherheiten der eingesetzten Stromzähler nach [VDE 0418-3-11; VDE 0418-3-22]

Strom	Leistungsfaktor	A42 - 112-100 (Klasse 1)	A42 - 552-100 (Klasse 0,5 S)
ab 10 mA	1	-	1,0%
ab 20 mA		1,5%	
ab 50 mA		1,0%	0,5%
ab 20 mA	0,5 ind ... 1 ... 0,8 kap	-	1,0%
ab 50 mA		1,0%	0,6%
ab 100 mA			

Werden im dVt-System die Leistungen der einzelnen Zähler addiert, so ist die Gesamtunsicherheit entsprechend des linearen Fehlerfortpflanzungsgesetzes die Summe der einzelnen Unsicherheiten.

3.4.2 Gemessene Ventilatorleistung gegenüber Berechnung mit vollständig planerisch bestimmten Randbedingungen

Es werden nun die gemessenen Verläufe den berechneten Verläufen der Ventilatorleistung gegenübergestellt, wobei in die Berechnung nur Randbedingungen einfließen, die aufgrund von planerisch definierten Randbedingungen prinzipiell auch im Rahmen einer gründlichen Fachplanung bekannt sein können. Dies sind im Einzelnen:

- Auslegungsvolumenströme der einzelnen Stränge der Lüftungsanlage
- Druckverlustberechnung mit Kanalnetzgeometrie und bekannten Einbauten
- Ventilator Kennfeld zur Ermittlung des maximalen Wirkungsgrades bei der berechneten Netzkennlinie (gemessen bei Einbau in zugehöriger Ventilatorbox)

Im vorliegenden Fall wurde die Druckverlustberechnung anhand der mh-Software, wie in Abbildung 3.15 dargestellt, durchgeführt. Die Ventilator Kennfelder wurden von der Fa. ebmpapst für die in einem Gehäuse der Fa. Systemair eingebauten Ventilatoren der Baureihe Radical ermittelt. Die so ermittelten Randbedingungen sind in nachfolgender Tabelle 3.7 aufgeführt.

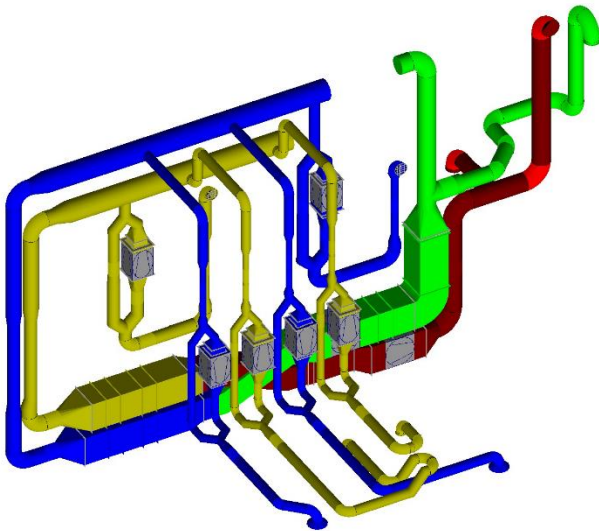


Abbildung 3.15: Modell zur Druckverlustberechnung des RLT-Versuchsstandes

Tabelle 3.7: Planerisch bestimmte Randbedingungen zur Leistungsberechnung

		TR1 (dVt)	TR2 (dVt)	Halle (dVt)	zVt (dVt)	zVt (VSR)
Zuluft	\dot{V}^*	150	150	300	600	600
	Δp^*	189	188	120	237	426
	f_{dim}	0,94	0,93	0,69	0,77	0,96
	η_{max}	34,1%	34,1%	39,4%	52,4%	50,3%
	Teillast	schlecht	schlecht	mittel	gut	gut
Abluft	\dot{V}^*	150	150	300	600	600
	Δp^*	159	118	91	235	394
	f_{dim}	0,89	0,82	0,64	0,76	0,93
	η_{max}	33,8%	32,4%	36,5%	52,4%	50,9%
	Teillast	schlecht	schlecht	mittel	gut	gut

Anhand dieser Angaben ist nun die Leistungsberechnung nach Kapitel 3 möglich:

- Für das Modell der Druckerhöhung müssen zunächst Druckverhältniszahl und Netzfaktor nach Gl. 3.15 und 3.23 bestimmt werden. Anschließend kann die in den jeweiligen Kanalabschnitten erforderliche Druckerhöhung der Ventilatoren für das VSR-System nach Gl. 3.17 und 3.18 und für das dVt-System nach Gl. 3.25 und 3.26 berechnet werden.
- Die Teillast-Wirkungsgrade werden nach den Gleichungen in 3.40 bis 3.44 bestimmt. Da abweichend vom dargestellten Rechenverfahren unterschiedliche dezentrale Ventilatoren mit entsprechend unterschiedlichen Wirkungsgraden eingesetzt werden, wird hier eine volumenstromgewichtete Mittelwertbildung vorgenommen.
- Die Ventilatorleistung kann dann für beide Systeme nach Gl. 3.3 und 3.4 berechnet werden.

Das Ergebnis der Berechnung ist zusammen mit den am RLT-Versuchsstand aufgezeichneten Messdaten in Abbildung 3.16 (Zuluft) und Abbildung 3.17 (Abluft) dargestellt.

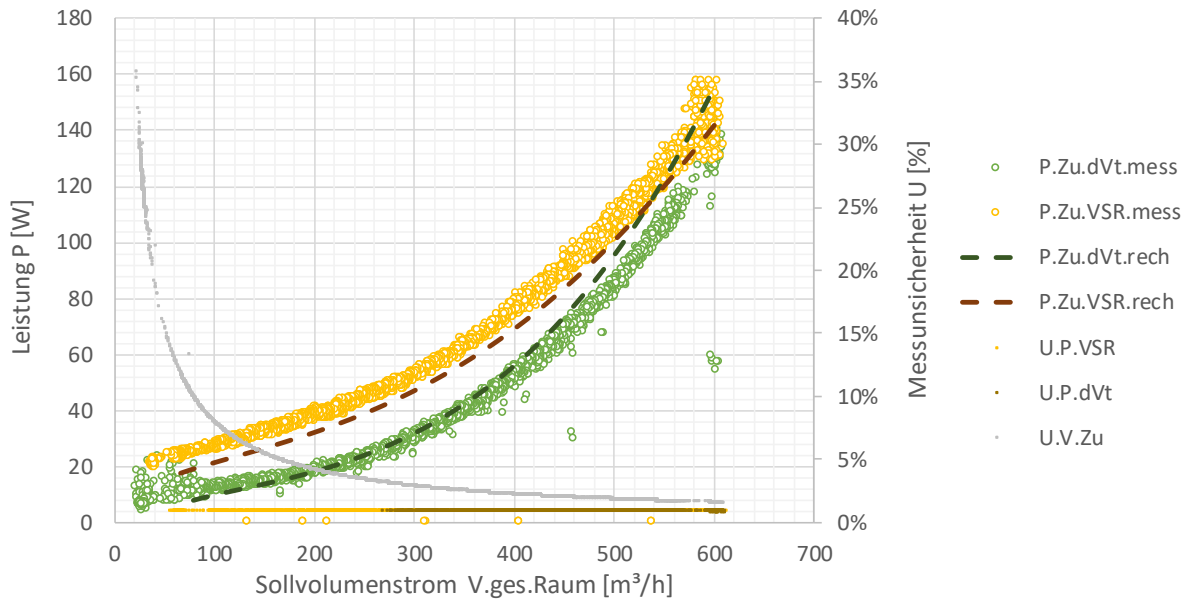


Abbildung 3.16: Vergleich von gemessener und berechneter Ventilatorleistung (Zuluft) für VSR und dVt-System bei planerisch bestimmten Berechnungsrandbedingungen [Alsen, Klimmt, Knissel 2016]

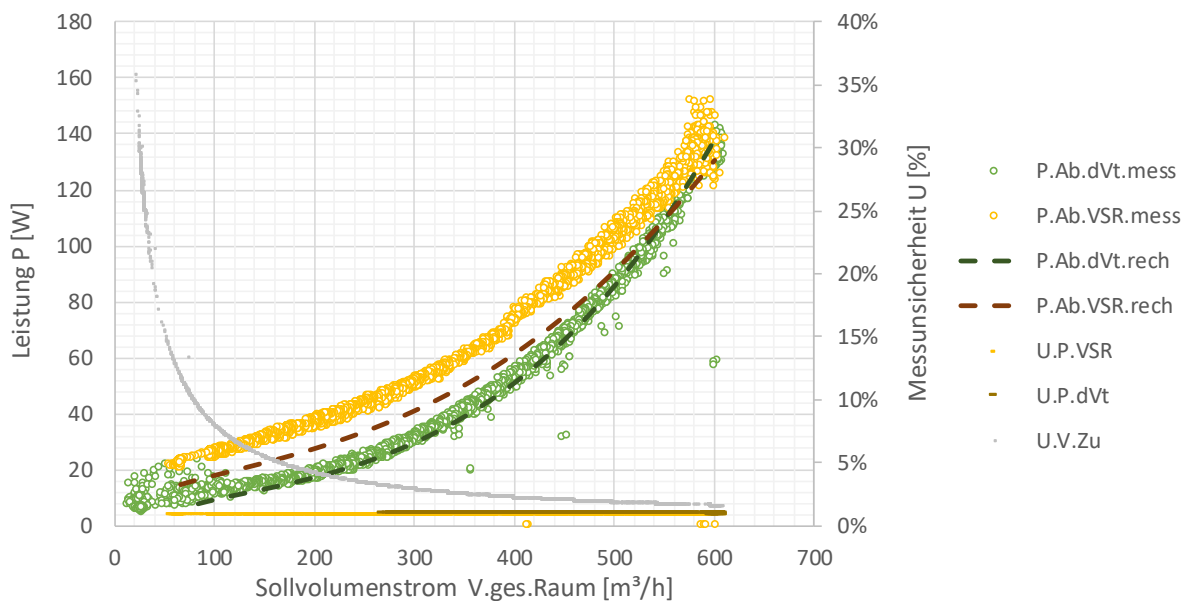


Abbildung 3.17: Vergleich von gemessener und berechneter Ventilatorleistung (Abluft) für VSR und dVt-System bei planerisch bestimmten Berechnungsrandbedingungen

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 jedoch 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. 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. Diese Feststellung ist für Systementscheidungen für oder gegen eins der Systeme von großer Bedeutung.

Über diese Feststellungen hinaus fallen im Detail folgende Punkte auf:

- Im VSR-System ist die berechnete Leistung etwas geringer als berechnet (Zuluft und Abluft). Die Kurven sind insgesamt parallel verschoben.
- Im dVt-System (Zuluft) ist die gemessene Leistung v.a. bei hohen Volumenströmen geringer als berechnet und gleicht sich dann an.
- Die Messunsicherheit ist in Bezug auf den Volumenstrom ab 160 m³/h kleiner als 5% und ist damit keine plausible Erklärung für die Abweichung. Die Messungenauigkeit der Stromzähler liegt (im dargestellten Bereich) bei ca. 1% und kann vernachlässigt werden.
- Die Punktwolke im Volumenstrombereich kleiner 100 m³/h ist auf ein taktendes Verhalten der dezentralen Ventilatoren zurückzuführen und führt im Mittel zu geringeren minimalen Volumenströmen als berechnet.
- Die einzelnen „Ausreißer“ sind auf Zählerausfälle zurückzuführen und bedürfen keiner weiteren Betrachtung.

Offenbar liegen im realen Aufbau des RLT-Versuchsstands zum Teil spezielle Randbedingungen vor, die zu den erstgenannten Abweichungen führen. Diese werden im nächsten Abschnitt genauer eingegrenzt, indem ein Teil der Berechnungsrandbedingungen mit den realen Randbedingungen (Auslegungsdruckverluste und real geförderte Volumenströme) abgeglichen werden.

3.4.3 Berücksichtigung von Leckagevolumenstrom und realen Auslegungsdruckverlusten

Die der Druckverlustberechnung entstammenden Auslegungsdruckverluste weichen von den gemessenen Druckerhöhungen über den Ventilatoren teils erheblich ab (siehe Tabelle 3.8). Die berechneten Werte sind alle größer als die gemessenen Werte, was aufgrund der bei der Planung zur Verfügung stehenden Eingangsdaten zur Druckverlustberechnung zur Auslegung von Ventilatoren nur bedingt überrascht, da vermutlich in der Praxis tendenziell zu hohe Druckverluste angegeben werden, um Unterdimensionierungen von Ventilatoren und daraus entstehende Folgekosten zu vermeiden.

Werden in der Leistungsberechnung lediglich die Auslegungsdruckerhöhungen den realen Bedingungen angepasst, so liegt die berechnete Leistung in allen Fällen deutlich unterhalb von den gemessenen Werten. Es ist daher zu erwarten, dass eine weitere Randbedingung deutlich von der Realität abweicht.

Tabelle 3.8: Vergleich von gemessenen mit den planerisch bestimmten Auslegungsdruckverlusten

		TR1 (dVt)	TR2 (dVt)	Halle (dVt)	zVt (dVt)	zVt (VSR)
Zuluft	$\Delta p_{\text{rechen}}^*$	189	188	120	237	426
	Δp_{mess}^*	132	101	84	201	369
Abluft	$\Delta p_{\text{rechen}}^*$	159	118	91	235	394
	Δp_{mess}^*	134	102	85	201	363

Noch während der Inbetriebnahme des RLT-Versuchsstands wurde deutlich, dass der modulare Aufbau des Zentralgerätes zwar Vorteile hinsichtlich der Installation von individuellen Messstellen und z.B. den für den Versuchsstand hergestellten Ventilatorboxen 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.

Für energetische Berechnungen ist es bei Zuluft-Kanalnetzen entscheidend, die Leckage im unter Überdruck stehenden Abschnitt einzubeziehen (energetisch relevanter Bereich). Leckagen führen dort zu Exfiltration, sodass ein Teil der benötigten Luft nicht mehr im Raum ankommt und der Ventilator entsprechend mehr Luft fördern muss, um die Leckagen auszugleichen. Die unter Unterdruck stehenden Abschnitte führen zu Infiltration, die aus hygienischer Sicht bedenklich ist, aber zu keinem höheren Energiebedarf führt. In Abluft-Kanalnetzen sind dagegen die Unterdruck-Kanalabschnitte für die energetische Betrachtung von Bedeutung.

Um für die Zuluft die energetisch relevanten Leckagevolumenströme (Überdruckbereiche) am RLT-Versuchsstand zu messen, müssen für dVt- und VSR-System unterschiedliche Bilanzen gebildet werden, weil sich die Überdruckbereiche unterscheiden:

$$\dot{V}_{L,VSR} = \dot{V}_{zVt} - \dot{V}_{ges.Raum} \quad 3.58$$

$$\dot{V}_{L,dVt} = \dot{V}_{zVt} - \dot{V}_{Kanal} \quad 3.59$$

$\dot{V}_{L,VSR}$ Erfassbarer Exfiltrations-Leckagevolumenstrom im VSR-System [m³/h]

$\dot{V}_{L,dVt}$ Erfassbarer Exfiltrations-Leckagevolumenstrom im dVt-System [m³/h]

\dot{V}_{zVt} Gesamter vom Zentralventilator geförderter Volumenstrom [m³/h]

\dot{V}_{Kanal} Gemeinsamer Volumenstrom nahe am Drucksensor zur 0 Pa – Regelung des Zentralventilators [m³/h]

$\dot{V}_{ges.Raum}$ Summierter Volumenstrom, der an der jeweils letzten Messstelle vor dem Luftdurchlass in die Testräume und die Halle gemessen wird [m³/h]

Der vom Ventilator geförderte Volumenstrom kann mit einer stationären Druckentnahmestelle an der saugseitig installierten Einlaufdüse des Ventilators gemessen werden. Der gemessene Wirkdruck kann dann mit dem gleichen Verfahren wie bei Messkreuzen anhand von Gl. 3.47 in den Volumenstrom umgerechnet werden.

Abbildung 3.18 zeigt den Verlauf absoluten (linke Achse) und des auf den Sollvolumenstrom bezogenen (rechte Achse) Leckagevolumenstroms im dVt- und im VSR-System.

- Im dVt-System steigt der Leckagevolumenstrom nahezu proportional mit dem Sollvolumenstrom an. Der Leckageanteil liegt konstant bei ca. 20%.
- Im VSR-System steigt der Leckagevolumenstrom ebenfalls näherungsweise proportional mit dem Sollvolumenstrom an, weist jedoch über den gesamten Bereich einen Sockelbetrag auf, welcher auf den konstanten Vordruck zurückzuführen ist. Die Leckagevolumenströme sind dadurch deutlich höher als beim dVt-System und übersteigen bei geringen Soll-Volumenströmen sogar den eigentlichen Sollwert (Leckageanteil > 100%).

Die Unsicherheit bei der Volumenstrommessung an der Einlaufdüse ist nicht dokumentiert. Der Abgleich des Volumenstrommesswertes mit dem Messwert einer Netzmessung mittels Hitzdrahtanemometer zeigt eine gute Übereinstimmung. Aufgrund der Ähnlichkeit zur Volumenstrombestimmung mittels Messkreuzen kann grob angenommen werden, dass diese eine ähnliche Unsicherheit aufgrund des Messverfahrens aufweisen (siehe Gl. 3.55). Die mit dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz ermittelte erweiterte Messunsicherheit für \dot{V}_L liegt dann beim dVt-System bei ca. 19 – 25 m³/h und beim VSR-System bei 8 – 18 m³/h. Bezogen auf die v.a. im dVt-System geringen Leckagevolumenströmen ist die relative Messunsicherheit entsprechend groß.

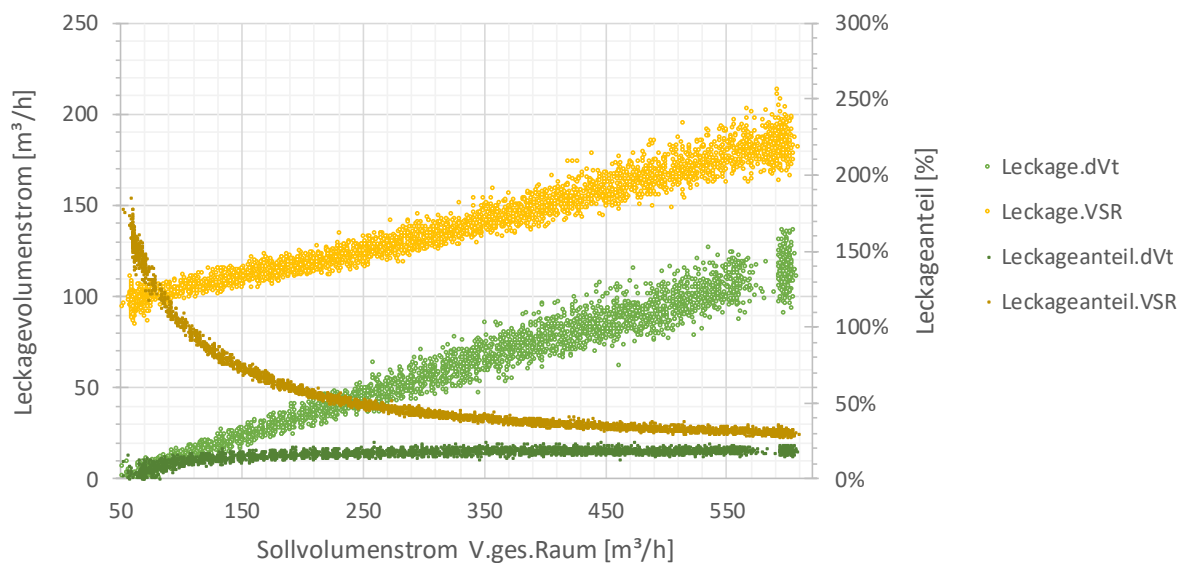


Abbildung 3.18: Verlauf des absoluten (linke Achse) und des auf den Sollvolumenstrom (rechte Achse) bezogenen Leckagevolumenstroms im dVt- und im VSR-System (Zuluft) [Alsen, Klimmt, Knissel 2016]

Neben den real auftretenden Auslegungsdruckverlusten soll nun auch der real auftretende Leckage-Volumenstrom in die Leistungsberechnung einfließen. Dabei stellt sich die Frage, welchen Einfluss eine Steigerung des Volumenstroms auf die Ventilatorleistung hat:

- Sollte ein wesentlicher Teil der Leckage im *Verteilnetz* stattfinden, muss durch dieses und durch die Lüftungszentrale nicht nur der zu fördernde Sollvolumenstrom, sondern auch der nutzlos entweichende Leckagevolumenstrom gefördert werden.

Im ungünstigsten Fall (bei Leckage nahe der raumseitigen Luftdurchlässe) steigen die Druckverluste im gesamten Netz dann quadratisch, was sich auch in der Leistungsaufnahme entsprechend widerspiegelt. Da zudem der Volumenstrom linear in die Leistungsberechnung einfließt, ist in einem solchen Extremfall mit einer Steigerung der Ventilatorleistung mit der dritten Potenz zu rechnen:

$$P_{ges,max} = P^* \cdot \left(\frac{\dot{V}^* + \dot{V}_L}{\dot{V}^*} \right)^3 \quad 3.60$$

$P_{ges,max}$	Gesamtleistung eines Ventilators bei gleichmäßiger Verteilung der Leckagevolumenströme nahe der raumseitigen Luftdurchlässe (maximale Erhöhung) [W]
P^*	Leistung eines Ventilators bei Auslegungsbedingung ohne Berücksichtigung des Leckagevolumenstroms [W]
\dot{V}^*	Auslegungsvolumenstrom [m ³ /h]
\dot{V}_L	Leckagevolumenstrom [m ³ /h]

- Findet die Leckage direkt am Ventilator statt, bleiben alle nachgelagerten Druckverluste unverändert und die Ventilatorleistung steigt nur linear durch die Erhöhung des Volumenstroms:

$$P_{ges,min} = P^* \cdot \frac{\dot{V}^* + \dot{V}_L}{\dot{V}^*} \quad 3.61$$

$P_{ges,min}$	Gesamtleistung eines Ventilators bei Leckagen am oder nahe des Ventilators (minimale Erhöhung) [W]
---------------	--

Die potenzielle Erhöhung durch außen- und fortluftseitig ansteigende Druckverluste wird bei diesem Rechenansatz vernachlässigt.

HINWEIS: In beiden Ansätzen hat der veränderte Betriebspunkt zudem Auswirkungen auf den Wirkungsgrad des jeweiligen Ventilators.

Im vorliegenden Fall ist bekannt, dass die wesentlichen Leckagestellen in der Anbindung der Zentralventilatoren und insbesondere im Heizregister – also nahe des Zuluft-Zentralventilators – verortet sind. Es wird daher zur Berechnung der Ventilatorleistung unter Berücksichtigung der real auftretenden Leckagevolumenströme der Ansatz nach Gl. 3.61 gewählt.

Das Ergebnis der Berechnung ist in Abbildung 3.19 dargestellt. Es zeigt sich, dass die berechneten Verläufe nun nahezu bestmöglich die Punkteschar der gemessenen Werte überlagern. Das Rechenverfahren erzeugt also eine hohe Genauigkeit, wenn die Auslegungsdruckverluste bekannt sind und entweder wenig Leckagen auftreten oder diese wie im vorliegenden Fall quantifiziert werden können.

Für die Praxis sollte aus den Erfahrungen am Teststand bezüglich der Dichtheit von Zentralgeräten die Erkenntnis gewonnen werden, dass möglichst nur solche Geräte verwendet werden, bei denen vom Hersteller für den gesamten Aufbau eine definierte Dichtheitsklasse z.B. nach [DIN EN 1886] garantiert werden kann.

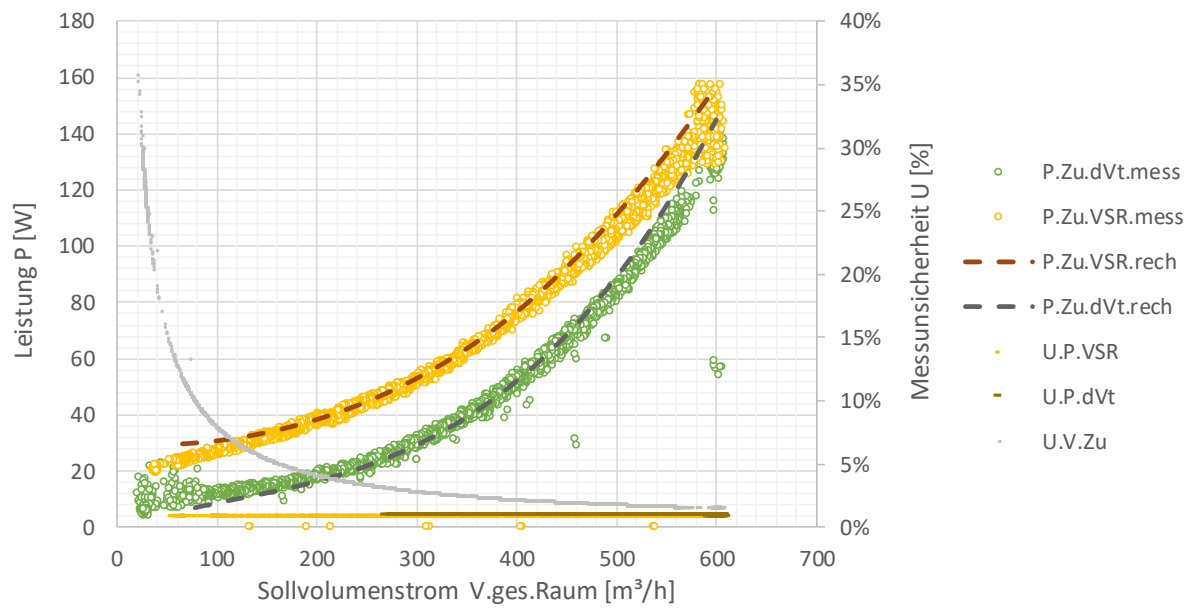


Abbildung 3.19: Vergleich von gemessener und berechneter Ventilatorleistung (Zuluft) für VSR und dVt-System bei Berücksichtigung des real auftretenden Auslegungs-Druckverlusts und der Leckagevolumenströme [Alsen, Klimmt, Knissel 2016]

4 Energetische Bewertung bei nutzungsbezogener Betrachtung

End- und Primärenergiebedarf der betrachteten Lüftungssysteme stellen die zentralen Bewertungsgrößen für die energetische Bewertung dar. Im vorliegenden Kapitel wird eine nutzungsartenbezogene Bewertung durchgeführt, d.h. eine Bewertung der Lüftungssysteme je nach anwendungsfallbezogener Nutzungsart.

Da sich eine Energiemenge grundsätzlich aus dem Integral der Leistung (Kapitel 3) über die Zeit berechnet, ist zur energetischen Bewertung zunächst die Berücksichtigung des Faktors Zeit zu klären. Aufgrund des nutzungsbezogenen Ansatzes muss dies vor dem Hintergrund der zu untersuchenden Nutzungsarten geschehen.

Da im Allgemeinen keine kontinuierlichen Lastprofile für die energetische Bilanzierung vorliegen, wird anstelle eines Integrals typischerweise mit dem Produkt einer mittleren Leistung über einen zu definierenden Zeitraum gerechnet. Je kleiner dann der Mittelungszeitraum des Lastprofils ist, d.h. je höher die Teillastzustände zeitlich aufgelöst sind, umso mehr nähert sich das Berechnungsergebnis der Realität an.

Nachfolgend werden zunächst der Berechnungsansatz mit Teillastzuständen nach DIN V 18559 diskutiert, welche für die bedarfsabhängige Lüftung verwendet werden (Abschnitt 4.1). Wegen der nichtlinearen Berechnung der elektrischen Ventilatorleistung erscheinen die im Rahmen der Vornorm verwendeten Mittelungszeiträume über die gesamte Betriebszeit als zu groß, was im weiteren Verlauf auch detailliert dargestellt wird (Abschnitt 4.5). Es werden daher zunächst stündliche Tagesprofile definiert (Abschnitt 4.2), die sich weitestgehend an den von der DIN V 18599-10 vorgegebenen Mittelwerten orientieren. Dadurch wird eine bestmögliche Vergleichbarkeit mit sonstigen (die energetische Bilanzierung von Lüftungssystemen betreffenden) Forschungsarbeiten erreicht.

Auf dieser Basis kann zunächst die endenergetische und anschließend – unter Berücksichtigung des thermischen Energiebedarfs zur Konditionierung der Außenluft und sonstigen elektrischen Verbrauchern mit konstantem Leistungsbedarf – die primärenergetische Bewertung der Lüftungssysteme durchgeführt werden (Abschnitt 4.4 bis 4.8). Die energetische Bewertung des dVt-Systems umfasst einen Vergleich mit dem Energiebedarf

- des Konstant-Volumenstrom-Systems,
- des Variabel-Volumenstrom-Systems mit Variabel-Volumenstromreglern und konstantem Vordruck (VSR-System) und
- des Systems mit dezentralen, in die Außenwand integrierten Ventilatoren (deAL-System)

jeweils für eine Auswahl an typischen Nutzungsarten bei Standardrandbedingungen. Zudem wird eine Variation der Standardrandbedingungen für den direkten Vergleich von dVt- und VSR-System durchgeführt.

4.1 Mittlerer Außenluftvolumenstrom nach DIN V 18599

Obwohl in Teil 3 der DIN V 18599 vorgegeben wird, dass bei einer nutzungsabhängigen Regelung des Volumenstroms der Energiebedarf der Luftförderung aufgrund der Nichtlinearität als Summe aus sämtlichen Teillastzuständen berechnet werden muss, wird in Teil 7 der Norm ein mittlerer Außenluftvolumenstrom bei bedarfsabhängiger Regelung definiert. Dies ist ein grundsätzliches Problem im Rechenansatz und führt in einigen Fällen, wie nachfolgend beschrieben wird, zu einer deutlichen Ungenauigkeit.

Zunächst soll die Berechnung des mittleren Außenluftvolumenstroms bei bedarfsabhängiger Lüftung nach DIN V 18599-7 verdeutlicht werden. Grundsätzlich setzt sich der mittlere Außenluftvolumenstrom aus zwei Anteilen zusammen:

- Zum einen wurde in Anlehnung an die DIN EN 15251 ein gebäudeabhängiger Mindestaußenluftvolumenstrom $\dot{V}_{A,Geb}$ für „die Kategorie II (nicht [sic] schadstoffarmes Gebäude)“ definiert. „Dieser ist unabhängig von der Steuerung und Regelung während der Nutzungszeit sicherzustellen.“ [DIN V 18599-7, S. 31].
HINWEIS: Tatsächlich orientieren sich die tabellierten Werte von $\dot{V}_{A,Geb}$ zwar an der die Kategorie II, jedoch für schadstoffarme Gebäude.
- Zum anderen gibt es mit der Differenz zwischen Mindestaußenluftvolumenstrom \dot{V}_A und $\dot{V}_{A,Geb}$ einen personenabhängigen Anteil. „Dieser kann in Abhängigkeit des Regelkonzeptes verringert werden“ [DIN V 18599-7, S. 31].

Es wird somit eine Regelstrategie vorgegeben, die während der Nutzungszeit immer eine Grundlüftung zur Abführung von Gebäudelasten sicherstellt und dann bei bedarfsabhängiger Regelung den personenabhängigen Anteil verringert. Wie sehr der personenabhängige Anteil verringert werden darf, hängt vom Teilbetriebsfaktor F_{RLT} und der relativen Abwesenheit c_{RLT} ab, die je nach Regelstrategie angesetzt werden dürfen oder nicht.

Der mittlere Außenluftvolumenstrom bei bedarfsabhängiger Lüftung berechnet sich wie folgt:

$$\dot{V}_{dc} = \dot{V}_{A,Geb} + F_{RLT} \cdot (1 - c_{RLT}) (\dot{V}_A - \dot{V}_{A,Geb}) \quad 4.1$$

\dot{V}_{dc}	mittlerer Außenluftvolumenstrom bei bedarfsabhängiger Lüftung
\dot{V}_A	Mindestaußenluftvolumenstrom je m ²
$\dot{V}_{A,Geb}$	gebäudeabhängiger Anteil des Mindestaußenluftvolumenstroms je m ²
F_{RLT}	Teilbetriebsfaktor, berücksichtigt Präsenz
c_{RLT}	relative Abwesenheit, berücksichtigt Luftqualität

Mit dem so berechneten mittleren Volumenstrom kann anhand von Gl. 3.3 und einem als konstant anzusetzenden Wirkungsgrad die mittlere Ventilatorleistung bei bedarfsabhängiger Lüftung nach [DIN V 18599-3] berechnet werden.

Der Teilbetriebsfaktor gibt einen Anteil innerhalb der Betriebszeit vor, in dem *keine Personen anwesend* sind und somit nur der gebäudeabhängige Mindestaußenluftvolumenstrom gefördert werden muss. Entsprechend darf F_{RLT} nach [DIN V 18599-7, Tabelle 11] bei einer raumweisen manuellen oder zeitabhängigen Steuerung, sowie bei Präsenzmeldern, Personenzählern oder Gassensoren je nach Nutzung unterschiedlich hoch angesetzt werden. Wenn keine entsprechende Regelung stattfindet, ist $F_{RLT} = 1$. Die relative Abwesenheit c_{RLT} reduziert im Mittel den personenabhängigen Anteil $\dot{V}_A - \dot{V}_{A,Geb}$ bei *Personenanwesenheit*. Dieser je

nach Nutzung unterschiedlich hohe Anteil darf nur bei Regelung über Personenzähler oder Gassensoren angesetzt werden und ist sonst 0.

In der Definition der Nutzungszeit wurde eine Forderung der DIN EN 13779 und DIN EN 15251 bezüglich der Belüftung außerhalb der Nutzungszeit berücksichtigt. So wird in [DIN EN 13779, S. 20] gefordert: „Die Hauptoptionen für eine Belüftung außerhalb der Belegungszeit sind:

- Grundluftvolumenstrom während der gesamten belegungsfreien Zeit [...];
- Beginn der Lüftung bereits vor der Belegung;
- Kurzzeitiger Betrieb der Lüftungsanlage während der belegungsfreien Zeit.“

In der Bewertung nach DIN V 18599 wurde ein Rechenansatz in Anlehnung an die o.g. zweite Option nach DIN EN 13779 gewählt. So wird für die RLT-Betriebszeit „gegenüber der Nutzungszeit ein zweistündiger Vorlauf angenommen; Ausnahmen bilden die Profile Nr. 22.1, 22.2 und 22.3 [Gewerbliche und industrielle Hallen] mit nur einer Stunde Vorlauf.“ [DIN V 18599-10; S. 19]

Vorteile des Verfahrens der DIN V 18599 zur Bestimmung des mittleren Volumenstroms bei bedarfsabhängiger Lüftung sind:

- + Gute Übereinstimmung mit der von der DIN EN 15251 implizierten Vorgabe, dass es Gebäudelasten gibt, die unabhängig von der Anzahl der anwesenden Personen abgeführt werden müssen.
- + Berücksichtigung der Forderung aus DIN EN 13779 und DIN EN 15251, dass ein Betrieb der Lüftungsanlage außerhalb der Nutzungszeit stattfinden sollte.
- + Unterschiedliche Bedarfswerte für raumweise Regelung über Gassensoren oder Personenzähler bzw. über raumweise an/aus-Regelung.
- + Es existiert eine große Auswahl an typischen Nutzungsprofilen, welche normativ anerkannt sind.

Die Faktoren der bedarfsabhängigen Lüftung F_{RLT} und c_{RLT} und die Verwendung dieser im Rechengang soll nachfolgend anhand des Beispiels eines Sitzungs-, Besprechungs- oder Seminarraums mit folgenden Randbedingungen nach [DIN V 18599-10] verdeutlicht werden.:

- RLT-Betriebszeit: von 05:00 Uhr bis 18:00 Uhr
- $c_{RLT} = 0,5$, d.h. bei Personenbelegung im Mittel nur der halbe Volumenstrom
- $F_{RLT} = 0,5$, d.h. an 6,5h keine Personen anwesend

Mit diesen Angaben kann ein Nutzungsprofil (siehe Abbildung 4.1) nachgebildet werden, wobei die Zeitpunkte der Belegung frei gewählt sind. Dort findet während der gesamten Betriebszeit die Lüftung des gebäudeabhängigen Anteils und zusätzlich von 8:30 Uhr bis 12:00 Uhr und von 14:00 bis 17:00 Uhr aufgrund der Personenbelegung und der Regelung über Gassensoren eine Lüftung mit dem mittleren Volumenstrom bei Personenanwesenheit statt.

Die Darstellung in Abbildung 4.1 ist jedoch rein informativ, da nach [DIN V 18599-7] bzw. nach Gl. 4.1 ein mittlerer Volumenstrom während der RLT-Betriebszeit und damit die mittlere Leistung bei bedarfsabhängiger Lüftung berechnet wird. Die so in drei Stufen mögliche rechnerische Abbildung der Teillastzustände (gebäudeabhängige Lüftung, Volumenstrom bei Verwendung von Gassensoren und Nennvolumenstrom bei Verwendung von Präsenzmeldern etc.) geht durch die Mittelung abhanden.

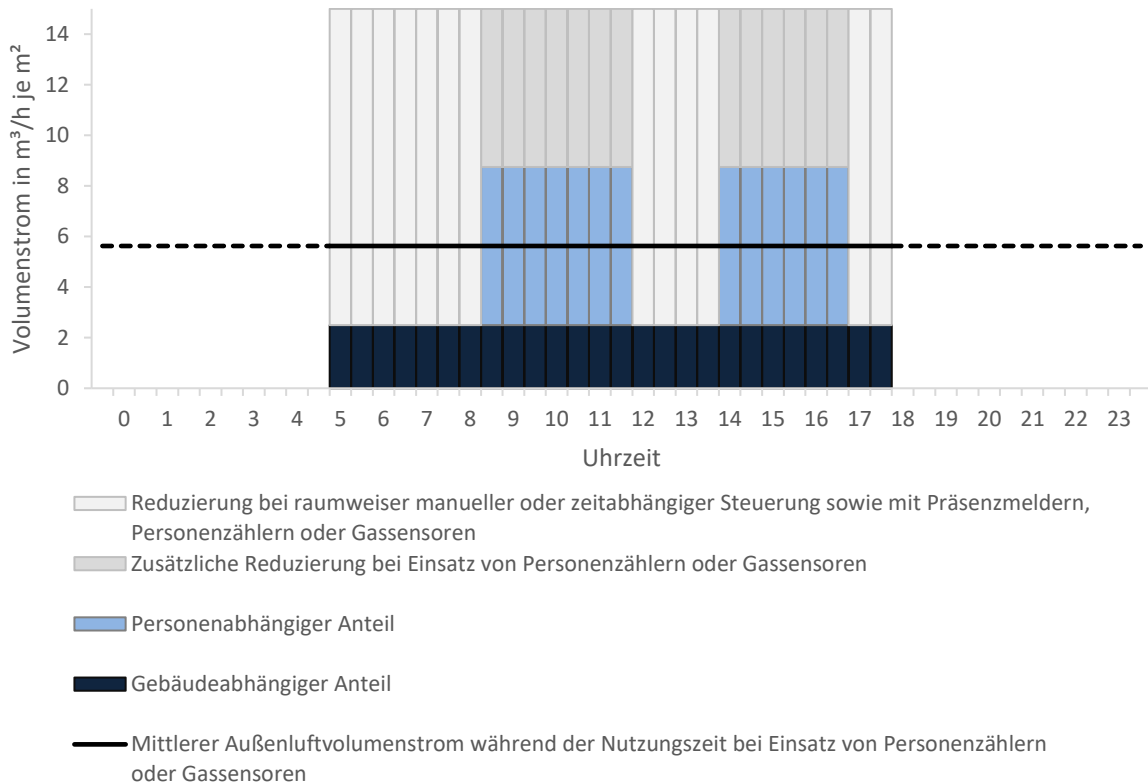


Abbildung 4.1: Berechnung des mittleren Außenluftvolumenstroms eines Sitzungs-, Besprechungs- oder Seminarraums nach DIN 18599-7

4.2 Nutzungsabhängige Tagesprofile mit stündlicher Auflösung

Die Ventilatorleistung soll nachfolgend, wie in Teil 3 der DIN V 18599 vorgesehen, für jeden Teillastzustand einzeln berechnet werden. Dazu wird ein Verfahren mit einem stündlichen Tagesprofil dargestellt, welches auf den Randbedingungen der DIN V 18599-10 (Mindestaußenluftvolumenstrom, gebäudeabhängiger Anteil des Mindestaußenluftvolumenstroms, Teilbetriebsfaktor, relative Abwesenheit, Nutzungsdauer) aufbaut.

Es werden Tagesprofile für diejenigen Nutzungen erstellt, für die im Referenzgebäude der Energieeinsparverordnung eine Bedarfsregelung mit VSR und konstantem Vordruck vorgesehen ist. Es handelt sich dabei um Nutzungen mit einem Zuluftvolumenstrom von mehr als 9 m³/h je m²_{NGF}. Bei diesen besteht bei Einbau oder Erneuerung die Pflicht, die Anlagen mit Einrichtungen „zur selbsttätigen Regelung der Volumenströme in Abhängigkeit von den thermischen und stofflichen Lasten oder zur Einstellung der Volumenströme in Abhängigkeit von der Zeit“ auszustatten, soweit der Gesundheits- und Arbeitsschutz es erlaubt und Laständerungen messtechnisch oder hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs erfassbar sind (s. EnEV 2014, §15, Abs. 3). Zusätzlich werden Büronutzungen als mögliches Anwendungsgebiet betrachtet. Es werden keine Nutzungsarten des Gesundheitswesens betrachtet, die ggf. in den Anwendungsbereich der [DIN 1946-4] fallen.

Die Tagesprofile werden in mehreren aufeinander aufbauenden Schritten erstellt.

- Zunächst werden stündliche Anwesenheitsprofile in Anlehnung an die [SIA 2024] erstellt, in denen der Anteil der Personen gegenüber der Vollbelegung für jede Nutzungsstunde angegeben wird. Bei der Erstellung der Nutzungsprofile wird darauf geachtet, dass die Nutzungszeiten und die jeweilige Personenabwesenheit während der Nutzungszeit (berechnet über F_{RLT}) mit den Angaben der DIN V 18599-10 übereinstimmen, wobei (wenn nötig) Rundungen auf volle Stunden vorgenommen werden.
- Diese Anwesenheitsprofile stellen noch nicht den eigentlichen Lüftungsbedarf dar, weil z.B. noch keine Aussage über die benötigte Lüftung bei Personenabwesenheit enthalten ist. Im nächsten Schritt werden daher Bedarfsprofile erstellt, die den Lüftungsbedarf der betrachteten Zone im Tagesverlauf charakterisieren. Dieser Lüftungsbedarf entspricht im Tagesmittel dem mittleren Außenluftvolumenstrom bei bedarfsabhängiger Lüftung der DIN V 18599-7 gemäß Gl. 4.1.
- Abschließend wird eine aus technologischer Sicht notwendige Begrenzung der Mindest-Teillastvolumenstromanteils berücksichtigt. Sowohl Variabel-Volumenstromregler als auch Ventilatoren haben einen nach unten begrenzten Regelbereich, die z.B. einen Volumenstrom von kleiner als 10% des maximalen Volumenstroms i.d.R. nicht ermöglichen.

Die Vorgehensweise ist in nachfolgendem Schema zusammengefasst und soll nachfolgend am Beispiel eines Besprechungs-, Sitzungs- oder Seminarzimmers im Einzelnen dargestellt werden.

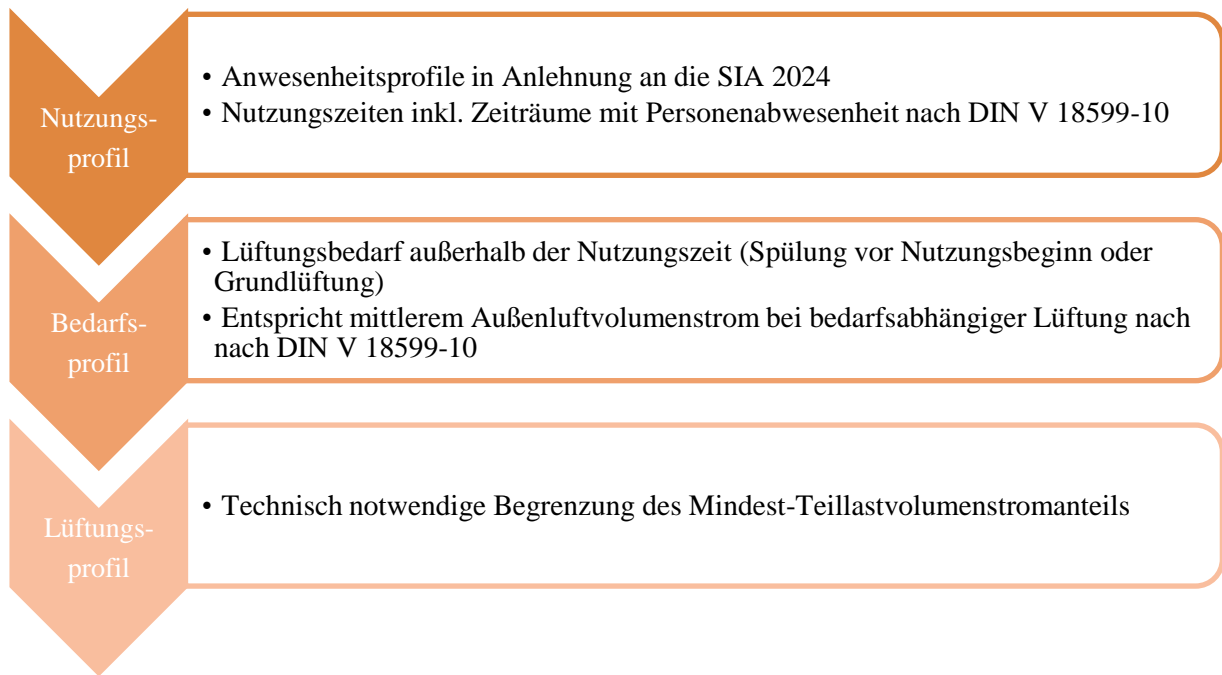


Abbildung 4.2: Schema zur Erstellung der stündlichen Lüftungsprofile

Zur Erstellung des Nutzungsprofils des Besprechungs-, Sitzungs- oder Seminarzimmers (siehe Abbildung 4.3) werden folgende Randbedingungen verwendet:

- Die Nutzungszeit ist wie in DIN 18599-10 angegeben von 7:00 Uhr bis 18:00 Uhr. Die Betriebszeit der Lüftungsanlage beginnt schon um 5:00 Uhr.
- Dies entspricht 11 Stunden täglicher Nutzungsdauer zuzüglich 2 Stunden Spülung vor Nutzungsbeginn.
- Aufgrund von $F_{RLT} = 0,5$ ist in der Hälfte der 13h Betriebszeit keine Person anwesend, was gerundet 7h Personenabwesenheit entspricht (davon 2h zur Spülung vor Nutzungsbeginn)
- Es verbleiben $13h - 7h = 4h$ der täglichen Betriebszeit mit Personenanwesenheit. Diese 4 Stunden werden nach Ermessen des Autors auf den Tag verteilt, wobei
- die Höhe des Anteils der anwesenden Personen so bestimmt wird, dass beim nachfolgend erstellten Bedarfsprofil die Tagessumme des während der Nutzungszeit geförderten Volumenstroms identisch mit der Berechnung nach DIN V 18599-7 ist.

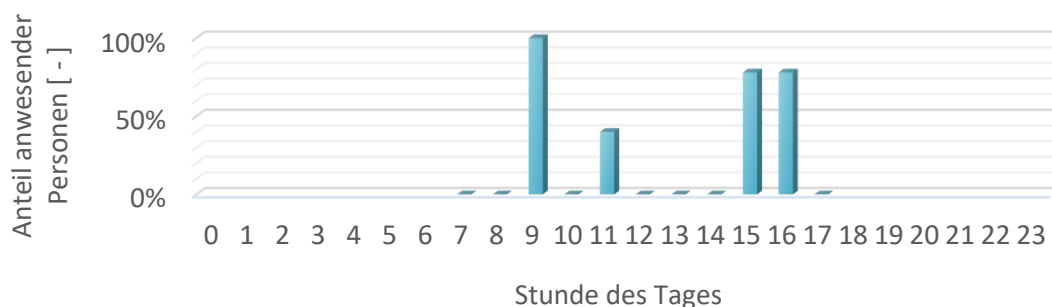


Abbildung 4.3: Anwesenheitsprofil für einen Besprechungs- Sitzungs-, oder Seminarraum

Basierend auf den so erstellten Nutzungsprofilen kann der erforderliche Außenluftvolumenstrom während der Nutzungszeit berechnet werden. Der zur jeweiligen Stunde erforderliche Außenluftvolumenstrom wird ins Verhältnis zum Auslegungs-Außenluftvolumenstrom gesetzt und entspricht bei der nutzungsspezifischen Bewertung dem Teillast-Volumenstromanteil der Gesamtanlage.

Wie im Verfahren nach DIN V 18599-7 wird während der gesamten Nutzungszeit mindestens der gebäudeabhängige Anteil abgeführt. Allerdings wird der Volumenstrom nicht, wie in DIN V 18599-7, als Summe aus gebäudeabhängigem und personenabhängigem Anteil berechnet. Anstelle dessen gibt es einen Mindestwert in Höhe des gebäudeabhängigen Anteils und ansonsten eine Regelung des Volumenstroms, die sich rein proportional zum Anteil der anwesenden Personen verhält. Es ist somit:

$$\dot{V}_x = \max \left\{ \dot{V}_{A,Geb} ; \frac{n}{n^*} \cdot \dot{V}_A \right\} \quad 4.2$$

$$\frac{\dot{V}_x}{\dot{V}^*} = \max \left\{ \frac{\dot{V}_{A,Geb}}{\dot{V}^*} ; \frac{n}{n^*} \right\} \quad 4.3$$

\dot{V}_x	Außenluftvolumenstrom bei bedarfsabhängiger Regelung in der Stunde x in m ³ /h
$\dot{V}^* = \dot{V}_A$	Auslegungs-Außenluftvolumenstrom bzw. Mindestaußenluftvolumenstrom in m ³ /h
$\dot{V}_{A,Geb}$	Gebäudeabhängiger Anteil des Mindestaußenluftvolumenstroms in m ³ /h
n	Anzahl der anwesenden Personen zur jeweiligen Stunde
n^*	Maximale Anzahl an Personen

Diese Art der proportionalen Bestimmung des Volumenstroms aus der Anzahl der anwesenden Personen bei einem gegebenen Mindestvolumenstrom entspricht einer typischen Regelung über Personenzähler oder resultiert bei einer Regelung über CO₂-Sensoren, bei der eine bestimmte CO₂-Konzentration konstant gehalten wird.

Wie bereits in Kap. 4.1 beschrieben, gibt es gemäß DIN EN 13779 drei Optionen zur Belüftung außerhalb der Nutzungszeit:

- Grundluftvolumenstrom während der gesamten belegungsfreien Zeit;
- Beginn der Lüftung bereits vor der Belegung;
- Kurzzeitiger Betrieb der Lüftungsanlage während der belegungsfreien Zeit.

Für das System mit VSR und konstantem Vordruck werden Tagesprofile mit einem Beginn der Lüftung vor Beginn der Nutzungszeit gewählt. Analog zur DIN V 18599 wird ein i.d.R. zweistündiger Vorlauf (einer sog. „Spülphase“) mit dem mittleren Volumenstrom ansetzt.

Für das System mit dezentralen Ventilatoren wird zusätzlich die Option des Grundluftvolumenstroms während der gesamten belegungsfreien Zeit untersucht. Aufgrund des nichtlinearen Zusammenhangs von Leistung und Teillastvolumenstrom sowie dem potenziellen Entfall einer Absperklappe ist dies für das dVt-System eine sinnvolle Methode.

- Für die Bedarfsprofile wird die Höhe des Grundluftvolumenstroms einheitlich so definiert, dass das Luftvolumen in der Tagessumme genauso hoch ist, wie es die zweistündige Spülphase nach DIN V 18599 vorgibt.
- Für die verschiedenen Nutzungen ergeben sich so Luftvolumenströme von 0,14 – 0,43 l/s je m². Prinzipiell sollte der Grundluftvolumenstrom nach [DIN EN 15251] bei einem Mindestwert von 0,1 l/s je m² bis 0,2 l/s je m² liegen. Die Anforderung wird also bei allen betrachteten Nutzungsarten erfüllt.

Durch die Zuordnung des Spülbetriebs zum System mit VSR und wahlweise der Grundlüftung zum dVt-System wird für beide Systeme die jeweils aus energetischer Sicht günstigere Option zur Belüftung außerhalb der Nutzungszeit gewählt. Alle Bedarfsprofile entsprechen im Tagesmittel dem nach Gl. 4.1 berechneten mittleren Außenluftvolumenstrom bei bedarfsabhängiger Lüftung der DIN V 18599. Abbildung 4.4 zeigt exemplarisch das Bedarfsprofil der Nutzung als Besprechungs-, Sitzungs- oder Seminarzimmer (für alle übrigen Lüftungsprofile für alle übrigen Nutzungsprofile siehe Anhang, Abschnitt 8.2).

- In hellblau sind die Stunden mit Personenanwesenheit hervorgehoben. Die Höhe des benötigten Teillast-Volumenstromanteils ergibt sich aus dem in Abbildung 4.3 dargestellten Anwesenheitsprofil bzw. dem Anteil der anwesenden Personen.
- In lila sind die Stunden mit Personenabwesenheit während der Nutzungszeit dargestellt. Die Höhe ergibt sich aus dem gebäudeabhängigen Anteil des Mindestaußenluftvolumenstroms.
- In rot ist die Belüftung außerhalb der Nutzungszeit mit Spülvorgang (links) und mit Grundlüftung (rechts) dargestellt.

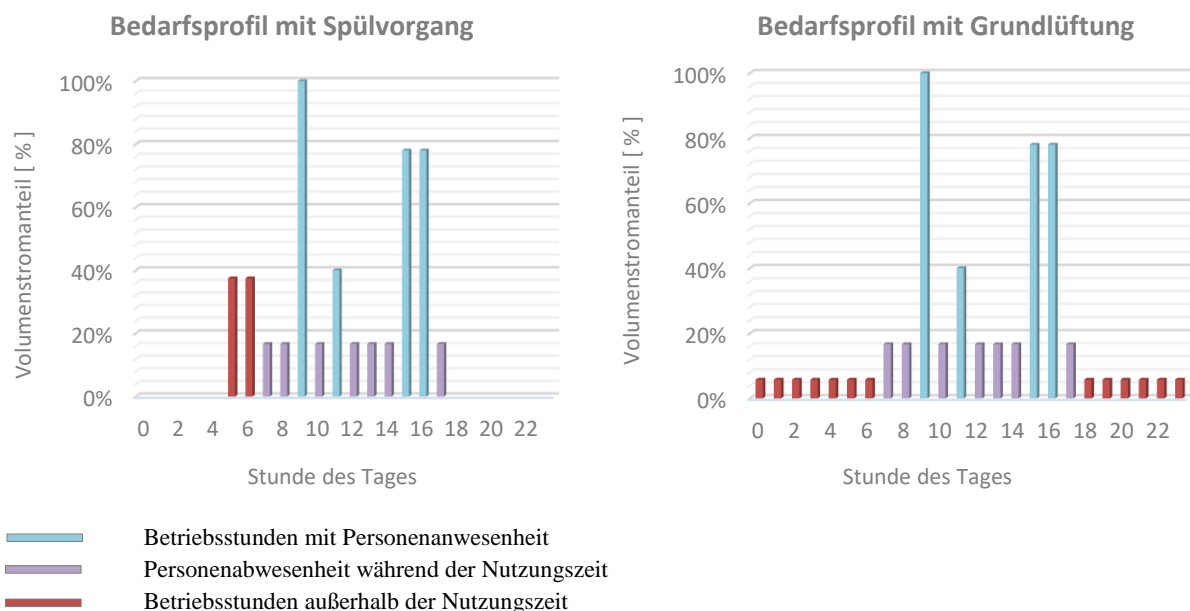


Abbildung 4.4: Bedarfsprofil für einen Besprechungs-, Sitzungs-, oder Seminarraum mit Spülvorgang (links) und mit Grundlüftung (rechts)

Im dritten Schritt wird das Lüftungsprofil erzeugt, indem ein Mindestvolumenstromanteil in Höhe von 12% definiert wird. Der Wert ergibt sich aus der minimalen Drehzahl von hier 10% der maximalen Drehzahl und der Überdimensionierung bei Auslegungsbedingungen:

$$\frac{\dot{V}_{min}}{\dot{V}^*} = \frac{n_{min}}{n^*} = \frac{0,10 \cdot n_{max}}{n^*} = \frac{0,10}{f_{dim}} = \frac{0,10}{0,86} = 0,12 \quad 4.4$$

$\frac{\dot{V}_{min}}{\dot{V}^*}$	Mindestvolumenstromanteil bei bedarfsabhängiger Lüftung
f_{dim}	Dimensionierungsfaktor $f_{dim} = n^*/n_{max}$
n_{min}	Mindestdrehzahl eines Ventilators $n_{min} = 0,10 \cdot n_{max}$
n^*	Drehzahl bei Auslegungsbedingungen
n_{max}	Maximale Drehzahl eines Ventilators

Auch bei Variabel-Volumenstromreglern erscheint der Wert grundsätzlich angemessen, da diese aufgrund der stets notwendigen Volumenstrommessung – welche i.d.R. anhand von Druckmessungen durchgeführt wird – ebenfalls im Regelbereich begrenzt sind.

In Abbildung 4.5 ist das resultierende Lüftungsprofil des exemplarischen Besprechungs-, Sitzungs- oder Seminarzimmers für den Fall der Vorspülung links und den Fall der Grundlüftung rechts dargestellt (für die Lüftungsprofile aller übrigen Nutzungsprofile siehe Anhang, Abschnitt 8.2). Dabei ist vor allem die Grundlüftung außerhalb der Nutzungszeit vom Mindest-Volumenstromanteil betroffen. Bei Nutzungsarten mit hoher Personenbelegung, wie z.B. in Hörsälen, ist ebenfalls der Volumenstromanteil während der Nutzungszeit bei Personenabwesenheit betroffen.

HINWEIS: Etwaige Leckagevolumenströme sind nicht in den Lüftungsprofilen und den darauf basierenden energetischen Berechnungen enthalten. Diese Vereinfachung begünstigt bei vorhandenen Leckagen aus energetischer Sicht das VSR- und das KVS-System gegenüber dem dVt-System. Weitergehende Untersuchungen inkl. Leckage werden in [Klimmt o. J.] durchgeführt.

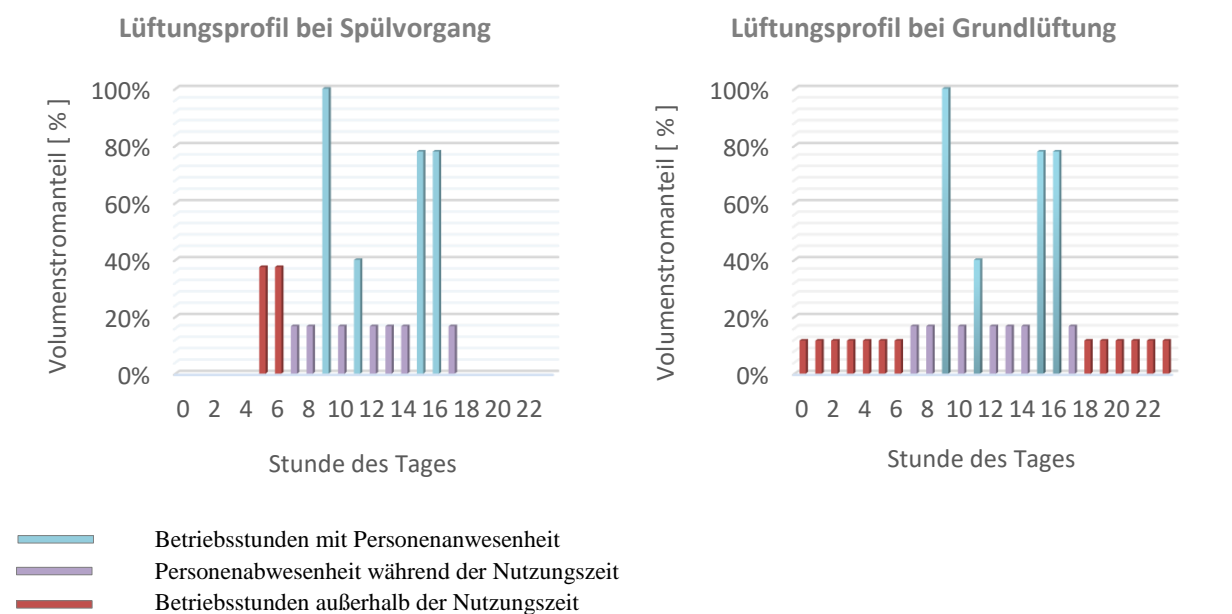


Abbildung 4.5: Lüftungsprofil für einen Besprechungs-, Sitzungs-, oder Seminarraum mit Spülvorgang (links) und mit Grundlüftung (rechts)

4.3 Jahres-Ventilatorenergiebedarf bei Standardrandbedingungen

Mit den Lüftungsprofilen kann stündlich die normierte Ventilatorleistung des dVt- und des VSR-Systems berechnet werden (Gl. 3.5 und 3.6). Der stündliche Energiebedarf ist das Produkt von Leistung und Zeit, welcher in weiteren Schritten auf Tages- und Jahreswerte aufsummiert bzw. hochgerechnet wird:

$$W_{0,h} = P_0 \cdot t_h \quad 4.5$$

$W_{0,h}$	Normierter stündlicher Ventilatorenergiebedarf [Wh je m ³ /s]
P_0	Normierte Leistung [W je m ³ /s]
t_h	Zeitraum von 1h [h]

Abbildung 4.6 veranschaulicht den gesamten Rechengang ausgehend von den in Abbildung 4.5 dargestellten Lüftungsprofilen mit Vorspülung (VSR-System) und Grundlüftung (dVt-System). Dabei werden zunächst die jeweiligen Druckerhöhungen und Wirkungsgrade vom Zentralventilator und von den dezentralen Ventilatoren in Abhängigkeit des vom Lüftungsprofil zur jeweiligen Stunde vorgegebenen Teillast-Volumenstromanteils berechnet (obere und mittlere Grafik in Abbildung 4.6). Mit Gl. 3.3 bis 3.6 und 4.5 wird dann der stündliche normierte Energiebedarf $W_{0,h}$ berechnet (untere Grafik). Im direkten Vergleich von dVt- und VSR-System zeigen sich der im dVt-System resultierende geringere Ventilatorenergiebedarf im Teillast-Betriebsbereich, was vor allem auf die geringeren Druckerhöhungen zurückzuführen ist.

Der normierte Jahresenergiebedarf an Nutzungstagen ist die Summe der Stundenwerte multipliziert mit den jährlichen Nutzungstagen:

$$W_{0,a} = t_a \cdot \sum_{h=1}^{24} W_{0,h} \quad 4.6$$

$W_{0,a}$	Normierter jährlicher Ventilatorenergiebedarf an Nutzungstagen [kWh je m ³ /s und Jahr]
$W_{0,h}$	Normierter stündlicher Ventilatorenergiebedarf [kWh je m ³ /s und Stunde]
t_a	Nutzungstage pro Jahr nach DIN V 18599-10 [d pro Jahr]

Bei Systemen mit Grundlüftung muss der Jahresenergiebedarf auch für die Nichtnutzungstage entsprechend berechnet werden:

$$W_{0,a,NNT} = (365d - t_a) \cdot 24h \cdot W_{0,GL} \quad 4.7$$

$W_{0,a,NNT}$	Normierter jährlicher Ventilatorenergiebedarf an Nicht-Nutzungstagen [kWh je m ³ /s und Jahr]
$W_{0,GL}$	Normierter stündlicher Ventilatorenergiebedarf bei Grundlüftung [kWh je m ³ /s und Stunde]
t_a	Nutzungstage pro Jahr nach DIN V 18599-10 [d pro Jahr]

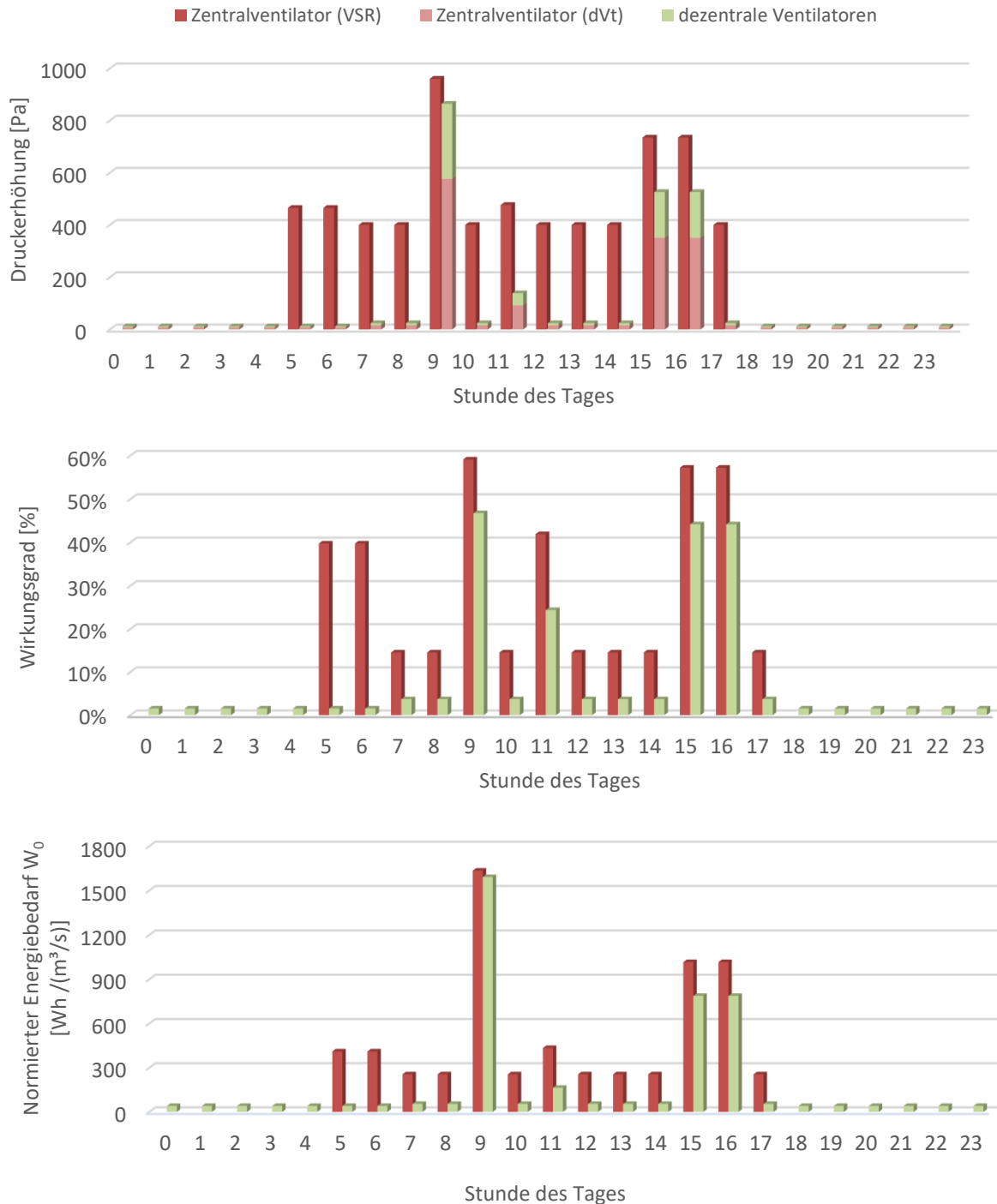


Abbildung 4.6: Vergleich der Druckerhöhung, des Wirkungsgrads und des normierten stündlichen Energiebedarfs eines Systems mit VSR (rot) und mit dVt (grün) bei Nutzung als Besprechungs- oder Sitzungszimmer im Tagesverlauf (Zuluft)

Eine Denormierung ist grundsätzlich je nach Anwendungsfall anhand des Auslegungsvolumenstroms je Raum oder der Gesamtanlage möglich. Der bei Energiekennwerten übliche Flächenbezug und eine gleichzeitige Denormierung in Bezug auf den Auslegungsvolumenstrom kann anhand des Mindestaußenluftvolumenstroms \dot{V}_A der DIN V 18599-10 erzeugt werden, welcher den hygienisch notwendigen Auslegungsvolumenstrom je m^2 Nutzfläche angibt. Des

Weiteren wird im Energiekennwert die Summe von Zu- und Abluftventilatoren berücksichtigt:

$$w_a = (W_{0,a,SUP} + W_{0,a,ETA} + W_{0,a,NNT,SUP} + W_{0,a,NNT,ETA}) \cdot \dot{V}_A \quad 4.8$$

w_a	Energiebedarfskennwert der Luftförderung [kWh/(m ² Jahr)]
$W_{0,a,SUP}$	Normierter jährlicher Ventilatorenergiebedarf der Zuluftventilatoren an Nutzungstagen nach Gl. 4.6 [kWh/(m ³ /s Jahr)]
$W_{0,a,ETA}$	Normierter jährlicher Ventilatorenergiebedarf der Abluftventilatoren an Nutzungstagen nach Gl. 4.6 [kWh/(m ³ /s Jahr)]
$W_{0,a,NNT,SUP}$	Normierter jährlicher Ventilatorenergiebedarf der Zuluftventilatoren an Nicht-Nutzungstagen nach Gl. 4.13 (nur bei Grundlüftung) [kWh/(m ³ /s Jahr)]
$W_{0,a,NNT,ETA}$	Normierter jährlicher Ventilatorenergiebedarf der Abluftventilatoren an Nicht-Nutzungstagen nach Gl. 4.13 (nur bei Grundlüftung) [kWh/(m ³ /s Jahr)]
\dot{V}_A	Nutzungsspezifischer Mindestaußenluftvolumenstrom der DIN V 18599-10 [m ³ /s je m ²]

Die Berechnungsrandbedingungen für Zuluft- und Abluftventilatoren sind, mit Ausnahme des Druckverlustes bei Auslegungsbedingungen, gleich und entsprechen dem in Kapitel 3 diskutierten Vorgehen. Die Druckverluste fließen mit

- 750 Pa für die Abluft und
- 960 Pa für die Zuluft

in die Berechnung ein (siehe Abschnitt 3.1.4).

Im Ergebnis zeigt Abbildung 4.7 für die betrachtete Auswahl an Nutzungsarten den Jahres-Energiebedarfskennwert für

- das Konstant-Volumenstrom-Systems (stets die höchsten Kennwerte),
- das VSR-System und dem Lüftungsprofil Vorspülung (stets höhere Kennwerte als das dVt-System, jedoch nahezu gleichwertig bei Gruppenbüros),
- das dVt-System mit dem Lüftungsprofil
 - Grundlüftung: Vorteilhaft bei Nutzungsarten mit vielen Nutzungstagen und/oder täglichen Nutzungsstunden, z.B. Büronutzungen,
 - Vorspülung: Vorteilhaft bei Nutzungsarten mit unterdurchschnittlich vielen Nutzungstagen und/oder täglichen Nutzungsstunden, z.B. Hörsaal,
- das deAL-System (aufgrund der geringen Druckverluste stets der geringste elektrische Endenergiebedarf).

Die Einsparung an elektrischem Energiebedarf zur Luftförderung beträgt durch den Wechsel vom Konstant-Volumenstrom-Systems zum VSR-System zwischen 20 % und 70 %. Mit dem dVt-System kann bei den betrachteten Nutzungsarten gegenüber dem VSR-System nochmal zwischen 8 % und 54 % eingespart werden. Ohne Gruppenbüros lassen sich bei den untersuchten Nutzungsarten mindestens 20% an elektrischer Energie zur Luftförderung einsparen.

Am niedrigsten ist der Ventilatorenergiebedarf beim deAL-System. Es sei angemerkt, dass die Rückwärmzahl häufig geringer als bei zentralen Systemen ist (siehe Abschnitt 4.7: Nutzenergiebedarf der thermischen Luftaufbereitung) und auch zentrale Systeme druckverlustärmer als üblich ausgelegt werden können, was die Differenz verringern würde. Ebenfalls sind in der Literatur noch keine Ergebnisse von Feldtests veröffentlicht, die die geringe Leistungsaufnahme der deAL-Systeme bestätigen würden.

HINWEIS: Bei der Hörsaalnutzung ist das deAL System keine technische Option und wird daher in den nachfolgenden Auswertungen nicht mit angegeben.

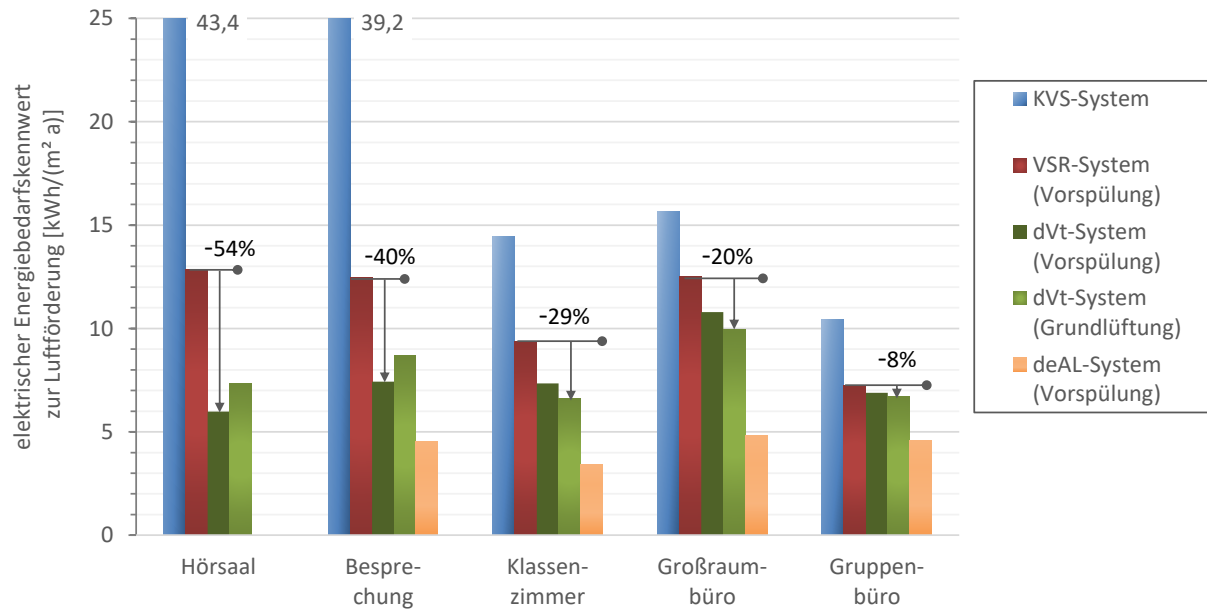


Abbildung 4.7: Elektrischer Energiebedarfskennwert zur Luftförderung im Vergleich

4.4 Ventilatorenergiebedarf bei Variation der Standardrandbedingungen

Die Variation der Standardrandbedingungen wird für den im Abbildung 3.11 (Seite 51) dargestellten typischen Variationsbereich der Randbedingungen auf Ebene der Leistungskurven dargestellt. Auf diese Weise kann ein Großteil der Randbedingungen hinsichtlich ihres Einflusses beurteilt werden. Zusätzlich werden fallweise Variationen auf Ebene des Jahresenergiebedarfs für die im vorigen Abschnitt definierten Nutzungsarten durchgeführt.

4.4.1 Einfluss des Auslegungsdruckverlustes

Der Auslegungsdruckverlust bzw. die zugehörige Druckerhöhung der Ventilatoren hat einen entscheidenden Einfluss auf die normierte Ventilatorleistung aller mechanischen Lüftungssysteme. Bei Volllast ist der Effekt besonders ausgeprägt, da die Ventilatorleistung in diesem Bereich linear mit einem Anstieg des Auslegungsdruckverlusts ansteigt:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\Delta p_2^*}{\Delta p_1^*} \quad 4.9$$

$\frac{\Delta p_2^*}{\Delta p_1^*}$ Änderung der Auslegungsdruckverluste [-]
 $\frac{P_2}{P_1}$ Änderung der Ventilatorleistung (dVt- oder VSR-System)

In Abbildung 4.8 wird zudem deutlich, dass sich bei Teillast

- im dVt-System die normierte Ventilatorleistung in allen Fällen bei abfallenden Teillast-Volumenstromanteilen einer Leistung von 0 W nähert.
- im VSR aufgrund des konstanten Vordrucks von 40 % ein Sockel der Ventilatorleistung bestehen bleibt, der mit höheren Auslegungsdruckverlusten ansteigt.

Die prozentuale Einsparung des dVt-Systems gegenüber dem VSR-System ist unabhängig vom Auslegungsdruckverlust und daher in allen Fällen gleich.

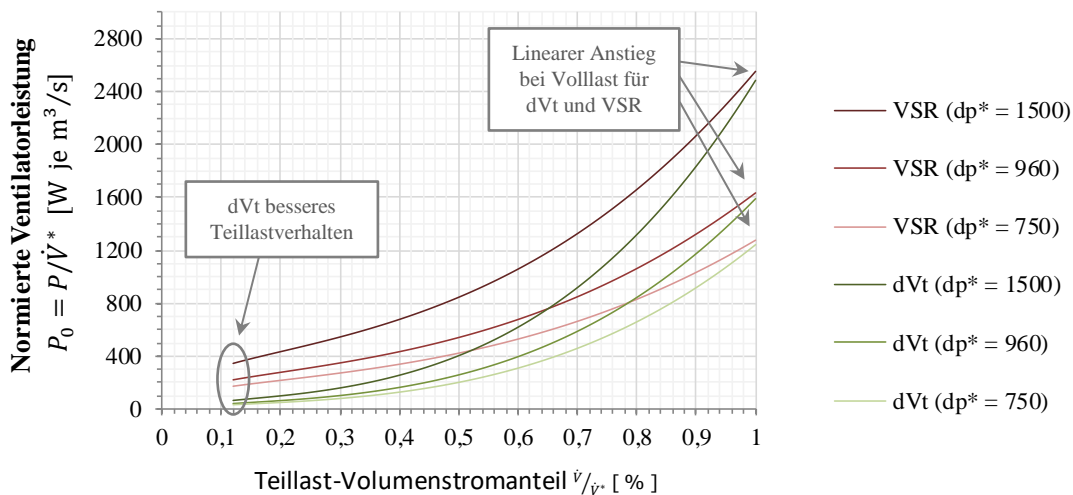


Abbildung 4.8: Energiebedarf des dVt-Systems bei unterschiedlichen Auslegungsdruckerhöhungen gegenüber dem VSR-System

4.4.2 Einfluss des Netzfaktors

Ein geringerer Netzfaktor führt per Definition zu einem geringeren (mittleren) Energiebedarf der dezentralen Ventilatoren, da diese im Mittel weniger Druck aufbauen müssen. Bei hohen Teillast-Volumenstromanteilen ist es u. U. von der Verteilung der Druckverluste im Verteilnetz abhängig, ob eine Einsparung durch das dVt-System erzielt wird und wie hoch diese ist.

In Abbildung 4.9 ist ersichtlich, dass der Energiebedarf des dVt-Systems bei abnehmenden Netzfaktoren vor allem bei hohen Werten des Teillast-Volumenstromanteils deutlich sinkt. Der Unterschied verringert sich bei geringeren Werten des Teillast-Volumenstromanteils. In Abbildung 4.10 ist ersichtlich, dass die prozentuale Einsparung um bis zu 15 Prozentpunkte im dargestellten Bereich der Netzfaktoren variieren kann. Bei geringen Teillast-Volumenströmen sinkt der Einfluss des Netzfaktors auf die prozentuale Einsparung.

Auf das VSR-System hat der Netzfaktor keinen Einfluss, da die Druckerhöhung des Zentralventilators fest durch die Druckverluste des hydraulisch ungünstigsten Strangs beim Auslegungsvolumenstrom vorgegeben ist.

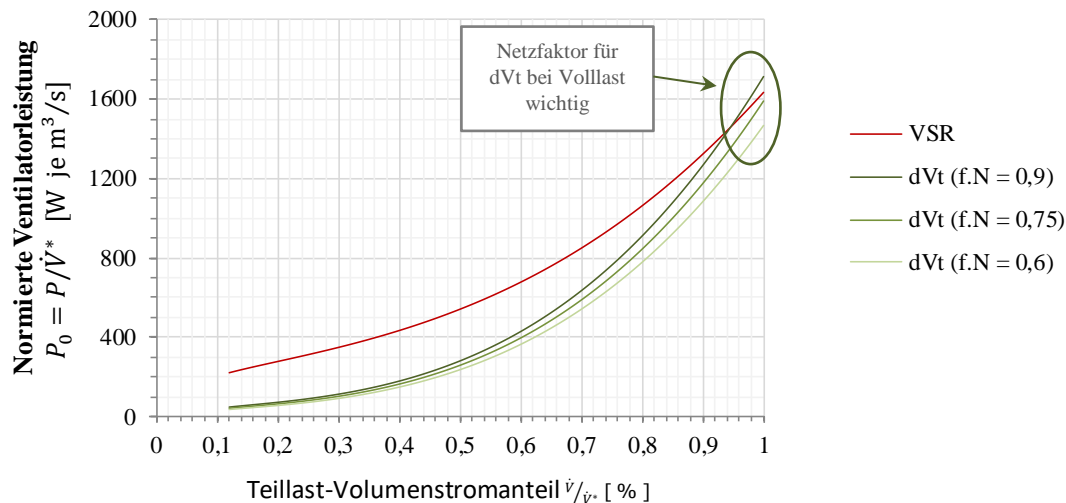


Abbildung 4.9: Energiebedarf des dVt-Systems bei unterschiedlichen Netzfaktoren gegenüber dem VSR-System

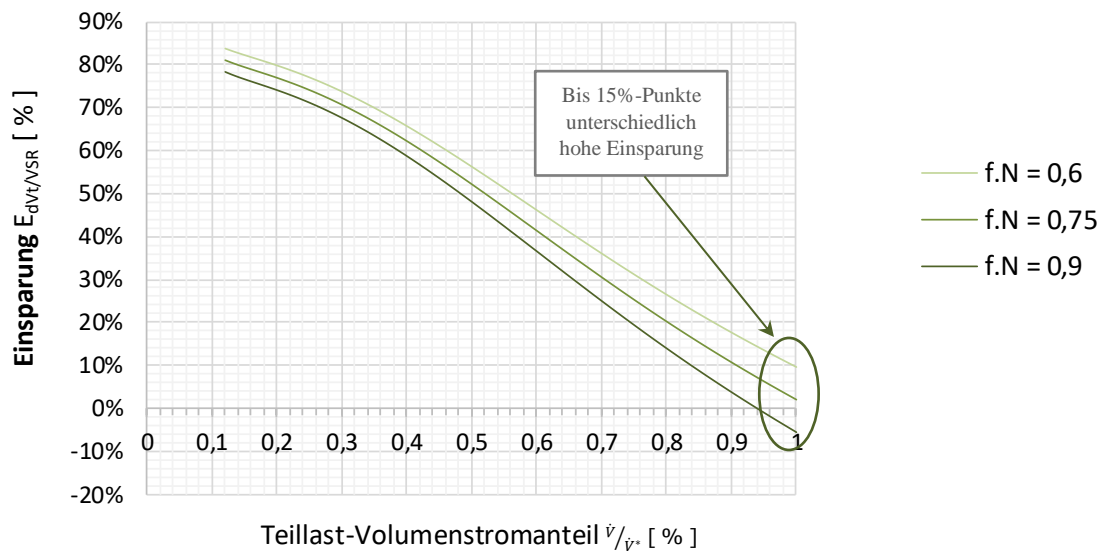


Abbildung 4.10: Einsparung des dVt-Systems bei unterschiedlichen Netzfaktoren gegenüber dem VSR-System

Die Auswirkung einer Variation des Netzfaktors auf die Leistungs- und Energiebedarfsberechnung hängt von weiteren Berechnungsgrößen ab, insbesondere

- dem Anteil der Druckverluste des Verteilnetzes am gesamten Kanalnetz (Druckverhältniszahl, siehe Abschnitt 4.4.3: Einfluss der Druckverhältniszahl)
- und den Wirkungsgraden der eingesetzten Ventilatoren.

Vor diesem Hintergrund ist in Abbildung 4.11 die Auswirkung der Variation des Netzfaktors auf den Jahres-Ventilatorenergiebedarf dargestellt. Neben den unterschiedlichen Häufigkeiten der einzelnen Teillastzustände je nach Nutzungsart, sind den jeweiligen Nutzungsarten auch ein jeweils unterschiedlicher maximaler Wirkungsgrad sowie ein unterschiedliches Teillast-Verhalten zugeordnet. Es zeigt sich ein maximaler Einfluss auf den Jahresenergiebedarf von ca. 1 kWh/(m² a). Einzig bei Büronutzungen entscheidet sich dadurch, ob das dVt-System mehr oder weniger elektrische Ventilatorenergie benötigt als das VSR-System. Eine etwas höhere Bedeutung des Netzfaktors ist zu erwarten, wenn dezentrale Ventilatoren mit konstantem Volumenstrom betrieben werden, z.B. wenn aus Kostengründen eine größere Anzahl von Büroräumen zusammengefasst wird oder wenn aus sonstigen Gründen keine Bedarfsregelung möglich ist.

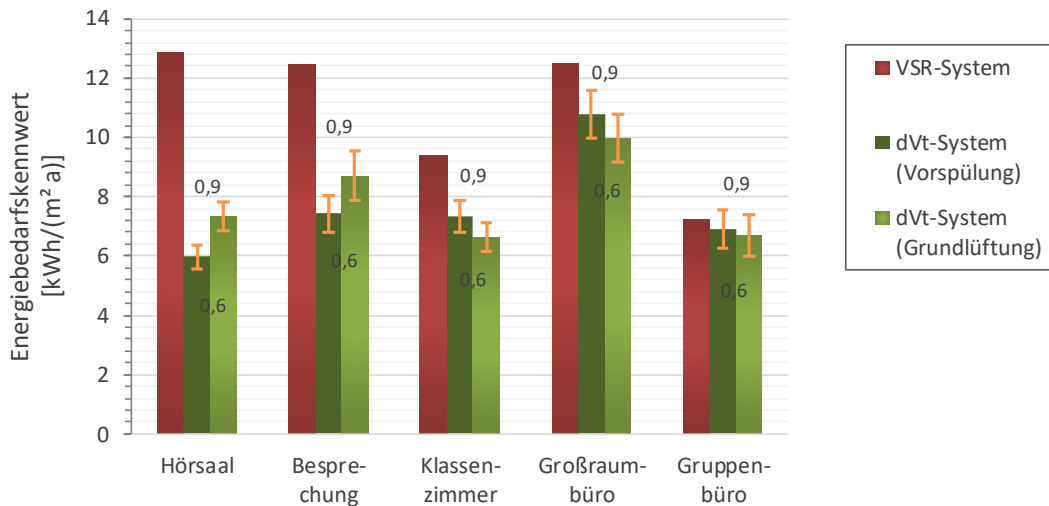


Abbildung 4.11: Auswirkung der Variation des Netzfaktors auf den Jahres-Ventilatorenergiebedarf von VSR- und dVt-System

4.4.3 Einfluss der Druckverhältniszahl

Die Druckverhältniszahl beschreibt den Anteil der Druckverluste des Verteilnetzes (zum hydraulisch ungünstigsten Strang) an den Druckverlusten der Gesamtanlage. Für das VSR- und das dVt-System sind die Auswirkungen unterschiedlich (vgl. Abbildung 4.12 und Abbildung 4.13):

- Im VSR-System ist die Druckverhältniszahl gleichbedeutend mit dem Anteil der Druckerhöhung, der vom Ventilator auch bei Teillast konstant gehalten werden muss. Entsprechend führt eine Erhöhung der Druckverhältniszahl bei Teillast zu einem stark erhöhten Leistungsbedarf. Bei Volllast (d.h. Teillast-Volumenstromanteil = 1) fallen sowohl in der Lüftungszentrale als auch in der Verteilung die für den Auslegungsfall berechneten Druckverluste an. Für Volllast macht es daher keinen Unterschied, wie hoch der Anteil der Verteilung und damit die Höhe der Druckverhältniszahl ist. In Bezug auf den Jahresenergiebedarf wird dieser Zusammenhang besonders deutlich. Während in Nutzungsarten mit vielen Teillast-Betriebszuständen (z.B. Hörsaal, Besprechung, Restaurant) die Variation der Druckverhältniszahl eine Änderung des Jahresenergiebedarfs um bis zu 30% bewirkt, spielt die Druckverhältniszahl bei Büronutzungen und Klassenzimmern eine untergeordnete Rolle.
- Im dVt-System steigt die kumulierte Ventilatorleistung bei steigender Druckverhältniszahl *geringfügig* an, da ein zunehmender Anteil der benötigten Druckerhöhung mit den dezentralen Ventilatoren erzeugt wird, die typischerweise einen geringeren Wirkungsgrad als die Zentralventilatoren haben. Je kleiner die Differenz zwischen Wirkungsgrad von zentralen und dezentralen Ventilatoren ist, umso geringer ist der beschriebene Effekt. So haben die Nutzungsarten Hörsaal, Restaurant und Kantine mit ihren guten Ventilatorwirkungsgraden bei einer hohen Druckverhältniszahl sogar einen geringeren Jahresenergiebedarf als bei Standardrandbedingungen. Dies ist auf den Einfluss des Netzfaktors zurückzuführen.

Die prozentuale Einsparung des dVt-Systems steigt erwartungsgemäß gegenüber dem VSR-System bei einer zunehmenden Druckverhältniszahl im Teillastbereich deutlich an.

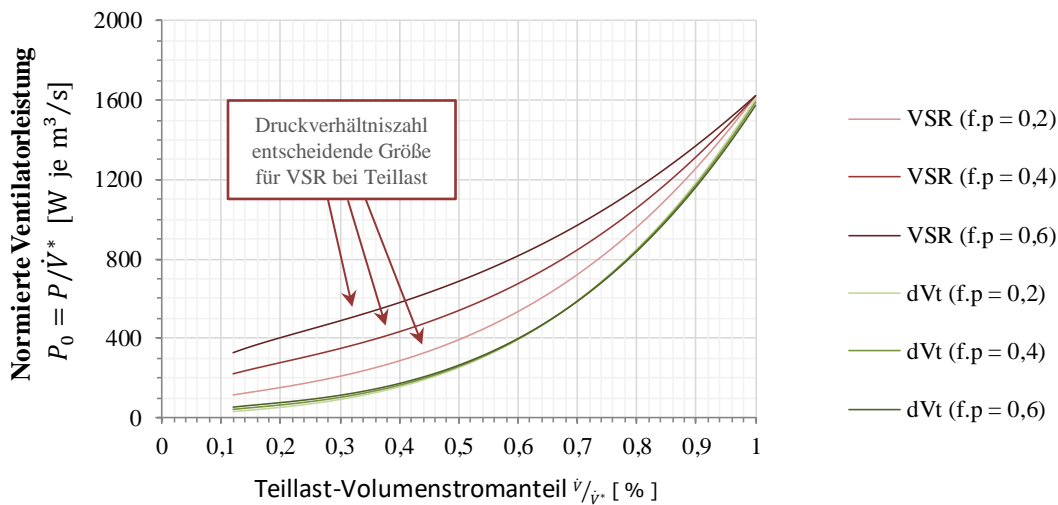


Abbildung 4.12: Normierte Ventilatorleistung von VSR- und dVt-System bei unterschiedlichen Druckverhältniszahlen

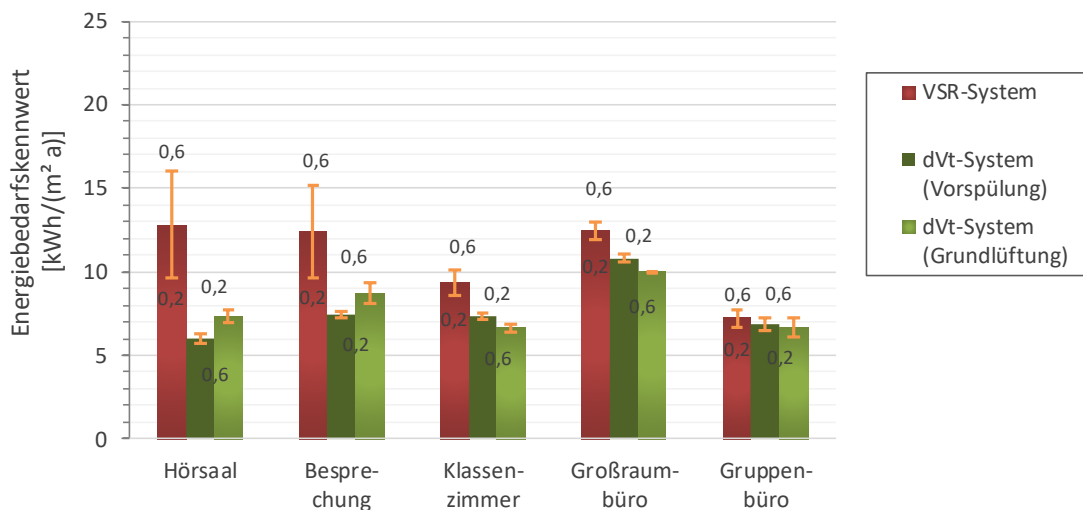


Abbildung 4.13: Auswirkung der Variation der Druckverhältniszahl auf den Jahres-Ventilatorenergiebedarf von VSR- und dVt-System

4.4.4 Einfluss der maximalen Ventilatorwirkungsgrade

Der Wirkungsgrad der dezentralen Ventilatoren ist eine der zentralen Größen des dVt-Systems. Ähnlich wie bei sinkenden Netzfaktoren entscheidet sich durch die Wirkungsgrad-differenz zwischen zentralen Ventilatoren und dezentralen Ventilatoren, ab welchem Teillast-Volumenstromanteil eine Einsparung gegenüber dem VSR-System auftritt und wie hoch diese ausfällt.

Während die Höhe des Netzfaktors i.d.R. nur begrenzt durch die Planung des Kanalnetzes beeinflusst werden kann und im Übrigen als feste Randbedingungen angesehen werden muss, orientiert sich die Höhe des Wirkungsgrads stark am Stand der Technik. Während in den bisherigen Ansätzen von semizentraler Lüftung die maximalen Wirkungsgrade bei Werten

< 25 % lagen (siehe Abschnitt 1.2.2), werden mit aktuellen EC-Ventilatoren Wirkungsgrade in Höhe von 38 % und mehr erzielt – allerdings erst ab Luftvolumenströmen von aktuell ca. 144 m³/h (Stand 2016) und im jeweils optimalen Betriebspunkt.

In Abbildung 4.14 ist die normierte Ventilatorleistung für Ventilatoren mit maximalen Wirkungsgraden von 38%, 48% und 52% dargestellt. Diese Wirkungsgrade können nach Abbildung 3.5 (Seite 40) bei typischen Volumenströmen in Gruppenbüros, Besprechungs- und Sitzungsräumen bzw. Klassenzimmern auf Basis der dort angegebenen Regression maximal erreicht werden.

In Bezug auf die prozentuale Einsparung ist in etwa eine Parallelverschiebung der prozentualen Einsparung zu verzeichnen: Ein Anstieg des maximalen Wirkungsgrads führt über den gesamten Teillast-Bereich zu einer Erhöhung der Einsparung.

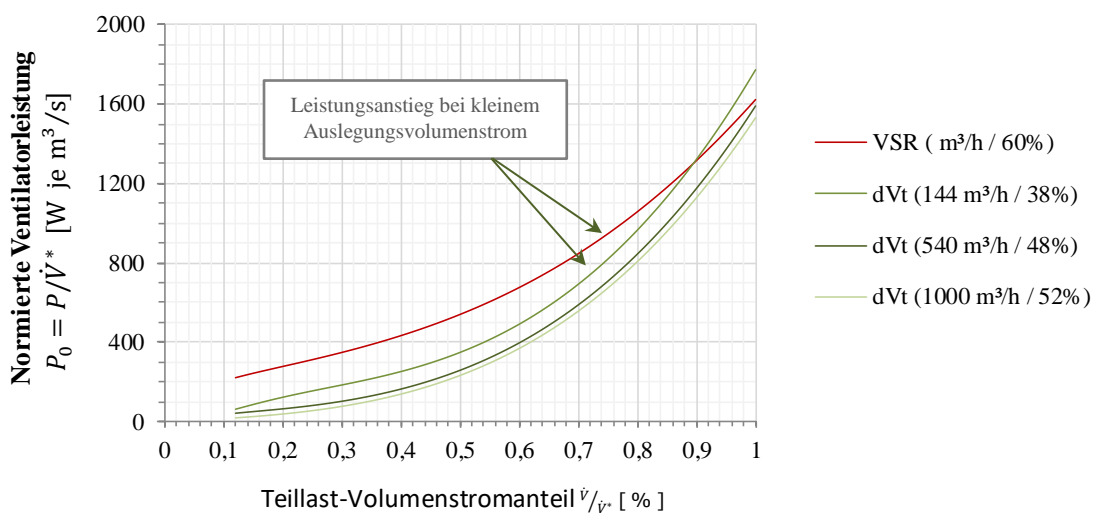


Abbildung 4.14: Energiebedarf des dVt-Systems bei unterschiedlichen Auslegungsvolumenströmen der dezentralen Ventilatoren durch Wirkungsgradsteigerungen gegenüber dem VSR-System

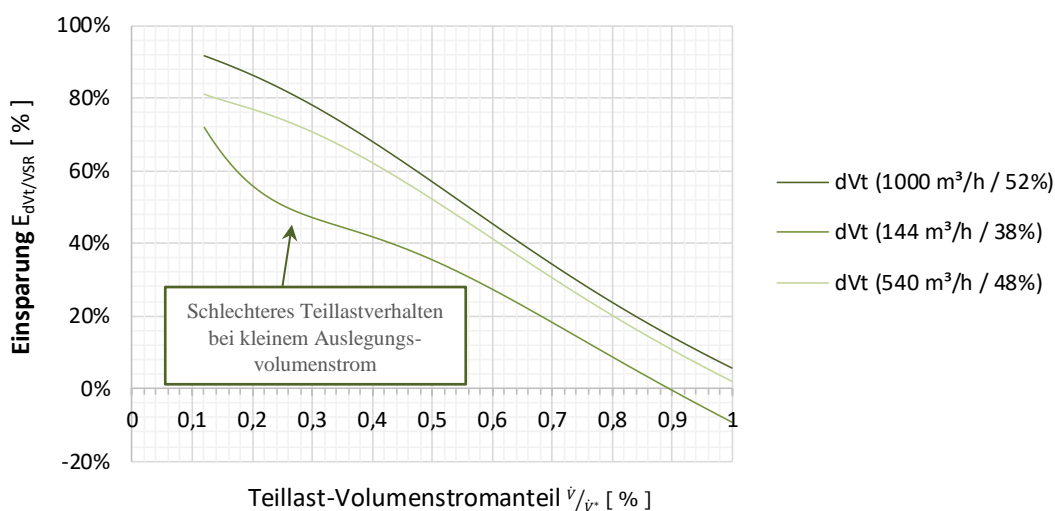


Abbildung 4.15: Einsparung bei unterschiedlichen Auslegungsvolumenströmen der dezentralen Ventilatoren durch Wirkungsgradsteigerungen

In obigen Auswertungen wurde angenommen, dass der Wirkungsgrad der dezentralen Ventilatoren variiert und der Wirkungsgrad der zentralen Ventilatoren konstant bleibt. Wird dagegen angenommen, dass sich die Wirkungsgrade sowohl der dezentralen als auch der zentralen Ventilatoren gleichermaßen ändert, kann festgestellt werden, dass sich die Ventilatorleistung entgegengesetzt (antiproportional) verhält:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\eta_1}{\eta_2} \quad 4.10$$

$\frac{\eta_1}{\eta_2}$ Wirkungsgradveränderung von dVt und zVt [-]
 $\frac{P_2}{P_1}$ Änderung der Ventilatorleistung (dVt- oder VSR-System)

Zusammenfassend wird deutlich, dass geringere Wirkungsgrade, als dargestellt, aus energetischen Gründen vermieden werden sollten, da ansonsten mit keiner oder nur unter bestimmten Betriebsbedingungen mit einer Einsparung durch das dVt-System gerechnet werden kann. Das führt beispielsweise dazu, dass Einzelbüros ohne kühllastabhängige Regelung (was i.d.R. mit erhöhten Auslegungsvolumenströmen einhergeht) kein sinnvolles Einsatzgebiet für das dVt-System sind: Bei typischen Auslegungsvolumenströmen von ca. 30 ... 70 m³/h stehen keine Ventilatoren mit entsprechend hohen Wirkungsgraden zur Verfügung stehen (Stand: 2016).

4.4.5 Einfluss einer Überdimensionierung von Ventilatoren

Die Überdimensionierung von Ventilatoren erzeugt sowohl für das dVt- als auch für das VSR-System einen erhöhten Leistungsbedarf. Vor allem, wenn bereits überdimensionierte Ventilatoren aufgrund der Bedarfsregelung noch weiter in Teillast betrieben werden, als es aufgrund der Überdimensionierung ohnehin schon der Fall ist, steigt die elektrische Ventilatorleistung beider Lüftungssysteme deutlich an.

Die Überdimensionierung wird, wie in Abschnitt 3.2.3.2 beschrieben, anhand des Dimensionierungsfaktors f_{dim} beschrieben, der angibt, welcher Anteil der maximal möglichen Drehzahl im Auslegungszustand benötigt wird. Für nachfolgende Auswertungen wird f_{dim} wie in Tabelle 3.5 (Seite 49) beschrieben, variiert:

- $f_{dim} = 0,86$
- $f_{dim} = 0,71$
- $f_{dim} = 0,91$

In Abbildung 4.16 ist die normierte Ventilatorleistung für das VSR- und das dVt-System mit den genannten Dimensionierungsfaktoren aufgetragen. Dabei erhöht sich die Leistung des VSR-Systems bei dem Übergang von $f_{dim} = 0,91$ auf $f_{dim} = 0,86$ nur wenig und beim Übergang auf $f_{dim} = 0,71$ etwas stärker, wobei der Anstieg im dVt-System wegen des als „mittel“ angenommene Teillastverhaltens der dezentralen Ventilatoren gegenüber dem „guten“ Teillastverhalten der zentralen Ventilatoren etwas höher ausfällt (vgl. Abbildung 3.6, Seite 43). Weiterhin ist ersichtlich, dass der Mindestvolumenstrom in beiden Systemen etwas ansteigt. Die prozentuale Einsparung verringert sich, wie in Abbildung 4.18 dargestellt, nur geringfügig. Unter den gegebenen Randbedingungen scheint eine übliche Überdimensionierung im dVt-System wie im VSR-System zu noch vertretbaren Mehrverbräuchen zu führen.

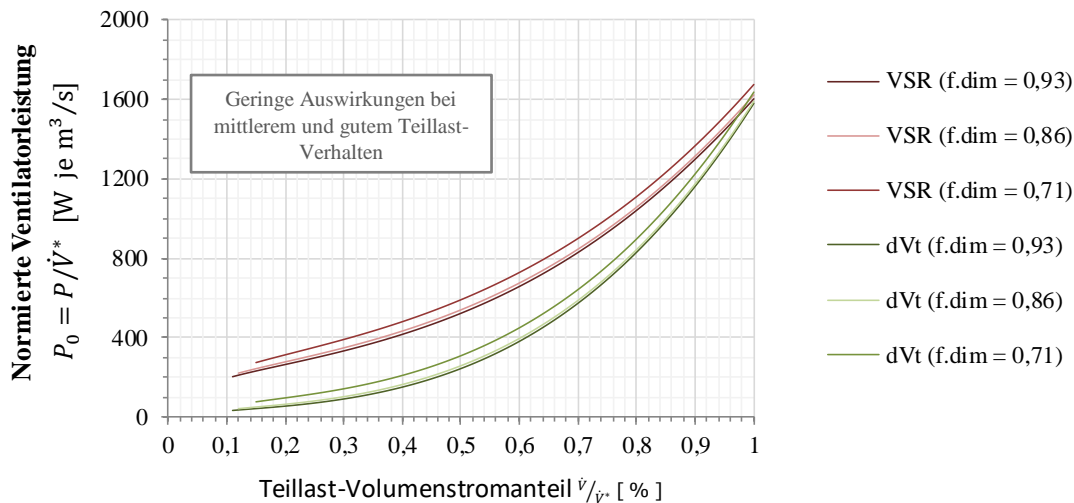


Abbildung 4.16: Normierte Ventilatorleistung von VSR- und dVt-System bei variierter Überdimensionierung der Ventilatoren („mittleres“ Teillastverhalten der dezentralen Ventilatoren nach Abbildung 3.6)

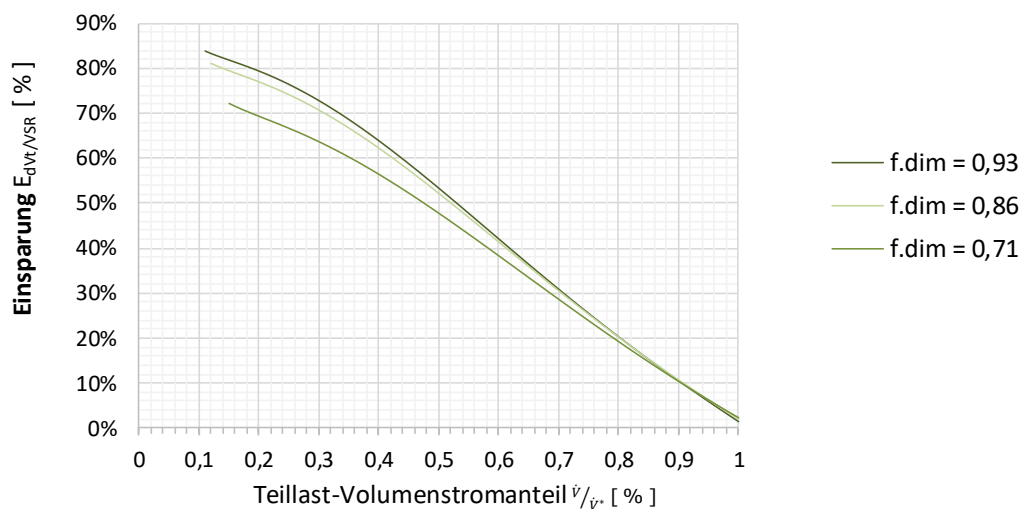


Abbildung 4.17: Einsparung bei variierter Überdimensionierung der Ventilatoren („mittleres“ Teillastverhalten der dezentralen Ventilatoren nach Abbildung 3.6)

Exemplarisch soll zudem die Auswirkung einer Überdimensionierung bei Ventilatoren mit „schlechtem“ Teillastverhalten dargestellt werden. In Abbildung 4.18 ist ein solches Szenario mit einem schlechten Teillastverhalten für Auslegungsvolumenströme von 144 m³/h (typisch für Gruppenbüros) dargestellt. Dabei führt ein starker Anstieg der Ventilatorleistung im dVt-System bei Überdimensionierung in Verbindung mit dem schlechten Teillastverhalten zu einer deutlichen Reduzierung der Einsparung gegenüber dem VSR-System. Unter diesen Randbedingungen sollte daher besonders auf eine gute Auslegung der dezentralen Ventilatoren geachtet werden.

Das „schlechte“ Teillastverhalten der dezentralen Ventilatoren betrifft nur die kleinsten Baugrößen, bei denen leistungsunabhängige Elektronikverluste in der Größenordnung von ca. 1-2 Watt bereits einen deutlichen Anteil der überhaupt benötigten elektrischen Leistung ausmachen. Näherungsweise ab Auslegungsvolumenströmen von 350 m³/h kann bereits von einem „mittleren“ Teillastverhalten ausgegangen werden, bei denen die leistungsunabhängigen Elektronikverluste eine geringere Rolle spielen.

HINWEIS: Grundsätzlich wären konstruktive Verringerungen der leistungsunabhängigen Verluste möglich, die zu einem „mittleren“ bis „guten“ Teillastverhalten führen könnten. Dies wird jedoch aufgrund höherer Kosten und akustischen Verschlechterungen derzeit nicht umgesetzt (Rücksprache mit dem Ventilatorhersteller ebm-papst, Stand 2015).

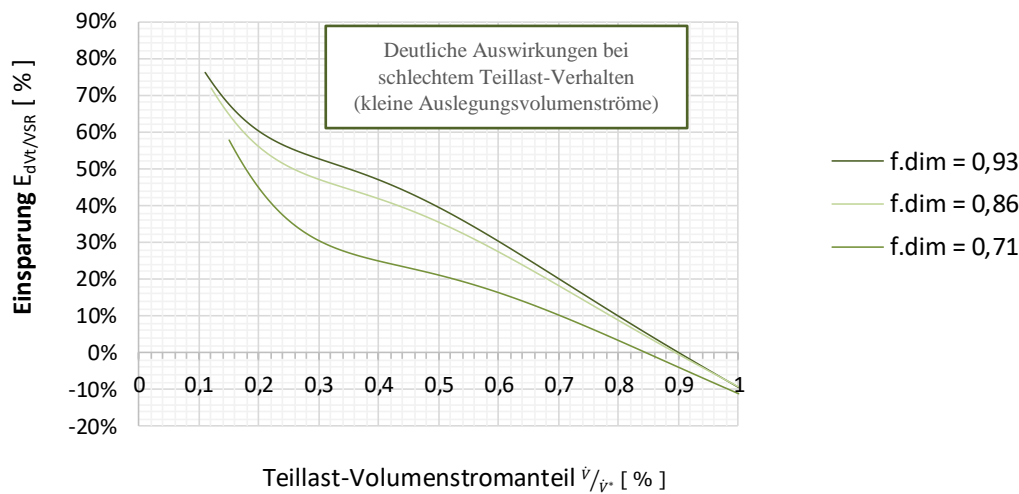


Abbildung 4.18: Einsparung bei variiert Überdimensionierung der Ventilatoren (Wirkungsgrad der dezentralen Ventilatoren für Gruppenbüro Nutzung mit 144 m³/h mit „schlechtem“ Teillastverhalten nach Abbildung 3.6)

4.4.6 Einfluss des Druckexponenten

Wie in Abschnitt 3.1.2: *Druckverluste bei Teillast-Volumenströmen* beschrieben, gilt der verwendete Druckexponent im Prinzip nur für rein turbulente Strömungen. Dies ist jedoch in einigen Komponenten, sowie bei geringen Geschwindigkeiten auch in Rohrleitungen nur bedingt der Fall. Allgemeine Aussagen sind nicht oder nur eingeschränkt möglich, da das genaue Verhalten in vielen Fällen nicht bekannt ist und der Umschlagpunkt von turbulent zu laminar wechselhaft und von Komponente zu Komponente unterschiedlich ist.

Um den Einfluss des Druckexponenten auf das Berechnungsergebnis überschlägig beurteilen zu können, wird nachfolgend eine Parametervariation mit $n = 1,4$ für die Druckverluste der Lüftungszentrale und $n = 1,8$ für die Druckverluste des Verteilnetzes durchgeführt und dem Standardfall mit $n = 2$ gegenübergestellt. Der Druckexponent für die Druckverluste der Lüftungszentrale sind typischerweise geringer als der Druckexponent für die Druckverluste des Verteilnetzes, da Komponenten der Lüftungszentrale wie Filter und Wärmeübertrager hohe laminare Anteile haben. Im Resultat linearisiert sich die Leistungskurve etwas, ohne dass sich am grundlegenden Zusammenspiel etwas ändert. Auch sind die Änderungen im VSR- und im dVt-System sehr ähnlich. Somit erscheint die vorgenommene Vereinfachung, den Druckexponenten mit $n = 2$ anzunehmen, als noch vertretbar.

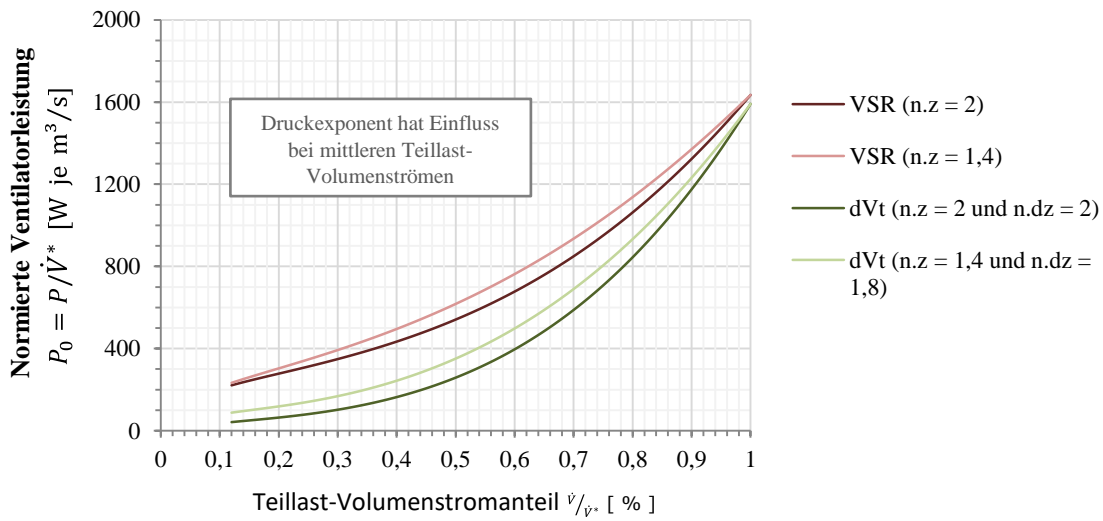


Abbildung 4.19: Normierte Ventilatorleistung von VSR- und dVt-System bei unterschiedlichen Druckexponenten

4.4.7 Einfluss der Betriebsdauer

Da die Betriebsdauer auch von weiteren Berechnungsgrößen (z.B. Wärmebedarf) abhängt, wird die Variation der Betriebsdauer in Abschnitt 4.8 auf Basis des Primärenergiekennwerts vorgenommen.

4.5 Unterschiede der Energiebedarfsberechnung zur Berechnung nach DIN V 18599

In Abschnitt 4.1 wurde beschrieben, wie gemäß DIN V 18599-7 der mittlere Außenluftvolumenstrom bei bedarfsabhängiger Lüftung berechnet wird. Nachfolgend soll ein Vergleich des berechneten Energiebedarfs nach dem in dieser Arbeit vorgestellten stündlichen Verfahren mit dem einfacheren Ansatz aus DIN V 18599-3 jeweils für das System mit VSR und konstantem Vordruck vorgenommen werden. Dazu wird zunächst die Leistungsberechnung nach DIN V 18599-3 bei bedarfsabhängiger Lüftung mit dem berechneten mittleren Außenluftvolumenstrom beschrieben.

Zur Leistungsberechnung werden in DIN V 18599-3:2011 drei Ansätze beschrieben. Es ist nicht eindeutig dokumentiert, welcher Ansatz zur Berechnung der bedarfsabhängigen Volumenstromregelung verwendet werden soll. Die folgenden drei Ansätze werden daher kurz diskutiert:

1. Leistung von Konstant-Volumenstrom-Systemen
2. Leistung von Variabel-Volumenstrom-Systemen, welche für Anlagen mit zeit- oder nutzungsabhängiger Steuerung verwendet wird, bei der alle Teillastzustände einzeln bekannt sind
3. Leistung von Variabel-Volumenstrom-Systemen mit kühllastabhängiger Regelung, bei denen mit einem mittleren Volumenstrom zur Kühlung gerechnet wird

Der erste Ansatz ist nur für Konstant-Volumenstrom-Systeme geeignet und kommt nicht für die Berechnung der Ventilatorleistung bei bedarfsabhängiger Lüftung infrage, da einerseits kein konstanter Vordruck wie im Variabel-Volumenstrom-System und andererseits keine physikalisch stattfindende Verringerung der Druckverluste bei Teillast-Volumenströmen berücksichtigt wird.

Der zweite Ansatz für Anlagen mit zeit- oder nutzungsabhängiger Steuerung entspricht dem in dieser Arbeit verwendeten Ansatz zur Berechnung des VSR-Systems, wenn anstelle von Teillast-Wirkungsgraden ein mittlerer Wirkungsgrad verwendet wird. Für die bedarfsabhängige Lüftung mit mittlerem Außenluftvolumenstrom sollte dieser Ansatz nicht verwendet werden, da die Teillastzustände aufgrund der Mittelung nicht einzeln berechnet werden und sich eine Ungenauigkeit aufgrund der Nichtlinearität der Leistungskurve ergeben würde.

Im dritten Ansatz zur kühllastabhängigen Regelung wird eine Wichtung in dem Term des mittleren Volumenstroms vorgenommen, der die quadratische Verringerung der Druckverluste bei Teillast-Volumenströmen berechnet. In diesen gewichteten Volumenstrom fließt neben dem mittleren Volumenstrom auch der maximale Volumenstrom ein, der dem Auslegungsvolumenstrom entspricht. Dadurch wird die Nichtlinearität der Leistungskurve bei Teillast-Volumenströmen näherungsweise Rechnung getragen. Daher eignet sich der Ansatz zur kühllastabhängigen Regelung auch zur Berechnung der bedarfsabhängigen Lüftung am besten.

HINWEIS: In der Ausgabe DIN V 18599-3:2016 wird der zweite Ansatz für Anlagen mit zeit- oder nutzungsabhängiger Steuerung als Verfahren bei bedarfsabhängiger Regelung klar definiert.

Mit Gl. 16 bis 19 der DIN V 18599-3 lautet der Ansatz zur Leistungsberechnung bei bedarfsabhängiger Lüftung wie folgt (dritter Ansatz):

$$P_{VSR} = \frac{\Delta p^* \cdot f_p \cdot \dot{V}_{dc}}{\eta_m} + \frac{\Delta p^* \cdot (1-f_p) \cdot (0,8 \cdot \dot{V}_{dc} + 0,2 \cdot \dot{V}^*)^2 \cdot \dot{V}_{dc}}{\eta_m \cdot \dot{V}^{*2}} \quad 4.11$$

\dot{V}_{dc}	mittlerer Außenluftvolumenstrom bei bedarfsabhängiger Lüftung
\dot{V}^*	Auslegungsvolumenstrom
Δp^*	Auslegungsdruckverlust beim Auslegungsvolumenstrom
f_p	Druckverhältniszahl
η_m	mittlerer Wirkungsgrad

HINWEIS 1: In den zitierten Gleichungen der DIN V 18599-3 wird der monatliche Energiebedarf berechnet. Dieser lässt sich jedoch durch Division mit der monatlichen Betriebszeit (wie oben) in die mittlere Leistung umrechnen.

HINWEIS 2: Wenn die Lüftungsanlage gleichzeitig zur Deckung der Kühllast eingesetzt wird, muss bei Kühlbedarf statt dem mittleren Außenluftvolumenstrom bei bedarfsabhängiger Lüftung der benötigte mittlere monatliche Außenluftvolumenstrom zur thermischen Luftaufbereitung nach Gl. 4 der DIN V 18599-3 angesetzt werden. Weiterhin muss der Auslegungsvolumenstrom aus der maximalen Kühllast ermittelt werden.

Wird in Gl. 4.11 der Teillast-Volumenstromanteil als Quotient von Teillast-Volumenstrom zum Auslegungsvolumenstrom eingeführt und mit dem Auslegungsvolumenstrom normiert, kann die Formel folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$P_{0,VSR} = \frac{P_{VSR}}{\dot{V}^*} = \frac{\Delta p^* \cdot f_p \cdot \left(\frac{\dot{V}_{dc}}{\dot{V}^*}\right)}{\eta_m} + \frac{\Delta p^* \cdot (1-f_p) \cdot \left(0,8 \cdot \left(\frac{\dot{V}_{dc}}{\dot{V}^*}\right) + 0,2\right)^2 \cdot \left(\frac{\dot{V}_{dc}}{\dot{V}^*}\right)}{\eta_m} \quad 4.12$$

$\left(\frac{\dot{V}_{dc}}{\dot{V}^*}\right)$	Mittlerer Teillast-Volumenstromanteil bei bedarfsabhängiger Lüftung
Δp^*	Auslegungsdruckverlust beim Auslegungsvolumenstrom
f_p	Druckverhältniszahl
η_m	mittlerer Wirkungsgrad

Die mit Standardrandbedingungen und dem Verfahren der DIN V 18599 inkl. Wichtung berechnete, normierte Ventilatorleistung wird in Abbildung 4.20 dargestellt. Als vertikale Linien sind die mittleren Teillastvolumenstromanteile (für bedarfsabhängige Lüftung über Gassensoren) von exemplarischen Nutzungsarten eingetragen. Der Schnittpunkt mit der Leistungskurve zeigt die mittlere Ventilatorleistung während der Betriebszeit je m³/h Auslegungsvolumenstrom. Das Produkt der mittleren Leistung mit der Betriebszeit ist der entsprechende Tagesenergiebedarf des VSR-Systems nach DIN V 18599.

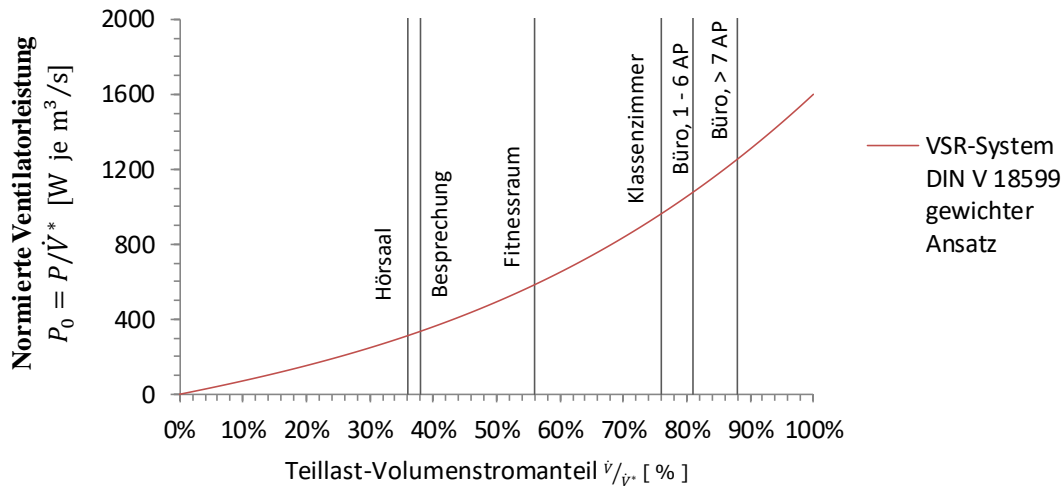


Abbildung 4.20: Mittlere Ventilatorleistung des VSR-Systems bei Berechnung nach DIN V 18599-3 (Verfahren: kühllastabhängige Regelung) für typische Nutzungen (horizontale Linien: Mittlere Teillast-Volumenstromanteile bei bedarfsabhängiger Regelung über Gassensoren)

Der so nach DIN V 18599 berechnete Tagesenergiebedarf wird in Abbildung 4.21 dem in der vorliegenden Arbeit verwendeten Ansatz – in zwei Stufen zunächst lediglich auf stündlicher Basis und dann zusätzlich mit Teillastwirkungsgraden – gegenübergestellt. Daraus können folgende Schlüsse gezogen werden:

1. Die in Gl. 4.12 enthaltene Wichtung funktioniert insgesamt gut: So wird in Abbildung 4.21 (rote Balken) die Abweichung des mit dem Stundenprofil – jedoch mit konstantem Wirkungsgrad – ermittelten Energiebedarfs gegenüber dem mit dem Tagesmittelwert nach DIN V 18599 berechneten jährlichen Energiebedarf für das System mit VSR bei bedarfsabhängiger Lüftung gegenübergestellt. Die nach DIN berechneten Werte sind bis zu 17% geringer als in der Referenzberechnung. Da die Wirkungsgrade bei dieser Betrachtung bei beiden Systemen gleich gehalten wurden, sind die Unterschiede auf das Rechenverfahren mit Stundenprofil bzw. Tagesmittelwert inkl. Wichtung zurückzuführen. Beim Verfahren ohne Wichtung (zeit- oder nutzungsabhängige Steuerung) sind hier größere Abweichungen zu erwarten.
2. Eine höhere Genauigkeit wird in dieser Arbeit zusätzlich durch die Berücksichtigung von Teillastwirkungsgraden erreicht. In Abbildung 4.21 (blaue Balken) wird die Referenzberechnung daher zusätzlich auch mit Teillastwirkungsgraden durchgeführt. Es zeigt sich, dass bei Nutzungsarten mit geringem mittleren Teillast-Volumenstrom wie Hörsälen oder Besprechungsräumen der Energiebedarf nach dem gewichteten Verfahren der DIN V 18599 um bis zu 37% zu gering berechnet wird.

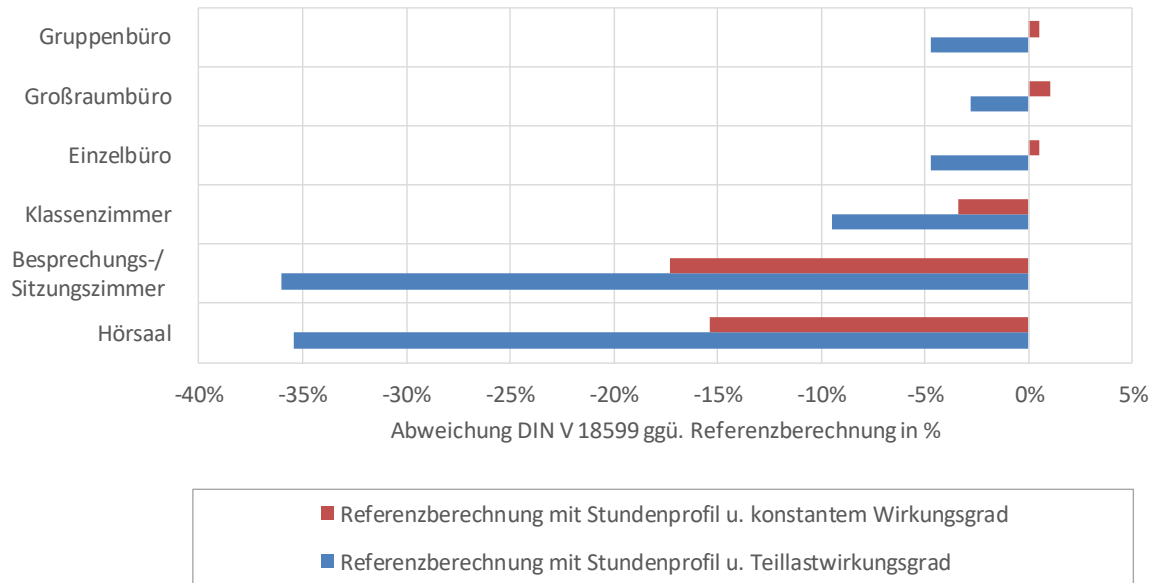


Abbildung 4.21: Abweichung des Energiebedarfs bei Berechnung nach DIN V 18599 gegenüber Referenzberechnung mit konstantem oder variablem Teillastwirkungsgrad

Bei den obenstehenden Berechnungen nach DIN V 18599 wurde stets ein mittlerer Wirkungsgrad von 60% angenommen, was dem empfohlenen Standardwert entspricht. Eine höhere Genauigkeit könnte mit den DIN-Verfahren auch durch die Berechnung eines mittleren Ventilator-Wirkungsgrads in Abhängigkeit vom zu erwartenden mittleren Teillast-Volumenstromanteil erreicht werden. Dazu fehlen dem Anwender der Norm jedoch entsprechende Berechnungshinweise, so dass eigene Ansätze verwendet werden müssten. Es ist daher davon auszugehen, dass in der Regel eine Ungenauigkeit durch die Verwendung eines Standardwertes in Kauf genommen wird.

Zusammengefasst kann davon ausgegangen werden, dass gerade bei Nutzungsarten mit hohen Anteilen an Teillastbetrieb, der Ventilatorstrombedarf nach DIN V 18599 gegenüber einem detaillierteren Ansatz um mehr als 30% zu gering berechnet wird. Dies ist zum einen auf den nichtlinearen Verlauf der Leistungskurve, aber noch stärker auf den Wirkungsgradabfall bei Teillast zurückzuführen. Als Ausblick auf die gebäudebezogene Bewertung in Kapitel 6 sei angemerkt, dass die Ventilatorleistung geringer ausfällt, wenn mehrere Lüftungszone mit unterschiedlichen Lastprofilen von einer Lüftungsanlage versorgt werden. Dadurch kann sich eine Kompensation mit den hier beschriebenen Zusammenhängen ergeben, die im Resultat zu einer geringeren Abweichung führen kann.

4.6 Konstante Leistungsanteile von sonstigen Verbrauchern

Neben dem Leistungsbedarf von Ventilatoren als Hauptverbrauchern ist ein elektrischer Leistungsbedarf durch weitere Verbraucher, die mit dem Volumenstrom-Raumregelsystem verknüpft sein können, vorhanden. Diese hat als Grundlast näherungsweise ein konstantes Leistungsprofil. In Tabelle 4.1 sind Beispiele für marktübliche Ausführungen, die hier als Richtwert dienen sollen, aufgeführt. Die Art und Anzahl entspricht den in Abschnitt 2.2 dargestellten System- und Regelvarianten. Es wird von einer digitalen Anbindung an ein ohnehin vorhandenes System der Gebäudeleittechnik ausgegangen, welche keine nennenswerte Verlustleistung je zusätzlichem Kanal aufweist. Weitere, optionale Verbraucher wie dezentrale Anzeige- und Bedienelementen werden ebenfalls nicht berücksichtigt.

Tabelle 4.1: Konstante Leistungsanteile der VVS-Lüftungssysteme (nur zusätzliche Komponenten)

Komponente	Beispiel	P	VSR-System		dVt-System G+D		dVt-System V+K	
			n	P	n	P	n	P
Ventilator (außerhalb Betriebszeit)	ebm-papst RadiCal	1,5 W					2	3,0 W
Volumenstromregler	Trox Easy-Regler	0,6 W	2	1,2 W				
Motorabsperreklappe	Belimo LM24A-SR	0,2 W					2	0,4 W
CO ₂ -Sensor	E+E EE850	0,4 W	1	0,4 W	1	0,4 W	1	0,4 W
Drucksensor	Sensirion SDP1000	< 0,02 W			1	0,0 W	1	0,0 W
Dezentraler Regler	LS Control MultiController	1,0 W			1	1,0 W	1	1,0 W
Summe								
ganzjährig				1,6 W		1,4 W		1,8 W
außerhalb Betriebszeit								3,0 W

Für das VSR-System ergibt sich eine konstante Leistung von 1,6 Watt über 8760 Stunden im Jahr. Demgegenüber ist:

- Im dVt-System mit Grundlüftung diese mit 1,4 Watt etwas geringer.
- Im dVt-System mit Vorspülung die konstante Leistung mit 2,2 Watt über 8760 Stunden im Jahr und zusätzlich 3 Watt für die Stunden außerhalb der Betriebsdauer höher.

Im deAL-System wird der Anteil konstanter Leistung mit dem dVt-System mit Vorspülung gleichgesetzt. Der mit diesen Angaben zu berechnende elektrische Jahres-Energiebedarf wird, wie in Abbildung 4.22 dargestellt, auf die Grundfläche der jeweiligen Nutzungsarten bezogen:

$$w_{a,S} = \frac{\sum_i P_{S,i} \cdot t_{S,i}}{A_{NGF}} \quad 4.13$$

$w_{a,S}$	Jahres-Energiebedarfskennwert sonstiger elektrischer Verbraucher [kWh je m ² und Jahr]
$P_{S,i}$	Grundleistung sonstiger elektrischer Verbraucher wie oben aufgelistet [kW]
$t_{S,i}$	Betriebsdauer sonstiger elektrischer Verbraucher wie oben aufgelistet [h]
A_{NGF}	(Nettogrund-)Fläche je Raum bzw. Nutzungszone nach Tabelle 3.4

Dabei zeigt sich, dass sich im dVt-System mit Vorspülung bei Einzel- und Gruppenbüros und bei Besprechungsräumen Kennwerte von ca. 1 bis 2 kWh/(m²a) ergeben. Für alle anderen Lüftungssysteme und Nutzungsarten liegt der Energiebedarfskennwert der sonstigen elektrischen Verbraucher bei Werten unter 0,5 kWh/(m²a). Der Unterschied ist auf den konstanten Verbrauch von elektromotorischen Klappen und insbesondere der Ventilatoren außerhalb der Betriebszeit zurückzuführen.

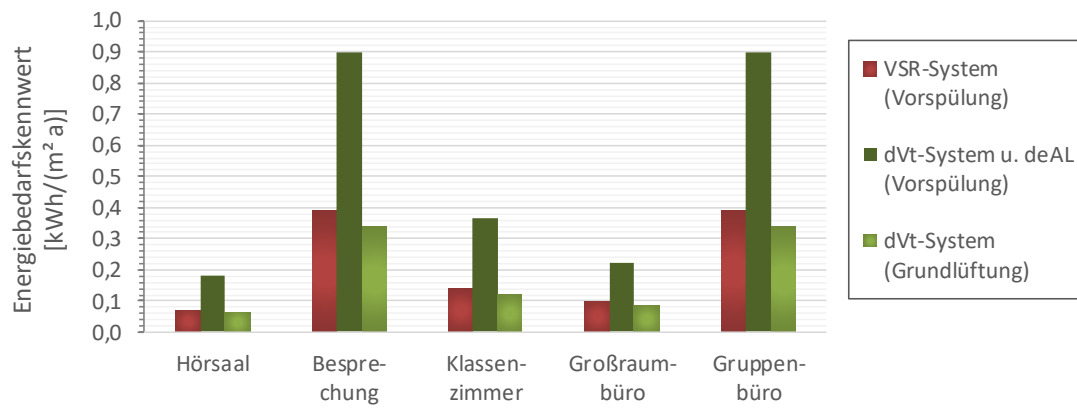


Abbildung 4.22: Energiebedarfskennwert durch konstante Leistungsanteile der Lüftungssysteme im Vergleich

4.7 Nutzenergiebedarf der thermischen Luftaufbereitung

Für eine energetische Bewertung der Lüftungssysteme auf primärenergetischer Basis ist neben der elektrischen Leistung auch der Nutzenergiebedarf der thermischen Luftaufbereitung zu betrachten. Dieser Nutzenergiebedarf entspricht in näherungsweise den Lüftungswärmeverlusten durch die (mit dem Luftvolumenstrom transportierte) thermische Energie, die mit Raumtemperatur das Gebäude verlässt und nicht durch Wärmerückgewinnung einer erneuten Nutzung zugeführt wird.

Der Nutzenergiebedarf der thermischen Luftaufbereitung spielt in der vorliegenden Arbeit für folgende Unterschiede zwischen den Lüftungssystemen eine Rolle:

- Wegen der nach unten begrenzten Ventilator Drehzahl und der Grundlüftung auch an Nichtnutzungstagen ergibt sich ein höherer Nutzenergiebedarf der thermischen Luftaufbereitung im Lüftungsprofil mit Grundlüftung gegenüber dem Lüftungsprofil mit Vorspülung, da mehr Außenluft thermisch konditioniert wird (höherer mittlerer Luftvolumenstrom). Noch höher ist der mittlere Luftvolumenstrom – und damit der Lüftungswärmeverlust – beim Konstant-Volumenstrom-System.
- Die Rückwärmzahl von dezentralen außenwandintegrierten Lüftungsgeräten (deAL) wird in Anlehnung an [Mahler u. a. 2008, S. 36] mit 60 % gegenüber der zentralen Konditionierung mit 75% als geringer angenommen. (Eine höhere Rückwärmzahl der zentralen Systeme gegenüber den deAL kann auch durch die deutlich höheren Druckverluste bei Standardrandbedingungen begründet werden. Im Einzelfall sind je nach Auslegung in allen Systemen bessere oder schlechtere Rückwärmzahlen möglich.) Die bei Standardrandbedingungen unterschiedlich hoch angesetzte Rückwärmzahl führt zu höheren Lüftungswärmeverlusten der deAL.

Die Bewertung des Nutzenergiebedarfs der thermischen Luftaufbereitung wird weitgehend mit dem Verfahren der DIN V 18599 – 3 durchgeführt, wobei nur der zur thermischen Konditionierung entstehende Nutzenergiebedarf betrachtet wird. Etwaige Übergabe-, Verteil-, und Speicherverluste werden vernachlässigt. Methodisch wird zunächst der tabellierte Jahresnutzenergiebedarfskennwert für Wärme bei einer Zulufttemperatur von 18 °C bei einer Betriebsdauer von 12 h pro Tag und 365 Tagen pro Jahr für eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (Rückwärmzahl 60 % bzw. 75 %) aus der Norm entnommen. Ebenso wird mit der Zunahme des Energiekennwerts je Kelvin höherer Zulufttemperatur verfahren.

Die Kennwerte wurden für die Verwendung im Rahmen der Norm für ein Referenzklima der Bundesrepublik Deutschland berechnet und müssen in nachfolgenden Schritten auf die konkrete Betriebssituation angepasst werden [DIN V 18599-3, S. 20]. Die entsprechenden Jahreskennwerte sind in Tabelle 4.2 aufgeführt:

Tabelle 4.2: Normierte Kennwerte zur Berechnung des Nutzenergiebedarfs der thermischen Luftaufbereitung nach DIN V 18599-3 bei unterschiedlichen Rückwärmzahlen

	Mit Rückwärmzahl 60 %	Mit Rückwärmzahl 75 %	
$q_{h,18^{\circ}C,12h}$	$1148 \frac{Wh}{m^3/h}$	$40 \frac{Wh}{m^3/h}$	Kennwert des jährlichen Nutzenergiebedarfs für Heizen bei Zulufttemperatur-Sollwert 18 °C und täglicher Betriebszeit von 12h
$g_{h,o}$	$783 \frac{Wh}{K \cdot m^3/h}$	$443 \frac{Wh}{K \cdot m^3/h}$	Gradient des monatlichen spezifischen Heizenergiebedarfs bei Zulufttemperatur-Sollwert > 18 °C

Zunächst sind diese Werte auf die reale Zulufttemperatur anzupassen. Es wird mit 21°C Zulufttemperatur (angenommene Raumtemperatur) gerechnet, um die Lüftungswärmeverluste (konditionierte Luft, welche mit Raumtemperatur die Lüftungszone verlässt) vollständig auszugleichen:

$$q_{h,12h} = q_{h,18^{\circ}C,12h} + g_{h,o} (\theta_h - 18^{\circ}C) \quad 4.14$$

$q_{h,12}$ Der Kennwert des jährlichen Nutzenergiebedarfs für Heizen bei Zulufttemperatur-Sollwert 21 °C und täglicher Betriebszeit von 12h

θ_h Zulufttemperatur-Sollwert = 21 °C

Anschließend wird der Kennwert auf die täglichen Betriebsstunden und die jährlichen Nutzungstage umgerechnet [DIN V 18599-3, S. 20]:

$$q_h = q_{h,12h} \cdot \frac{t_{v,mech}}{12h} \cdot f_{T,h} \cdot \frac{d_{v,mech}}{365d} \quad 4.15$$

q_h Der Kennwert des jährlichen Nutzenergiebedarfs für Heizen bei angepasstem Zulufttemperatur-Sollwert angepasster täglicher Betriebszeit

$t_{v,mech}$ Tägliche Anlagenbetriebszeit

$d_{v,mech}$ Jährliche Betriebstage nach [DIN V 18599-10]

$f_{T,h}$ Korrekturfaktor der täglichen Betriebszeit nach [DIN V 18599-3, Gl. 31]

An dieser Stelle wird zwischen den Lüftungsprofilen unterschieden: Während im Profil mit Vorspülung die tägliche Anlagenbetriebszeit und die jährlichen Betriebstage den Werten der DIN V 18599-10 entsprechen, wird im Lüftungsprofil mit Grundlüftung ganzjährig ein dauerhafter Betrieb angenommen.

HINWEIS 1: Der Korrekturfaktor $f_{T,h}$ wird für bei Lüftungsprofile mit den in der [DIN V 18599-10, S. 20] aufgeführten Zeiten berechnet, die dem Nutzungsprofil mit Vorspülung entsprechen. Da die nächtliche Grundlüftung bei minimalem Volumenstrom stattfindet und sich die Außentemperatur in der Nacht kaum von der Temperatur in den frühen Morgenstunden (typischerweise oder zum Sonnenaufgang) unterscheidet, in denen der Spülvorgang durchgeführt wird, wird an dieser Stelle keine Unterscheidung zwischen Grundlüftung und Vorspülung gemacht. Für $f_{T,h}$ ergeben sich entsprechend Werte von 0,95 bis 1,03.

HINWEIS 2: Da bei der Bedarfslüftung in allen Monaten der gleiche Volumenstrom gefördert wird, kann wie bei Konstant-Volumenstrom-Systemen mit den normierten Jahreskennwerten gerechnet werden.

Der nun hinsichtlich der Randbedingungen vollständig angepasste Nutzenergiebedarfskennwert für Heizen q_h wird mit dem mittleren Volumenstrom der jeweiligen Nutzungsart multipliziert, um den Jahresnutzenergiebedarf zu berechnen:

$$Q_{V,h} = q_h \cdot \dot{V}_{mech} \quad 4.16$$

$Q_{V,h}$	Jährlicher Nutzenergiebedarf der thermischen Luftaufbereitung in kWh/a
q_h	Kennwert des jährlichen Nutzenergiebedarfs der thermischen Luftaufbereitung bei angepasstem Zulufttemperatur-Sollwert angepasster täglicher Betriebszeit in kWh/(m ³ /h)
\dot{V}_{mech}	Mittlerer Volumenstrom während der Anlagenbetriebszeit in m ³ /h

Der mittlere Volumenstrom muss mit den je nach Lüftungsprofil unterschiedlichen täglichen Nutzungsstunden und jährlichen Nutzungstagen berechnet werden. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.23 dargestellt:

- Das KVS-System hat bei den Nutzungsarten Hörsaal und Besprechung den höchsten Nutzenergiebedarf der thermischen Luftaufbereitung. Dies ist auf die deutlich höheren Volumenströme und die damit einhergehende Luftkonditionierung zurückzuführen.
- Das deAL-System mit 60 % Rückwärmzahl hat für diese Nutzungsarten einen ähnlich hohen Nutzenergiebedarf der thermischen Luftaufbereitung und ist für die übrigen Nutzungsarten zum Teil mehr als doppelt so hoch. Dies ist auf die geringere angenommene Rückwärmzahl der deAL zurückzuführen. Bereits in den normierten Kennwerten des Nutzenergiebedarfs (Tabelle 4.2) ist der deutliche Unterschied zwischen 60 % und 75 % Rückwärmzahl zu erkennen. Können deAL-Systeme die Rückwärmzahl der zentralen Systeme erreichen, so sinkt der Nutzenergiebedarf der thermischen Luftaufbereitung auf das Niveau des dVt- und des VSR-Systems mit Vorspülung.
- Bezüglich der Frage, ob im dVt-System die Regelvariante mit Grundlüftung oder die Regelvariante mit Vorspülung energetisch vorteilhafter ist, zeigt sich, dass bei Grundlüftung diejenigen Nutzungsarten einen deutlich höheren Nutzenergiebedarf der thermischen Luftaufbereitung aufweisen, die wenige Nutzungsstunden am Tag oder wenige Nutzungstage pro Jahr aufweisen. Dies ist in Abbildung 4.23 beim Hörsaal und weniger ausgeprägt bei Besprechungs- und Klassenzimmern der Fall. Zur Minimierung der Lüftungswärmeverluste ist die Regelvariante mit Vorspülung für diese Nutzungen daher vorteilhafter.

Die nachfolgende primärenergetische Untersuchung fasst die thermischen und elektrischen Energiebedarfe der Luftförderung zusammen und dient der ganzheitlicheren Betrachtung.

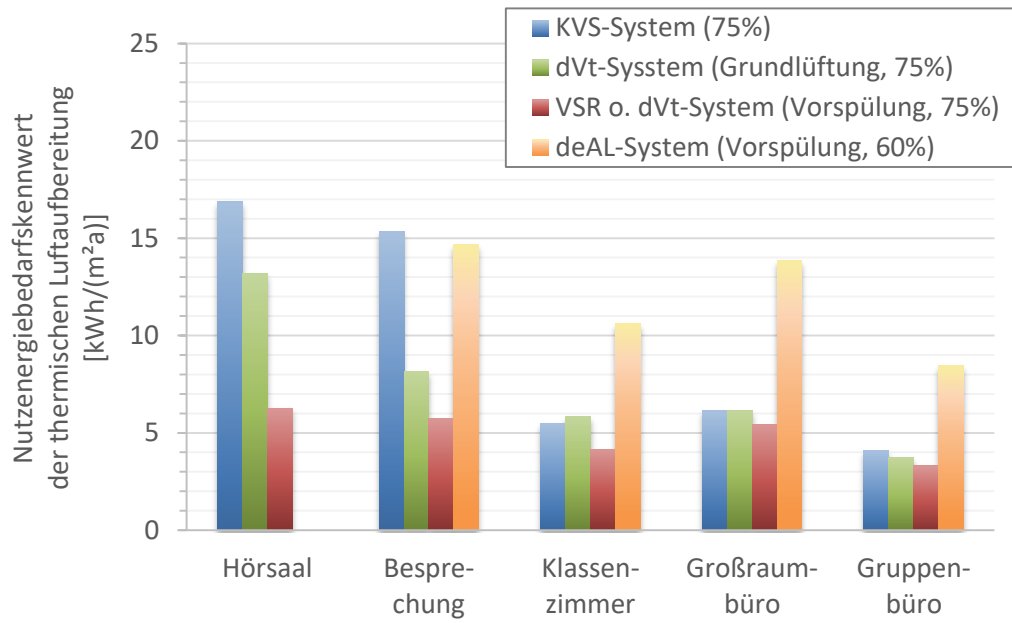


Abbildung 4.23: Vergleich des Nutzenergiebedarfskennwerts der thermischen Luftaufbereitung von KVS, VSR und dVt-System bei Standardrandbedingungen

4.8 Primärenergetisches Einsparpotenzial

Der Primärenergiebedarf je m² ist in Abbildung 4.24 dargestellt. Die Kennwerte beruhen auf einem Primärenergiefaktor von 2,0 für den nichterneuerbaren Anteil des deutschen Strommixes und 1,1 für den Wärmebedarf nach [DIN V 18599-1 Berichtigung 1].

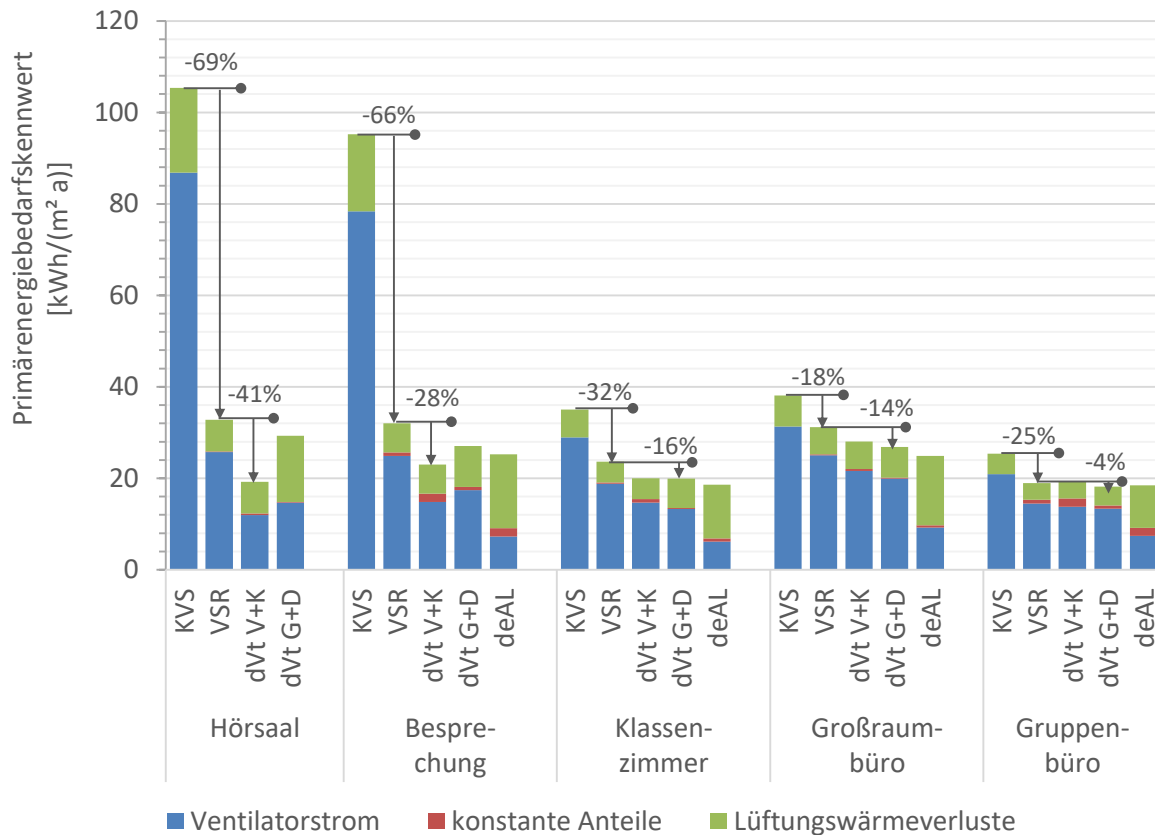


Abbildung 4.24: Jahres-Primärenergiekennwert der Lüftungssysteme bei Standardrandbedingungen

Die Auswertung zeigt:

- Das Konstant-Volumenstrom-System hat in allen Nutzungsarten einen zum Teil deutlich höheren Primärenergiebedarf als die übrigen Lüftungssysteme, v.a. bei Nutzungsarten mit viel Teillast-Betrieb (Hörsaal, Besprechung).
- VVS-Anlagen mit Variabel-Volumenstromreglern und konstantem Vordruck (VSR-System) ermöglichen gegenüber KVS-Anlagen für die untersuchten Nutzungsarten bereits primärenergetische Einsparungen von je nach Anwendungsfall 18 % bis 69 %. Von den dargestellten Nutzungsarten ist dies – außer in den Büronutzungen – bereits der vorgeschriebene Mindeststandard.
- Mit dem dVt-System ist demgegenüber mit einer weiteren Einsparung zu rechnen.
 - Die Regelvarianten mit Vorspülung und Klappe haben bei Hörsaal und Besprechung den geringsten Primärenergiebedarf aller Systeme. Das Einsparpotenzial gegenüber dem VSR-System liegt dort bei 41 % bzw. 28 %. Ähnlich hohe Einsparungen sind bei weiteren Nutzungsarten wie beispielsweise Kantinen, Restaurants, Theaterfoyer und Zuschauerbereichen, Fitnessräumen u.a. zu erwarten.

- Bei Klassenzimmern, Großraum- und Gruppenbüros ist die Regelvariante mit Grundlüftung primärenergetisch knapp überlegen oder gleichwertig. Das Einsparpotenzial gegenüber dem VSR-System liegt dann bei 4 % bis 16 %.
- Das deAL-System ist das einzige Lüftungssystem, bei dem die thermische Energiebedarf zur Luftaufbereitung größer als der elektrische Ventilatorenergiebedarf ist. Hier macht sich die geringere Rückwärmzahl bemerkbar. Dennoch ist der Primärenergiebedarf gegenüber den übrigen Lüftungssystemen gleichwertig oder leicht besser.

Es seien zwei wesentliche Einflussfaktoren angemerkt, die die Rangfolge der jeweils energieeffizientesten Systeme aufgrund der geringen Unterschiede in der absoluten Höhe ändern können:

- Werden bei den deAL-Systemen höhere Rückwärmzahlen erreicht, sinken die Lüftungswärmeverluste stark und es ist i.d.R. damit zu rechnen, dass ein sehr geringer Primärenergiebedarf besteht.
- Wird die Lüftung bei zentralen Systemen druckverlustärmer ausgelegt als üblich, sinkt der Ventilatorstrombedarf auch für diese Systeme deutlich. Auch bei den zentralen Systemen ist so möglich, deutlich geringere Primärenergiebedarfe zu erzielen.

Die berechneten und in Abbildung 4.24 dargestellten Primärenergiekennwerte stellen – soweit möglich – übliche Verhältnisse dar, die im Einzelfall deutlich variieren können.

Detail: Variation der jährlichen Nutzungstage

Die Detailbetrachtung einer Variation der jährlichen Nutzungstage im dVt-System um +/- 50 Tage in Abbildung 4.15 zeigt eine geringere Sensitivität des Lüftungsprofils mit Grundlüftung gegenüber dem Lüftungsprofil mit Vorspülung. So zeigt sich anhand des unterschiedlich großen Bereichs, den die Fehlerindikatoren aufspannen, dass die Variation im dVt-System mit Grundlüftung G+D etwas geringer ausfällt, als im System mit Vorspülung V+K. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Ventilatoren im System mit Grundlüftung ohnehin ganzjährig auf kleiner Stufe laufen, was bei Systemen mit Vorspülung nicht der Fall ist.

Für die Anwendung des dVt-Systems in der Praxis kann daher hinsichtlich einer energieoptimierten Auslegung tendenziell empfohlen werden, bei denjenigen Nutzungen, bei denen der Primärenergiebedarf näherungsweise gleich ist (hier: Klassenzimmer, Büronutzungen) abzuwägen, ob eher mehr oder weniger Auslastung, als in den Standardrandbedingungen definiert ist, erwartet wird:

- Bei einer größeren Auslastung (z.B. samstagsbetrieb in Büros, Nachmittagsunterricht in Schulen) ist das System mit Grundlüftung primärenergetisch günstiger.
- Bei einer geringeren Auslastung (z.B. zu erwartende Leerstände oder Teilzeitarbeit) ist das System mit Vorspülung und Klappe primärenergetisch günstiger.

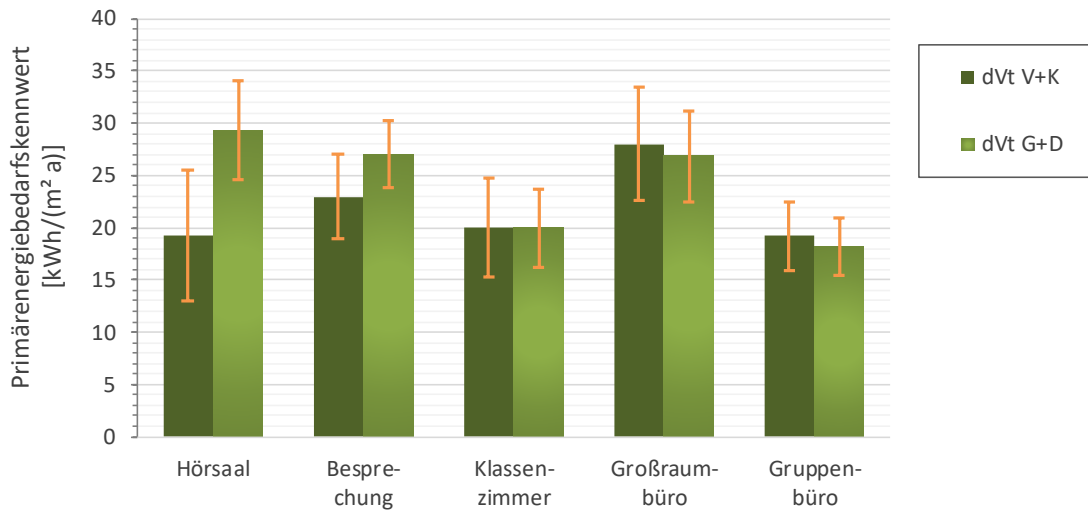


Abbildung 4.25: Primärenergiekennwert bei Variation der jährlichen Nutzungstage um +/- 50 Tage

5 Wirtschaftliche Bewertung des dVt-Systems

In die Bewertung der Wirtschaftlichkeit fließen die Gesamtkosten (hier für Investition, Inspektion, Wartung und Energie) des dVt-Systems, des VSR-Systems und des Konstant-Volumenstrom-Systems ein. Da sich das dVt-System noch in der Entwicklungsphase befindet, kann es sich hierbei nur um Schätzwerte handeln, die größtenteils auf einer Zusammenstellung von marktüblichen Einzelkomponenten beruhen. Die Kostenschätzung zeigt einen Streubereich auf, welcher in späteren Phasen der Systementwicklung und Markteinführung präzisiert werden sollte.

Die wirtschaftliche Bewertung erfolgt raumweise auf Basis des Kapitalwerts, der Rendite (interner Zinsfuß) und der dynamisch berechneten Amortisationsdauer. Tabelle 5.1 zeigt die wichtigsten Randbedingungen der Wirtschaftlichkeitsberechnung. Die Festlegung dieser Randbedingungen wird in nachfolgenden Abschnitten beschrieben. Anschließend erfolgt eine Parametervariation mit den wichtigsten Einflussgrößen. Die Ergebnisse stellen keine harten Fakten dar, sondern können wegen der oben beschriebenen Unsicherheiten bei der Ermittlung der Investitionskosten lediglich Tendenzen aufzeigen. Abschließend werden Hinweise zur Systemwahl – insbesondere zwischen dVt-System und VSR-System – bei projektspezifisch individuellen Randbedingungen diskutiert.

Tabelle 5.1: Randbedingungen der Wirtschaftlichkeitsberechnung

Energiepreise (Q4 2015)	Strom	Industrie: 13,0 Ct/kWh Verbraucher: 29,5 Ct./kWh nachfolgend: 18,9 Ct./kWh (netto) Preissteigerung: 3,8 % p.a. (5-Jahres Mittelwert)
	Wärme	Industrie: 3,0 Ct/kWh Verbraucher: 6,8 Ct./kWh nachfolgend: 4,4 Ct./kWh (netto) Preissteigerung: 1,7 % p.a. (5-Jahres Mittelwert)
Sonstige Randbedingungen (Q4 2015)	Bezugszeitraum	= Nutzungszeitraum 15 Jahre (einheitlich)
	Kalkulationszinsfuß	Angenommene Fremdkapitalfinanzierung Hypothekendarlehen: 2,5 % p.a. (5-Jahres Mittelwert)
Investitions(mehr-)kosten	VSR und dVt gegenüber KVS dVt gegenüber VSR	anhand Einzelkomponenten bestimmt
Wartungs- und Inspektionskosten	nach VDI 2067-1	Jährl. Kosten als % der Anfangsinvest.
Bewertungsgrößen	Kapitalwert	absoluter Gewinn/Verlust
	Amortisationsdauer	Amortisation ja/nein, Risiko
	Rendite	Effektivität

5.1 Kostenermittlung

Zur wirtschaftlichen Bewertung werden nachfolgend Investitionskosten, Energiekosten sowie betriebsgebundene Kosten für Wartung und Inspektion ermittelt.

5.1.1 Investitionskosten

Die Investitionskosten sollen trotz des frühen Entwicklungsstadiums des dVt-Systems einem Differenziertheitsgrad entsprechen, welcher die unterschiedliche Komplexität im technischen Aufbau der verschiedenen System- und Regelvarianten individuell darstellt. Somit können die unterschiedlichen technischen Ansätze hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit untereinander verglichen werden und ein Bereich möglicher Investitionskosten aufgespannt werden. Die absolute Höhe der Investitionskosten ist dagegen vor dem Hintergrund einer noch in der Forschungs- und Entwicklungsphase befindlichen technischen Konzeption des dVt-Systems mit größeren Unsicherheiten verbunden.

Zur Kostenermittlung werden folgende Bezugsgrößen verwendet:

- Die Komponentenkosten inklusive Installation (Absperrklappen, Schalldämpfer, Volumenstromregler und Ventilatoren) werden anhand von Listenpreisen abzüglich marktüblicher Rabatte bestimmt. Als Grundlage dienen Angaben eines Anlagenherstellers und Abgleiche mit den Preisspiegeln zweier Planungsbüros.
- Die Kosten von Datenpunkten mit deren Anbindung an eine Gebäudeleittechnik variieren nach Expertenangaben zwischen den Projekten je nach Projektgröße und verwendeter Technik stark und betragen ca. 150 – 400 Euro je Datenpunkt (vgl. [AMEV 2005]), i.d.R. inkl. Sensor. Es handelt sich dabei um eine Mischkalkulation aus hochwertigen und einfachen Komponenten, Übertragungsnetzen, Automationsstationen, Software und Engineering und sonstigen Leistungen. Da die Sensorik für die im vorliegenden Fall benötigten Raumregelsysteme tendenziell aus hochwertigen Komponenten besteht, wird pauschal ein Wert von 275 Euro zuzüglich Sensorkosten verwendet.
- Ein dezentraler Regler inkl. Drucksensor und Messwertgeber zur Volumenstrommessung (Messkreuz o.ä.) zur Steuerung des dVt-Systems muss in dieser Zusammenstellung noch als massentaugliches Produkt entwickelt werden. Die einzelnen Ausstattungsmerkmale entsprechen in weiten Teilen (Regler, Messwertgeber, Drucksensor) denen von Variabel-Volumenstromreglern, wobei dort darüber hinaus eine Klappe mit Motor installiert ist. Der Preis eines entsprechenden dVt-Reglers wurde daher über den mittleren Mehrpreis von Volumenstromreglern gegenüber einfachen motorischen Absperrklappen (Baugrößen DN 125 – DN 250) abgeschätzt und – um Entwicklungskosten zu berücksichtigen – um 50% erhöht. Im Ergebnis ergeben sich 212 Euro als grobe Abschätzung. Die Annahme ist bei Vorliegen genauerer technischer Konzeptionen fortzuschreiben.

Die gesamte Wirtschaftlichkeitsberechnung wird auf Basis von Nettokosten (ohne Umsatzsteuer) durchgeführt. Für Privatpersonen und öffentliche Verwaltungen müssen sämtliche Kosten um die Umsatz- bzw. Mehrwertsteuer korrigiert werden. Die jeweils erforderliche Anzahl an Komponenten und Datenpunkten wird für alle Kombinationen der in Kapitel 2 beschriebenen System- und Regelvarianten einzeln bestimmt. Eine Kurzbeschreibung der Sys-

tem- und Regelvarianten ist in Tabelle 5.2 dargestellt (siehe unten). Für die weitere Beschreibung des technischen Aufbaus wird auf Kapitel 2 verwiesen.

Tabelle 5.2: Legende mit Kurzbeschreibung der System- und Regelvarianten (vgl. Kapitel 2)

Systemvarianten:

A	Raumweise Zu- und Abluftventilatoren inkl. Volumenstrommessung und CO ₂ -geführter Regelung
B	Raumweise Zu- und Abluftventilatoren mit CO ₂ -geführter Regelung
C	Raumweise Zuluftventilatoren mit CO ₂ -geführter Regelung. Ein Abluftventilator für mehrere gleichartige Räume (hier: 3 Räume).

Regelvarianten:

G + D dez.	Zur Vermeidung von Fehlströmungen wird die Drehzahl hochgeregelt. Grundlüftung außerhalb der Nutzungszeit. Nutzungszeiten werden für die Regelung nicht benötigt. Es ist ein zentrales Monitoring vorhanden (1 Datenpunkt). Alle Regelvorgänge finden dezentral statt.
G + D zen.	Wie Regelvariante "G + D dez.", jedoch mit vollständig zentraler Regelung über die Gebäudeleittechnik (5 Datenpunkte).
V + K dez.	Abweichend zu den Regelvarianten G + D wird außerhalb der Nutzungszeit die Absperrklappe geschlossen. Die Nutzungszeiten werden benötigt, damit vor Beginn der Nutzungszeit ein Spülvorgang stattfinden kann. Alle weiteren Regelvorgänge finden dezentral statt (1 Datenpunkt).
V + K zen.	Wie Regelvariante "V + K dez.", jedoch mit vollständig zentraler Regelung über die Gebäudeleittechnik (7 Datenpunkte).

Die Kosten der Komponenten sind weiterhin abhängig vom Volumenstrom der versorgten Lüftungszone bzw. des versorgten Raumes. Daher wurden Volumenstrom-Kategorien von 200 m³/h, 500 m³/h, 1000 m³/h und 6000 m³/h gebildet, denen die untersuchten Nutzungsarten näherungsweise zugeordnet werden können.

Tabelle 5.3 zeigt beispielhaft die Kostenermittlung für die Volumenstrom-Kategorien von 500 m³/h, der z.B. Besprechungsräume zugeordnet werden. In der Tabelle wird zunächst die Zwischensumme der Komponenten aufgeführt, die für die jeweilige Systemvariante (A, B oder C) benötigt werden. Hinzu kommt ein Regelzusatz entsprechend der jeweiligen Regelvariante. Für das Beispiel des Besprechungsraums liegen die Kosten des Variabel-Volumenstrom-Systems mit ca. 1.900 Euro je Raum im unteren Bereich des von den dVt-Systemen aufgespannten Kostenrahmens von ca. 1.500 Euro – ca. 4.100 Euro.

- Es zeigt sich, dass die Varianten mit einer dezentralen Regelung immer kostengünstiger ausfallen, als die vollständig zentral geregelten Varianten, weil die benötigten Datenpunkte inkl. des zugehörigen Programmieraufwands immer mehr kosten als ein zusätzlicher dezentraler Regler, welcher mit nur einem Datenpunkt an die übergeordnete Gebäudeleittechnik angebunden wird.

- Für die dezentralen Regelvarianten liegen die Kosten im dVt-System zwischen ca. 1.500 Euro und 2.400 Euro. Die minimalen Kosten von ca. 1.500 Euro je Raum werden erreicht, wenn es möglich ist, die Systemvariante 1C zu verwenden. Dabei wird die Abluft mehrerer aneinander liegender Räume (hier 3 Räume angenommen) von nur einem Abluftventilator abgesaugt.

Tabelle 5.3: Mehrkosten gegenüber Konstant-Volumenstrom-Systemen bei 500 m³/h (ohne MwSt.)

Kosten je Raum für Volumenstrom-Raumregelsystem 500 m ³ /h (z.B. Besprechungszimmer)								
dVt-System	Komponente	Stückkosten	Systemvariante 1A		Systemvariante 1B		Systemvariante 1C	
			Anzahl	Kosten	Anzahl	Kosten	Anzahl	Kosten
Basis-komponenten	Ventilator	324 €	2	648 €	2	648 €	1,3	432 €
	CO2 Sensoren	251 €	1	251 €	1	251 €	1	251 €
	Rohrschalldämpfer	75 €	2	150 €	2	150 €	1	100 €
	Kulissenschalldämpfer	107 €	2	214 €	2	214 €	1,3	143 €
	<i>Zwischensumme</i>			1.263 €		1.263 €		926 €
Regelzusatz:								
G + D dez.	Dezentraler Regler mit V.-Mess	212 €	2	424 €	1	212 €	1,3	283 €
	Fehlströmungsdetektion	70 €	0	- €	1	70 €	0	- €
	Datenpunkte GLT	275 €	1	275 €	1	275 €	1	275 €
	<i>Zwischensumme</i>			699 €		557 €		558 €
G + D zen.	Volumenstrommessung	212 €	2	424 €	0	- €	1,3	283 €
	Fehlströmungsdetektion	70 €	0	- €	2	140 €	0	- €
	Datenpunkte GLT	275 €	5	1.375 €	5	1.375 €	3,7	1.008 €
	<i>Zwischensumme</i>			1.799 €		1.515 €		1.291 €
V + K dez.:	Motorabsperklappe	223 €	2	446 €	2	446 €	1,3	297 €
	Dezentraler Regler mit V.-Mess	212 €	2	424 €	1	212 €	1,3	283 €
	Fehlströmungsdetektion	70 €	0	- €	1	70 €	0,0	- €
	Datenpunkte GLT	275 €	1	275 €	1	275 €	1	275 €
	<i>Zwischensumme</i>			1.145 €		1.003 €		855 €
V + K zen.:	Motorabsperklappe	223 €	2	446 €	2	446 €	1,3	297 €
	Volumenstrommessung	212 €	2	424 €	0	- €	1,3	283 €
	Fehlströmungsdetektion	70 €	0	- €	2	140 €	0	- €
	Datenpunkte GLT	275 €	7	1.925 €	7	1.925 €	5,0	1.375 €
	<i>Zwischensumme</i>			2.795 €		2.511 €		1.955 €
Regelvariante Grundlüftung + Drehzahlregelung dezentral:				1.962 €		1.820 €		1.483 €
Regelvariante Grundlüftung + Drehzahlregelung zentral:				3.062 €		2.778 €		2.217 €
Regelvariante Vorspülung + Klappe dezentral:				2.408 €		2.266 €		1.781 €
Regelvariante Vorspülung + Klappe zentral:				4.058 €		3.774 €		2.881 €
VSR-System								
		Stückkosten	Anzahl	Kosten				
	Variabel-Volumenstromregler	359 €	2	718 €				
	CO2 Sensor	251 €	1	251 €				
	Rohrschalldämpfer	75 €	2	150 €				
	Datenpunkte GLT	275 €	3	825 €				
	<i>Summe</i>			1.944 €				

Analog zu Tabelle 5.3 sind die Kostenermittlungen für die Volumenstrom-Kategorien von 200 m³/h, 1000 m³/h und 6000 m³/h im Anhang (Abschnitt 8.3) dokumentiert. In der Volumenstromkategorie 6000 m³/h existieren derzeit noch keine EC-Rohrventilatoren. Da anstelle dessen die etwas teurere Variante von Radialventilator in einer sog. Multibox in der Kostenberechnung angesetzt wird, besteht hier noch ein Kostensenkungspotenzial bei Entwicklung von entsprechenden Rohrventilatoren.

Die Zusammenfassung aller Kategorien (siehe Tabelle 5.4) zeigt, dass die Kosten bei steigenden Volumenströmen zwar ansteigen, allerdings nicht in gleichem Maße wie der Volumenstrom. Die Kosten je gefördertem m³/h Luftvolumenstrom verringern sich daher deutlich. Besonders ausgeprägt ist dieser Effekt im VSR-System: Die Kosten steigen lediglich um das 1,3-fache bei einer Steigerung des Volumenstroms um das 30-fache. *Sowohl im dVt- als auch im VSR-System lässt die Kostenstruktur auf eine wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit für die Versorgung von Lüftungsbereichen mit großen Volumenstromanforderungen schließen.*

Tabelle 5.4: Übersicht der Mehr-Investitionskosten je Raum für dVt-System und VSR-System bei den unterschiedlichen Volumenstrom-Kategorien gegenüber einem Konstant-Volumenstrom-System.

Mehr-Investitionskosten je Raum		Systemvariante 1A	Systemvariante 1B	Systemvariante 1C	VSR
200 m ³ /h	G + D dezentral	1.882 €	1.740 €	1.430 €	1.868 €
	G + D zentral	2.982 €	2.698 €	2.163 €	
	V + K dezentral	2.300 €	2.158 €	1.709 €	
	V + K zentral	3.950 €	3.666 €	2.809 €	
500 m ³ /h	G + D dezentral	1.962 €	1.820 €	1.483 €	1.944 €
	G + D zentral	3.062 €	2.778 €	2.217 €	
	V + K dezentral	2.408 €	2.266 €	1.781 €	
	V + K zentral	4.058 €	3.774 €	2.881 €	
1000 m ³ /h	G + D dezentral	2.314 €	2.172 €	1.718 €	2.082 €
	G + D zentral	3.414 €	3.130 €	2.451 €	
	V + K dezentral	2.788 €	2.646 €	2.034 €	
	V + K zentral	4.438 €	4.154 €	3.134 €	
6000 m ³ /h *)	G + D dezentral	5.370 €	5.228 €	3.755 €	2.480 €
	G + D zentral	6.470 €	6.186 €	4.489 €	
	V + K dezentral	6.280 €	6.138 €	4.362 €	
	V + K zentral	7.930 €	7.646 €	5.462 €	

*) Erhöhte Investitionskosten aufgrund noch nicht in entsprechender Baugröße entwickelter EC Rohr-Ventilatoren

5.1.2 Inspektions- und Wartungskosten

Basierend auf [VDI 2067-1] können Kosten für Inspektion, Wartung und Instandhaltung für einzelne Komponenten berechnet werden. Von den betrachteten Komponenten sind demnach Sensoren, motorische Klappen sowie elektronische Systeme zur Datenverarbeitung und –übertragung besonders kostenintensiv. In Tabelle 5.5 sind die für das dVt- und VSR-System relevanten Kosten der [VDI 2067-1] als prozentualer Anteil der Anfangsinvestition dargestellt.

Tabelle 5.5: Auszug aus VDI 2067-1 Tabelle A2 zu jährlichen Instandsetzung,- Wartungs- und Instandhaltungskosten als prozentualer Anteil der Anfangsinvestition

	Instandsetzung	Wartung und Inspektion
Nr. 2.1.6.3 Radialventilatoren	1%	3%
Nr. 6.1.2 Sensoren	10%	2%
Nr. 2.1.7 Schalldämpfer	0%	1%
Nr. 6.2.1.4 Regler	10%	5%
Nr. 6.2.2.5 Bussysteme (Leitungen, passive Bauteile)	5%	0,5%
Nr. 6.1.1 Jalousieklappenantriebe	10%	1%

HINWEIS: Da Volumenstromregler nicht separat aufgeführt werden, wird der Mittelwert von *Jalousieklappenantrieben*, *Reglern* und *Sensoren* verwendet.

Die in Tabelle 5.5 dargestellten Kosten für Instandhaltung erscheinen sehr hoch: Bei 10% jährlichen Kosten für Instandhaltung würde innerhalb des gesamten Nutzungszeitraums jedes Jahr ein Zehntel der Sensoren/Reglern/Klappenantrieben zum Neupreis ersetzt werden müssen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass i.d.R. für die ersten 5 Jahre Herstellergarantien bestehen, sodass der Anteil der jährlich defekten Komponenten noch höher sein müsste, um im Mittel jährlich 10% der Investitionskosten zu verursachen. Da nach 15 Jahren rechnerisch eine vollständige Ersatzinvestition zum Neupreis getätigt wird, werden nachfolgend nur die Wartungs- und Inspektionskosten berücksichtigt, nicht aber die Instandhaltungskosten. In der Realität werden einige Komponenten weniger lange und einige Komponenten deutlich länger funktionieren, bis sie ersetzt oder instandgesetzt werden müssen. Eine vollständige Neuinstallation wird häufig erst nach 30 oder mehr Jahren durchgeführt. Grundsätzlich sollte angestrebt werden, Komponenten zu installieren, bei denen bei sachgemäßer Wartung kaum oder keine Instandhaltung nötig ist.

Die so für das dVt-System und das VSR-Vergleichssystem jährlichen entstehenden Kosten können nun mit den in Abschnitt 5.1.1 genannten Investitionskosten berechnet werden. Diese sind in Tabelle 5.6 dargestellt. Im dVt-System ergeben sich demnach mittlere jährliche Kosten von 31 bis 147 Euro, wohingegen diese beim VSR-System nur zwischen 45 bis 63 Euro pro Jahr liegen. Die Wartungs- und Inspektionskosten fallen vor allem bei großen Volumenströmen beim dVt-System deutlich höher aus als beim VSR-System. Dies ist gemäß VDI 2067-1 rein mathematisch auf die höheren Investitionskosten des dVt-Systems zurückzuführen (vgl. Tabelle 5.4). Die Angaben sollten bei vorliegenden Wartungs- und Instandhaltungsverträgen im Zuge eines Feldtests oder einer Markteinführungsphase neu bewertet werden.

Tabelle 5.6: Jährliche Mehrkosten für Inspektion und Wartung nach VDI 2067-1 gegenüber einem Konstant-Volumenstrom-System (je Raum)

Wartungs- und Inspektionskosten p.a.		Systemvariante 1A	Systemvariante 1B	Systemvariante 1C	VSR
200 m³/h	G + D dezentral	50 €	41 €	35 €	45 €
	G + D zentral	43 €	37 €	31 €	
	V + K dezentral	54 €	45 €	38 €	
	V + K zentral	50 €	44 €	35 €	
500 m³/h	G + D dezentral	51 €	41 €	36 €	47 €
	G + D zentral	43 €	38 €	31 €	
	V + K dezentral	55 €	46 €	39 €	
	V + K zentral	51 €	45 €	36 €	
1000 m³/h	G + D dezentral	59 €	50 €	41 €	50 €
	G + D zentral	52 €	46 €	37 €	
	V + K dezentral	64 €	54 €	45 €	
	V + K zentral	59 €	53 €	42 €	
6000 m³/h *)	G + D dezentral	138 €	129 €	94 €	63 €
	G + D zentral	131 €	125 €	90 €	
	V + K dezentral	147 €	138 €	100 €	
	V + K zentral	143 €	137 €	97 €	

*) Erhöhte Kosten aufgrund noch nicht in entsprechender Baugröße entwickelter EC Rohr-Ventilatoren (aufgrund erhöhter Investitionskosten)

Bei den nachfolgenden Wirtschaftlichkeitsberechnungen wird für die in Tabelle 5.6 dargestellten Wartungs- und Inspektionskosten eine mittlere jährliche Preissteigerung in Höhe von 2,3% berücksichtigt, was der Steigerung des Nominallohnindex der Jahre 2011 bis 2015 (5-Jahresmittelwert) entspricht [destatis 2016b].

5.1.3 Energiekosten

Die Jahresstromkosten je Raum bzw. Nutzungszone berechnen sich mit dem Strompreis, dem Nutzenergiebedarfskennwert der Luftförderung nach Gl. 4.8 und der Zonenfläche nach Tabelle 3.4:

$$K_S = p_S \cdot w_a \cdot A_{NGF} \quad 5.1$$

K_S	Stromkosten in Euro/Jahr
p_S	Strompreis in Euro/kWh
w_a	Nutzenergiebedarfskennwert der Luftförderung je m ² nach Gl. 4.8
A_{NGF}	(Nettogrund-)Fläche je Raum bzw. Nutzungszone nach Tabelle 3.4

Der Strompreis wird dabei mit 18,9 Ct./kWh angesetzt, was dem mit Nettopreisen berechneten Mittelwert der Industrie- und Verbraucherpreise entspricht (Stand: 4. Quartal 2015):

- Verbraucher: 29,5 Ct./kWh brutto [destatis 2016a]
- Industrie: 13,0 Ct./kWh netto [destatis 2016a]

Bei den nachfolgenden Wirtschaftlichkeitsberechnungen wird für Strom eine mittlere jährliche Preissteigerung in Höhe von 3,8% berücksichtigt, was der Preissteigerung der Jahre 2011 bis 2015 (5-Jahresmittelwert) für Industriekunden und Verbraucher entspricht [destatis 2016a]. Zum Vergleich: Der 3-Jahresmittelwert beträgt 0,3% und der 15-Jahresmittelwert 4,6%. Durch Verwendung des 5-Jahresmittelwerts werden mittlere Verhältnisse beschrieben.

Die Jahreswärmekosten je Raum bzw. Nutzungszone berechnen sich mit dem Wärmepreis, dem Heizwärmebedarfskennwert³ und der Zonenfläche nach Tabelle 3.4:

$$K_q = p_q \cdot q_{V,q} \cdot A_{NGF} \quad 5.2$$

K_q	Wärmekosten in Euro/Jahr
p_q	Wärmepreis in Euro/kWh
$q_{V,q}$	Nutzenergiebedarfskennwert der Luftförderung für Heizwärme, je m ² nach Gl. 4.16
A_{NGF}	(Nettogrund-)Fläche je Raum bzw. Nutzungszone nach Tabelle 3.4

Der Wärmepreis wird mit 4,4 Ct./kWh angesetzt, was wiederum dem mittlerem Gaspreis zwischen Industrie- und Verbraucherpreisen entspricht (Stand: 4. Quartal 2015, Nettopreis):

- Verbraucher: 6,8 Ct./kWh brutto [destatis 2016a]
- Industrie: 3,0 Ct./kWh netto [destatis 2016a]

Die mittlere jährliche Preissteigerung wird mit 1,7% berücksichtigt, was dem mittleren jährlichen Preisanstieg der 2011 bis 2015 (5-Jahresmittelwert) für Industriekunden (1,9% p.a.) und Verbraucher (1,4% p.a.) entspricht [destatis 2016a]. Zum Vergleich: Der Preisanstieg im 3-Jahresmittel beträgt 0,3% und im 15-Jahresmittel 4,5%.

Im Ergebnis ergeben sich die Jahres-Energiekosten wie in Abbildung 5.1 dargestellt. Die Stromkosten betragen zwischen ca. 50 Euro bis 1.650 Euro und sind damit deutlich höher als die Wärmekosten mit etwa 5 bis 150 Euro pro Jahr. Bei allen Nutzungsarten ist durch den Wechsel vom KVS-System zu einem der VVS-Systeme eine deutliche Energiekosteneinspa-

³ Luft- oder wasserseitige Anlagenverluste zur Erzeugung, Speicherung, Verteilung und Übergabe der Wärme werden vernachlässigt, da die Wärmekosten insgesamt eine untergeordnete Rolle spielen (vgl. Abbildung 5.1).

rung möglich. Gegenüber dem KVS-System liegen die Energiekosten bei den VVS-Systemen bei ca. 20% bis 30% für Hörsäle und bei 70% bis 75% für Gruppenbüros. Die unterschiedliche Höhe der Angaben ist im Wesentlichen auf die Einsparung im Ventilatorenergiebedarf mit den unterschiedlich großen Volumenströmen je Raum zurückzuführen, welche sich je nach Nutzungsart stark unterscheiden.

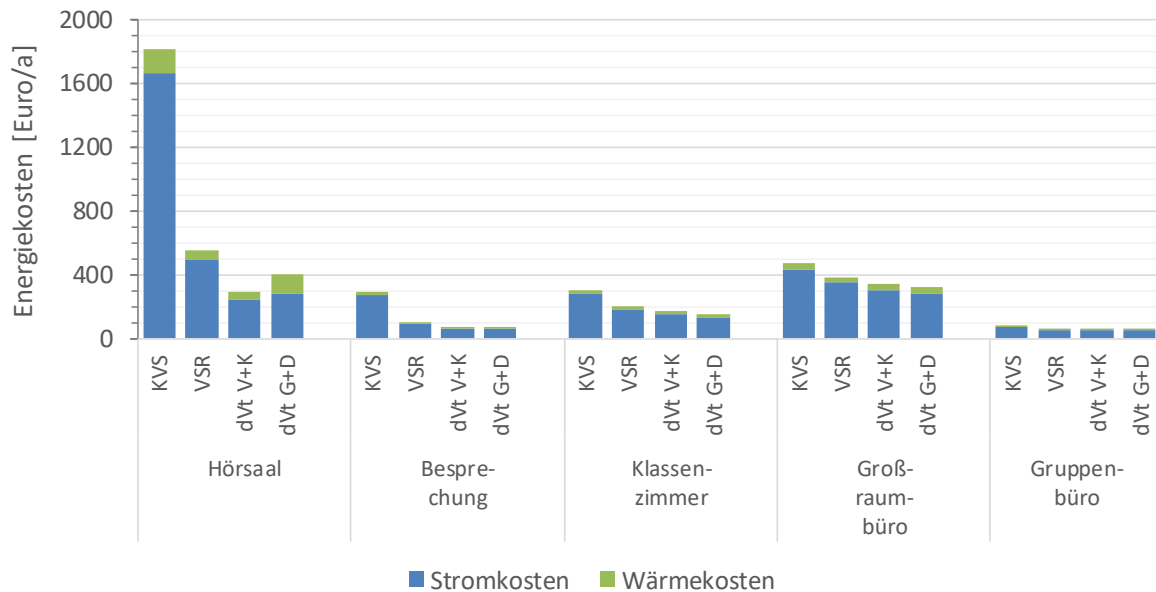


Abbildung 5.1: Anfängliche Jahresenergiekosten der verschiedenen Lüftungssysteme bei Standardrandbedingungen für typische Nutzungsarten

In Abbildung 5.2 ist die Differenz der Energiekosten der dVt-Systeme gegenüber dem VSR-System dargestellt. Negative Werte bedeuten, dass beim dVt-System weniger Energiekosten anfallen. Die Jahresenergiekosten sind beim dVt-System für alle Nutzungsarten niedriger als beim VSR-System (Gruppenbüros kaum Differenz). Die Einsparung je Raum beträgt allerdings nur zwischen ca. 30 und 250 Euro pro Jahr (außer Gruppenbüros). Bei Nutzungsarten mit vergleichsweise wenig jährlichen Nutzungsstunden (v.a. Hörsaal) ist das System mit Vorspülung und Klappe vorteilhafter. Bei Nutzungsarten mit vergleichsweise vielen Nutzungsstunden (Klassenzimmer und Büronutzungen) ist dagegen das System mit Grundlüftung und Drehzahlregelung vorteilhafter oder die Energiekosten sind gleichauf.

Die geringe absolute Energiekosteneinsparung je Raum verdeutlicht, dass die Mehrkosten des dVt-Systems gegenüber dem VSR-System i.d.R. gering ausfallen müssen, wenn die Mehrkosten amortisiert werden sollen. In den nachfolgenden Abschnitten wird die Wirtschaftlichkeit zunächst im Vergleich von dVt- und VSR-System gegenüber dem Konstant-Volumenstrom-System (Abschnitt 5.2) und anschließend gegeneinander quantifiziert und bewertet (Abschnitt 5.3).

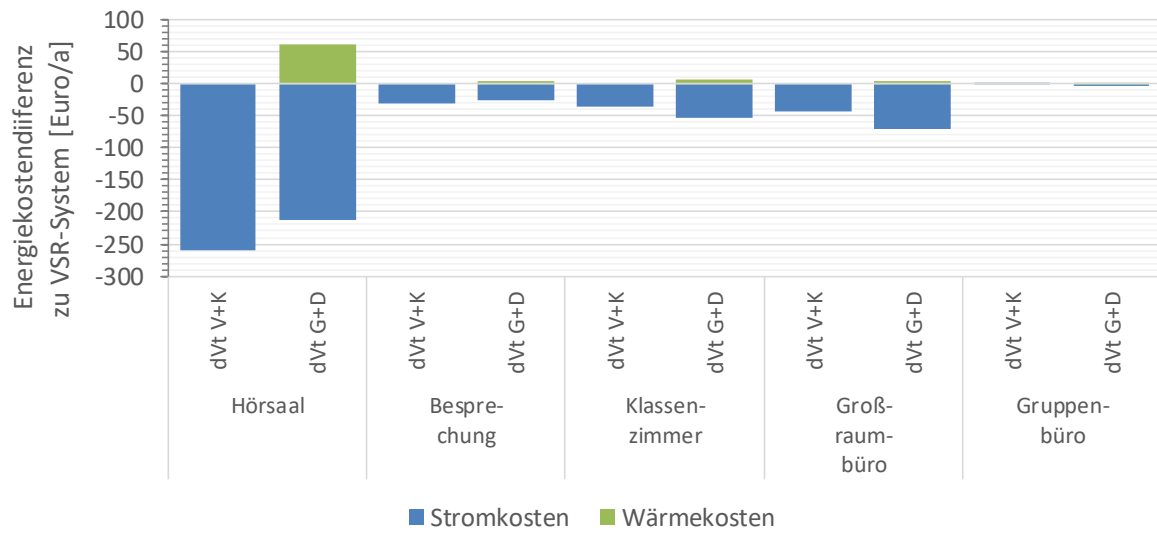


Abbildung 5.2: Energiekostendifferenz der dVt-Systeme gegenüber VSR-System (negative Werte = Einsparung)

5.2 Bewertung gegenüber Konstant-Volumenstrom-System

Zur wirtschaftlichen Bewertung der Lüftungssysteme werden nachfolgend die Kenngrößen Kapitalwert, Amortisationsdauer und Rendite berechnet. Alle drei Kenngrößen sind eng miteinander verknüpft.

Dem *Kapitalwert* liegt die Annahme zugrunde, dass zukünftige Ein- oder Ausgaben aus heutiger Sicht weniger Wert sind als solche, die sofort getätigt werden müssen (Zeitwert des Geldes). Daher werden alle zukünftigen Einsparungen und Ausgaben abgezinst (diskontiert), um zu berechnen, wie viel diese aus heutiger Sicht Wert sind. Die Investitionskosten finden zu Beginn des Nutzungszeitraums statt und bedürfen daher keiner Diskontierung.

$$KW = \sum_{t=1}^T \frac{E-A}{(1+i)^t} - I \quad 5.3$$

<i>KW</i>	Kapitalwert in Euro
<i>E - A</i>	Jährliche Einsparungen und Ausgaben gegenüber KVS-System in Euro
<i>I</i>	Mehr-Investitionskosten gegenüber KVS-System in Euro
<i>T</i>	Kalkulatorischer Nutzungszeitraum in Jahren
<i>i</i>	Kalkulationszinsfuß in %

Der kalkulatorische Nutzungszeitraum wird einheitlich für alle Komponenten mit 15 Jahren angenommen, was dem Bezugszeitraum der VDI 2067-1 für raumluftechnische Anlagen entspricht. Eine überschlägige Betrachtung der Ventilator-Vollaststunden hat diese Größenordnung bestätigt, wobei in der Praxis nutzungsartenbedingt Unterschiede bestehen. Aus Gründen der Nachvollziehbarkeit wird für die Wirtschaftlichkeitsberechnung jedoch eine einheitliche Nutzungsdauer verwendet und auf eine weitere Differenzierung verzichtet.

Zum Abzinsen wird der sogenannte Kalkulationszinsfuß verwendet, welcher sich z.B. daran orientiert, welche Verzinsung mit einer sicheren Geldanlage hätte erreicht werden können oder wieviel Kreditzinsen bei einer Fremdkapitalfinanzierung hätten eingespart werden können. In der vorliegenden Arbeit wird letzterer Ansatz gewählt, da angenommen wird, dass in Bauprojekten häufig auf eine Fremdkapitalfinanzierung verwendet wird:

- Mittel der Jahre 2011 – 2015: 2,5 % pro Jahr [Verband deutscher Pfandbriefbanken 2016]

Abbildung 5.3 zeigt die Entwicklung der Zinsen von Hypothekendarlehen, wobei vor allem die fallende Tendenz deutlich wird. Durch die Verwendung eines mehrjährigen Mittels wird daher ein eher hoher Wert verwendet, was zu einer tendenziell zurückhaltenden Bewertung von zukünftigen Einsparungen führt. Ein etwaiger Risikozuschlag wird hingegen an dieser Stelle nicht berücksichtigt. Das Investitionsrisiko (Einsparungen geringer oder Investitionskosten höher) muss daher mit einem ausreichend hohen Kapitalwert Rechnung getragen werden, wobei die absolute Höhe dessen individuell zu bewerten ist. Weiterhin wird auf die Parametervariation der Randbedingungen verwiesen.

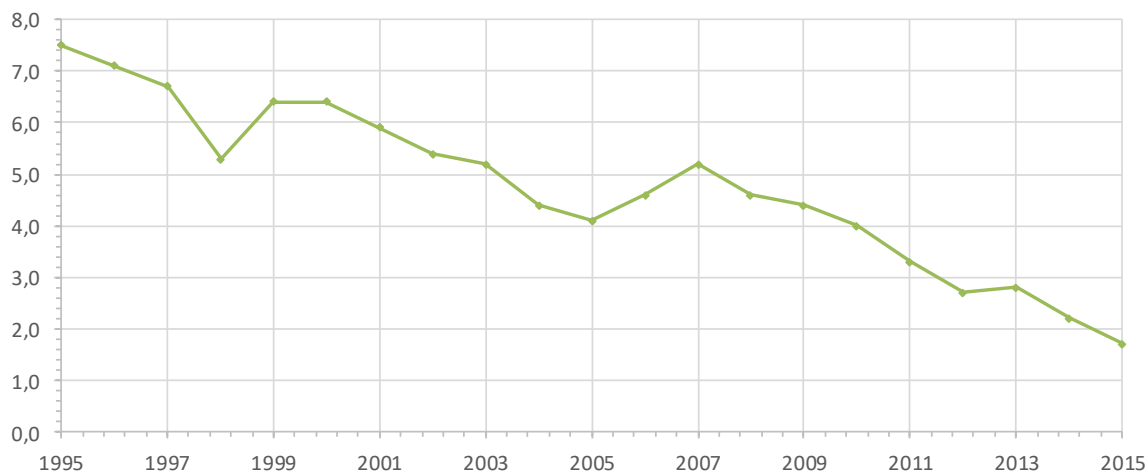


Abbildung 5.3: Effektivzins für Hypothekendarlehen in Deutschland in den Jahren 1995 bis 2015 [Verband deutscher Pfandbriefbanken 2016]

In Tabelle 5.7 sind die berechneten Kapitalwerte gegenüber einer Investition in ein Konstant-Volumenstrom-System für die verschiedenen System- und Regelvarianten des dVt-Systems und das VSR-System für die betrachtete Auswahl an typischen Nutzungsarten dargestellt. Die ausgewählten Nutzungsarten decken hinsichtlich ihrer Volumenströme (von 200 m³/h bis 6.000 m³/h) und Nutzungsprofile (mittlere Teillast-Volumenstromanteile von 36% bis 88%) eine große Bandbreite des Anwendungsspektrums ab.

Für die Nutzungsarten Klassenzimmer, Besprechungs-/ Sitzungszimmer und Hörsaal ist die Verwendung eines Variabel-Volumenstrom-Systems durch die EnEV 2014 vorgeschrieben, da der Auslegungsvolumenstrom (hier nach DIN V 18599-10) größer als 9 m³/h je m² ist (siehe Abschnitt 2.1.1 und Tabelle 3.4).

Die Auswertung der Kapitalwerte (siehe Tabelle 5.7) lässt folgende Schlüsse ziehen:

- Gegenüber dem Konstant-Volumenstrom-System sind in Gruppenbüros alle Kapitalwerte im negativen Bereich. In diesen Nutzungsarten ist eine Einzelraumregelung mit den betrachteten Systemkosten nicht wirtschaftlich darstellbar. In Großraumbüros und Klassenzimmern ist der Kapitalwert nur positiv, wenn die Regelvariante „G + D dezentral“ und Systemvariante 1C verwendet wird. Das VSR-Vergleichssystem erreicht bei Großraumbüros und Klassenzimmern keine positiven Kapitalwerte. In Besprechungs-/Sitzungsräumen und Hörsälen ist der Kapitalwert dagegen bis auf wenige Ausnahmen (wenn dVt-System zentral geregelt) immer positiv.
- Außer in der Hörsaalnutzung (wenige jährliche Betriebstage) ist für alle Nutzungsarten die Regelvariante „Grundlüftung und Drehzahlregelung“ der Regelvariante „Vorspülung und Klappe“ überlegen. Weiterhin ist die Variante mit dezentralem Regler immer die wirtschaftlichere Wahl.

Tabelle 5.7: Kapitalwert der betrachteten System- und Regelvarianten des dVt-Systems und des VSR-Systems je Raum gegenüber einem Konstant-Volumenstrom-System

Kapitalwert (auf 100te gerundet)		Systemvariante 1A	Systemvariante 1B	Systemvariante 1C	VSR
Gruppenbüro	G + D dezentral	-2.200 €	-1.900 €	-1.600 €	-2.200 €
	G + D zentral	-3.200 €	-2.800 €	-2.200 €	
	V + K dezentral	-2.800 €	-2.500 €	-2.000 €	
	V + K zentral	-4.400 €	-4.000 €	-3.000 €	
Großraumbüro	G + D dezentral	-600 €	-400 €	200 €	-1.400 €
	G + D zentral	-1.600 €	-1.300 €	-500 €	
	V + K dezentral	-1.600 €	-1.300 €	-500 €	
	V + K zentral	-3.100 €	-2.800 €	-1.600 €	
Klassenzimmer	G + D dezentral	-800 €	-500 €	100 €	-1.200 €
	G + D zentral	-1.800 €	-1.400 €	-600 €	
	V + K dezentral	-1.500 €	-1.200 €	-500 €	
	V + K zentral	-3.100 €	-2.700 €	-1.500 €	
Besprechungs-/ Sitzungszimmer	G + D dezentral	900 €	1.100 €	1.600 €	600 €
	G + D zentral	-100 €	200 €	900 €	
	V + K dezentral	500 €	800 €	1.300 €	
	V + K zentral	-1.100 €	-700 €	300 €	
Hörsaal ^{*)}	G + D dezentral	15.700 €	15.900 €	17.900 €	17.100 €
	G + D zentral	14.700 €	15.000 €	17.300 €	
	V + K dezentral	16.300 €	16.500 €	18.900 €	
	V + K zentral	14.700 €	15.000 €	17.800 €	

^{*)} Erhöhte dVt-Investitionskosten aufgrund noch nicht in entsprechender Baugröße entwickelter EC Rohr-Ventilatoren

Ein Nachteil der Kapitalwertmethode ist die Schwierigkeit, die Höhe der einzelnen Werte in den richtigen Bezug zu setzen und zu entsprechend beurteilen. Daher sind die Angaben zur Amortisationsdauer und zur Rendite (mittlere Verzinsung) sinnvolle Ergänzungen, da hier die Bezugsgrößen typischerweise bekannt sind. Beide Verfahren bauen mathematisch auf der Berechnung des Kapitalwerts auf bzw. sind eng mit der Kapitalwertmethode verwandt.

Die *Amortisationsdauer* gibt an, nach wie vielen Jahren die aufsummierten Einsparungen die Investitionskosten erstmalig übersteigen. Je kürzer die Amortisationsdauer ist, umso schneller hat sich die Investition gerechnet und umso geringer ist das Risiko, dass die Investition (bei schlechteren Randbedingungen als angenommen) unrentabel wird. Ist die Amortisationsdauer größer als die Nutzungsdauer, so findet keine Amortisation statt, d.h. die Investition rechnet sich nicht.

Bei der dynamischen Ermittlung der Amortisationsdauer werden – wie bei der Berechnung des Kapitalwerts – die Einsparungen unter Berücksichtigung der Energiepreissteigerung diskontiert, um den Zeitwert des Geldes entsprechend zu berücksichtigen. Mathematisch muss ermittelt werden, nach wie vielen Jahren der Kapitalwert erstmalig positiv wird:

$$KW = \sum_{t=1}^T \frac{E-A}{(1+i)^t} - I > 0 \quad 5.4$$

- KW* Kapitalwert in Euro
- E – A* Jährliche Einsparungen und Ausgaben gegenüber KVS-System in Euro
- I* Mehr-Investitionskosten gegenüber KVS-System in Euro
- T* Amortisationsdauer in Jahren (gesucht)
- i* Kalkulationszinsfuß in %

Die Amortisationsdauer der betrachteten System- und Regelvarianten des dVt-Systems und des VSR-Systems ist in Tabelle 5.8 dargestellt. Bei allen Ausführungen des dVt und VSR-Systems mit negativem Kapitalwert (siehe Diskussion von Tabelle 5.7) kann keine Amortisationsdauer berechnet werden, da keine Amortisation während der Nutzungsdauer stattfindet. Das Risiko, bei schlechteren Randbedingungen als angenommen eine Fehlinvestition zu tätigen, kann wie folgt eingeschätzt werden:

- Bei Einzel- und Gruppenbüros sind keine wirtschaftlichen Lösungen vorhanden. Ähnlich ist die Lage bei Großraumbüros und Klassenzimmern mit nur jeweils einer wirtschaftlichen Variante.
- In Besprechungsräumen liegt die Amortisationsdauer zwischen 5 und 15 Jahren und ist damit in Teilen durchaus attraktiv.
- Hörsäle haben Amortisationsdauern zwischen 3 und 6 Jahren und sind damit hochwirtschaftlich. Aufgrund der geringeren Kosten für das VSR-System findet die Amortisation für dieses System schneller statt. Das Risiko bei derartigen Nutzungsarten (u.a. auch Restaurants und Veranstaltungsräume) gegenüber einem Konstant-Volumenstrom-System eine wirtschaftliche Fehlinvestition zu tätigen, kann auch für alle dVt-Systemausführungen als sehr gering eingeschätzt werden.

Tabelle 5.8: Amortisationsdauer der betrachteten System- und Regelvarianten des dVt-Systems und des VSR-Systems gegenüber einem Konstant-Volumenstrom-System

Amortisationsdauer		Systemvariante 1A	Systemvariante 1B	Systemvariante 1C	VSR
Gruppenbüro	G + D dezentral	-	-	-	-
	G + D zentral	-	-	-	
	V + K dezentral	-	-	-	
	V + K zentral	-	-	-	
Großraumbüro	G + D dezentral	-	-	14	-
	G + D zentral	-	-	-	
	V + K dezentral	-	-	-	
	V + K zentral	-	-	-	
Klassenzimmer	G + D dezentral	-	-	15	-
	G + D zentral	-	-	-	
	V + K dezentral	-	-	-	
	V + K zentral	-	-	-	
Besprechungs-/ Sitzungszimmer	G + D dezentral	11	10	8	12
	G + D zentral	-	14	12	
	V + K dezentral	13	12	9	
	V + K zentral	-	-	14	
Hörsaal*)	G + D dezentral	5	4	3	3
	G + D zentral	5	5	4	
	V + K dezentral	5	5	4	
	V + K zentral	6	6	4	

*) Erhöhte dVt-Investitionskosten aufgrund noch nicht in entsprechender Baugröße entwickelter EC Rohr-Ventilatoren

Die *Rendite* entspricht mathematisch dem Begriff des internen Zinsfußes und beschreibt, welche mittlere Verzinsung das eingesetzte Kapital erfährt. Während mit dem Kapitalwert berechnet wird, wie hoch der absolute Gewinn oder Verlust über den Nutzungszeitraum ist, wird mit der Rendite ermittelt, wie effektiv das Kapital eingesetzt wird. Die Investition ist dann als wirtschaftlich zu betrachten, wenn die Rendite größer als der Kalkulationszinsfuß ist.

Die mittlere Verzinsung (Rendite, interner Zinsfuß) über den gesamten Nutzungszeitraum entspricht dem Zinssatz, bei dem die jährlichen, zu diskontierenden Einsparungen gerade mit den Investitionskosten übereinstimmen und daher in Gl. 5.3 der Kapitalwert Null wird. Es ist daher folgende Gleichung mit einem numerischen Lösungsverfahren (z.B. Newton-Verfahren) nach dem internen Zinsfuß aufzulösen:

$$0 = \sum_{t=1}^T \frac{E-A}{(1+i)^t} - I \quad 5.5$$

- $E - A$ Jährliche Einsparungen und Ausgaben gegenüber KVS-System in Euro
 I Mehr-Investitionskosten gegenüber KVS-System in Euro
 T Kalkulatorischer Nutzungszeitraum in Jahren
 i Interner Zinsfuß in %

Kapitalwert und Rendite können nun für die alle System- und Regelvarianten des dVt-Systems und für das VSR-System berechnet werden. Keine Auswertung erfolgt lediglich dort, wo in keinem Jahr die Energiekosteneinsparungen die Kosten für Inspektion und Wartung übersteigen.

Tabelle 5.9 zeigt, dass bei denjenigen System- und Regelvarianten, bei denen in den vorherigen Auswertungen eine Amortisation innerhalb der Nutzungszeit festgestellt wurde, die Rendite bei mindestens 2,5% liegt (entsprechend des Kalkulationszinssfußes Kriterium für Wirtschaftlichkeit) und in einigen Fällen sogar zweistellig werden kann. Angesichts der in den letzten Jahren (Stand 2015) geringen Verzinsungen auf dem Kapitalmarkt, dürften die Renditen also gerade für Investoren von Interesse sein.

Tabelle 5.9: Interner Zinsfuß der betrachteten System- und Regelvarianten des dVt-Systems und des VSR-Systems gegenüber einem Konstant-Volumenstrom-System

Interner Zinsfuß		Systemvariante 1A	Systemvariante 1B	Systemvariante 1C	VSR
Gruppenbüro	G + D dezentral	-	-	-	-
	G + D zentral	-	-	-	
	V + K dezentral	-	-	-	
	V + K zentral	-	-	-	
Großraumbüro	G + D dezentral	-1%	0%	4%	-9%
	G + D zentral	-5%	-3%	0%	
	V + K dezentral	-6%	-5%	-1%	
	V + K zentral	-10%	-9%	-5%	
Klassenzimmer	G + D dezentral	-2%	-1%	3%	-6%
	G + D zentral	-5%	-4%	-1%	
	V + K dezentral	-6%	-4%	-1%	
	V + K zentral	-10%	-9%	-5%	
Besprechungs-/ Sitzungszimmer	G + D dezentral	7%	9%	13%	6%
	G + D zentral	2%	4%	7%	
	V + K dezentral	5%	6%	10%	
	V + K zentral	-1%	0%	4%	
Hörsaal*)	G + D dezentral	27%	28%	39%	53%
	G + D zentral	22%	24%	33%	
	V + K dezentral	25%	26%	37%	
	V + K zentral	19%	20%	29%	

*) Erhöhte dVt-Investitionskosten aufgrund noch nicht in entsprechender Baugröße entwickelter EC Rohr-Ventilatoren

5.3 Bewertung gegenüber Volumenstromregler-System

Der direkte Vergleich des Kapitalwerts der verschiedenen dVt-System- und Regelvarianten gegenüber dem VSR-System ist in Tabelle 5.10 ist für die zuvor getroffene Auswahl an Nutzungsarten dargestellt.

Bereits im Vergleich mit dem Konstant-Volumenstrom-System wurde festgestellt, dass die Regelvariante G + D dezentral – bis auf Hörsaalnutzung – die wirtschaftlichste Regelvariante darstellt. In diesen Fällen *ist das dVt-System gegenüber dem VSR-System immer wirtschaftlicher* (bis auf Hörsaalnutzung). In Hörsälen können die deutlich höheren Investitionskosten nicht durch die deutlichen Energieeinsparungen kompensiert werden. Perspektivisch könnten EC-Rohrventilatoren in größeren Baugrößen – die derzeit nicht auf dem Markt verfügbar sind – Investitionskosten senken und damit die Wirtschaftlichkeit erhöhen. Insbesondere aufgrund der hohen Energieeinsparungen ist die Hörsaalnutzung (und vergleichbare Nutzungsarten mit hohen Auslegungsvolumenströmen und viel Teillastbetrieb) prinzipiell ein interessantes Anwendungsgebiet für das dVt-System.

Tabelle 5.10: Kapitalwert der betrachteten System- und Regelvarianten des dVt-Systems gegenüber dem VSR-System (eingekreiste Werte: Basisvariante für Parametervariation)

Kapitalwert (auf 100te gerundet)		Systemvariante 1A	Systemvariante 1B	Systemvariante 1C
Gruppenbüro	G + D dezentral	0 €	300 €	600 €
	G + D zentral	-1.000 €	-700 €	0 €
	V + K dezentral	-600 €	-300 €	200 €
	V + K zentral	-2.200 €	-1.800 €	-800 €
Großraumbüro	G + D dezentral	700 €	1.000 €	1.600 €
	G + D zentral	-300 €	100 €	900 €
	V + K dezentral	-200 €	100 €	900 €
	V + K zentral	-1.800 €	-1.400 €	-200 €
Klassenzimmer	G + D dezentral	400 €	700 €	1.300 €
	G + D zentral	-600 €	-200 €	600 €
	V + K dezentral	-300 €	-100 €	700 €
	V + K zentral	-1.900 €	-1.600 €	-400 €
Besprechungs-/ Sitzungszimmer	G + D dezentral	300 €	600 €	1.000 €
	G + D zentral	-700 €	-300 €	300 €
	V + K dezentral	-100 €	200 €	800 €
	V + K zentral	-1.700 €	-1.300 €	-300 €
Hörsaal ^{*)}	G + D dezentral	-1.400 €	-1.100 €	900 €
	G + D zentral	-2.400 €	-2.000 €	200 €
	V + K dezentral	-800 €	-500 €	1.800 €
	V + K zentral	-2.400 €	-2.000 €	800 €

^{*)} Erhöhte dVt-Investitionskosten aufgrund noch nicht in entsprechender Baugröße entwickelter EC Rohr-Ventilatoren

HINWEIS: Eine Berechnung von internem Zinsfuß und Amortisationsdauer ist für die Untersuchung dVt- vs. VSR-System nicht sinnvoll, da beide Verfahren auf einer einmaligen Anfangsinvestition beruhen, die sich aufgrund von zumindest zeitweilig positiven jährlichen Einnahmen amortisiert bzw. verzinst. Im vorliegenden Fall unterscheiden sich die Investitionskosten von dVt- und VSR-System in vielen Fällen sehr wenig voneinander. In einigen Fällen sind die Investitionskosten im dVt-System geringer als im VSR-System. Zudem sind nicht in jeder System- und Regelvariante jährliche Überschüsse vorhanden, die zu einer Amortisation führen könnten. Eine Berechnung ist daher in einigen Fällen entweder nicht möglich und würde in anderen Fällen zu sehr hohen oder niedrigen Werten führen, deren Aussagekraft begrenzt wäre. Das Kapitalwertverfahren ist diesbezüglich stabiler.

Nachfolgend wird für drei exemplarische Nutzungsarten (Gruppenbüro, Klassenzimmer und Hörsaal) die Sensitivität der relevantesten Randbedingungen der Kapitalwertberechnung für eine Investition in das dVt-System gegenüber einer Investition in das VSR-System dargestellt (Parametervariation). Eine Parametervariation für weitere Nutzungsarten ist in Anhang 8.4 aufgeführt.

Als Basisvariante der Parametervariation wurden beim dVt-System die in Tabelle 5.10 eingekreisten, fett gedruckten System- und Regelvarianten ausgewählt. Die so getroffene Auswahl für die Parametervariation dürfte für viele der typischen Anwendungsfälle eine aus energetischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvolle Lösung darstellen. Variiert werden die in Tabelle 5.11 aufgeführten Parameter der Wirtschaftlichkeitsberechnung. Die Variationen betreffen jeweils sowohl das zu bewertende dVt-System als auch das VSR-Vergleichssystem, um beide Systeme anhand der gleichen Maßstäbe zu bewerten.

Tabelle 5.11: Parameter zur Variation der Wirtschaftlichkeitsberechnung

	Basis	Variation von...	Variation bis...
Investitionskosten	s. Abschnitt 5.1.1	70 %	130 %
Investitionskosten (nur dVt-System)	s. Abschnitt 5.1.1	80 %	120 %
Nutzungsdauer	15 Jahre	12 Jahre	18 Jahre
Preissteigerung für Strom und Wärme	s. Abschnitt 5.1.3, d.h. 3,8 % Strom 1,7 % Wärme	Jeweils -2%, d.h. 1,8 % Strom und -0,3 % Wärme	Jeweils +2%, d.h. 5,8 % Strom und 3,7 % Wärme
Kalkulationszinsfuß	2,5 %	-2 %, d.h. 0,5 %	+2 %, d.h. 4,5 %
Energiepreise (Q4 2015)	Mittelwerte: 18,9 Ct./kWh Strom 4,4 Ct./kWh Wärme	Industriepreise: 13,0 Ct./kWh Strom 3,0 Ct./kWh Wärme	Verbraucherpreise: 29,5 Ct./kWh Strom 6,8 Ct./kWh Wärme
Nutzungstage pro Jahr	DIN V 18599-10	-50 Tage pro Jahr	+50 Tage pro Jahr
Auslegungsvolumenstrom je Raum oder Auslegungsdruckverlust	s. Tabelle 3.4, S. 46 u. Abbildung 3.11, S. 51	70 %	130 %
Druckverhältniszahl	0,4	0,2	0,6
Netzfaktor	0,75	0,6	0,9
Energiebedarf	s. Abschnitt 4.3	70 %	130 %

In Abbildung 5.4 bis Abbildung 5.6 sind die Ergebnisse der Parametervariation mit jeweils zwei sogenannten Netzdiagrammen für jede Nutzungsart (hier: Gruppenbüro, Klassenzimmer und Hörsaal, weitere Nutzungsarten siehe Anhang 8.4) dargestellt. In beiden zueinander gehörigen Netzdiagrammen sind die Kriterien nach Tabelle 5.11 aufgetragen, wobei die Diagramme auf der linken Seite mit den für das dVt-System typischerweise ungünstigeren Randbedingungen (höhere Investitions- und Wartungskosten, kürzere Nutzungsdauer und geringere Energiebedarfe, Energiepreise und Energiepreissteigerungen) und die Diagramme auf der rechten Seite mit den für das dVt-System entsprechend günstigeren Randbedingungen (geringere Investitions- und Wartungskosten, längere Nutzungsdauer und höhere Energiebedarfe, Energiepreise und Energiepreissteigerungen) berechnet werden.

Die Skalierung der Haupt-Gitternetzlinien in den Diagrammen entspricht dem Kapitalwert der jeweiligen Basisvariante. Somit liegen diejenigen Berechnungsvarianten, die gegenüber der Basisvariante zu geringeren Kapitalwerten führen, im Bereich innerhalb und diejenigen Berechnungsvarianten, die zu höheren Kapitalwerten führen, außerhalb des vom Kapitalwert der Basisvariante aufgespannten Haupt-Gitternetzes. Jede Über- oder Unterschreitung einer Hilfs-Gitternetzlinie entspricht einer Steigerung oder Verringerung des Kapitalwertes der Basisvariante um 20%.

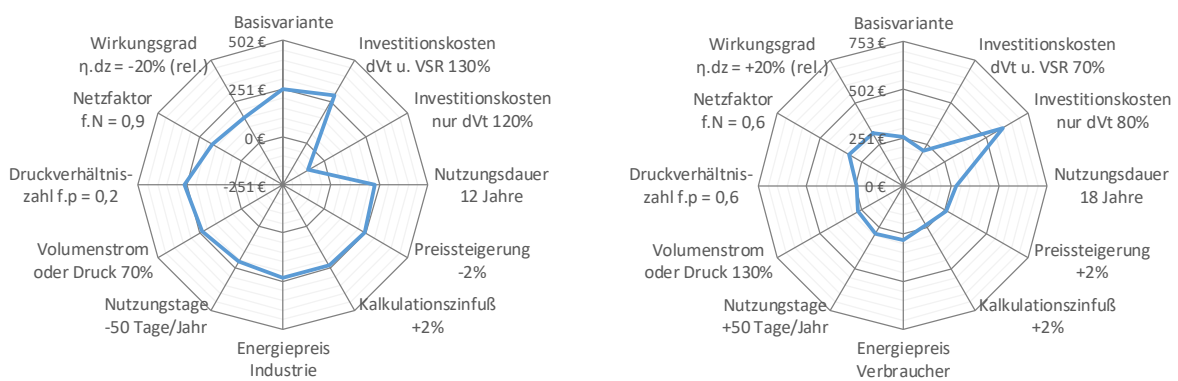


Abbildung 5.4: Gruppenbüro – Parametervariation zur Berechnung des Kapitalwerts ggü. VSR-System

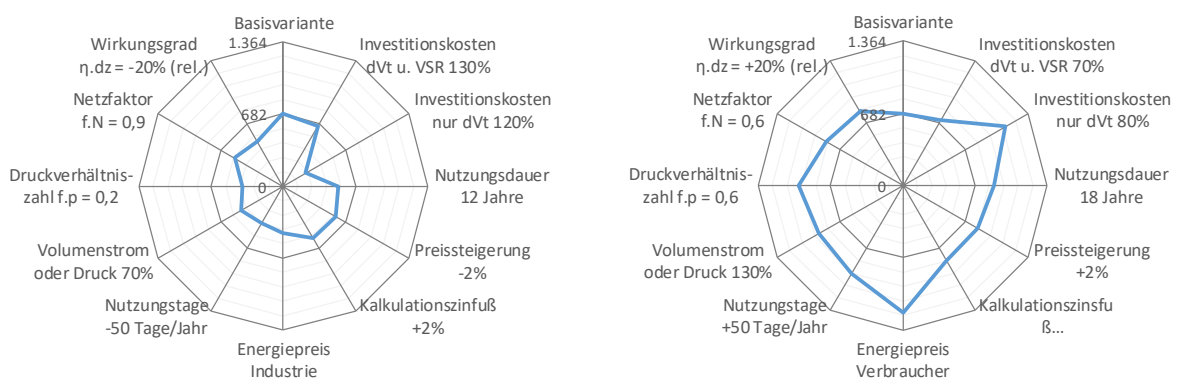


Abbildung 5.5: Klassenzimmer – Parametervariation zur Berechnung des Kapitalwerts ggü. VSR-System

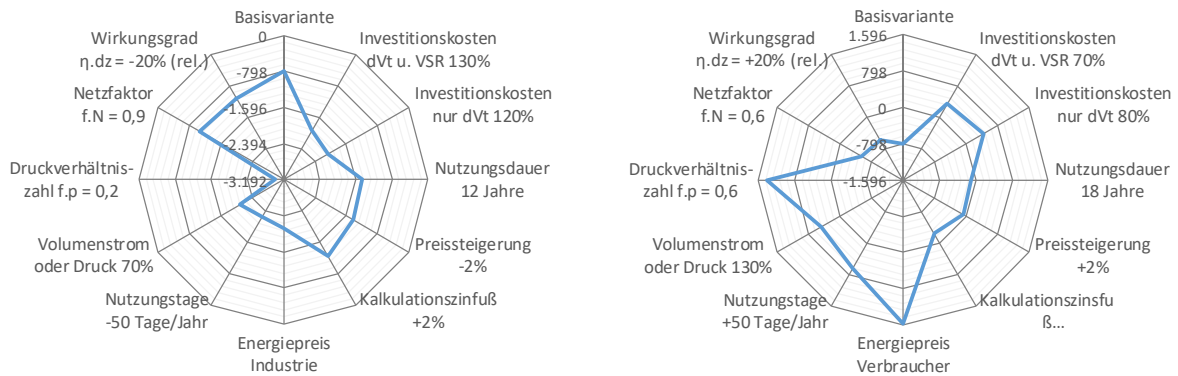


Abbildung 5.6: Hörsaal – Parametervariation zur Berechnung des Kapitalwerts ggü. VSR-System

Im Vergleich der drei Nutzungsarten zeigen sich deutliche Unterschiede:

- Die Gruppenbüronutzung (charakterisiert durch geringe Auslegungsvolumenströme und mäßige Variation des Tagesprofils) stellt sich insgesamt als wenig sensitiv für die Parametervariationen heraus, was darauf zurückzuführen ist, dass sowohl die Investitionskosten als auch die jährlich anfallenden Energiekosten und betriebsgebundenen Kosten des dVt-Systems und des VSR-Vergleichssystems für diese Nutzungsart sehr ähnlich sind. Einen großen Einfluss auf den Kapitalwert hat eine Änderung der Investitionskosten des dVt-Systems.

Rangfolge der Parameter mit höchster Sensitivität:

1. Investitionskosten dVt (!)
2. Netzfaktor
3. Wirkungsgrad dVt

Insgesamt ist für die Büronutzung festzuhalten, dass das dVt-System bis auf die Erhöhung der Investitionskosten dVt auf 120% immer wirtschaftlicher ist als das VSR-System. Es sei allerdings nochmals darauf hingewiesen, dass sich die Investitionskosten für beide Variabel-Volumenstrom-Systeme nicht gegenüber einem Konstant-Volumenstrom-System amortisieren (vgl. Abschnitt 5.2).

- Die Klassenzimmernutzung (mittlere Auslegungsvolumenströme mit mäßiger Variabilität im Tagesprofil) zeigt eine deutliche Sensitivität auf nahezu alle Parameter. Die maximalen Ausschläge sind aber vergleichsweise gering.

Rangfolge der Parameter mit höchster Sensitivität:

1. Energiepreis
2. Investitionskosten dVt
3. Druckverhältniszahl

Das dVt-System ist für alle Fälle der Parametervariation wirtschaftlicher als das VSR-System. Der Einsatz des dVt-Systems in Schulen erscheint daher als ein grundsätzlich sinnvolles Einsatzgebiet.

- Die Hörsaalnutzung (großer Auslegungsvolumenstrom, hohe Variabilität im Tagesprofil, wenig jährliche Nutzungstage) zeichnet sich durch eine sehr hohe Sensitivität vieler Einflussgrößen auf die Höhe des Kapitalwerts aus. Dies liegt vor allem daran, dass die Investitionskosten des dVt-Systems gegenüber dem VSR-System deutlich größer sind. Dadurch sind hohe Energiekosteneinsparungen in der Basisvariante nötig, um die Mehrkosten zu amortisieren. Verschlechtern sich die Randbedingungen in Be-

zug auf Energiekosteneinsparung, so können die Mehrkosten nicht mehr amortisiert werden. Andersherum vervielfacht sich der Kapitalwert bei günstigeren Randbedingungen.

Rangfolge der Parameter mit höchster Sensitivität:

1. Druckverhältniszahl (!)
2. Energiepreis
3. Nutzungstage

Auch die Senkung der dVt-Investitionskosten auf 80% bringt den Kapitalwert in den positiven Bereich. Dies könnte zukünftig möglich sein, da in der aktuellen Kalkulation kein EC-Rohrventilator eingesetzt werden kann (da nicht verfügbar) und somit höhere Kosten entstehen. Hinzu kommt die Motor-Absperrklappe aufgrund der ausgewählten Regelvariante. Auch hier sollten Kostenreduktionen angestrebt werden.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass von den kalkulatorischen Randbedingungen der Wirtschaftlichkeitsberechnung – Kalkulationszinsfuß, Preissteigerungen, kalkulatorische Nutzungsdauer sowie Energiepreis und Investitionskosten – die Investitionskosten bei Nutzungsarten mit einem geringen Energiebedarf je Raum (z.B. Gruppenbüros) und der Energiepreis bei Nutzungsarten mit einem hohen Energiebedarf je Raum (z.B. Hörsäle) die entscheidende Rolle spielen.

Die energetischen und technischen Randbedingungen – Auslegungsvolumenstrom je Raum, Auslegungsdruckverluste, Wirkungsgrad der dezentralen Ventilatoren, Nutzungstage pro Jahr sowie Netzfaktor und Druckverhältniszahl – sind von ebenso großer Bedeutung wie die wirtschaftlichen Randbedingungen. Vor allem bei Nutzungsarten mit viel Teillastbetrieb (z.B. Hörsaal, Besprechungs-/Sitzungsräume) ist die Druckverhältniszahl von zentraler Bedeutung. Bei Nutzungsarten mit höheren mittleren Teillast-Volumenströmen überwiegt der Einfluss der Wirkungsgrade und des Netzfaktors. Dies trifft z.B. für alle Büronutzungen zu. Die Hintergründe für diese Zusammenhänge auf Ebene der Ventilatorleistung und des Ventilatorenergiebedarfs wurden bereits in Abschnitt 4.4.2 bis 4.4.4 (*Einfluss des Netzfaktors, Einfluss der Druckverhältniszahl und Einfluss der maximalen Ventilatorwirkungsgrade*) ausführlich diskutiert.

5.4 Hinweise zur Systemwahl bei individuell festgelegten Randbedingungen

Bei projektspezifisch individuell festgelegten Randbedingungen ist aufgrund der Vielzahl von Einflüssen eine Abgrenzung der energetisch und wirtschaftlich sinnvollen Anwendungsfälle nicht trivial. Nachfolgend werden die Ergebnisse der energetischen und wirtschaftlichen Untersuchungen aus Kapitel 4 und 5 – insbesondere hinsichtlich variabler Randbedingungen – abstrahiert und in einer Entscheidungshilfe nach Abbildung 5.7 auf Basis einer qualitativen Einschätzung der wichtigsten Einflüsse dargestellt.

Aus Abbildung 5.7 geht zunächst hervor, dass das konventionelle Volumenstromregler-System auch perspektivisch bei Randbedingungen wie z.B. kleinen Volumenströmen mit Einzelraumregelung, wenig Teillastbetrieb und ggf. wenig Drosselung zur Luftverteilung weiterhin die technologisch sinnvollste Option darstellt. Auch haben innerhalb von VVS-Anlagen als Konstant-Volumenstrom-System ausgeführte Raumgruppen eine Berechtigung als wirtschaftlichstes System bei ansonsten kleinen Raumvolumenströmen.

Insgesamt kann für das dVt-System festgehalten werden, dass der Wirkungsgrad der dezentralen Ventilatoren $\geq 40\%$ betragen sollte. Andernfalls können auch sonst positive Randbedingungen kaum zu einer energetischen Vorteilhaftigkeit führen. Dieser minimale Wirkungsgrad wird mit geeigneten EC-Ventilatoren bei Volumenströmen ab ca. $150\text{ m}^3/\text{h}$ erreicht (s. Abbildung 4.14, Seite 85). Aus Kostengründen sollten größere Raumvolumenströme von $250 \dots 500\text{ m}^3/\text{h}$ angestrebt werden (Stand: 2016).

Anwendungsfälle mit entsprechenden Mindest-Raumvolumenströmen ($\dot{V}_i^* \geq 250\text{ m}^3/\text{h}$) sind dann klar dem dVt-System zuzuordnen, wenn

1. häufig Teillastvolumenströme angefordert werden (mittlerer Volumenstrom ca. $\leq 70\%$ des Auslegungsvolumenstroms) und
2. die Druckverluste im Verteilnetz in üblicher Höhe ausfallen (z.B. Druckverhältniszahl $f_p \geq 0,4$ bzw. absolut ab ca. 300 Pa).

In denjenigen Anwendungsfällen, in denen die Druckverluste des Verteilnetzes geringer ausfallen als unter Punkt 2 angegeben, dürfen für den wirtschaftlichen Einsatz des dVt-Systems nur geringe Investitions(mehr)kosten gegenüber dem VSR-System anfallen. Werden zusätzlich seltener Teillastvolumenströme angefordert, als unter Punkt 1 angegeben, sollte zumindest die Drosselung zur Luftmengenverteilung im üblichen Bereich liegen ($f_N \leq 0,75$).

HINWEIS: Die angegebenen Zahlenwerte sind jeweils nicht als scharfe Grenzwerte zu verstehen, sondern dienen der Orientierung. Im Zweifelsfall empfiehlt sich eine rechnerische Bewertung des Einzelfalls nach dem in Kapitel 6 aufgeführten Verfahren der anlagenbezogenen Bewertung.

Grundsätzlich sollte bei der Auswahl des Lüftungssystems zunächst abgewogen werden, ob ein dezentrales, in die Außenwand integriertes Lüftungssystem (deAL-System) eingesetzt werden kann und soll. Dieses ist insgesamt als sehr energieeffizient zu bewerten. Der wirtschaftlich sinnvolle Einsatzbereich ist tendenziell dann gegeben, wenn nicht ohnehin ein kostenintensives zentrales Lüftungssystem nötig ist (z.B. aufgrund von innenliegenden Räumen, großen Volumenströmen, besonderen Anforderungen an die Luftaufbereitung) und langfristig der erhöhte Wartungsaufwand akzeptiert werden kann. Ein weit verbreitetes Anwendungsgebiet des deAL-Systems ist der Wohnungsbau, auch wenn die langfristige Sicherstellung der Nutzerakzeptanz aufgrund des erhöhten Wartungsaufwands infrage gestellt werden kann. Als zentrale Lüftungsvariante bieten sich im Wohnungsbau ansonsten – aufgrund geringer Volu-

menströme und wenig Teillastbetrieb – die Systeme mit Variabel-Volumenstromreglern an. Das dVt-System ist dagegen im Nichtwohnungsbau zu verorten.

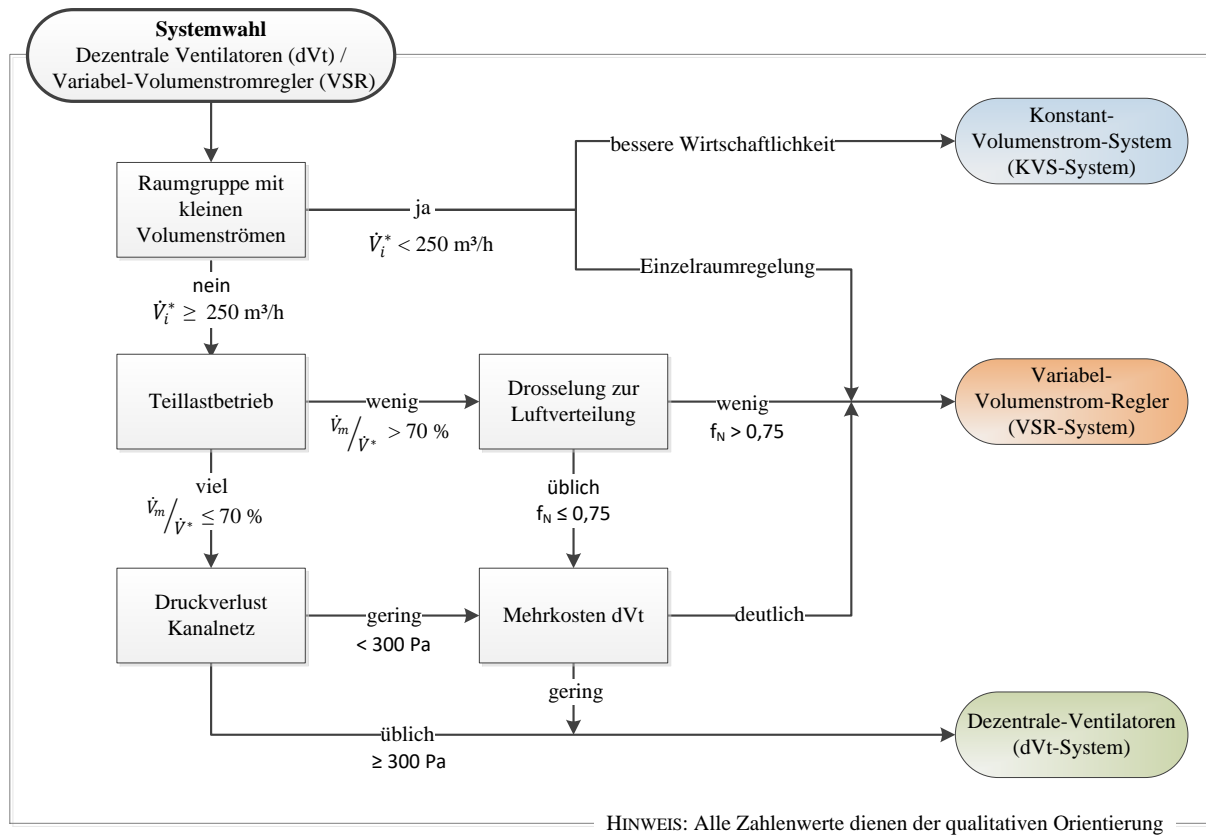


Abbildung 5.7: Flussdiagramm zur Wahl zwischen dVt- und VSR-System auf Basis von wichtigen Randbedingungen

Innerhalb des dVt-Systems gibt es eine Unterscheidung in Bezug auf die Wahl der Regelstrategie außerhalb der Nutzungszeit und damit die anlagentechnische Ausstattung: Bei wenig Betriebsstunden (unregelmäßige oder seltene Nutzung) ist es energetisch vorteilhaft, vor Beginn der Nutzungszeit im Rahmen der sog. „Vorspülung“ die Raumluft auszutauschen. In der Nichtnutzungszeit kann der Strang anhand einer Klappe vollständig abgesperrt werden. Dies kann beispielsweise bei Hörsälen oder Besprechungsräumen zutreffen. Bei Nutzungsarten mit regelmäßigem und häufigem Betrieb ist es auch energetisch mindestens gleichwertig auf die Vorspülung zu verzichten und stattdessen bei minimalem Volumenstrom eine Grundlüftung vorzunehmen. Dies hat zum einen den Vorteil, dass die Investition in eine Absperrklappe entfällt. Zum anderen muss das Regelsystem nicht den Beginn der Arbeitszeit kennen, was den Aufwand der Betriebsführung senkt und zu einem Regelverhalten führt, welches näher am Bedarf liegt. Typische Anwendungsfälle für diese Art der Lüftungsregelung sind Büronutzungen und Klassenzimmer.

6 Anlagenbezogene Bewertung des dVt-Systems

Gegenüber der energetischen und wirtschaftlichen Bewertung in Kapitel 4 und 5 – in denen bei typischen Randbedingungen für bestimmte Nutzungsarten allgemeine Aussagen zur energetischen und wirtschaftlichen Bewertung getroffen werden – zielt die nun folgende anlagenbezogene Bewertung darauf ab, exemplarische Einzelfälle zu untersuchen.

Dabei soll die Frage beantwortet werden, wie die Energieeinsparung durch Variabel-Volumenstrom-Systeme – insbesondere durch das dVt-System – für exemplarische Büro- und Verwaltungsgebäude einzuschätzen ist. Dazu werden die zuvor als typisch identifizierten Randbedingungen hinsichtlich Druck und Wirkungsgrad verwendet. Die zu versorgenden Lüftungszonen mit ihren jeweiligen Nutzungsarten, die Höhe des Auslegungsvolumenstroms und die Anzahl der einzusetzenden Ventilatoren werden durch die Gebäudegeometrie und vorliegende Lüftungsplanungen vorgegeben und beruhen ergänzend dazu auf eigenen Planungen (siehe auch [Klimmt o. J.] und Anhang 8.5).

HINWEIS: In den Beispielgebäuden wird jeweils eine RLT-Anlage eingesetzt, sodass die anlagenbezogene einer gebäudebezogenen Bewertung entspricht.

Als nötige methodische Ergänzung wird zunächst das Rechenmodell der vorangegangenen Kapitel in Hinblick auf die Überlagerung mehrerer Nutzungsarten (v.a. unterschiedliche Tagesprofile und unterschiedlich viele jährliche Nutzungstage) ergänzt (Abschnitt 6.2). Durch die Implementierung des Rechenverfahrens in ein Excel-Werkzeug ist es z.B. in der Vorplanung von Bauprojekten oder in weiteren wissenschaftlichen Studien möglich, mit vergleichsweise geringem Aufwand den Energiebedarf von unterschiedlichen Lüftungssystemen individuell zu berechnen und somit eine große Bandbreite an möglichen Einsatzgebieten abzudecken. In der vorliegenden Arbeit wird anhand eines entsprechenden Excel-Werkzeugs der Lüftungsenergiebedarf der exemplarischen Büro- und Verwaltungsgebäude berechnet, die nachfolgend in Abschnitt 6.1 beschrieben werden.

Das methodisch ergänzte Rechenverfahren wird zunächst dahingehen analysiert, inwiefern die anlagenbezogene Berechnung gegenüber einer nutzungsbezogenen Bewertung zu anderen Ergebnissen führt (Abschnitt 6.3.1). Dies ist in Bezug auf energetische Bewertungsnormen relevant (bspw. DIN V 18599), welche den nutzungsbezogenen Ansatz verfolgen und dient zur besseren Bewertung und Einordnung der Ergebnisse aus den vorigen Kapiteln. Anschließend wird eine Methode zur Vereinfachung des Rechengangs bei Nutzungsarten mit unterschiedlich vielen jährlichen Nutzungstagen vorgestellt und exemplarisch geprüft (Abschnitt 6.3.2).

Während die vorgenannten methodischen Untersuchungen der exemplarischen Büro- und Verwaltungsgebäude auf Ebene des Endenergiebedarfskennwertes der elektrischen Ventilatorleistung durchgeführt werden, findet abschließend (Abschnitt 6.4) eine primärenergetische Bewertung des Einsparpotenzials durch das dVt-Konzept gegenüber dem Volumenstromregler- und dem Konstant-Volumenstrom-System statt.

6.1 Exemplarische Büro- und Verwaltungsgebäude

Um die Energieeinsparung und Wirtschaftlichkeit exemplarischer Büro- und Verwaltungsgebäude zu ermitteln, werden drei Büro- und Verwaltungsgebäude aus der Studie „Typologiegestützte Kennwerte für die energetische Bewertung bestehender Nichtwohngebäude am Beispiel von 10 Gerichts-, Verwaltungs- und Polizeidienstgebäuden“ des Instituts Wohnen und Umwelt [Stein, Hörner 2015] sowie das Zentrum für Umweltbewusstes Bauen (ZUB) der Universität Kassel als Demonstrationsgebäude des dVt-Forschungsprojekts verwendet:

- Landgericht (Baujahr 1881 mit Anbau von 1954. Denkmalgeschützte Lochfassade in Klinkerfassade)
- Amtsgebäude (Baujahr 1962. Verputzte Stützenraster- /Lochfassade)
- Verwaltungsgebäude (Baujahr 1966. Vorelementierte Stahlbetonskelettkonstruktion mit Pfosten-Riegel-Elementen)
- Zentrum für Umweltbewusstes Bauen (Baujahr 2001 in Kassel. Demonstrationsobjekt im Förderprogramm "Energieoptimiertes Bauen" mit vorgehängter Pfosten-/Riegelkonstruktion)

Bei allen Gebäuden sind einerseits Büronutzungen und andererseits Besprechungs-, Sitzungs-, Seminar oder Hörsaalnutzungen die Hauptnutzungsarten. In Bezug auf das Lüftungskonzept stellt dies eine wichtige Unterscheidung dar, da es bei Einzel- und Gruppenbüros i.d.R. nicht wirtschaftlich ist, eine bedarfsgerechte Einzelraumregelung zu installieren (siehe Tabelle 5.7 in Abschnitt 5.2). Diese Nutzungsarten werden daher in nachfolgenden Betrachtungen als KVS ausgeführt. Besprechungs-, Sitzungs-, Seminar oder Hörsaalnutzungen werden dagegen mit einer bedarfsabhängigen CO₂-geführten Einzelraumregelung berechnet.

Der Anteil der als VVS belüfteten Fläche liegt bei den o.g. exemplarischen Büro- und Verwaltungsgebäuden lediglich bei 10 % bis 24 %, der Rest sind Büroflächen, Verkehrsflächen (sofern belüftet) und sonstige konstant belüftete Räume. Betrachtet man dagegen den Anteil des Auslegungsvolumens der als VVS betrieben wird, liegt der Anteil bei 46 % bis 78 % (siehe Abbildung 6.1). Ein Variabel-Volumenstrom-System ist daher für diese Gebäudekategorie grundsätzlich ein sinnvoller Anlagentyp, obwohl die Büroräume aus Kostengründen nicht individuell bedarfsgerecht geregelt werden. Nach dieser Maßgabe wurde für jedes Beispielgebäude eine Lüftungsplanung erstellt, welches beinhaltet, an welcher Stelle im Kanalnetz dezentrale Ventilatoren eingebaut werden müssten, um die entsprechenden Lüftungszonen zu versorgen. Daraus wurden die im Anhang 8.5 dargestellten Strangschemata abgeleitet, nach denen die energetische Bewertung durchgeführt wird.

Durch die Planung des dVt-Systems in Bestandsgebäude mit entsprechend festgelegten Kanalnetzgeometrien und Konstellationen von Zu- und Abluft (z.B. Abluft über Atrium, über Flur-, über WC oder direkt im Zulufräum) wurde gezeigt, dass das dVt-System prinzipiell unter sehr unterschiedlichen Randbedingungen eingesetzt werden kann. Die Planungsgrundsätze bei bspw. unterschiedlichen räumlichen und nutzungsartbedingten Gegebenheiten werden in [Klimmt o. J.] sowohl in allgemeiner Form, als auch anhand der hier verwendeten exemplarischen Büro- und Verwaltungsgebäude vertieft dargestellt und erläutert.

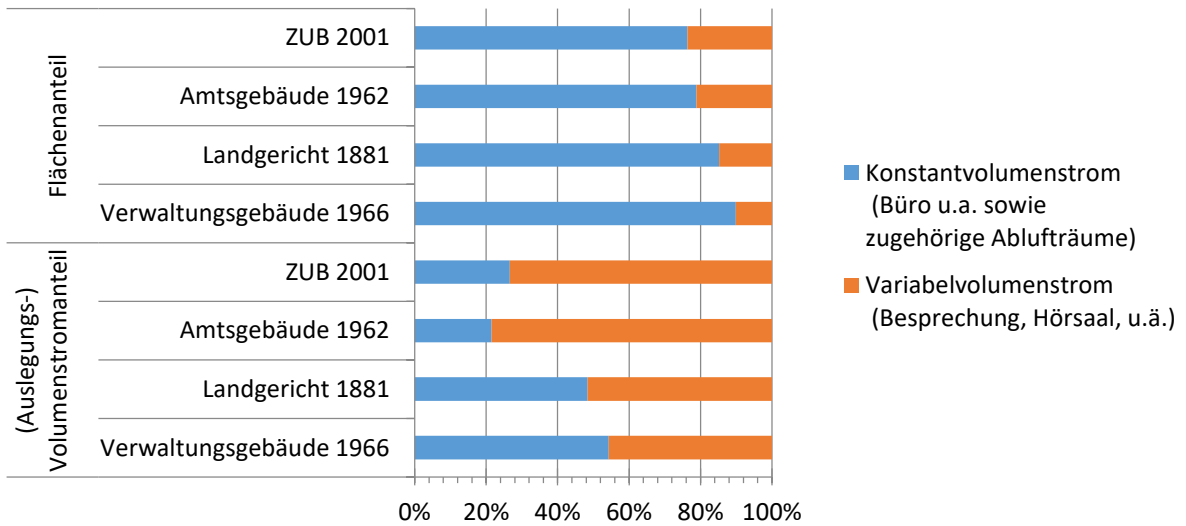


Abbildung 6.1: Nutzungsarten mit Konstant-Volumenstrom bzw. Variabel-Volumenstrom als prozentualer Anteil der belüfteten Nettogrundfläche bzw. des Auslegungsvolumenstroms der exemplarischen Büro- und Verwaltungsgebäude

6.2 Ventilatorleistung und -energiebedarf bei Überlagerung mehrerer Nutzungsarten

Nachdem über die Gebäudegeometrie und -nutzungen die Auslegungsvolumenströme, die zugehörigen Lüftungsprofile, sowie die Anzahl der Ventilatoren definiert worden sind, ergibt sich der jeweilige Wirkungsgrad und das Teillastverhalten nach dem in Abschnitt 3.2 definierten Verfahren. Für die Druckverluste des Kanalnetzes werden die Standardrandbedingungen verwendet, wodurch erreicht wird, dass die Ergebnisse der gebäudebezogenen Bewertung mit den Ergebnissen der nutzungsbezogenen Bewertung vergleichbar sind.

Der wesentliche methodische Unterschied zwischen der nutzungsartenbezogenen Berechnung – bei der alle versorgten Räume die gleichen Nutzungszeiten und Tagesprofile aufweisen – und der anlagenbezogenen Berechnung liegt in der gleichzeitigen Berechnung von Lüftungszonen mit unterschiedlichen Tagesprofilen. Dabei überlagern sich die Teillast-Volumenströme unterschiedlicher Lüftungszonen in einzelnen Kanalabschnitten des Kanalnetzes und es bilden sich somit je nach örtlichen geometrischen Anordnungen von Zonen und Kanalnetz jeweils individuelle Teillast-Volumenströme in den einzelnen Kanalabschnitten. Eine physikalisch-mathematische Abbildung dieser komplexen Zusammenhänge ist nur möglich, wenn eine vollständige Kanalnetzrechnung im Rahmen einer dynamischen Simulation abgebildet wird, wie es bspw. in [Klimmt o. J.] durchgeführt wird. Dieser Ansatz ist aufgrund des Modellierungsaufwandes jedoch auf Einzelfälle und i.d.R. kleinere Systeme beschränkt.

In der vorliegenden anlagenbezogenen Berechnung werden die Druckverluste der Lüftungszentrale (vom Außen- oder Fortluftdurchlass bis zum Drucksensor vor dem ersten Abzweig des Verteilnetzes), wo bei Standardrandbedingungen typischerweise 60% ($= 1 - f_p$) der gesamten Druckverluste anfallen, anhand der überlagerten Volumenströme der einzelnen Lüftungszonen berechnet. In diesem Abschnitt überlagern sich per Definition die Volumenströme aller nachgelagerten Lüftungszonen, sodass eine realitätsnahe Berechnung auch ohne detaillierte dynamische Simulation möglich ist. Dazu wird die entsprechende Ventilatordruckerhöhung weiterhin wie in Abschnitt 3.1.3: *Ventilatordruckerhöhungen der Variabel-Volumenstrom-Systeme* nach Gl. 3.17 bzw. 3.25 berechnet:

$$\Delta p_z = \left(\frac{\dot{V}_m}{\dot{V}_{ges}^*} \right)^2 \cdot (1 - f_p) \cdot \Delta p^* \quad 6.1$$

Δp^*	Druckverluste der Gesamtanlage bei \dot{V}^* [Pa]
Δp_z	Druckverluste bis zum Drucksensor (v.a. Lüftungszentrale) [Pa]
$\dot{V}_m / \dot{V}_{ges}^*$	Mittlerer Teillast-Volumenstromanteil der Gesamtanlage [-]
f_p	Druckverhältniszahl nach DIN V 18599-3 (Anteil der Druckverluste ab Drucksensor) [-]

Neu bei der gebäudebezogenen Betrachtung ist, dass sich der mittlere Teillast-Volumenstromanteil der Gesamtanlage als Summe der raum- bzw. zonenweise bestimmten Teillast-Volumenströme, bezogen auf den Auslegungsvolumenstrom der Gesamtanlage, errechnet:

$$\frac{\dot{V}_m}{\dot{V}_{ges}^*} = \frac{\frac{\dot{V}_1 \cdot \dot{V}_1^* + \dots + \dot{V}_n \cdot \dot{V}_n^*}{\dot{V}_1^* + \dots + \dot{V}_n^*}}{\dot{V}_1^* + \dots + \dot{V}_n^*} = \frac{\sum \dot{V}_i}{\sum \dot{V}_i^*} \quad 6.2$$

\dot{V}_i / \dot{V}_i^*	Teillastvolumenstromanteile der n Lüftungszonen [-]
\dot{V}_i^*	Auslegungs-Volumenstrom der n Lüftungszonen [m ³ /h]
$\dot{V}_m / \dot{V}_{ges}^*$	Mittlerer Teillastvolumenstromanteil der Gesamtanlage [m ³ /h]

Auf diese Weise wird der tatsächlich resultierende, mittlere Volumenstrom in der Lüftungszentrale bestimmt und die auftretenden Druckverluste in Gl. 6.1 danach berechnet.

HINWEIS: Die Druckverluste in der *Lüftungsverteilung* (ab Drucksensor vor dem ersten Abzweig des Verteilnetzes bis zum Luftdurchlass im Raum) werden wie in den vorstehenden Kapiteln beschrieben für jede Nutzungsart einzeln berechnet. Für diesbezüglich weitergehende Untersuchungen wird auf [Klimmt o. J.] verwiesen.

Bei *Konstant-Volumenstrom-Systemen* orientiert sich die Betriebszeit stets an der Nutzung mit der längsten Betriebsdauer. Dies wird bei einer nutzungsartenbezogenen Berechnung nicht abgebildet. Bei der anlagenbezogenen Berechnung steigt dagegen der Ventilatorenergiebedarf, wenn die Lüftungszonen unterschiedlich viele Nutzungsstunden pro Tag oder Nutzungstage pro Jahr aufweisen. Gegenüber der nutzungsartenbezogenen Betrachtung ist daher bei unterschiedlichen Betriebszeiten prinzipiell mit einer höheren Energieeinsparung der Variabel-Volumenstrom-Systeme gegenüber dem Konstant-Volumenstrom-System zu rechnen.

6.3 Methodische Fragestellungen

Es sollen nachfolgend zwei methodische Fragestellungen untersucht werden:

1. Einfluss der anlagenbezogenen gegenüber der nutzungsbezogenen Berechnung (Abschnitt 6.3.1) und
2. Überprüfung einer methodischen Vereinfachung bei Lüftungszonen mit unterschiedlich vielen jährlichen Nutzungstagen (Abschnitt 6.3.2).

6.3.1 Anlagenbezogene vs. nutzungsbezogene Berechnung

Die nutzungsbezogene Berechnung ist der heute übliche Ansatz zur Berechnung des elektrischen Energiebedarfs der Luftförderung, z.B. in DIN V 18599-3. Dementgegen bildet ein anlagenbezogener Ansatz die Realität physikalisch besser ab. Wie in Abschnitt 6.2 beschrieben, wird bei der anlagenbezogenen Berechnung der zur Überwindung der Druckverluste in der Lüftungszentrale anfallende Anteil der Ventilatorleistung mit einem mittleren Teillastvolumenstromanteil berechnet. Entsprechend gilt für die Ventilatorleistung:

$$P_Z = P_{Z,m} \quad 6.3$$

P_Z	Gesamte Ventilatorleistung zur Überwindung der Druckverluste in der Lüftungszentrale [W]
$P_{Z,m}$	Mit mittleren Volumenstromanteil berechnete Ventilatorleistung, siehe Gl. 6.1 und 6.2 (anlagenbezogener Ansatz) [W]

Bei der nutzungsbezogenen Berechnung wird dieser Leistungsanteil für jede Nutzungsart einzeln berechnet und dann zur Bestimmung der Gesamtleistung addiert:

$$P_Z = \sum_{i=1}^n P_{Z,i} \quad 6.4$$

P_Z	Gesamte Ventilatorleistung zur Überwindung der Druckverluste in der Lüftungszentrale [W]
$P_{Z,i}$	Für jede Nutzung i berechnete Ventilatorleistung (nutzungsbezogener Ansatz) [W]

Es soll nun gezeigt werden, dass die mit dem mittleren Volumenstrom berechnete Ventilatorleistung $P_{Z,m}$ (linke Seite der nachfolgenden Ungleichung, anlagenbezogene Berechnung) aufgrund der nichtlinearen Leistungsberechnung *immer kleiner ist*, als $\sum_{i=1}^n P_{Z,i}$ (rechte Seite der nachfolgenden Ungleichung, nutzungsbezogene Berechnung). Dazu dient ein gegenüber der ansonsten durchgeführten Leistungsberechnung vereinfachtes mathematisches Modell von zwei Lüftungszonen mit gleichen Druckverlusten, konstanten Wirkungsgraden und gleichen Auslegungsvolumenströmen. Dargestellt ist der Leistungsanteil der Lüftungszentrale:

$$\begin{aligned}
 P_{Z,m} &< P_{Z,1} + P_{Z,2} && | \text{ zu zeigen} \\
 \frac{\dot{V}_m \cdot \Delta p_Z}{\eta} &< \frac{\dot{V}_1 \cdot \Delta p_Z}{\eta} + \frac{\dot{V}_2 \cdot \Delta p_Z}{\eta} && | \Delta p_Z \text{ nach Gl. 6.1} \\
 \frac{\dot{V}_m \cdot \left(\frac{\dot{V}_m}{\dot{V}_{ges}^*}\right)^2 \cdot \Delta p_Z^*}{\eta} &< \frac{\dot{V}_1 \cdot \left(\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_1^*}\right)^2 \cdot \Delta p_Z^*}{\eta} + \frac{\dot{V}_2 \cdot \left(\frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_2^*}\right)^2 \cdot \Delta p_Z^*}{\eta} && | \text{ mit } \dot{V}_m = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 \text{ und } \dot{V}_{ges}^* = \dot{V}_1^* + \dot{V}_2^* \\
 \frac{(\dot{V}_1 + \dot{V}_2)^3 \cdot \Delta p_Z^*}{(\dot{V}_1^* + \dot{V}_2^*)^2 \cdot \eta} &< \frac{\dot{V}_1^3 \cdot \Delta p_Z^*}{\dot{V}_1^{*2} \cdot \eta} + \frac{\dot{V}_2^3 \cdot \Delta p_Z^*}{\dot{V}_2^{*2} \cdot \eta} && | \text{ mit } \dot{V}_1^* = \dot{V}_2^* = \dot{V}^*
 \end{aligned}$$

$$\frac{(\dot{V}_1 + \dot{V}_2)^3 \cdot \Delta p_Z^*}{4 \cdot \dot{V}^{*2} \cdot \eta} < \frac{\dot{V}_1^3 \cdot \Delta p_Z^*}{\dot{V}^{*2} \cdot \eta} + \frac{\dot{V}_2^3 \cdot \Delta p_Z^*}{\dot{V}^{*2} \cdot \eta} \quad | \text{ kürzen und umstellen}$$

$$\frac{(\dot{V}_1 + \dot{V}_2)^3}{4} - \dot{V}_1^3 - \dot{V}_2^3 < 0 \quad | \text{ faktorisieren}$$

$$-\frac{3}{4}(\dot{V}_1 - \dot{V}_2)^2 \cdot (\dot{V}_1 + \dot{V}_2) < 0$$

Die Gleichung ist wahr, da die erste Klammer aufgrund der Quadrierung und die zweite Klammer aufgrund der Summe von immer positiven Volumenströmen immer positiv ist. Da das Produkt der Klammern mit einem negativen Vorfaktor multipliziert wird, ist das Ergebnis immer kleiner Null, was zu zeigen war. Es ist damit bewiesen, dass unter Berücksichtigung der genannten Annahmen bzw. Vereinfachungen *die mit dem mittleren Volumenstrom berechnete Ventilatorleistung immer kleiner ist, als die Summe der unabhängig voneinander berechneten Teilvolumenströme*. Nutzungsbezogene Berechnungen bewerten den elektrischen Energiebedarf zur Luftförderung daher systematisch zu hoch, wenn von einer VVS-Anlage Zonen mit unterschiedlichen Lüftungsprofilen versorgt werden.

Die einzige Ausnahme ist der Fall gleicher Volumenströme, d.h. $\dot{V}_1 = \dot{V}_2$, da sich dann die Gleichung zu Null gleich Null vereinfacht. Für diesen Fall ist es unerheblich, ob die Ventilatorleistung mit dem Mittelwert berechnet wird, oder ob die Leistungsanteile additiv behandelt werden.

Es ist davon auszugehen, dass die dargelegten Zusammenhänge auch für ungleiche Auslegungsvolumenströme und im typischen Anwendungsgebiet auch für nicht konstante Wirkungsgrade gelten. Dies wird nachfolgend am Beispiel der exemplarischen Büro- und Verwaltungsgebäude gezeigt. Dazu wird der elektrische Energiebedarfskennwert zur Luftförderung für jedes Beispielgebäude einmal nach dem anlagenbezogenen Ansatz (wie in Abschnitt 6.2 bzw. nach Gl. 6.5) und einmal nach dem nutzungsbezogenen Ansatz (einzelne Berechnung für jede Nutzungsart und anschließende Summierung gemäß Gl. 6.4) berechnet.

In Abbildung 6.2 ist der elektrische Energiebedarfskennwert zur Luftförderung für beide Rechenansätze dargestellt. (Der Vergleich der Lüftungssysteme untereinander erfolgt anschließend in Abschnitt 6.4: *End- und Primärenergiebedarf der exemplarischen Büro- und Verwaltungsgebäude*.) Bezüglich der Rechenansätze werden zwei Aspekte deutlich:

- Bei den Variabel-Volumenstrom-Systemen (VVS) ist der Energiebedarf beim anlagenbezogenen Ansatz stets geringer als beim nutzungsbezogenen Ansatz. Dies entspricht der zuvor dargestellten mathematischen Beweisführung.
- Beim Konstant-Volumenstrom-System (KVS) ist der Energiebedarf nach dem anlagenbezogenen Ansatz im Amtsgebäude 1962 und im ZUB 2001 deutlich höher, als nach dem nutzungsbezogenen Ansatz. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die Betriebszeiten wie zuvor erläutert nicht nach der jeweiligen Nutzungsart, sondern nach der Nutzungsart mit den längsten Betriebszeiten richten.

Das dVt- und das VSR-System sind in ähnlichem Maße von der Abweichung zwischen den beiden Rechenansätzen betroffen. Die aufgrund der Nichtlinearität der Leistungsberechnung entstehenden absoluten Differenzen zwischen nutzungsartenbezogener zur anlagenbezogener Bewertung sind deshalb ähnlich, weil diese auf den Leistungsanteil P_Z zur Überwindung der

Druckverluste in der Lüftungszentrale zurückzuführen sind. Für diesen Leistungsanteil ist die Berechnung der Ventilatorleistung für dVt-System und VSR-System hinsichtlich der Drücke gleich, sodass sich ähnliche absolute Differenzen ergeben. Die absoluten Differenzen sind nur ähnlich und nicht identisch, weil sich das Teillastverhalten von dVt- und VSR-System (quadratische Netzkennlinie bzw. Netzkennlinie mit konstantem Anteil) sowie die Lüftungsart außerhalb der Nutzungszeit (Grundlüftung bzw. Vorspülung) unterscheiden.

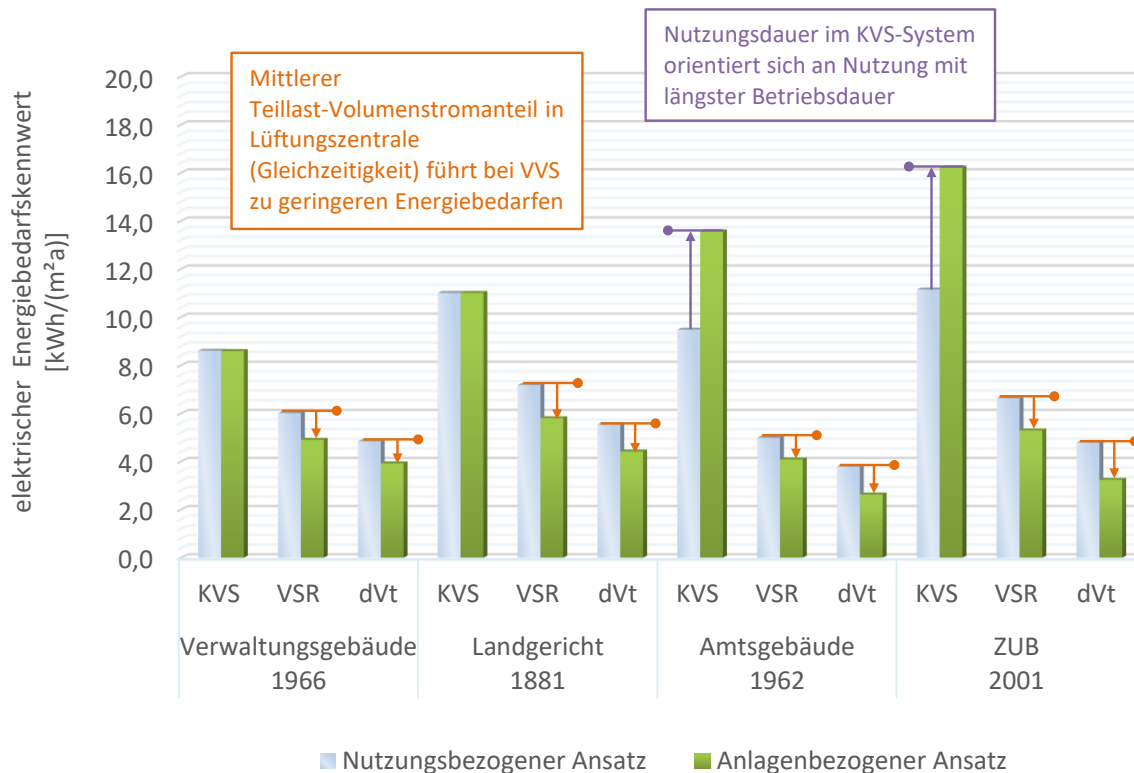


Abbildung 6.2: Nutzungsbezogener und anlagenbezogener Berechnungsansatz im Vergleich

Zusammenfassend lässt sich in Bezug auf die anlagenbezogene Bewertung der Rückschluss ziehen, dass die Ventilatorleistung von zentralen *Variabel-Volumenstrom-Systemen* gegenüber einer additiven Betrachtung *sinkt*, wenn in den zu versorgenden Lüftungszonen unterschiedliche Nutzungsprofile auftreten, d.h. unterschiedliche Raumnutzungen kombiniert versorgt werden. Treten dagegen in allen Räumen ähnliche Nutzungsprofile auf, können die Nutzungsarten mit dem gleichen Ergebnis auch einzeln berechnet werden. *Konstant-Volumenstrom-Systeme* haben bei einer anlagenbezogenen Berechnung zum Teil deutlich längere Betriebszeiten, sodass der Energiebedarf ansteigt und die Differenz zum Energiebedarf der VVS-Anlagen weiter zunimmt.

In Bezug auf die Normung bedeutet dies, dass bei einer rein nutzungsbezogenen Berechnung der Energiebedarf für VVS-Anlagen tendenziell zu hoch und für KVS-Anlagen tendenziell zu niedrig berechnet wird. Allerdings wurde bspw. in Abbildung 4.21 (Seite 93) durch eine andere Vereinfachung im Rahmen der DIN V 18599 auch eine gegenläufige Tendenz festgestellt: Durch die Verwendung von einem mittleren Teillast-Volumenstrom bei bedarfsabhängiger Lüftung anstelle von Stundenprofilen und keiner Reduzierung des Wirkungsgrads bei Teillast wird bei VVS-Anlagen für einige Nutzungsarten ein zu geringer Energiebedarf berechnet. Es ist daher nur schwer möglich, generelle Aussagen darüber zu treffen, ob der Lüftungsenergie-

bedarf bei einer nutzungsartenbezogenen Berechnung tendenziell über- oder unterschätzt wird. Dies hängt sowohl von den betrachteten Nutzungsarten an sich, als auch von der Kombination der Nutzungsarten ab. In der praktischen Anwendung sind daher sowohl Fälle zu erwarten, in denen der Energiebedarf unterschätzt, als auch Fälle, in denen Energiebedarf überschätzt wird. Um eine verlässlichere Aussage zu treffen, sollte ein physikalisch genauerer Rechenansatz – wie bspw. in dieser Arbeit vorgestellt – gewählt werden.

Für die energetische und wirtschaftliche Bewertung des dVt-Systems in Kapitel 4 und 5 ergeben sich folgende Auswirkungen durch die Verwendung eines anlagenbezogenen Ansatzes:

- Es ergeben sich nur dann Unterschiede, wenn von einer Lüftungsanlage Nutzungsarten mit voneinander abweichenden Lüftungsprofilen versorgt werden. In obigen Beispielen trifft dies durch die gleichzeitige Versorgung von Büro-, Besprechungs- und teilweise Hörsaalnutzungen zu.
- In diesen Fällen ergeben sich für den direkten Vergleich zwischen dVt-System und VSR-System keine signifikanten Auswirkungen, da der Energiebedarf beider Systeme in ähnlicher Höhe sinkt.
- Gegenüber dem KVS-System steigt dagegen die Energieeinsparung und damit auch die Wirtschaftlichkeit der VVS-Anlagen.

Der Einsatz von VVS-Anlagen ist daher im Vergleich mit dem KVS-System gegenüber den Bewertungsergebnissen in Kapitel 4 und 5 nochmals wirtschaftlicher, wenn Lüftungszonen mit unterschiedlichen Bedarfsanforderungen versorgt werden.

6.3.2 Mittlere jährliche Nutzungstage

Bei der anlagenbezogenen Bewertung kommt es vor, dass die Lüftungszonen eine unterschiedliche Anzahl an jährlichen Nutzungstagen aufweisen (siehe Tabelle 6.1 für Standardwerte der DIN 18599-10).

Typische Beispiele können dabei die Kombination von Büronutzungen (5-Tage-Woche) mit Nutzungen des Einzelhandels (6-Tage-Woche) oder Bereiche des Gesundheitswesens mit teilweise durchgehender Nutzung sein. In den exemplarischen Büro- und Verwaltungsgebäuden sind im Amtsgebäude 1962 und im ZUB 2001 neben der Büronutzung mit 250 jährlichen Nutzungstagen auch Anteile Hörsaalnutzung mit 150 jährlichen Nutzungstagen vorhanden.

Während in der nutzungsartenbezogenen Bewertung nach Kapitel 4 lediglich der Tagesenergiebedarf an Nutzungstagen und an Nichtnutzungstagen berechnet wird, muss in der anlagenbezogenen Bewertung bei einer unterschiedlich hohen Anzahl an jährlichen Nutzungstagen bei genauer Betrachtung der Tagesenergiebedarf abgestuft berechnet werden. In o.g. Beispiel mit 250 Tagen Büronutzung und 150 Tagen Hörsaalnutzung ergäben sich dabei folgende Abstufungen zur Berechnung Tagesenergiebedarfs:

- 150 Tage Hörsaal und Büronutzung
- 100 Tage nur Büronutzung
- 115 Nichtnutzungstage (= 365d – 150d – 100d)

An den Tagen, in denen nur ein Teil der Lüftungszonen betrieben wird, beträgt nach Gl. 6.2 der Volumenstrom \dot{V}_i der jeweils nicht betriebenen Zone entweder 0 m³/h (bei Vorspülung) oder entspricht dem Grundlüftungsvolumenstrom. Für den stündlich berechneten mittleren

Teillastvolumenstrom der Gesamtanlage $\dot{V}_m/\dot{V}_{ges}^*$ ergeben sich dann an diesen Tagen deutlich geringere Werte.

Tabelle 6.1: Sortierung der Nutzungsarten nach DIN V 18599-10 nach jährlichen Nutzungstagen

Nutzungsart nach DIN V 18599-10	Jährliche Nutzungstage
Hörsaal, Auditorium, Messe/Kongress	150
Gewerbliche und industrielle Hallen (leichte, mittlere und schwere Tätigkeit)	230
Einzelbüro, Gruppenbüro, Großraumbüro, Besprechung, Sitzung, Seminar, Schalterhalle, Kantine, WC und Sanitär in Nichtwohngebäuden, sonstige Aufenthaltsräume, Nebenflächen, Verkehrsflächen, Zuschauerbereich, Foyer, Bühne, Ausstellungsräume, Museum, Turnhalle, Parkhäuser (Büro- und Privatnutzung), Labor, Untersuchungs- und Behandlungsräume, Arztpraxen und therapeutische Praxen	250
Einzelhandel/Jaufhaus, Restaurant, Küche mit Vorbereitung u. Lager in Nichtwohngebäuden	300
Rechenzentrum, Parkhäuser (öffentliche Nutzung), Saunabereich, Fitnessraum, Spezialpflegebereiche, Flure des allgemeinen Pflegebereichs, Lagerhallen, Logistikhallen	365

Wird der Tagesenergiebedarf entsprechend abgestuft berechnet, erfolgt die Hochrechnung auf den Jahresenergiebedarf in Analogie zu Kapitel 4 (Gl. 4.6 und Gl. 4.7). Bei der nachfolgenden Berechnung des End- und Primärenergiekennwertes in Abschnitt 6.4 sowie im vorangegangenen Abschnitt 6.3.1 wird bzw. wurde auf diese Weise verfahren.

Vor dem Hintergrund methodischer Vereinfachungen soll ergänzend eine Methode dargestellt werden, bei der eine mittlere Anzahl an Nutzungstagen verwendet wird. Dies ist bspw. in Anwendungsfällen interessant, in denen je Zone mit einer individuellen jährlichen Nutzungsdauer gerechnet wird und eine größere Anzahl an Abstufungen nötig würde. Für diese Fälle ist eine mögliche Art der Bestimmung der mittleren jährlichen Nutzungstage, diese mit dem jährlich geförderten Luftvolumen zu gewichten:

$$t_{a,m} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{d,i} \cdot t_{a,i}}{\sum_{i=1}^n V_{d,i}} \quad \text{mit } V_{d,i} = \sum_{n=1}^{24} \dot{V}_{i,n} \cdot 1h \quad 6.5$$

- $t_{a,m}$ mittlere jährliche Nutzungstage [d]
- $t_{a,i}$ jährliche Nutzungstage der i-ten Lüftungszone [d]
- $V_{d,i}$ Täglich gefördertes Luftvolumen der i-ten Lüftungszone [m³]
- $\dot{V}_{i,n}$ Volumenstrom zur Stunde n der i-ten Lüftungszone [m³/h]

Auf diese Weise wird erreicht, dass sowohl bei der genaueren, abgestuften Berechnung des Jahresenergiebedarfs als auch bei der methodisch vereinfachten Herangehensweise mit mittleren jährlichen Nutzungstagen (trotz unterschiedlicher Teillastprofile und Auslegungsvolumenströme) in der Jahresbilanz mit demselben geförderten Luftvolumen gerechnet wird.

In Abbildung 6.3 wird der elektrische Jahresenergiebedarfskennwert mit mittleren jährlichen Nutzungstagen nach Gl. 6.5 berechnet und dem detaillierten, abgestuften Wert gegenübergestellt. Die im vorliegenden Fall geringen Abweichungen von max. 0,2 kWh / (m²a) bzw. 6% deuten darauf hin, dass die Mittelwertbildung insgesamt gut geeignet ist. Aufgrund der geringen Fallzahl ist jedoch noch keine abschließende Bewertung möglich.

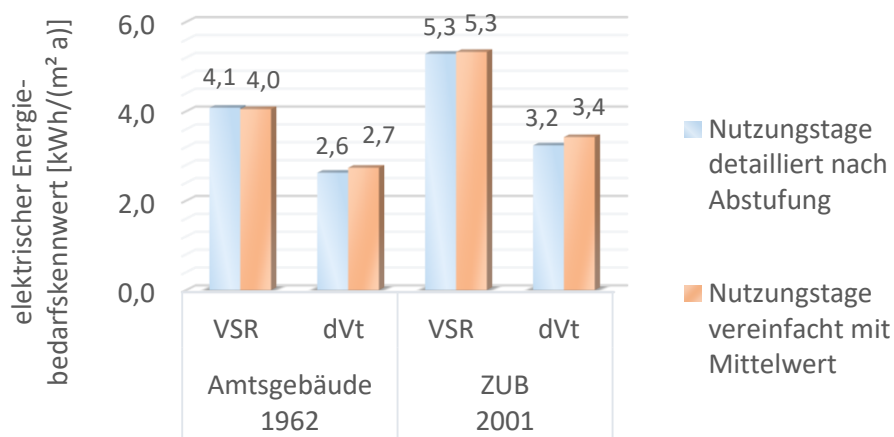


Abbildung 6.3: Vereinfachte vs. detaillierte Berücksichtigung der jährlichen Nutzungstage anhand der exemplarischen Büro- und Verwaltungsgebäude mit Hörsaal (150 Tage pro Jahr) und Büronutzungen (250 Tage pro Jahr)

6.4 End- und Primärenergiebedarf der exemplarischen Büro- und Verwaltungsgebäude

Während in den vorherigen Abschnitten der elektrische Energiebedarfskennwert für methodische Auswertungen verwendet wurde, dient die nachfolgende Abbildung 6.4 zur Darstellung der Differenzen zwischen den drei Lüftungssystemen (KVS, VSR und dVt):

- Es zeigt sich eine große Einsparung beim Übergang von KVS zu VSR-System: Der elektrische Endenergiebedarfskennwert verringert sich um 43 % bis 67 %. Dieses verringerte Niveau durch bedarfsabhängige Lüftung ist bei Einbau oder Erneuerung von Lüftungsanlagen mit einem Zuluftvolumenstrom ab 4.000 m³/h seit dem Jahr 2007 als gesetzliche Mindestanforderung anzusehen, weil der Zuluftvolumenstrom dieser Anlagen im Fall der Nutzung als Besprechungsraum oder als Hörsaal je Quadratmeter versorgter Nettogrundfläche neun Kubikmeter pro Stunde überschreitet (EnEV 2014, §15 Abs. 3).
- Durch das dVt-System kann in den exemplarischen Büro- und Verwaltungsgebäuden darüber hinaus eine Einsparung an elektrischer Endenergie zur Luftförderung in Höhe von 20 % bis 39 % erzielt werden. Bei den betrachteten Gebäuden liegt das Einsparpotenzial am oberen Ende, wenn einzelne bedarfsorientierte Lüftungszonen weniger Nutzungstage als die übliche Büronutzung aufwiesen (hier: Hörsäle), wodurch mehr – für das dVt-System besonders vorteilhafte – Betriebssituationen mit Teillastbetrieb auftreten.

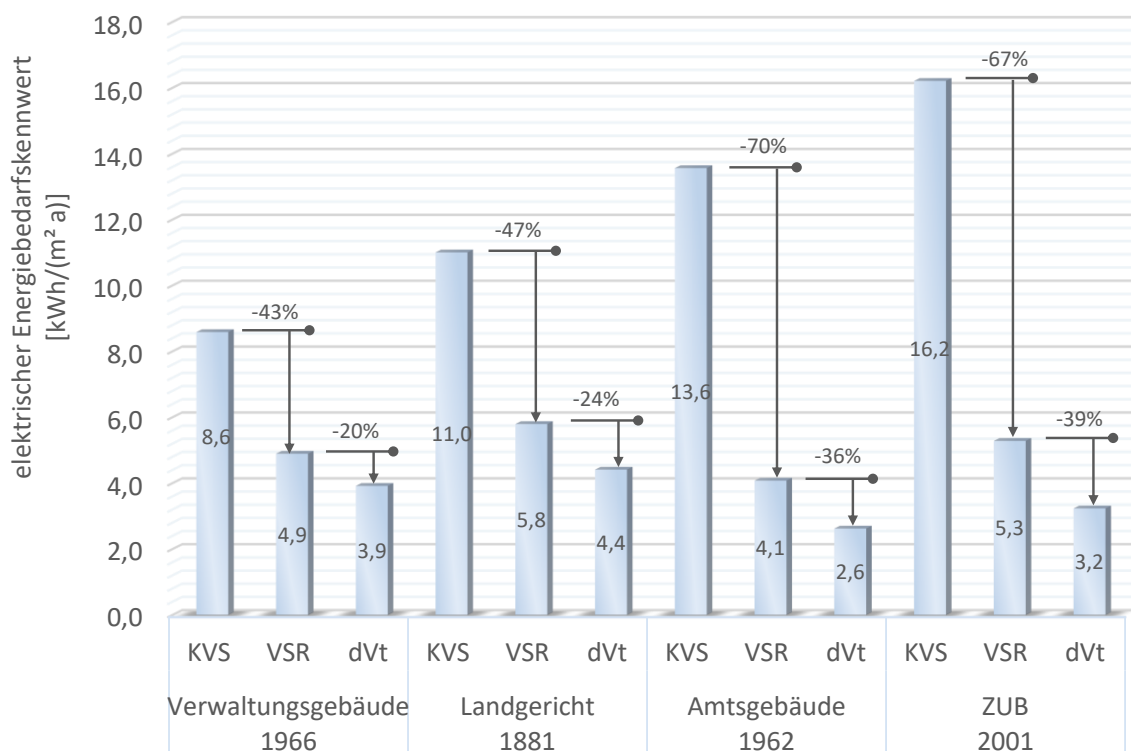


Abbildung 6.4: Elektrischer Energiebedarfskennwert der exemplarischen Büro- und Verwaltungsgebäude (Ventilatorstrom und Lüftungswärmeverluste) der Lüftungssysteme im Vergleich

In Abbildung 6.5 ist der Primärenergiebedarfskennwert (Ventilatorstrom und Lüftungswärmeverluste) der exemplarischen Büro- und Verwaltungsgebäude für die zu vergleichenden Lüftungssysteme dargestellt:

- Beim Schritt vom KVS zum VSR-System wird der Primärenergiebedarfskennwert je nach Gebäude um 40 % bis 64 % verringert. Die Einsparung an Primärenergie liegt damit nahezu in derselben Höhe wie die zuvor dargelegte Einsparung an elektrischer Energie. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in VVS-Anlagen durch die Luftmengenreduzierung auch entsprechend Lüftungswärmeverluste reduziert werden.
- *Durch das dVt-System kann in den exemplarischen Büro- und Verwaltungsgebäuden darüber hinaus eine Primärenergieeinsparung in Höhe von 12 % bis 29 % erzielt werden.* Die primärenergetische Einsparung ist damit gegenüber dem VSR-System etwas geringer als die alleinige Einsparung an elektrischer Energie, weil keine weitere Reduzierung der Lüftungswärmeverluste erfolgt.

Die prozentualen Aussagen zur Energieeinsparung sind nicht als allgemeingültig zu verstehen, weisen aber auf einen typischen Wertebereich für Büro- und Verwaltungsgebäude mit einer üblichen Höhe und Verteilung der Druckverluste (siehe Abschnitt 3.1.4: *Randbedingungen zur Berechnung der erforderlichen Druckerhöhung*) bei Verwendung von EC-Ventilatoren aktueller Baureihe (siehe Abschnitt 3.2: *Modell der Ventilator-Wirkungsgrade*) hin.

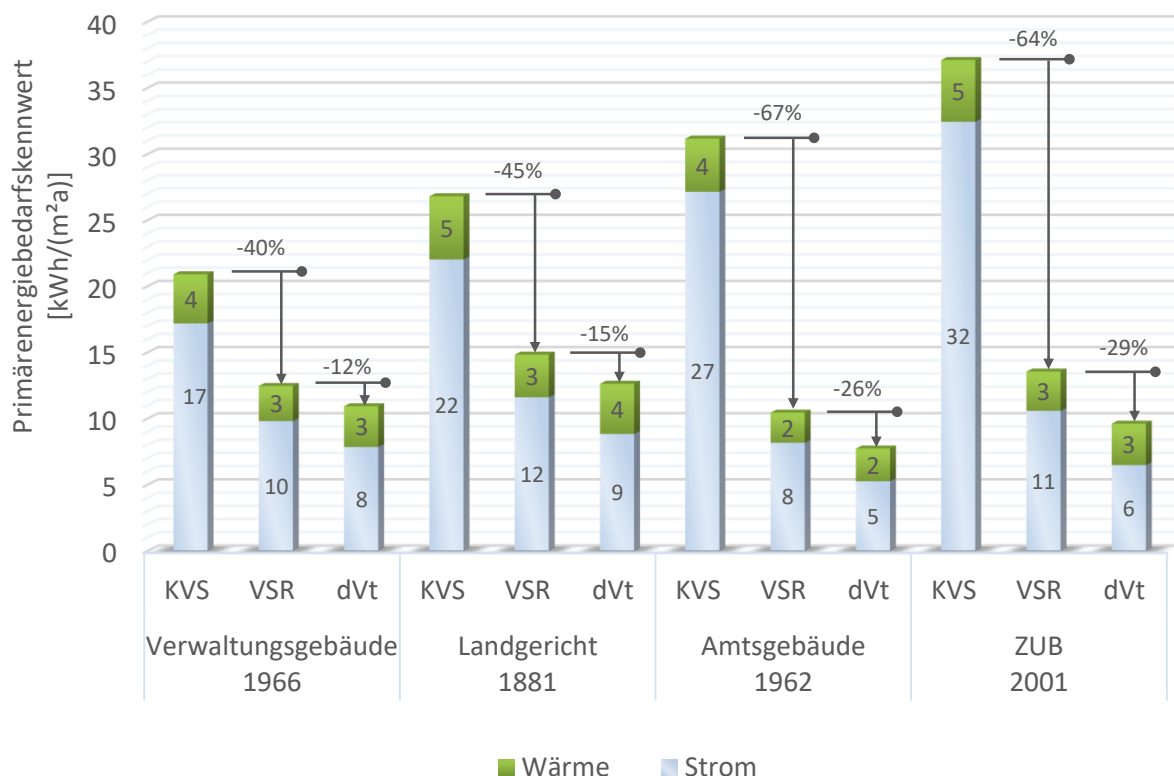


Abbildung 6.5: Primärenergiebedarfskennwert der exemplarischen Büro- und Verwaltungsgebäude (Ventilatorstrom und Lüftungswärmeverluste) der Lüftungssysteme im Vergleich

7 Zusammenfassung und Fazit

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Bewertung des zu untersuchenden „Dezentrale-Ventilatoren-Systems“ (dVt-System). Dieses befindet sich derzeit in der Forschungs- und Entwicklungsphase und verspricht Effizienzgewinne gegenüber dem konventionellen Variabel-Volumenstrom-System (VVS)-Anlagen mit Variabel-Volumenstromreglern (VSR-System).

Die Anwendung des im dVt-System verwendeten Prinzips stellt eine grundlegende Änderung des Anlagenaufbaus von VVS-Anlagen dar, welche bislang maßgeblich auf dem Prinzip der Drosselung beruhen:

1. Dauerhafte Drosselung zur Begrenzung des Volumenstroms und
2. Zeitweise Drosselung zur bedarfsorientierten oder kühllastabhängigen Regelung

Für diese Vorgänge verwenden VVS-Anlagen typischerweise Variabel-Volumenstromregler, welche aus einer motorisch verstellbaren Absperrklappe, einer druckdifferenzbasierten Volumenstrommessung sowie einer elektronischen Reglereinheit bestehen. Während die (Zu- und Abluft) Zentralventilatoren einen i.d.R. konstanten Druck liefern, reduzieren die Variabel-Volumenstromregler den Volumenstrom auf das benötigte Maß anhand der oben genannten Drosselvorgänge. Trotz der Drosselvorgänge wird durch die mögliche Reduzierung des Volumenstroms und damit der Ventilatorumdrehzahl gegenüber Konstant-Volumenstrom-Systemen (KVS-Anlagen) eine deutliche Energieeinsparung bei Teillastvolumenströmen erreicht.

Die genannten Drosselvorgänge entfallen im dVt-System, welches ebenfalls den VVS-Anlagen zuzuordnen ist. Dabei überwinden die Zentralventilatoren ausschließlich die Druckverluste des Außen- und Fortluftkanalnetzes sowie insbesondere die Druckverluste der Lüftungszentrale. Am Übergang von Lüftungszentrale zu Zu- bzw. Abluftnetz wird durch die Regelung auf 0 Pa ein gegenüber der Umgebung neutrales Druckniveau erreicht. Alle Druckverluste, die im nachfolgenden Zu- bzw. Abluftkanalnetz – also den Kanalnetzen zur Luftverteilung – auftreten, werden im dVt-System von dezentral im Kanalnetz platzierten Ventilatoren überwunden, welche den jeweils benötigten Volumenstrom liefern.

Methodik der energetischen Bewertung

Einleitend wurden zwei zentrale Fragestellungen zum Einsatz des Dezentrale-Ventilatoren-System (dVt-System) formuliert:

- Was sind typische energetische Einsparpotenziale des dVt-Systems?
- Wie ist das dVt-System wirtschaftlich einzuschätzen?

Für die Bewertung des dVt-Konzepts ist es nötig, Modelle zur Berechnung von Druckerhöhungen und Wirkungsgraden an das dVt-System anzupassen und weiterzuentwickeln, da beide Größen einen maßgeblichen Einfluss auf die Berechnung der Ventilatorleistung haben:

- Aufbauend auf physikalischen Prinzipien wird die mittlere, volumenstromgewichtete Druckerhöhung von allen dezentralen Ventilatoren berechnet. Neben der in der Literatur bekannten Druckverhältniszahl (die den Anteil der Druckverluste des Kanalnetzes zur Luftverteilung am Gesamtdruckverlust darstellt) und Angaben zum Gesamtdruckverlust wird dazu der sog. Netzfaktor neu eingeführt und in der Berechnung verwendet.

- Zur Berechnung des Ventilatorwirkungsgrads, auch bei Teillastbetriebszuständen, werden Messprotokolle von Ventilatoren unterschiedlicher Baugröße und Bauform (rückwärtsgekrümmte Radialventilatoren und Rohrventilatoren jeweils mit integrierten EC-Motoren) eines führenden Ventilatorherstellers anhand einer Regressionsanalyse ausgewertet.

Das erstellte Modell zur Berechnung der Ventilatorleistung wurde an einem eigens erstellten Versuchsstand des Fachgebiets Technische Gebäudeausrüstung der Universität Kassel unter realen Bedingungen getestet. Dabei konnte die gemessene Ventilatorleistung detailliert rechnerisch nachgebildet und das mathematische Modell validiert werden.

Unter Annahme von neu (in Anlehnung an DIN V 18599-10) erstellten stündlichen Lüftungsprofilen und weiteren Standardrandbedingungen kann der End- und Primärenergiebedarf der unterschiedlichen Lüftungssysteme bestimmt werden. Die Lüftungsprofile beinhalten das jeweilige Anwesenheitsprofil einer Nutzungsart, die Lüftung während Personenabwesenheit sowie technologisch bedingte Mindestdrehzahlen bei niedrigen Teillastvolumenströmen. Zusammenfassend kann so für unterschiedliche Nutzungsarten der elektrische Endenergiebedarf der Luftförderung und – unter Berücksichtigung des Nutzenergiebedarfs der thermischen Luftaufbereitung sowie von elektrischen Verbrauchern mit konstantem Leistungsbedarf (Regler, Sensoren, u.ä.) – der Primärenergiebedarf der Lüftungssysteme berechnet werden.

Ergänzend zur nutzungsartenbezogenen energetischen Bewertung – wo für bestimmte Nutzungsarten bei typischen Randbedingungen allgemeine Aussagen zur energetischen und wirtschaftlichen Bewertung getroffen werden – zielt die methodisch weitergehende anlagenbezogene Bewertung darauf ab, exemplarische Einzelfälle zu untersuchen. Bei den exemplarischen Büro- und Verwaltungsgebäuden sind die Anzahl und Art der zu versorgenden Lüftungszonen sowie die Höhe des Auslegungsvolumenstroms durch die Gebäudegeometrie und vorliegende Lüftungsplanungen vorgegeben. Die Platzierung der dezentralen Ventilatoren und deren Anbindung ans Lüftungs kanalnetz basiert auf eigenen Planungen [siehe auch Klimmt o. J.]. Es werden die zuvor als typisch identifizierten Randbedingungen der nutzungsartenbezogenen Bewertung verwendet, sodass die Ergebnisse der exemplarischen, anlagenbezogenen Bewertung den vorherigen Ergebnissen gegenübergestellt werden können.

Ergebnisse der energetischen Bewertung

Aus energetischer Sicht ist zunächst der Einsatz von VVS-Anlagen – auch in konventioneller Technik mit Variabel-Volumenstromreglern (VSR-System) – ein maßgeblicher Schritt für eine hohe Energieeffizienz. Schwerpunktmäßig untersucht wurde das Einsparpotenzial für die Nutzungsarten Gruppenbüro, Klassenzimmer, Besprechung/Sitzung/Seminar und Hörsaalnutzung. In diesen Fällen liegt das primärenergetische Einsparpotenzial des VSR-Systems bei Standardrandbedingungen bei 25 % bis 70 % gegenüber Konstant-Volumenstrom-Systemen. Außer in Büronutzungen (geringste Einsparung mit 25 %) ist der Einsatz von VVS-Anlagen durch die Energieeinsparverordnung bei den untersuchten Nutzungsarten typischerweise aufgrund des Zuluftvolumenstroms je m^2_{NGF} bereits bei Einbau und Erneuerung vorgeschrieben. Bei Lüftungsanlagen im Bestand stellt die Nachrüstung von Variabel-Volumenstrom-Systemen in den genannten Fällen ein wesentliches Einsparpotenzial dar.

Über die Energieeinsparung von Systemen mit Variabel-Volumenstromreglern und konstantem Vordruck hinaus bietet das dVt-System ein primärenergetisches Einsparpotenzial von

14 % bis 41 % bei Standardrandbedingungen, je nach Nutzung. Bezogen auf die elektrische Energie zur Luftförderung liegt das Einsparpotenzial bei 20 % bis 54 % für die untersuchten Nutzungsarten. In Gruppenbüros ist gegenüber dem VSR-System nur mit einer geringen Einsparung < 10% zu rechnen. Dies ist auf geringe Raumvolumenströme mit resultierenden geringen Wirkungsgraden der dezentralen Ventilatoren sowie geringe Anteile an Teillastbetrieb zurückzuführen.

Als ebenfalls energieeffiziente, aber nur in Teilbereichen sinnvoll einsetzbare Alternative zu den Zentralventilatorsystemen, hat sich zudem der Einsatz von dezentralen in die Außenwand integrierten Lüftungssystemen herausgestellt (deAL-System). Da im deAL-System das Kanalnetz und die Lüftungszentrale entfallen, ist dort mit günstigen Investitionskosten, jedoch höheren Kosten für Wartung und Inspektion zu rechnen. Primärenergetisch ist das deAL-System als in etwa gleichwertig gegenüber dem dVt-System einzuschätzen. Wenn die Rückwärmzahl der Wärmerückgewinnung ähnlich wie die Zentralventilatorsysteme Werte um 80 % erreicht, sind mit deAL-Systemen systematisch die geringsten Primärenergiebedarfe zu erzielen. Allerdings finden sich in der Literatur noch keine Feldtests, die die geringen Energiebedarfe im realen Betrieb in Form von Verbrauchsmessungen nachweisen. Deutliche Investitionskosteneinsparungen treten nur in denjenigen Einsatzfällen auf, in denen nicht ohnehin der zusätzliche Einbau von zentralen Lüftungssystemen nötig ist. Insgesamt sind wesentliche Einsatzhemmnisse der deAL-Systeme nicht energetischer, sondern technischer und organisatorischer Art.

Die Untersuchung der exemplarischen Büro- und Verwaltungsgebäude zeigt, dass auch auf Gebäudeebene gegenüber dem VSR-Referenzsystem eine Einsparung an elektrischer Endenergie zur Luftförderung in Höhe von 20 % bis 39 % erzielt werden kann. Das Einsparpotenzial der anlagenbezogenen Bewertung liegt damit in einer ähnlichen Größenordnung wie das Einsparpotenzial bei nutzungsbezogener Betrachtung. Im Detail sind zwei gegenläufige Tendenzen zu beobachten:

- Einerseits ist das Einsparpotenzial geringer, da Büronutzungen ohnehin ein geringes Einsparpotenzial bieten und aus Kostengründen auf eine Einzelraumregelung verzichtet wird.
- Andererseits sinkt durch die anlagenbezogene Betrachtung der errechnete Energiebedarf, wenn Nutzungsarten mit unterschiedlichen Lüftungsprofilen von einer gemeinsamen RLT-Anlage versorgt werden.

Letzterer Effekt erhöht das Einsparpotenzial gegenüber dem VSR-System, wenn ein Teil der Lüftungszonen weniger Nutzungstage als die übliche Büronutzung (250 jährliche Betriebstage) aufweist, da dadurch mehr – für das dVt-System besonders vorteilhafte – Betriebssituationen mit Teillastbetrieb auftreten. So wird bei den exemplarischen Büro- und Verwaltungsgebäude das obere Ende des genannten Einsparpotenzials von 20 % bis 39 % erreicht, wenn Hörsaalnutzungen mit nur 150 jährlichen Betriebstagen vorhanden waren.

Wirtschaftliche Bewertung

Eine abschließende Bewertung der Wirtschaftlichkeit setzt eine sichere Kenntnis der Kostenstruktur voraus. Dies ist beim dVt-System derzeit nicht der Fall, da sich der gesamte Ansatz noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium befindet. Dennoch ist die möglicherweise gesteigerte Wirtschaftlichkeit ein zentraler Grund für die Entwicklung des dVt-Konzepts, so-

dass eine Abschätzung notwendig ist. Vor diesem Hintergrund werden zunächst die Investitionskosten des dVt-Systems und des VSR-Vergleichssystems – als Mehrkosten gegenüber einer KVS-Anlage – basierend auf am Markt erhältlichen Einzelkomponenten (inkl. Einbau) ermittelt.

Bei der Analyse der Kostenstruktur zeigt sich eine zentrale Entwicklungsaufgabe: Ähnlich wie bei Volumenstromreglern wird auch im dVt-System eine dezentrale Regeleinheit mit integrierter Volumenstrommessung benötigt, welche entweder die Schnittstelle des dVt-Systems an übergeordnete Systeme der Gebäudeautomation darstellt oder einen autarken Betrieb ermöglicht. Auch ohne die (noch zu entwickelnde) dezentrale Regeleinheit ist es möglich, das dVt-System mit marktüblicher Sensorik und einer Regelung über zentrale Automationsstationen zu implementieren. Dies stellt sich allerdings durchweg als teurer dar und ist vermutlich zudem anfälliger für Programmierfehler.

Nach Festlegung der Investitionskosten, den damit verknüpften Inspektions- und Wartungskosten (gemäß VDI 2067), der Energiepreise (Stand: 4.Quartal 2015, Mittelwerte von Industrie- und Verbraucherpreisen) und Energiepreissteigerungen (Mittelwerte der Jahre 2011 bis 2015) sowie des Kalkulationszinsfußes (Mittlerer Kreditzins der Jahre 2011 bis 2015) können die betriebswirtschaftlichen Kenngrößen Kapitalwert, Amortisationsdauer und Rendite berechnet werden. Die wichtigsten Ergebnisse werden nachfolgend zunächst für den Vergleich von VSR- und dVt-System gegenüber dem KVS-System und anschließend gegeneinander zusammengefasst.

Die Wirtschaftlichkeit der VVS-Anlagen (dVt- und VSR-System) gegenüber dem Konstant-Volumenstrom-System kann in erster Näherung nach zwei Kriterien bewertet werden. Die Wirtschaftlichkeit ist umso besser:

1. *Je größer der Auslegungsvolumenstrom je Raum und/oder*
2. *Je geringer der mittlere Volumenstrom ggü. dem Auslegungsvolumenstrom ist.*

Die erste Aussage ist im Wesentlichen auf die sinkenden spezifischen Investitionskosten je m^3/h geförderter Luft zurückzuführen. Im dVt-System tritt dieser Effekt noch verstärkt auf, da zusätzlich die Wirkungsgrade der dezentralen Ventilatoren abhängig vom Auslegungsvolumenstrom steigen. Die zweite Aussage ist auf die energetischen Einsparungen (Strom und Wärme) bei Teillastvolumenströmen zurückzuführen. Auch hier tritt der Effekt im dVt-System verstärkt auf, da die elektrische Energieeinsparung bei Teillast besonders hoch ist.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass ein eindeutig wirtschaftlicher Einsatz gegenüber dem Konstant-Volumenstrom-System erst bei Nutzungsarten ab Volumenströmen von ca. $500 \text{ m}^3/\text{h}$ und Teillastbetrieb entsprechend z.B. Besprechungs-, Sitzungs- oder Seminarräumen. Hier liegt die Rendite typischerweise $> 5\%$ und die Amortisationsdauer bei 8...14 Jahren. Hochwirtschaftlich sind die VVS-Anlagen in Hörsälen, Restaurants, Theatern, Fitnessräumen, Kantinen, Messen und ähnlichen Nutzungsarten mit großen Volumenströmen (mehrere tausend m^3/h) und unterschiedlich hoher Auslastung im Tages- und Wochenverlauf. So amortisiert sich eine VVS-Anlage in einem Hörsaal z.B. innerhalb von ca. 3...6 Jahren. Der Kapitalwert (entspricht bei positiven Werten grob dem gesamten Gewinn, bezogen auf den Anfangszeitpunkt einer Investition) ist für alle VVS-Ausführungen je Hörsaal größer als 14.000 Euro.

In vielen Fällen beruht die Wahl einer VVS-Anlage (dVt- oder VSR-System) nicht auf einer Abwägung der grundsätzlichen Wirtschaftlichkeit, sondern ist durch andere Einflüsse bereits vorgegeben. Neben den Anwendungsfällen, in denen der Einsatz einer bedarfsbasierten Regelung durch die Energieeinsparverordnung direkt vorgeschrieben ist, können dies darüberhin- ausgehende Ansprüche an den Gesamtenergiebedarf von Gebäuden oder Klimatisierungsan- forderungen zur zonenweisen Temperierung oder zum Feuchtmanagement sein. In diesen Fällen ist insbesondere die Systementscheidung zwischen dVt- oder VSR-System zu treffen:

Bei typischen Randbedingungen und den betrachteten System- und Regelvarianten *ist das dVt-System immer wirtschaftlicher als ein konventionelles VSR-System mit konstantem Vor- druck*, wenn

1. eine *kostengünstige, autarke Regelung* einen minimalen Einsatz von Datenpunkten ermöglicht (Entwicklungsaufgabe),
2. passende, hocheffiziente *Rohrventilatoren* verfügbar sind (Entwicklungsaufgabe)
3. und auf kostenintensive Einzelkomponenten wie motorische Absperrklappen verzich- tet wird (*Grundlüftung* außerhalb der Nutzungszeit außer bei Nutzungsarten mit wenig jährlichen Nutzungstagen oder täglichen Nutzungsstunden).

Insbesondere bei großen Volumenströmen (Hörsaal u.ä.) führen nicht auf dem Markt verfüg- bare, effiziente Rohrventilatoren und teure Einzelkomponenten derzeit (Stand: 2016) – trotz der größten energetischen Einsparpotenziale in diesem Bereich typischerweise nicht zu einer Wirtschaftlichkeit gegenüber dem VSR-System.

In Bezug auf die Randbedingungen zeigt die Parametervariation der Wirtschaftlichkeitsbe- rechnung die wesentlichen Einflussfaktoren der wirtschaftlichen Bewertung auf. Großen Ein- fluss auf die energetische und wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit des dVt-Systems haben bei Nutzungsarten

- mit *viel Teillastbetrieb* (mittlerer Volumenstrom ca. ≤ 70 % des Auslegungsvolumen- stroms) die Druckverhältniszahl und der Energiepreis,
- mit *wenig Teillastbetrieb* (mittlerer Volumenstrom ca. > 70 % des Auslegungsvolu- menstroms) der Netzfaktor zur Charakterisierung der vermiedenen Drosselung zur Luftmengenverteilung und der Wirkungsgrad der dezentralen Ventilatoren, sowie bei Nutzungsarten
- mit *geringem Energiebedarf je Raum* (i.d.R. Auslegungsvolumenströme < 500 m³/h) möglichst geringe Investitions(mehr)kosten.

Ausblick

Vor dem Hintergrund von langfristig angelegten Klimaschutzvereinbarungen ist über die nächsten Jahrzehnte hinweg weiterhin mit stetig steigenden Anforderungen an die Energieef- fizienz im Gebäudesektor zu rechnen. Während Gebäude im Passivhaus-, Nullenergie- oder Plusenergiestandard technologisch bereits flächendeckend errichtet werden könnten, steht den steigenden Energieeffizienzanforderungen kurz- und mittelfristig in vielen Bereichen der Grundsatz der Wirtschaftlichkeit entgegen.

Das dVt-System hat das Potenzial – ohne Einbußen bei der Wirtschaftlichkeit – die Energie- effizienz im Gewerk der Lüftungstechnik maßgeblich zu erhöhen. Weiterhin kann es auch bei der Sanierung von Lüftungsanlagen im Bestand eingesetzt werden. Dies sind zwei überaus

bedeutende Bausteine, um in der Breite heutiger und zukünftiger Anforderungen Akzeptanz und Anwendung zu finden.

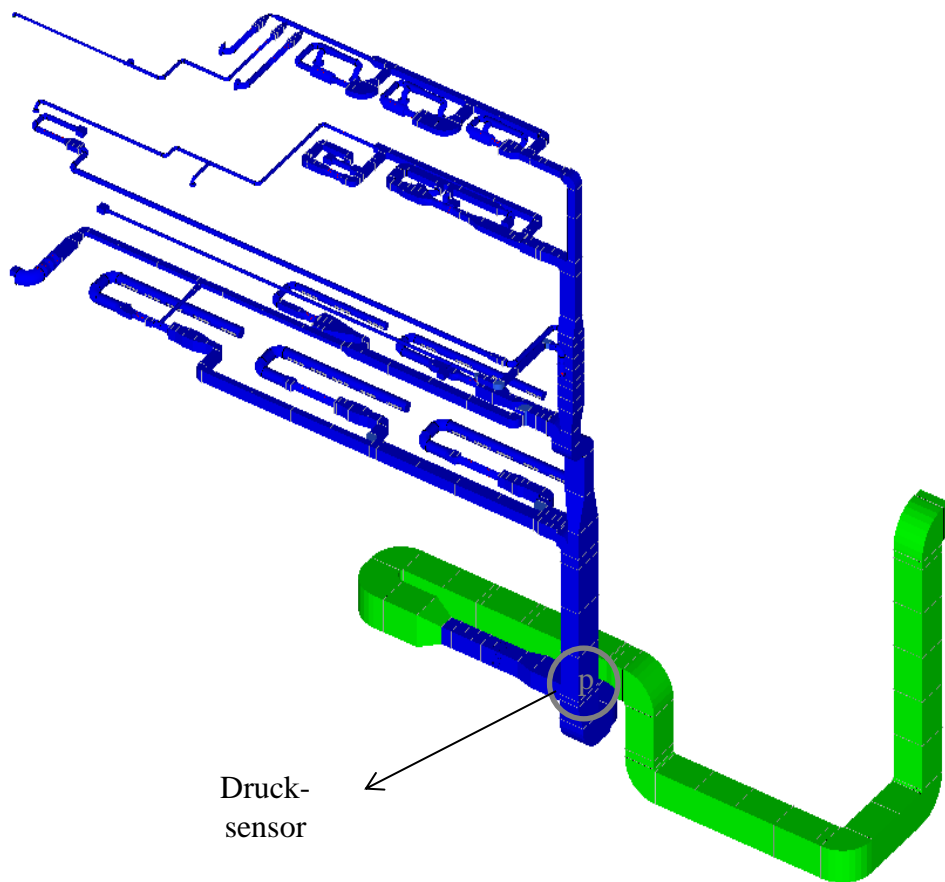
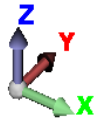
Perspektivisch ist zu beobachten, inwieweit sich die technologisch konkurrierenden Systeme mit Variabel-Volumenstromreglern und variablem Vordruck am Markt etablieren werden. Diese sind ebenfalls energieeffizienter als heute übliche Systeme mit konstantem Vordruck und spielen ihre Stärken wie das dVt-System bei viel Teillastbetrieb aus. Anders als beim dVt-System ist eine Energieeinsparung jedoch davon abhängig, dass alle Stränge bei Teillast mit geringen Kanaldrücken auskommen. Zudem ist eine regelungstechnische Vernetzung aller Stränge nötig, was die Fehleranfälligkeit der Systeme mit variablem Vordruck bei Ausfall einzelner Signale erhöht. Das dVt-System kann dagegen als System von raumweise autark agierenden Regelungen eingesetzt werden.

Abschließend kann festgestellt werden, dass das Dezentrale-Ventilatoren-System für viele Anwendungen in Neubau und Bestand ein ausgesprochen energieeffizientes und zudem wirtschaftliches Lüftungssystem darstellt. Dies sollte mittelfristig auch bei der energetischen Bewertung von Gebäuden auch normativ honoriert werden. Bei der Entwicklung von markttauglichen Systemen sollte ein besonderes Augenmerk auf einfache und an die jeweiligen Randbedingungen angepasste Konzepte gelegt werden, wie sie auch in [Klimmt o. J.] untersucht werden. Ein Feldtest und eine begleitende oder anschließende Phase des Markthochlaufs mit entsprechenden Schulungen für Architekten und Ingenieure sind anzustreben.

8 Anhang

8.1 Druckverlustberechnungen

Gebäude Ingenieurwissenschaften 1, Anlage 8 Zuluft



Anlagenkennzahlen

\dot{V}^*	Δp^*	f_p	f_N
[m ³ /h]	[Pa]	[-]	[-]
16.200	1.170	0,25	0,78

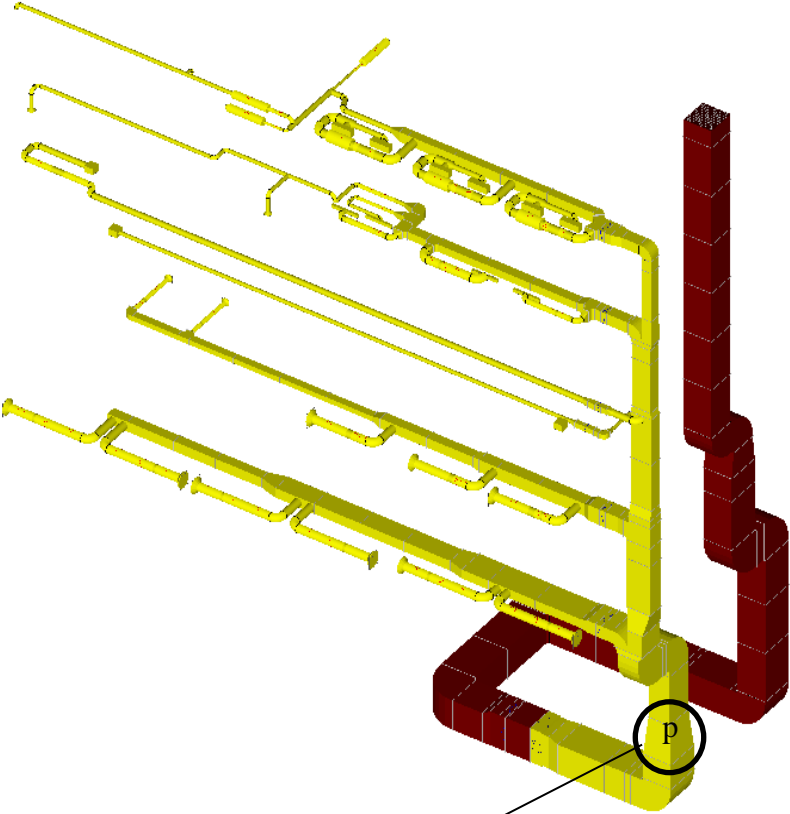
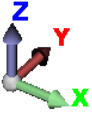
Tabelle mit Druckverlusten von jedem Strang

Druckverluste von Außenluftdurchlass bis Drucksensor: 883 Pa

Druckverluste ab Drucksensor bis zum Auslass:

Position	Raum-Nr.	Nutzung	q_{V^*i}	$\Delta p_{t,N}^*$
			[m ³ /h]	[Pa]
1	3114	Analyse	1100	287
2	4115	Labor	800	288
3	4114	Labor	800	287
4	4112	Teeküche	200	256
5	2116	Projektraum	500	242
6	4116	Labor	800	240
7	3115	Chem.Labor	1600	233
8	3109	Teeküche	200	233
9	4113	EDV	100	235
10	4113 A	EDV	100	231
11	1123 A	Auswertung	300	204
12	0118	Labor	2100	208
13	0121	Labor	2300	205
14	1126	Messlabor	1000	205
15	0122	Labor	2300	198
16	1127	Prüflabor	1400	197
17	1125 A	Demolabor	400	162
18	2117	Teeküche	200	163

Gebäude Ingenieurwissenschaften 1, Anlage 8 Abluft



Druck-sensor

Anlagenkennzahlen

\dot{V}^*	Δp^*	f_p	f_N
[m ³ /h]	[Pa]	[-]	[-]
16200	910	0,29	0,70

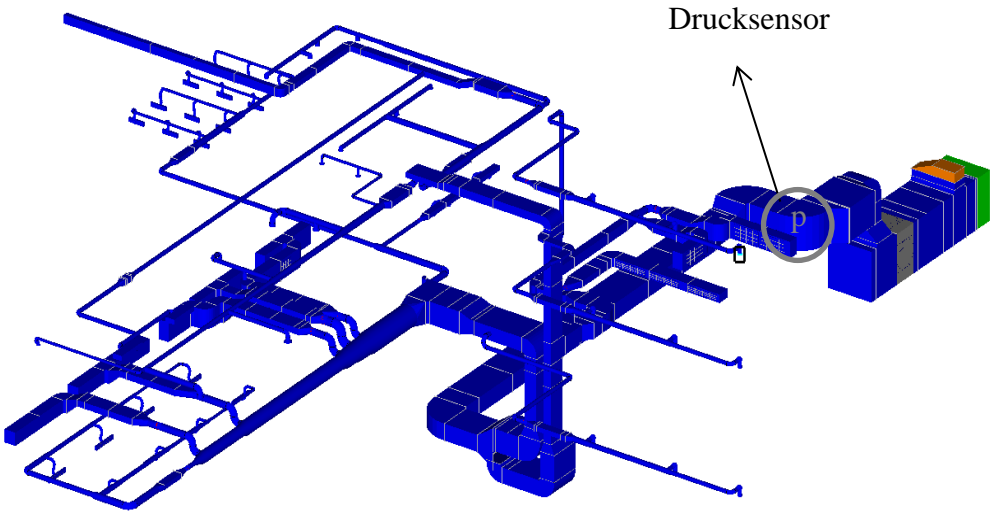
Tabelle mit Druckverlusten von jedem Strang

Druckverluste von Fortluftauslass bis Drucksensor: 647 Pa

Druckverluste ab Drucksensor bis zum Auslass:

Position	Raum-Nr.	Nutzung	q_{V^*i}	$\Delta p_{t,N}^*$
			[m ³ /h]	[Pa]
1	3114	Analyse	300	263
2	3114	Analyse	800	236
3	4109	Teeküche	200	238
4	4113	EDV Labor	100	231
5	4114	Labor	800	207
6	4115	Labor	800	202
7	3109	Teeküche	200	217
8	3115	Chemi..Labor	650	194
9	4113 A	EDV Labor	100	211
10	2116	Projektraum	500	196
11	1125	Demolabor(Umluft)	400	189
12	2117	Besprechung	200	192
13	121	Labor	1150	186
14	4116	Labor	800	184
15	1126	Messlabor	1000	181
16	1123	Auswertung(Umluft)	300	192
17	3115	Chemie-Labor	950	180
18	122	Labor	1150	176
19	122	Labor	1150	171
20	1127	Prüflabor	700	170
21	1127 A	Prüflabor	700	166
22	118	Labor	1050	159
23	118	Labor	1050	152
24	121	Labor	1150	142

Gebäude Ingenieurwissenschaften 3, Anlage 8.0 Zuluft



Anlagenkennzahlen

\dot{V}^*	Δp^*	f_p	f_N
[m ³ /h]	[Pa]	[-]	[-]
25092	1343	0,67	0,70

Tabelle mit Druckverlusten von jedem Strang

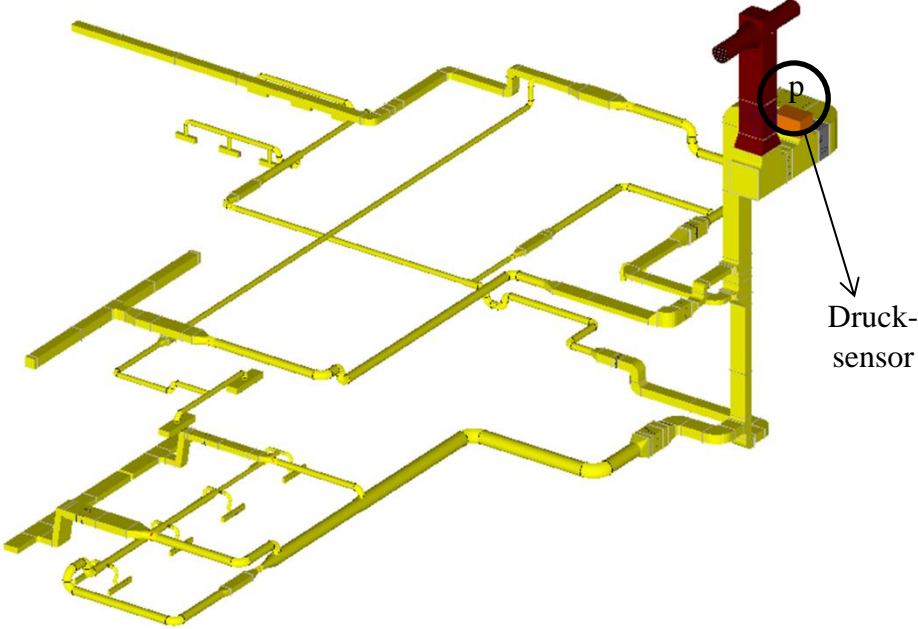
Druckverluste von Außenluftdurchlass bis Drucksensor: 445 Pa

Druckverluste ab Drucksensor bis zum Auslass:

Position	Raum-Nr.	Nutzung	q_{V^*i}	$\Delta p_{t,N}^*$
			[m ³ /h]	[Pa]
1	1715	Aufenthaltsraum	200	898
2	1715	Aufenthaltsraum	200	897
3	714	Mechanik Labor	1166	811
4	714	Mechanik Labor	1166	808
5	714	Mechanik Labor	1168	807
6	2700	Flur/Treppenhaus	320	806
7	2700	Flur/Treppenhaus	320	787
8	2700	Flur/Treppenhaus	80	768
9	715	Fahrzeugtechnik	900	738
10	715	Fahrzeugtechnik	1220	736
11	715	Fahrzeugtechnik	1220	736
12	1719	Konstruktionsbüro	310	729
13	1719	Konstruktionsbüro	310	725
14	1719	Konstruktionsbüro	315	721
15	1719	Konstruktionsbüro	315	718
16	700	Flur/Treppenhaus	320	706
17	700	Flur/Treppenhaus	320	687
18	1718	Umkleide Herren	230	679
19	700	Flur/Treppenhaus	80	668
20	1718	Umkleide Herren	230	650
21	1718	Umkleide Herren	230	642
22	1717	Umkleide Damen	100	641
23	1718	Umkleide Herren	110	620
24	1718	Umkleide Herren	100	620
25	1717	Umkleide Damen	100	618
26	1718	Umkleide Herren	105	615
27	1718	Umkleide Herren	100	609
28	0721 A	Spritzraum	1166	607
29	0721 A	Spritzraum	1166	605
30	1700	Flur/Treppenhaus	320	603
31	1700	Flur/Treppenhaus	320	583
32	722	Holz+Kunststoff	375	574
33	1711	Lager	150	573
34	1716	Umkleide Damen 2	150	573
35	722	Holz+Kunststoff	375	572
36	722	Holz+Kunststoff	375	571
37	1712	Lager Ätztation	200	570
38	1714	Teeküche	100	569

39	0721 A	Spritzraum	1168	568
40	1700	Flur/Treppenhaus	80	564
41	1716	Umkleide Damen 2	150	564
42	1717	Umkleide Damen	202	552
43	1717	Umkleide Damen	200	547
44	0714 B	Electronic	125	520
45	716	Zeichenplätze	50	517
46	714	Mechanik Labor	850	515
47	714	Mechanik Labor	850	513
48	0714 B	Electronic	125	513
49	716	Zeichenplätze	50	512
50	0714 B	Electronic	125	511
51	716	Zeichenplätze	50	510
52	716	Zeichenplätze	50	507
53	0714 A	EDV-Raum	100	507
54	716	Zeichenplätze	50	506
55	716	Zeichenplätze	50	504
56	719	Fotolabor	250	504
57	0714 B	Electronic	125	504
58	0714 A	EDV-Raum	100	502
59	716	Zeichenplätze	50	501
60	719	Fotolabor	250	501
61	0714 A	EDV-Raum	100	500
62	716	Zeichenplätze	50	498
63	0714 A	EDV-Raum	100	495
64	716	Zeichenplätze	50	495
65	716	Zeichenplätze	50	494
66	716	Zeichenplätze	50	487
67	716	Zeichenplätze	50	487
68	715	Fahrzeugtechnik	1220	477
69	715	Fahrzeugtechnik	1220	477
70	715	Fahrzeugtechnik	1220	459

Gebäude Ingenieurwissenschaften 3, Anlage 8.0 Abluft



Anlagenkennzahlen

\dot{V}^*	Δp^*	f_p	f_N
[m³/h]	[Pa]	[-]	[-]
8850	1336	0,64	0,72

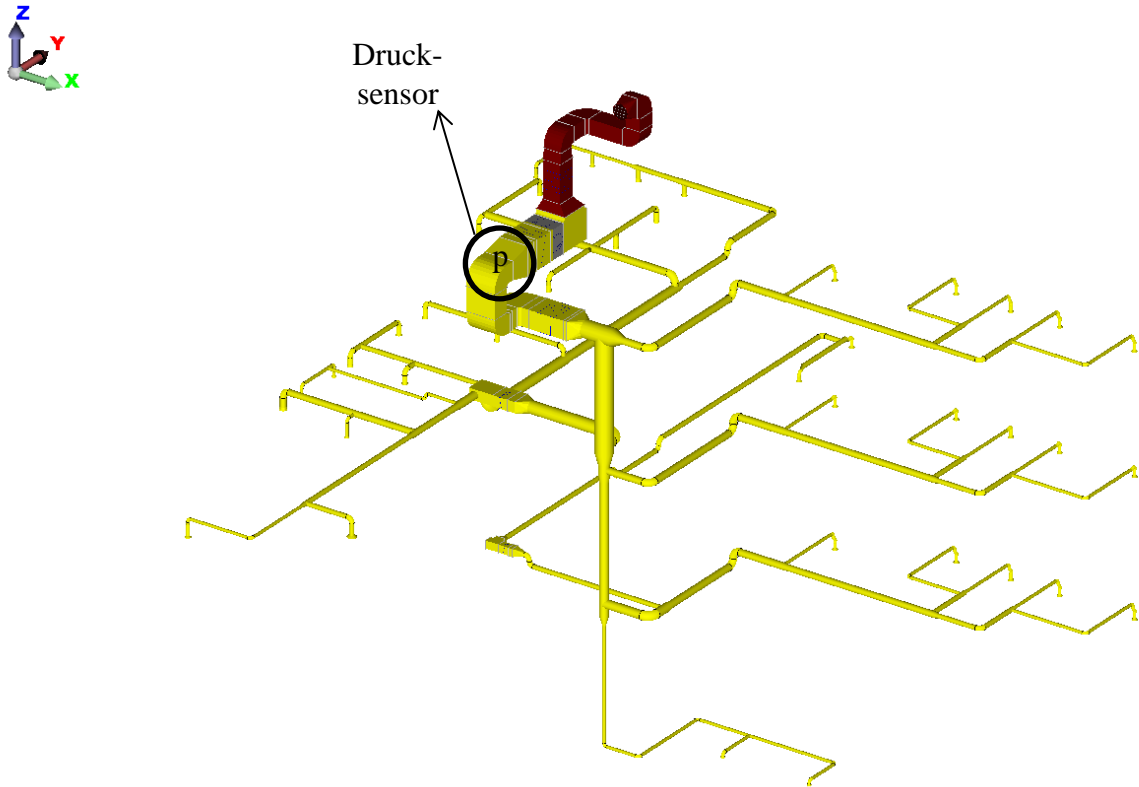
Tabelle mit Druckverlusten von jedem Strang

Druckverluste von Fortluftauslass bis Drucksensor: 482 Pa

Druckverluste ab Drucksensor bis zum Auslass:

Position	Raum-Nr.	Nutzung	q_{V^*i}	$\Delta p_{t,N}^*$
			[m³/h]	[Pa]
1	714	Mechanik Labor	700	854
2	714	Mechanik Labor	700	854
3	714	Mechanik Labor	700	742
4	714	Mechanik Labor	700	729
5	714	Mechanik Labor	700	722
6	0714 A	EDV-Raum	100	660
7	0714 A	EDV-Raum	100	660
8	1715	Aufenthaltsraum	200	642
9	1715	Aufenthaltsraum	200	642
10	0714 A	EDV-Raum	100	612
11	0714 A	EDV-Raum	100	612
12	0714 B	Electronic	125	596
13	0714 B	Electronic	125	596
14	0714 B	Electronic	125	564
15	0714 B	Electronic	125	564
16	716	Zeichenplätze	100	561
17	716	Zeichenplätze	100	560
18	716	Zeichenplätze	100	555
19	716	Zeichenplätze	100	554
20	716	Zeichenplätze	100	553
21	716	Zeichenplätze	100	547
22	719	Fotolabor	250	521
23	719	Fotolabor	250	517
24	1719	Konstruktionsbüro	315	481
25	1719	Konstruktionsbüro	315	475
26	1719	Konstruktionsbüro	310	463
27	1719	Konstruktionsbüro	310	446
28	714	Mechanik Labor	280	434
29	714	Mechanik Labor	280	433
30	714	Mechanik Labor	280	431
31	714	Mechanik Labor	280	431
32	714	Mechanik Labor	300	427
33	714	Mechanik Labor	280	427

Gebäude Ingenieurwissenschaften 3, Anlage 8.4 (Abluft WC's)



Anlagenkennzahlen

\dot{V}^*	Δp^*	f_p	f_N
[m ³ /h]	[Pa]	[-]	[-]
5230	671	0,38	0,72

Tabelle mit Druckverlusten von jedem Strang

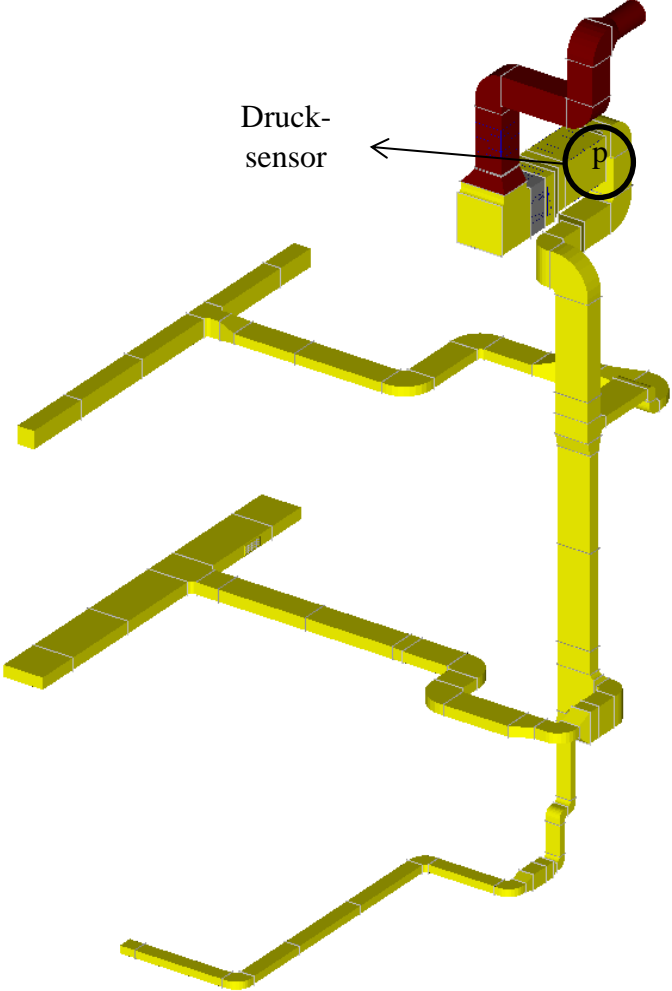
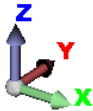
Druckverluste von Fortluftauslass bis Drucksensor: 418 Pa

Druckverluste ab Drucksensor bis zum Auslass:

Position	Raum-Nr.	Nutzung	q_{V^*i}	$\Delta p_{t,N}^*$
			[m ³ /h]	[Pa]
1	1718	Umkleide Herren	100	253
2	1718	Umkleide Herren	200	251
3	1718	Umkleide Herren	200	245
4	722	Holz+Kunststoff	150	239
5	722	Holz+Kunststoff	150	239
6	1718	Umkleide Herren	100	238
7	1718	Umkleide Herren	150	230
8	1718	Umkleide Herren	150	229
9	1718	Umkleide Herren	100	217

10	1717	Umkleide Damen	140	214
11	1717	Umkleide Damen	140	213
12	1718	Umkleide Herren	200	212
13	1718	Umkleide Herren	100	208
14	0709 A	WC Herren	170	202
15	1716	Umkleide Damen 2	50	193
16	1717	Umkleide Damen	140	190
17	1709 A	WC Herren	170	184
18	0708 A	WC Damen	150	183
19	1717	Umkleide Damen	140	176
20	1717	Umkleide Damen	140	172
21	709	WC Herren	170	167
22	1714	Teeküche	100	166
23	1708 A	WC Damen	150	164
24	1711	Lager	150	159
25	708	WC Damen	150	158
26	1716	Umkleide Damen 2	50	155
27	1716	Umkleide Damen 2	200	152
28	2709 A	WC Herren	170	151
29	1709	WC Herren	170	148
30	1716	Umkleide Damen 2	100	145
31	1708	WC Damen	150	139
32	-1703	???	50	138
33	-1704	???	70	136
34	2708 A	WC Damen	150	131
35	707	Beh. WC	80	118
36	2709	WC Herren	170	115
37	2708	WC Damen	150	106
38	1707	Beh. WC	80	100
39	2707	Beh. WC	80	67

Gebäude Ingenieurwissenschaften 3, Abluft 8.1 (Fahrzeugtechnik)



Anlagenkennzahlen

\dot{V}^*	Δp^*	f_p	f_N
[m ³ /h]	[Pa]	[-]	[-]
7000	844	0,37	0,79

Tabelle mit Druckverlusten von jedem Strang

Druckverluste von Fortluftauslass bis Drucksensor: 535 Pa

Druckverluste ab Drucksensor bis zum Auslass:

Position	Raum-Nr.	Nutzung	q_{V^*i}	$\Delta p_{t,N}^*$
			[m ³ /h]	[Pa]
1	3704	-	900	309
2	715	Fahrzeugtechnik	520	306
3	715	Fahrzeugtechnik	520	305
4	715	Fahrzeugtechnik	520	304
5	715	Fahrzeugtechnik	520	302
6	715	Fahrzeugtechnik	520	299
7	715	Fahrzeugtechnik	500	189
8	715	Fahrzeugtechnik	500	187
9	715	Fahrzeugtechnik	500	187
10	715	Fahrzeugtechnik	500	184
11	715	Fahrzeugtechnik	500	181
12	-1713	-	1000	168

8.2 24h-Lüftungsprofile

Tabelle 8.1: Lüftungsprofile für Nutzungsarten aus DIN V 18599 Spülvorgang und mit Grundlüftung (gelb unterlegt = Norm-Nutzungszeit; blauer Text = Grundlüftung / Vorspülung; grüner Text = Mindestlüftung)

Std	Hörsaal	Besprechungs- / Sitzungszimmer	Restaurant	Zuschauerbereich (Theater u.ä.)	Kantine	Fitnessraum	Foyer (Theater- u.ä.)	Untersuchungs- u. Behandlungsräume	Arztpraxen	Klassenzimmer	Einzelbüro	Großraumbüro	Gruppenbüro	Sonstige Aufenthaltsräume	Küche (Vorbereitung, Lager)	WC und Sanitär in NWG	Nebenflächen ohne Aufenthaltsräume	Lager	Labor mit Gefährdungspotenzial	Verkehrsflächen	Labor ohne Gefährdungspotenzial		
1																						0,50	
2																							0,50
3																							0,50
4																							0,50
5																							0,50
6		0,38						0,62			0,81	0,88	0,81	0,61		0,53	1,00	1,00	0,50	1,00	0,70		
7	0,36	0,38			0,40	0,56		0,62	0,62	0,76	0,81	0,88	0,81	0,61		0,53	1,00	1,00	0,50	1,00	0,70		
8	0,36	0,17			0,40	0,56		0,25	0,62	0,76	0,63	0,80	0,63	0,36		0,33	1,00	1,00	1,00	1,00	0,40		
9	0,12	0,17	0,38		0,30	0,35		0,80	0,25	0,90	0,90	0,90	0,90	0,50	1,00	0,33	1,00	1,00	1,00	1,00	0,40		
10	0,50	1,00	0,38		0,30	0,70		0,90	0,80	1,00	1,00	1,00	1,00	0,80	1,00	0,70	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		
11	0,83	0,17	0,38		0,40	0,70		0,80	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,90	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		
12	0,83	0,40	0,45		0,50	0,40		0,25	0,80	0,80	0,90	0,80	0,90	1,00	1,00	0,70	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		
13	0,12	0,17	0,80		0,68	0,21		0,25	0,25	0,25	0,63	0,72	0,63	0,36	1,00	0,45	1,00	1,00	1,00	1,00	0,40		
14	0,12	0,17	0,70		0,40	0,21		0,80	0,25	0,70	0,63	0,8	0,63	0,50	1,00	0,45	1,00	1,00	1,00	1,00	0,40		
15	0,12	0,17	0,14		0,20	0,40		0,99	0,89	0,64	0,90	1	0,9	0,70	1,00	0,55	1,00	1,00	1,00	1,00	0,40		
16	0,50	0,78	0,14			0,60		0,90	0,89		0,90	1	0,9	0,70	1,00	0,70	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		
17	0,50	0,78	0,14			0,40		0,60	0,80		0,80	0,9	0,8	0,50	1,00	0,40	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		
18	0,12	0,17	0,14	0,39		0,70	0,60	0,25	0,25		0,63	0,8	0,63	0,36	1,00	0,33	1,00	1,00	1,00	1,00	0,40		
19			0,30	0,39		0,90	0,60								1,00						0,50		
20			0,30	0,18		1,00	0,80								1,00						0,50		
21			0,80	0,60		0,90	0,40								1,00						0,50		
22			0,70	0,60		0,70	0,40								1,00						0,50		
23			0,20	0,18		0,30	0,80								1,00						0,50		
24			0,14																		0,50		
1	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,14	0,12	0,12	0,18	0,12	0,15	0,15	0,50	0,15	0,12		
2	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,14	0,12	0,12	0,18	0,12	0,15	0,15	0,50	0,15	0,12		
3	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,14	0,12	0,12	0,18	0,12	0,15	0,15	0,50	0,15	0,12		
4	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,14	0,12	0,12	0,18	0,12	0,15	0,15	0,50	0,15	0,12		
5	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,14	0,12	0,12	0,18	0,12	0,15	0,15	0,50	0,15	0,12		
6	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,14	0,12	0,12	0,18	0,12	0,15	0,15	0,50	0,15	0,12		
7	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,14	0,12	0,12	0,18	0,12	0,15	0,15	0,50	0,15	0,12		
8	0,12	0,17	0,12	0,12	0,12	0,13	0,12	0,25	0,12	0,12	0,63	0,80	0,63	0,36	0,18	0,33	1,00	1,00	1,00	1,00	0,40		
9	0,12	0,17	0,12	0,12	0,30	0,35	0,12	0,80	0,25	0,90	0,90	0,90	0,90	0,50	0,18	0,33	1,00	1,00	1,00	1,00	0,40		
10	0,50	1,00	0,12	0,12	0,30	0,70	0,12	0,90	0,80	1,00	1,00	1,00	1,00	0,80	0,18	0,70	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		
11	0,83	0,17	0,38	0,12	0,40	0,70	0,12	0,80	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,90	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		
12	0,83	0,40	0,45	0,12	0,50	0,40	0,12	0,25	0,80	0,80	0,90	0,80	0,90	1,00	1,00	0,70	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		
13	0,12	0,17	0,80	0,12	0,68	0,21	0,12	0,25	0,25	0,25	0,63	0,72	0,63	0,36	1,00	0,45	1,00	1,00	1,00	1,00	0,40		
14	0,12	0,17	0,70	0,12	0,40	0,21	0,12	0,80	0,25	0,70	0,63	0,8	0,63	0,50	1,00	0,45	1,00	1,00	1,00	1,00	0,40		
15	0,12	0,17	0,14	0,12	0,20	0,40	0,12	0,99	0,89	0,64	0,90	1	0,9	0,70	1,00	0,55	1,00	1,00	1,00	1,00	0,40		
16	0,50	0,78	0,14	0,12	0,12	0,60	0,12	0,90	0,89	0,12	0,90	1	0,9	0,70	1,00	0,70	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		
17	0,50	0,78	0,14	0,12	0,12	0,40	0,12	0,60	0,80	0,12	0,80	0,9	0,8	0,50	1,00	0,40	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		
18	0,12	0,17	0,14	0,12	0,12	0,70	0,12	0,25	0,25	0,12	0,63	0,8	0,63	0,36	1,00	0,33	1,00	1,00	1,00	1,00	0,40		
19	0,12	0,12	0,30	0,12	0,12	0,90	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,14	0,12	0,12	1,00	0,12	0,15	0,15	0,50	0,15	0,12		
20	0,12	0,12	0,30	0,18	0,12	1,00	0,80	0,12	0,12	0,12	0,12	0,14	0,12	0,12	1,00	0,12	0,15	0,15	0,50	0,15	0,12		
21	0,12	0,12	0,80	0,60	0,12	0,90	0,40	0,12	0,12	0,12	0,12	0,14	0,12	0,12	1,00	0,12	0,15	0,15	0,50	0,15	0,12		
22	0,12	0,12	0,70	0,60	0,12	0,70	0,40	0,12	0,12	0,12	0,12	0,14	0,12	0,12	1,00	0,12	0,15	0,15	0,50	0,15	0,12		
23	0,12	0,12	0,20	0,18	0,12	0,30	0,80	0,12	0,12	0,12	0,12	0,14	0,12	0,12	1,00	0,12	0,15	0,15	0,50	0,15	0,12		
24	0,12	0,12	0,14	0,12	0,12	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,14	0,12	0,12	0,18	0,12	0,15	0,15	0,50	0,15	0,12		

8.3 Kostenermittlungen

Kosten je Raum für Volumenstrom-Raumregelsystem 200 m³/h (z.B. Gruppenbüros)								
dVt-System	Komponente	Stückkosten	Systemvariante 1A		Systemvariante 1B		Systemvariante 1C	
			Anzahl	Kosten	Anzahl	Kosten	Anzahl	Kosten
Basis- kompo- nenten	Ventilator	324 €	2	648 €	2	648 €	1,3	432 €
	CO2 Sensoren	251 €	1	251 €	1	251 €	1	251 €
	Rohrschalldämpfer	47 €	2	94 €	2	94 €	1	63 €
	Kulissenschalldämpfer	95 €	2	190 €	2	190 €	1,3	127 €
	<i>Zwischensumme</i>			1.183 €		1.183 €		872 €
Regelzusatz:								
G + D dez.	Dezentraler Regler mit V.-Mess	212 €	2	424 €	1	212 €	1,3	283 €
	Fehlströmungsdetektion	70 €	0	- €	1	70 €	0	- €
	Datenpunkte GLT	275 €	1	275 €	1	275 €	1	275 €
	<i>Zwischensumme</i>			699 €		557 €		558 €
G + D zen.	Volumenstrommessung	212 €	2	424 €	0	- €	1,3	283 €
	Fehlströmungsdetektion	70 €	0	- €	2	140 €	0	- €
	Datenpunkte GLT	275 €	5	1.375 €	5	1.375 €	3,7	1.008 €
	<i>Zwischensumme</i>			1.799 €		1.515 €		1.291 €
V + K dez.:	Motorabsperriklappe	209 €	2	418 €	2	418 €	1,3	279 €
	Dezentraler Regler mit V.-Mess	212 €	2	424 €	1	212 €	1,3	283 €
	Fehlströmungsdetektion	70 €	0	- €	1	70 €	0,0	- €
	Datenpunkte GLT	275 €	1	275 €	1	275 €	1	275 €
<i>Zwischensumme</i>			1.117 €		975 €		836 €	
V + K zen.:	Motorabsperriklappe	209 €	2	418 €	2	418 €	1,3	279 €
	Volumenstrommessung	212 €	2	424 €	0	- €	1,3	283 €
	Fehlströmungsdetektion	70 €	0	- €	2	140 €	0	- €
	Datenpunkte GLT	275 €	7	1.925 €	7	1.925 €	5,0	1.375 €
<i>Zwischensumme</i>			2.767 €		2.483 €		1.936 €	
Regelvariante Grundlüftung + Drehzahlregelung dezentral:				1.882 €		1.740 €		1.430 €
Regelvariante Grundlüftung + Drehzahlregelung zentral:				2.982 €		2.698 €		2.163 €
Regelvariante Vorspülung + Klappe dezentral:				2.300 €		2.158 €		1.709 €
Regelvariante Vorspülung + Klappe zentral:				3.950 €		3.666 €		2.809 €
VSR-System								
	Variabel-Volumenstromregler	349 €	2	698 €				
	CO2 Sensor	251 €	1	251 €				
	Rohrschalldämpfer	47 €	2	94 €				
	Datenpunkte GLT	275 €	3	825 €				
	<i>Summe</i>			1.868 €				

Abbildung 8.1: Mehrkosten gegenüber Konstant-Volumenstrom-Systemen bei 200 m³/h (ohne MwSt.)

Kosten je Raum für Volumenstrom-Raumregelsystem 500 m³/h (z.B. Besprechungszimmer)								
dVt-System	Komponente	Stückkosten	Systemvariante 1A		Systemvariante 1B		Systemvariante 1C	
			Anzahl	Kosten	Anzahl	Kosten	Anzahl	Kosten
Basis- kompo- nenten	Ventilator	324 €	2	648 €	2	648 €	1,3	432 €
	CO2 Sensoren	251 €	1	251 €	1	251 €	1	251 €
	Rohrschalldämpfer	75 €	2	150 €	2	150 €	1	100 €
	Kulissenschalldämpfer	107 €	2	214 €	2	214 €	1,3	143 €
	<i>Zwischensumme</i>			1.263 €		1.263 €		926 €
Regelzusatz:								
G + D dez.:	Dezentraler Regler mit V.-Mess	212 €	2	424 €	1	212 €	1,3	283 €
	Fehlströmungsdetektion	70 €	0	- €	1	70 €	0	- €
	Datenpunkte GLT	275 €	1	275 €	1	275 €	1	275 €
	<i>Zwischensumme</i>			699 €		557 €		558 €
G + D zen.:	Volumenstrommessung	212 €	2	424 €	0	- €	1,3	283 €
	Fehlströmungsdetektion	70 €	0	- €	2	140 €	0	- €
	Datenpunkte GLT	275 €	5	1.375 €	5	1.375 €	3,7	1.008 €
	<i>Zwischensumme</i>			1.799 €		1.515 €		1.291 €
V + K dez.:	Motorabsperriklappe	223 €	2	446 €	2	446 €	1,3	297 €
	Dezentraler Regler mit V.-Mess	212 €	2	424 €	1	212 €	1,3	283 €
	Fehlströmungsdetektion	70 €	0	- €	1	70 €	0,0	- €
	Datenpunkte GLT	275 €	1	275 €	1	275 €	1	275 €
<i>Zwischensumme</i>			1.145 €		1.003 €		855 €	
V + K zen.:	Motorabsperriklappe	223 €	2	446 €	2	446 €	1,3	297 €
	Volumenstrommessung	212 €	2	424 €	0	- €	1,3	283 €
	Fehlströmungsdetektion	70 €	0	- €	2	140 €	0	- €
	Datenpunkte GLT	275 €	7	1.925 €	7	1.925 €	5,0	1.375 €
<i>Zwischensumme</i>			2.795 €		2.511 €		1.955 €	
Regelvariante Grundlüftung + Drehzahlregelung dezentral:				1.962 €	1.820 €	1.483 €		
Regelvariante Grundlüftung + Drehzahlregelung zentral:				3.062 €	2.778 €	2.217 €		
Regelvariante Vorspülung + Klappe dezentral:				2.408 €	2.266 €	1.781 €		
Regelvariante Vorspülung + Klappe zentral:				4.058 €	3.774 €	2.881 €		
VSR-System								
		Stückkosten	Anzahl	Kosten				
	Variabel-Volumenstromregler	359 €	2	718 €				
	CO2 Sensor	251 €	1	251 €				
	Rohrschalldämpfer	75 €	2	150 €				
	Datenpunkte GLT	275 €	3	825 €				
	<i>Summe</i>			1.944 €				

Abbildung 8.2: Mehrkosten gegenüber Konstant-Volumenstrom-Systemen bei 500 m³/h (ohne MwSt.)

Kosten je Raum für Volumenstrom-Raumregelsystem 1000 m ³ /h (z.B. Klassenzimmer, Großraumbüro)								
dVt-System	Komponente	Stückkosten	Systemvariante 1A		Systemvariante 1B		Systemvariante 1C	
			Anzahl	Kosten	Anzahl	Kosten	Anzahl	Kosten
Basis- kompo- nenten	Ventilator	440 €	2	880 €	2	880 €	1,3	587 €
	CO2 Sensoren	251 €	1	251 €	1	251 €	1	251 €
	Rohrschalldämpfer	118 €	2	236 €	2	236 €	1	157 €
	Kulissenschalldämpfer	124 €	2	248 €	2	248 €	1,3	165 €
	<i>Zwischensumme</i>							
				<i>1.615 €</i>		<i>1.615 €</i>		<i>1.160 €</i>
Regelzusatz:								
G + D dez.:	Dezentraler Regler mit V.-Mess	212 €	2	424 €	1	212 €	1,3	283 €
	Fehlströmungsdetektion	70 €	0	- €	1	70 €	0	- €
	Datenpunkte GLT	275 €	1	275 €	1	275 €	1	275 €
	<i>Zwischensumme</i>			<i>699 €</i>		<i>557 €</i>		<i>558 €</i>
G + D zen.:	Volumenstrommessung	212 €	2	424 €	0	- €	1,3	283 €
	Fehlströmungsdetektion	70 €	0	- €	2	140 €	0	- €
	Datenpunkte GLT	275 €	5	1.375 €	5	1.375 €	3,7	1.008 €
	<i>Zwischensumme</i>			<i>1.799 €</i>		<i>1.515 €</i>		<i>1.291 €</i>
V + K dez.:	Motorabsperrklappe	237 €	2	474 €	2	474 €	1,3	316 €
	Dezentraler Regler mit V.-Mess	212 €	2	424 €	1	212 €	1,3	283 €
	Fehlströmungsdetektion	70 €	0	- €	1	70 €	0,0	- €
	Datenpunkte GLT	275 €	1	275 €	1	275 €	1	275 €
	<i>Zwischensumme</i>			<i>1.173 €</i>		<i>1.031 €</i>		<i>874 €</i>
V + K zen.:	Motorabsperrklappe	237 €	2	474 €	2	474 €	1,3	316 €
	Volumenstrommessung	212 €	2	424 €	0	- €	1,3	283 €
	Fehlströmungsdetektion	70 €	0	- €	2	140 €	0	- €
	Datenpunkte GLT	275 €	7	1.925 €	7	1.925 €	5,0	1.375 €
	<i>Zwischensumme</i>			<i>2.823 €</i>		<i>2.539 €</i>		<i>1.974 €</i>
Regelvariante Grundlüftung + Drehzahlregelung dezentral:				2.314 €	2.172 €	1.718 €		
Regelvariante Grundlüftung + Drehzahlregelung zentral:				3.414 €	3.130 €	2.451 €		
Regelvariante Vorspülung + Klappe dezentral:				2.788 €	2.646 €	2.034 €		
Regelvariante Vorspülung + Klappe zentral:				4.438 €	4.154 €	3.134 €		
VSR-System								
		Stückkosten	Anzahl	Kosten				
	Variabel-Volumenstromregler	385 €	2	770 €				
	CO2 Sensor	251 €	1	251 €				
	Rohrschalldämpfer	118 €	2	236 €				
	Datenpunkte GLT	275 €	3	825 €				
	<i>Summe</i>			<i>2.082 €</i>				

Abbildung 8.3: Mehrkosten gegenüber Konstant-Volumenstrom-Systemen bei 1000 m³/h (ohne MwSt.)

Kosten je Raum für Volumenstrom-Raumregelsystem bei 6000 m ³ /h (z.B. Hörsaal)								
dVt-System	Komponente	Stückkosten	Systemvariante 1A		Systemvariante 1B		Systemvariante 1C	
			Anzahl	Kosten	Anzahl	Kosten	Anzahl	Kosten
Basis- kompo- nenten	Ventilator	1.665 €	2	3.330 €	2	3.330 €	1,3	2.220 €
	CO2 Sensor	251 €	1	251 €	1	251 €	1	251 €
	Rohrschalldämpfer		0	- €	0	- €	0	- €
	Kulissenschalldämpfer	545 €	2	1.090 €	2	1.090 €	1,3	727 €
	<i>Zwischensumme</i>			4.671 €		4.671 €		3.198 €
Regelzusatz:								
G + D dez.	Dezentraler Regler mit V.-Mess	212 €	2	424 €	1	212 €	1,3	283 €
	Fehlströmungsdetektion	70 €	0	- €	1	70 €	0	- €
	Datenpunkte GLT	275 €	1	275 €	1	275 €	1	275 €
	<i>Zwischensumme</i>			699 €		557 €		558 €
G + D zen.	Volumenstrommessung	212 €	2	424 €	0	- €	1,3	283 €
	Fehlströmungsdetektion	70 €	0	- €	2	140 €	0	- €
	Datenpunkte GLT	275 €	5	1.375 €	5	1.375 €	3,7	1.008 €
	<i>Zwischensumme</i>			1.799 €		1.515 €		1.291 €
V + K dez.:	Motorabsperriklappe	455 €	2	910 €	2	910 €	1,3	607 €
	Dezentraler Regler mit V.-Mess	212 €	2	424 €	1	212 €	1,3	283 €
	Fehlströmungsdetektion	70 €	0	- €	1	70 €	0,0	- €
	Datenpunkte GLT	275 €	1	275 €	1	275 €	1	275 €
<i>Zwischensumme</i>			1.609 €		1.467 €		1.164 €	
V + K zen.:	Motorabsperriklappe	455 €	2	910 €	2	910 €	1,3	607 €
	Volumenstrommessung	212 €	2	424 €	0	- €	1,3	283 €
	Fehlströmungsdetektion	70 €	0	- €	2	140 €	0	- €
	Datenpunkte GLT	275 €	7	1.925 €	7	1.925 €	5,0	1.375 €
<i>Zwischensumme</i>			3.259 €		2.975 €		2.264 €	
Regelvariante Grundlüftung + Drehzahlregelung dezentral:				5.370 €		5.228 €		3.755 €
Regelvariante Grundlüftung + Drehzahlregelung zentral:				6.470 €		6.186 €		4.489 €
Regelvariante Vorspülung + Klappe dezentral:				6.280 €		6.138 €		4.362 €
Regelvariante Vorspülung + Klappe zentral:				7.930 €		7.646 €		5.462 €
VSR-System								
	Variabel-Volumenstromregler	492 €	2	984 €				
	CO2 Sensor	251 €	1	251 €				
	Rohrschalldämpfer	210 €	2	420 €				
	Datenpunkte GLT	275 €	3	825 €				
	<i>Summe</i>			2.480 €				

Abbildung 8.4: Mehrkosten gegenüber Konstant-Volumenstrom-Systemen bei 6000 m³/h (ohne MwSt.)

8.4 Parametervariationen zur Wirtschaftlichkeitsberechnung

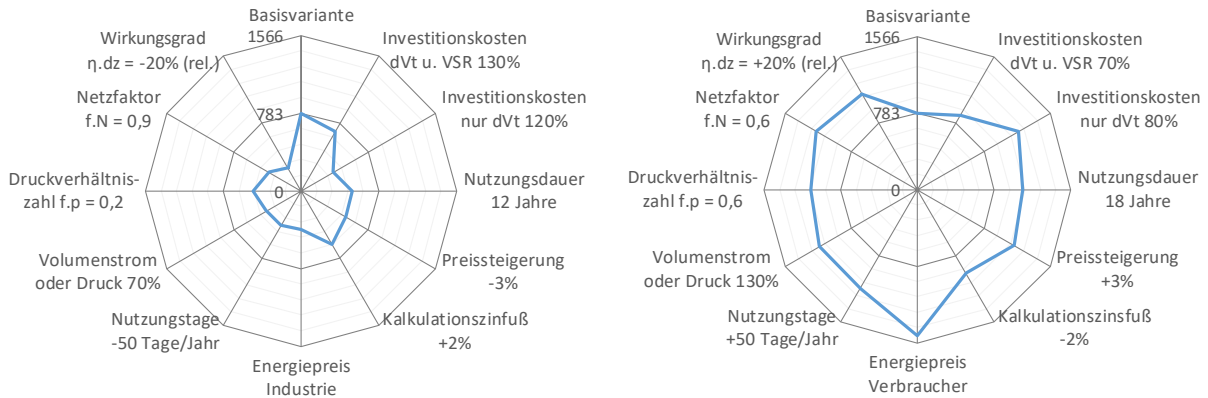


Abbildung 8.5: Großraumbüros – Parametervariation zur Berechnung des Kapitalwerts ggü. VSR-System

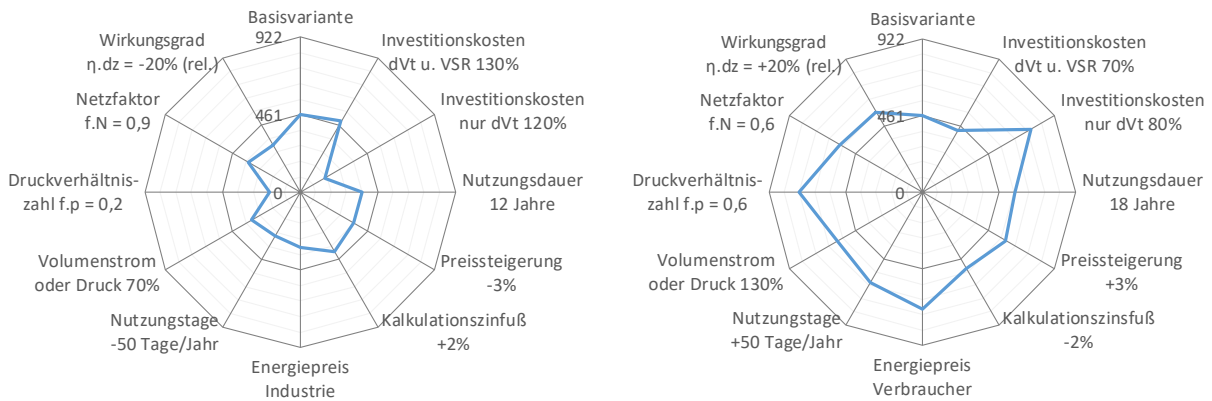


Abbildung 8.6: Besprechungs-/Sitzungszimmer/Seminarraum – Parametervariation zur Berechnung des Kapitalwerts ggü. VSR-System

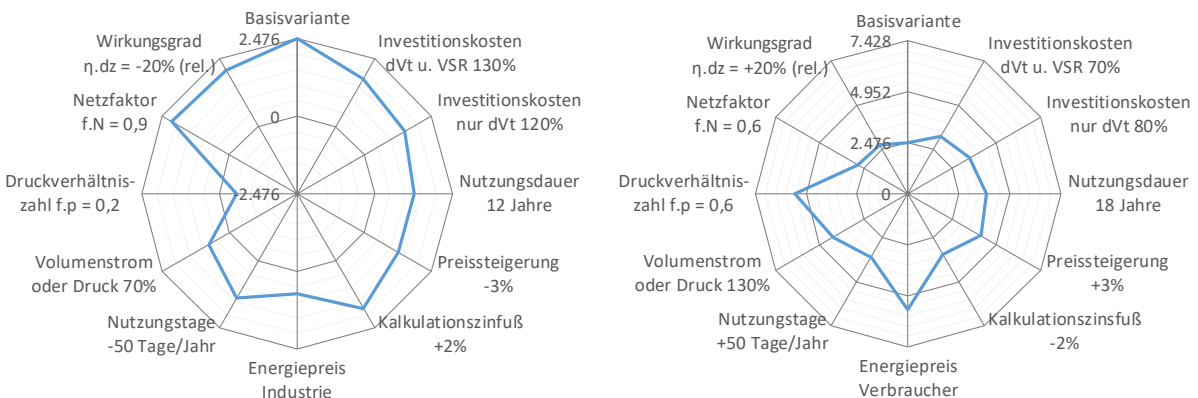


Abbildung 8.7: Restaurant – Parametervariation zur Berechnung des Kapitalwerts ggü. VSR-System

8.5 Strangchemata der exemplarischen Büro- und Verwaltungsgebäude

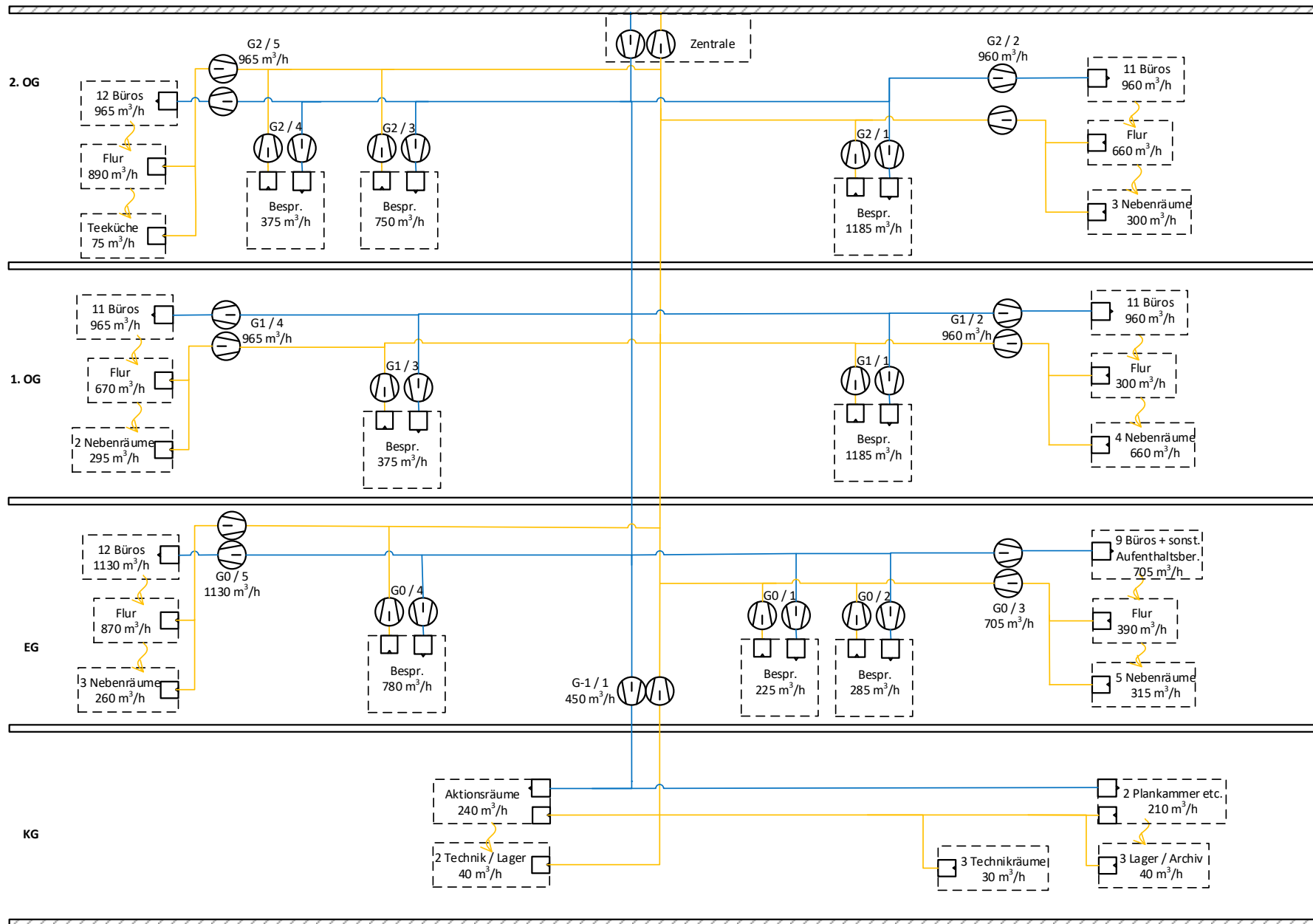


Abbildung 8.8: Strangenschema Verwaltungsgebäude 1966

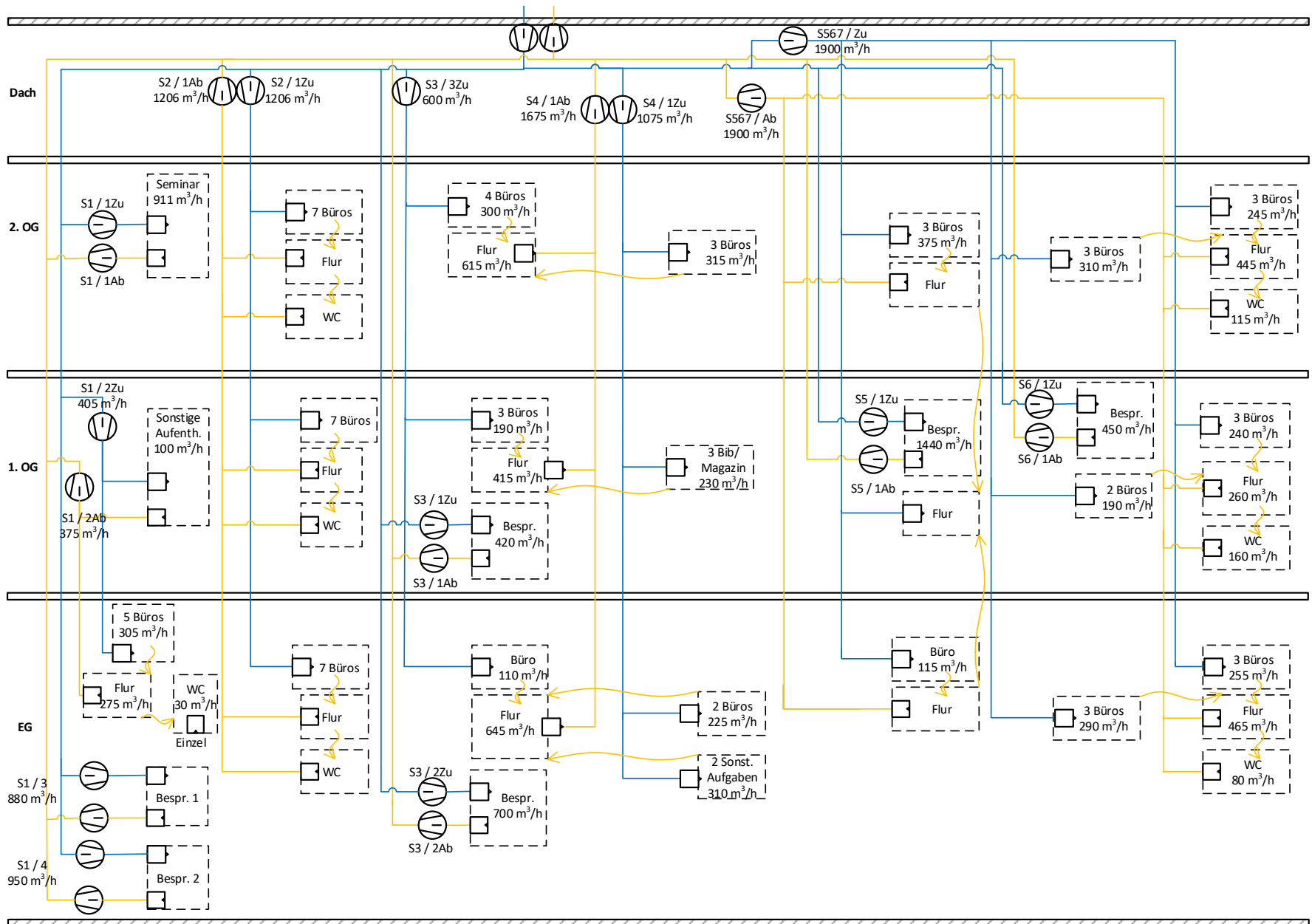


Abbildung 8.9: Strangenschema Landgericht 1988

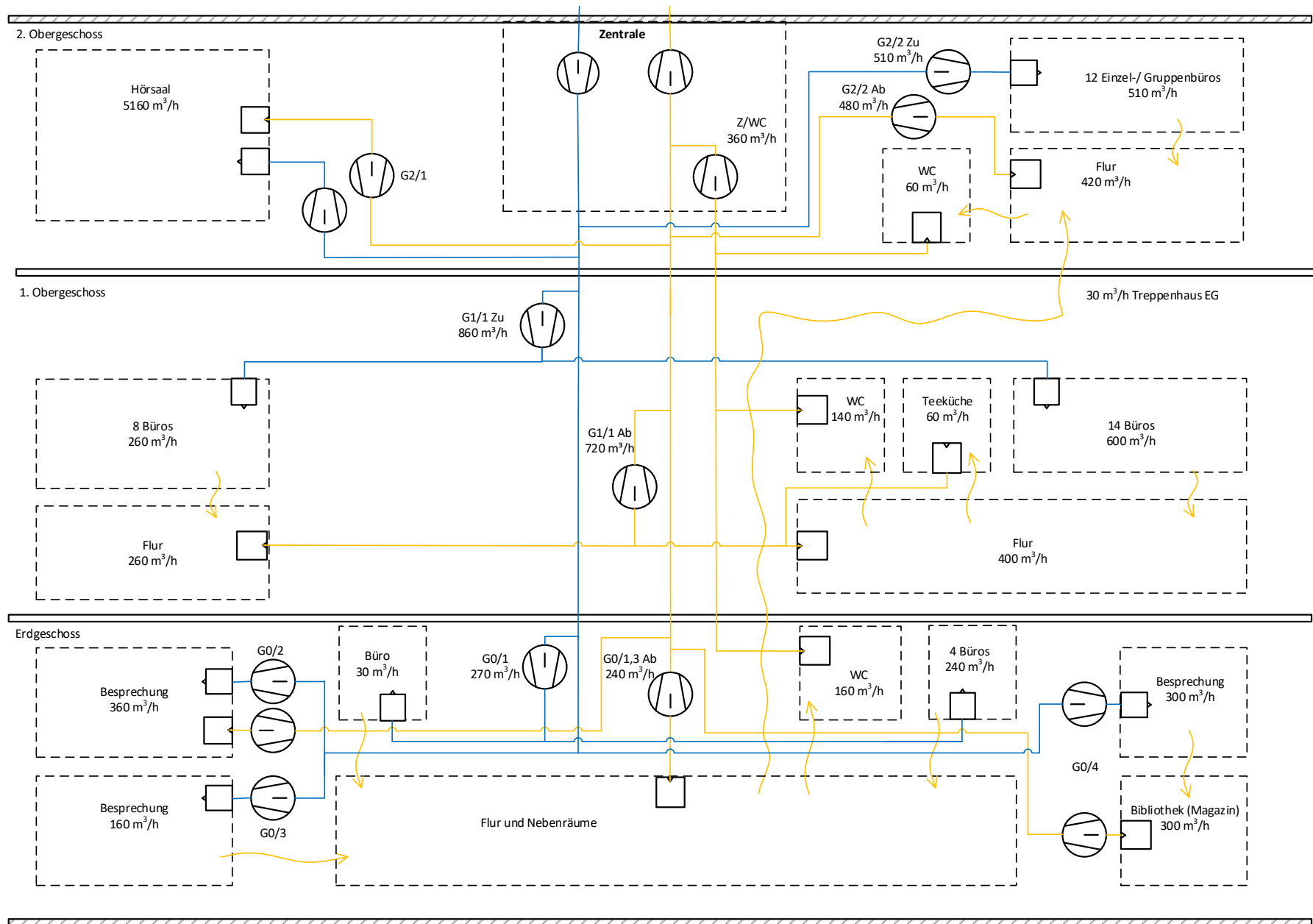


Abbildung 8.10: Amtsgebäude 1962

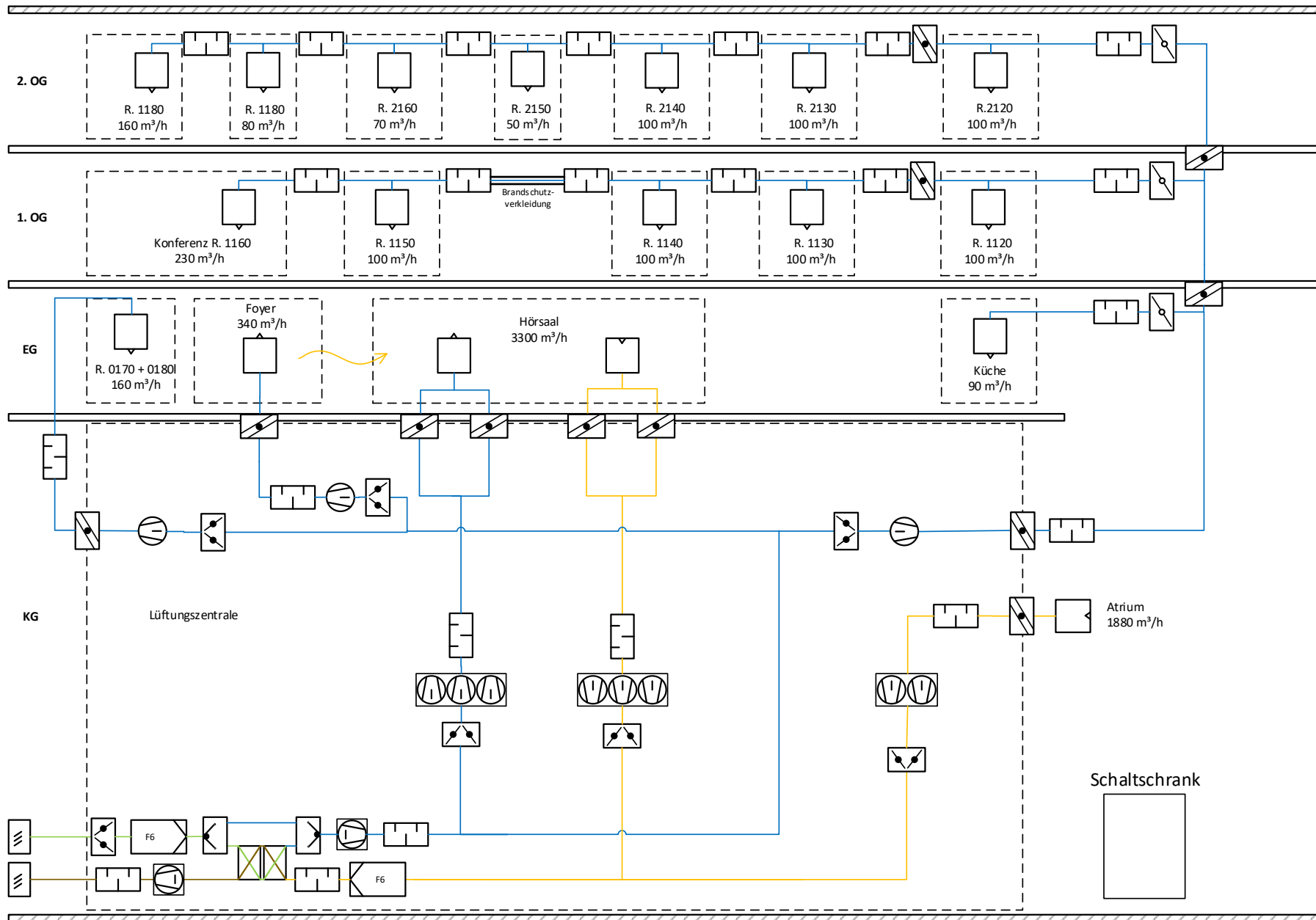


Abbildung 8.11: ZUB 2001

9 Literaturverzeichnis

Alsen, Klimmt, Knissel 2015

ALSEN, Niklas ; KLIMMT, Tobias ; KNISSEL, Jens: *Dezentrale Ventilatoren in zentralen raumlufttechnischen Anlagen - Berechnungen zur energetischen Vorteilhaftigkeit*. In: *Gebäudetechnik, Innenraumklima: GI* (2015) Nr. 1, S. 14–20

Alsen, Klimmt, Knissel 2016

ALSEN, Niklas ; KLIMMT, Tobias ; KNISSEL, Jens: *Dezentrale Ventilatoren in zentralen raumlufttechnischen Anlagen - Messtechnische Validierung berechneter Ventilatorleistung*: UNIVERSITÄT KASSEL, FACHGEBIET TECHNISCHE GEBÄUDEAUSRÜSTUNG: cci Dialog, 2016. URL https://cci-dialog.de/wissensportal/technikwissen/raumlufttechnik/ventilatoren/forschung_dezentrale_ventilatoren_in_zentralen_rlt-anlagen.html – Überprüfungsdatum 2016-02-18

Alsen, Knissel 2013

ALSEN, Niklas ; KNISSEL, Jens: *Einsatz von dezentralen Ventilatoren zur Luftförderung in zentralen RLT-Anlagen*. In: *HLH* (2013) Bd. 64, Nr. 4, S. 35–38

AMEV 2005

AMEV: *Hinweise für Planung, Ausführung und Betrieb der Gebäudeautomation in öffentlichen Gebäuden (Gebäudeautomation 2005)*. Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen, Berlin: 2005 (Ifd. Nr. 87)

Beck 2000

BECK, Edgar: *Energieverbrauch, -einsparpotential und -grenzwerte von Lüftungsarbeiten*. Dissertation an der Universität Kassel, Fachbereich Architektur. Bietigheim-Bissingen: FIA Forschungs-Informations-Austausch im Fachverband Gebäude-Klima e.V., 2000 (Nr. 86 11/03)

destatis 2016

destatis: *Daten zur Energiepreisentwicklung - Lange Reihen von Januar 2000 bis April 2016*. Wiesbaden, 2016. URL https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Preise/Energiepreise/EnergiepreisentwicklungPDF_5619001.pdf?__blob=publicationFile destatis 2016 – Überprüfungsdatum 2016-06-07

destatis 2016

destatis: *Verdienste und Arbeitskosten - Reallohnindex und Nominallohnindex*. Wiesbaden, 2016. URL https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/VerdiensteArbeitskosten/ReallohnNetto/ReallohnindexPDF_5623209.pdf?__blob=publicationFile destatis 2016 – Überprüfungsdatum 2016-06-07

drexel und weiss energieeffiziente haustechniksysteme gmbh 2011

drexel und weiss energieeffiziente haustechniksysteme gmbh: *v-box: Ergänzung zu den semi-zentralen Systemen von drexel und weiss*, 2011. URL http://www.drexel-weiss.de/HP/Upload/Dateien/Flyer_vbox_web.pdf. – Aktualisierungsdatum: 2011-07-

1 | Idrexel und weiss energieeffiziente haustechniksysteme gmbh 2011 – Überprüfungsdatum 2013-09-30

drexel und weiss energieeffiziente haustechniksysteme gmbh 2013

drexel und weiss energieeffiziente haustechniksysteme gmbh: *Technischer Katalog 2013/2014: Dokumentnummer 900.8000_03*. Wolfurt, Österreich, 2013. URL http://www.drexel-weiss.at/HP/Upload/Dateien/900.8000_03_KA_gesamt_DE2.pdf. – Aktualisierungsdatum: 2013-03-14
drexel und weiss energieeffiziente haustechniksysteme gmbh 2013 – Überprüfungsdatum 2013-09-23

Eck 2003

ECK, Bruno: *Ventilatoren: Entwurf und Betrieb der Radial-, Axial- und Querstromventilatoren*. 6. Aufl. Berlin, New York: Springer, 2003 (Klassiker der Technik (Springer-Verlag)). – ISBN 3540440585

DIN EN 15251

NORM, DIN EN 15251: *Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik*. Berlin: Beuth Verlag, August 2007

DIN V 18599-1 Berichtigung 1

VORNORM, DIN V 18599-1 Berichtigung 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 - Berichtigung zu DIN V 18599-1:2011-12*. Berlin: Beuth, Mai 2013

DIN V 18599-10

VORNORM, DIN V 18599-10: *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten*. Berlin: Beuth Verlag, Dezember 2011

DIN V 18599-3

VORNORM, 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*. Berlin: Beuth Verlag, Dezember 2011

DIN V 18599-7

VORNORM, DIN V 18599-7: *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 7: Endenergiebedarf von Raumlufttechnik- und Klimakältesystemen für den Nichtwohnungsbau*. Berlin: Beuth Verlag, Dezember 2011

Esdorn, Rietschel 1994

ESDORN, Horst (Hrsg.); RIETSCHEL, Hermann (Hrsg.): *Raumklimatechnik Band 1: Grundlagen*. 16. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer, 1994. – ISBN 3540544666

Feist 2000

FEIST, Wolfgang (Hrsg.): *4. Passivhaus-Tagung: [mit Fachausstellung Kassel, 10./11. März 2000]*. 1. Aufl.: [s.n.], 2000

Feist 2007a

FEIST, Wolfgang (Hrsg.): *11th international conference on passive houses 2007: 13-14 April 2007 Bregenz on Lake of Constance (Austria)*. Darmstadt: Passive House Institute, 2007

Feist 2007b

FEIST, Wolfgang (Hrsg.): *Protokollband Nr. 17: Dimensionierung von Lüftungsanlagen in Passivhäusern*. Arbeitskreis Kostengünstige Passivhäuser - Phase II. 6. Auflage. Darmstadt, 2007

Greml, Kapferer, Leitzinger 2011

GREML, Matthias ; KAPFERER, Roland ; LEITZINGER, Wolfgang: *60 Qualitätskriterien für Komfortlüftungen – Mehrfamilienhaus (MFH)*. Kufstein, Österreich: Verein komfortlüftung.at, 2011. URL

http://www.komfortlüftung.at/fileadmin/komfortlueftung/MFH/60_QK_Komfortlueftung_MFH_V_1.4_Februar_2011_mit_Erlaeuterungen.pdf. – Aktualisierungsdatum: 2011-02-25 – Überprüfungsdatum 2013-09-23

Hellwig, Hackl, Nocke 2015

HELLWIG, Runa T. ; HACKL, Martina ; NOCKE, Christian: *Lüftung in Schulen - Bessere Lernbedingungen für junge Menschen*. Bonn: BINE Informationsdienst, 2015

Hirn 2009

HIRN, Gerhard: *Bürogebäude dezentral lüften und klimatisieren*. Bonn: BINE Informationsdienst, 2009

Hörner, Bagherian, Jedek 2014

HÖRNER, Michael ; BAGHERIAN, Behrooz ; JEDEK, Christoph: *Projekt: Teilenergiekennwerte von Nicht-Wohngebäuden. Bericht: Querschnittsanalyse der Ergebnisse der Feldphase*. Darmstadt, 2014

Hörner, Schmidt 2011

HÖRNER, Berndt (Hrsg.); SCHMIDT, Manfred (Hrsg.): *Handbuch der Klimatechnik: Band 2: Anwendungen*. 5. Aufl. Berlin: VDE Verlag GmbH, 2011. – ISBN 9783800732418

Kailing 2013

KAILING, Matthias: *Energetische Schwachstellenanalyse eines komplexen Hochschulgebäudes mit vertiefter Analyse einer Einkanal-Hochdruckanlage*. Kassel: Masterarbeit an der Universität Kassel (nicht veröffentlicht), 2013

Kapferer u. a. 25.02.2011

KAPFERER, Roland ; GREML, Andreas ; HÖFLER, Karl ; LEITZINGER, Wolfgang ; SUSCHEK-BERGER, Jürgen: *Evaluierung von zentralen bzw. semizentralen Wohnraumlüftungen im Mehrfamilienhausbereich und Erstellung von Qualitätskriterien bzw. eines Planungsleitfadens*. 25.02.2011

Klimmt o. J.

KLIMMT, Tobias: *Entwicklung von Anlagenkonzepten zur Volumenstromregelung mittels dezentralen Ventilatoren in zentralen Lüftungsanlagen: Laufende Dissertationsarbeit*: Universität Kassel, Fachgebiet Technische Gebäudeausrüstung, o. J. (ohne Jahr)

Kober, Müller 2013

KOBER, Raymond (Hrsg.); MÜLLER, Harald (Hrsg.): *Luft- und Raumklimatechnik ganzheitlich*

geplant: Behaglichkeit und höchste Energieeffizienz. 1. Aufl. Karlsruhe: cci Dialog, 2013 (CCI-Buch). – ISBN 9783922420293

Leitzinger 2011

LEITZINGER, Wolfgang: *Planungsleitfaden für Wohnungslüftungen im Mehrfamilienhaus (MFH)*: Verein komfortlüftung.at, 2011. URL http://www.komfortlüftung.at/fileadmin/komfortlueftung/MFH/Planungsleitfaden_Komfortlueftung_im_MFH_V_1.0.pdf. – Aktualisierungsdatum: 2011-02-25 – Überprüfungsdatum 2013-09-17

Lichtmeß 2010

LICHTMEß, Markus: *Vereinfachungen für die energetische Bewertung von Gebäuden*. Wuppertal: PROMOTION AN DER BERGISCHEN UNIVERSITÄT WUPPERTAL, 2010. URL <http://elpub.bib.uni-wuppertal.de/edocs/dokumente/fbd/architektur/diss2010/lichtmess>

VDI 2078

RICHTLINIE, VDI 2078: *Luftleitungssysteme Bemessungsgrundlagen*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 10-2006

DIN EN 16211

NORM, DIN EN 16211: *Lüftung von Gebäuden - Luftvolumenstrommessung in Lüftungssystemen - Verfahren*. Berlin: Beuth Verlag, September 2015

DIN EN 1886

NORM, DIN EN 1886: *Lüftung von Gebäuden - Zentrale raumlufttechnische Geräte - Mechanische Eigenschaften und Messverfahren*. Berlin: Beuth Verlag, Juli 2009

DIN EN 13779

NORM, DIN EN 13779: *Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlsysteme*. Berlin: Beuth Verlag, September 2007

Mahler u. a. 2008

MAHLER, B. ; HIMMLER, R. ; SILBERBERGER, C. ; MATT, C.: *DeAL - Evaluierung dezentraler außenwandintegrierter Lüftungssysteme: Förderkennzeichen 0327386B*. Stuttgart: Steinbeis-Transferzentrum und Steinbeis Forschungszentrum Energie-, Gebäude- und Solartechnik, 2008

Müller o. J.

MÜLLER, W.: *Kurvenanpassung in EXCEL*: CARL-ENGLER-SCHULE KARLSRUHE, o. J. URL http://www.ces.karlsruhe.de/culm/culm/culm2/th_themen/C02-kurvenanpassung/kurvenanpassung.pdf – Überprüfungsdatum 2015-03-25

Pfluger, Feist 2001

PFLUGER, Rainer ; FEIST, Wolfgang: *Kostengünstiger Passivhaus-Geschoßwohnungsbau in Kassel Marbachshöhe: meßtechnische Untersuchung und Auswertung*. Darmstadt: Passivhaus-Institut, 2001

Pistohl 2009

PISTOHL, Wolfram: *Heizung, Lüftung, Beleuchtung, Energiesparen*. 7. Aufl. Düsseldorf: Werner, 2009. – ISBN 978-3-8041-4685-3

DIN 1946-4

NORM, DIN 1946-4: *Raumluftechnik - Teil 4: Raumluftechnische Anlagen in Gebäuden und Räumen des Gesundheitswesens*. Berlin: Beuth Verlag, Dezember 2008

Recknagel, Sprenger 2011

RECKNAGEL, Hermann ; SPRENGER, Eberhard: *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik: Einschließlich Warmwasser- und Kältetechnik ; mit 4 Einschlagtafeln*. 75. Aufl. München: Oldenburg Industrieverl., 2011. – ISBN 978-3-8356-3200-4

Rietschel, Fitzner 2008

RIETSCHEL, Hermann ; FITZNER, Klaus: *Raumklimatechnik Band 2: Raumluft- und Raumkühltechnik*. 16. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008 (VDI-Buch). – ISBN 9783540570110

Shahbandeh 2014

SHAHBANDEH, Mehrdad: *Fallstudie zur energetischen Analyse von dezentralen Ventilatoren in zentralen raumluftechnischen Anlagen*. Kassel: Masterarbeit an der Universität Kassel (nicht veröffentlicht), 2014

SIA 2024

MERKBLATT, SIA 2024: *Standard-Nutzungsbedingungen für die Energie- und Gebäudetechnik*. Zürich: SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Aug. 2006, 1. Aufl

Stein, Hörner 2015

STEIN, Britta ; HÖRNER, Michael: *Typologiegestützte Kennwerte für die energetische Bewertung bestehender Nichtwohngebäude*. Darmstadt: INSTITUT WOHNEN UND UMWELT, 2015.
URL <http://www.iwu.de/forschung/energie/laufend/nichtwohngebäudeanalyse/> – Überprüfungsdatum 2016-06-21

Verband deutscher Pfandbriefbanken 2016

Verband deutscher Pfandbriefbanken: *Effektivzins für Hypothekendarlehen in Deutschland in den Jahren 1994 bis 2015*, 2016. URL
<http://de.statista.com/statistik/daten/studie/155740/umfrage/entwicklung-der-hypothekenzinsen-seit-1996/> Verband deutscher Pfandbriefbanken 2016 – Überprüfungsdatum 2016-06-07

Verein komfortlüftung.at 2011

Verein komfortlüftung.at: *Erfahrungen, Fehler, Trends aus der Evaluierung Komfortlüftungen – Mehrfamilienhaus 2011*, 2011. URL
http://www.komfortlüftung.at/fileadmin/komfortlueftung/MFH/Erfahrungen_Komfortlueftung_MFH_V_1.0_Februar_2011.pdf. Verein komfortlüftung.at 2011 – Überprüfungsdatum 2013-09-26

Waldmann 2015

WALDMANN, Eva: *Energetische Bewertung unterschiedlicher Lüftungssysteme in Nichtwohngebäuden am Beispiel des „ZUB“*. Kassel: Masterarbeit an der Universität Kassel (nicht veröffentlicht), 2015

VDE 0418-3-11

NORM, VDE 0418-3-11: *Wechselstrom-Elektrizitätszähler - Besondere Anforderungen - Teil 11: Elektromechanische Wirkverbrauchsähler der Genauigkeitsklassen 0,5, 1 und 2*. Berlin: Beuth Verlag, November 2003

VDE 0418-3-22

NORM, VDE 0418-3-22: *Wechselstrom-Elektrizitätszähler - Besondere Anforderungen - Teil 22: Elektronische Wirkverbrauchszähler der Genauigkeitsklassen 0,2 S und 0,5 S*. Berlin: Beuth Verlag, November 2003

VDI 2067-1

VDI-RICHTLINIE, VDI 2067-1: *Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung*. Düsseldorf: VDI-Verlag, September 2012