

Universität Kassel
Fachbereich Architektur, Stadtplanung und Landschaftsplanung
Fachgebiet Technische Gebäudeausrüstung

Entwicklung von Anlagenkonzepten zur Volumenstromregelung mit dezentralen Ventilatoren in zentralen Lüftungsanlagen

Tobias Klimmt

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

Kassel, Februar 2018

Tag der mündlichen Prüfung: 12.07.2018

Danksagung

Zu Beginn möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, insbesondere bei meiner Mutter. Du hast mich immer begleitet und in allen Belangen des Lebens unterstützt. Dankeschön!

Der nächste Dank gilt meiner Freundin, welche jede Phase dieser Arbeit mit mir durchlebt hat. Du hast mich immer wieder aufgerichtet, wenn ich den Kopf in den Sand stecken wollte. Danke Marlene, ich freue mich auf unsere Zukunft. Du weißt was du bist für mich.

Ein großer Dank gebührt meinen Doktorvater, Jens Knissel, welcher immer bereit war mich durch kompetente Ideen und Kritik zu unterstützen und den letzten Tropfen Wissenschaft aus mir herausgeholt hat. Ohne deine Beteiligung würde diese Arbeit in dieser Form nicht existieren.

Auch allen anderen Mitarbeitern des Fachgebietes Technische Gebäudeausrüstung der Universität Kassel, welche mich über meine Zeit am Institut begleitet haben, möchte ich für den gelungenen Ideenaustausch und das angenehme Arbeitsklima danken. Danke Daniel, Marius, Max D., Max G., Niklas, Normen, Rainer und Steffi.

Zu guter Letzt will ich allen meinen Freunden danken, insbesondere Alex Ko., Alex W., Andreas, Anni G., Anni Z., Christian, Corinna, Daniel, David, Eckart, Franzi, Laura, Marcel, Martin, Max, Nick, Nicole, Nina, Paul, Richard, Simon, Till, Valentin, Vicky M., Vicky R. und allen anderen, welche ich aus Platzgründen nicht aufzählen kann. Danke für die schöne Zeit und die benötigte Ablenkung.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Stand des Wissens	2
1.2	Forschungsfragen der Arbeit	5
1.3	Aufbau der Arbeit	6
2	Anlagentechnische Umsetzung des dVt-Systems	8
2.1	Basisvariante vollständige Einzelraumregelung (Regelung 1a)	8
2.2	Komponentenreduzierung	9
2.3	Einzelraumversorgungen	12
2.3.1	Einzelraumregelung ohne Volumenstrommessung (Regelung 1b)	13
2.3.2	Einzelraumregelung mit strangweisem Abluftventilator (Regelung 1c)	14
2.3.3	Einzelraumregelung mit Überströmung (Regelung 1d)	15
2.4	Raumgruppenversorgungen	15
2.4.1	Schlechtraumregelung (Regelung 2a)	16
2.4.2	Mischkonzentrationsregelung (Regelung 2b)	17
3	Werkzeuge zur Untersuchung des dVt-Systems	19
3.1	Simulationsrechnungen	19
3.1.1	Definition der Raumgruppe	19
3.1.2	Definition von Kanalnetz und Undichtigkeiten der Gebäudehülle	22
3.1.3	Bewertung der Simulationsergebnisse	24
3.1.4	Simulationsmodelle	27
3.1.5	Validierung der Simulationsmodelle	41
3.2	RLT-Versuchsstand	43
3.2.1	Beschreibung des RLT-Versuchsstandes	43
3.2.2	Messtechnik und Messunsicherheit am RLT-Versuchsstand	45
3.3	Anwendungstest	49
3.3.1	Beschreibung der Lüftungsanlage	49
3.3.2	Messtechnik und Messunsicherheit am Anwendungstest	52
4	Vergleich dVt-System und VSR-System	57
4.1	Zentralgerät und Zentralventilator	57
4.2	Kanalnetz	57
4.2.1	Leckagevolumenstrom Saugseite Zuluft	59
4.2.2	Leckagevolumenstrom Druckseite Zuluft	62
4.2.3	Leckagevolumenstrom Saugseite Abluft	62
4.2.4	Leckagevolumenstrom Druckseite Abluft	63
4.3	Dezentrale Stellglieder	64
4.3.1	Regelbereich	64
4.3.2	Inbetriebnahme und Übergabe	65
4.3.3	Reaktion auf einen Sollwertsprung	66
4.3.4	Anfahrverhalten	67
4.3.5	Schall	68
4.3.6	Umnutzung des Raumes	69
5	Untersuchung der anlagentechnischen Umsetzungen des dVt-Systems	71
5.1	Untersuchungen der Einzelraumversorgungen	71
5.1.1	Vollständige Einzelraumregelung (Regelung 1a)	71
5.1.2	Einzelraumregelung ohne Volumenstrommessung (Regelung 1b)	77
5.1.3	Einzelraumregelung mit strangweisem Abluftventilator (Regelung 1c)	89

5.1.4 Einzelraumregelung mit Überströmung (Regelung 1d)	92
5.2 Untersuchungen der Raumgruppenversorgungen.....	94
5.2.1 Schlechtraumregelung (Regelung 2a)	94
5.2.2 Mischkonzentrationsregelung (Regelung 2b)	104
6 Strömungstechnische Besonderheiten	112
6.1 Betriebspunkte	116
6.2 Fehlströmung.....	120
6.2.1 Entstehung	120
6.2.2 Detektion und Vermeidung.....	121
7 Zusammenfassung, Fazit und Ausblick.....	126
8 Literaturverzeichnis.....	129
9 Anhang.....	134
9.1 Ergebnisse der Validierung des Druckverlustmodells	134
9.2 Standardmessunsicherheit Volumenstrommessung des Anwendungstestes	135
9.3 Volumenstromdifferenzen der Raumgruppen	136

Verzeichnis der Formelzeichen

Lateinische Buchstaben

Zeichen	Bedeutung	Einheit SI
<i>A</i>	Fläche	m^2
<i>C</i>	Winddruckbeiwert	-
<i>d</i>	Durchmesser	m
<i>E</i>	Energie	Ws
<i>f</i>	Faktor	%
<i>h</i>	Höhe	m
<i>k</i>	Durchflusskoeffizient	$m^3/(s Pa)$
<i>l</i>	Länge	m
<i>m</i>	Masse	kg
\dot{m}	Massestrom	kg/s
<i>n</i>	Drehzahl	s^{-1}
<i>N</i>	Anzahl	-
<i>p</i>	Druck	Pa
<i>P</i>	Leistung	W
<i>t</i>	Zeit	s
<i>T</i>	Temperatur	K
<i>u</i>	Standardunsicherheit	-
<i>U</i>	erweiterte Standardunsicherheit	-
<i>v</i>	Geschwindigkeit	m/s
<i>V</i>	Volumen	m^3
\dot{V}	Volumenstrom	m^3/s

Griechische Buchstaben

Zeichen	Bedeutung	Einheit SI
Δ	Differenz	-
ζ	Widerstandsbeiwert Einbauten	-
η	Wirkungsgrad	-
λ	Rohrreibungsbeiwert	-
ρ	Dichte	kg/m^3
φ	Lieferzahl des Ventilators	-
σ	Volumenkonzentration	ppm
ψ	Druckzahl des Ventilators	-

Indizes

Zeichen	Bedeutung
*	Auslegungszustand
<i>a</i>	Jahr
<i>A/p</i>	Personenbelegungsdichte
<i>Ab</i>	Abluft
<i>atm</i>	atmosphärisch
<i>Au</i>	Außenluft
<i>CO₂</i>	Kohlenstoffdioxid
<i>dc</i>	gemittelter und bedarfsabhängiger Volumenstrom

<i>Ein</i>	Einbauten
<i>Einzel</i>	von einzelner Ventilator durchströmter Kanal
<i>Fassade</i>	Fassade eines Gebäudes
<i>gem</i>	gemeinsam durchströmter Kanal
<i>Ges</i>	Gesamt
<i>Geschlossen</i>	Geschlossenes Fenster
<i>Grenz</i>	Grenzwert bzw. Grenzkennlinie
<i>groß</i>	großer Raum
<i>Grund</i>	Grundlüftung
<i>I</i>	Innen
<i>Ist</i>	Ist-Zustand
<i>Kanal</i>	Lüftungskanal
<i>klein</i>	kleiner Raum bzw. kleinster Raum
<i>Leck</i>	Leckage
<i>m</i>	Mittelwert
<i>max</i>	Maximalwert
<i>Mes</i>	Messung
<i>min</i>	Minimalwert
<i>Misch</i>	Mischkonzentration
<i>mittel</i>	mittlerer Raum
<i>N</i>	Normbedingungen
<i>O</i>	obere Öffnung der Hüllfläche
<i>Offen</i>	offenes Fenster
<i>Pers</i>	Personenbezogen
<i>Q</i>	Quellen im Raum
<i>R</i>	Raum
<i>Rohr</i>	Rohrreibung
<i>ref</i>	Referenz
<i>rel</i>	relativ, bezogen auf das Maximum
<i>Rest</i>	restliche Räume der Raumgruppe
<i>S</i>	Symmetrie
<i>Skal</i>	Skalierung
<i>st</i>	statisch
<i>T</i>	Thermik
<i>teil</i>	Teillast
<i>Ueber</i>	Überstromelement
<i>Und</i>	Undichtigkeiten
<i>U</i>	untere Öffnung der Hüllfläche
<i>Vent</i>	Ventilator
<i>W</i>	Wind
<i>Z</i>	Zentrale
<i>Zu</i>	Zuluft

Abkürzungsverzeichnis

Zeichen	Bedeutung
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DASSL	Differential-Algebraic System Solver
dVt	dezentraler Ventilator
dVt-System	Lüftungssystem mit dezentralen Ventilatoren
EG	Erdgeschoss

ETA	extract air/ Abluft
GI	Gleichung
KG	Kellergeschoss
KVR	Konstant-Volumenstromregelung
OG	Obergeschosse
ppm	parts per million
RLT	Raumluftechnik
R	Regler
SRR	Schlechtraumregelung
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
VSR	Volumenstromregler
VSR-System	Lüftungssystem mit Volumenstromreglern und konstantem Vordruck
WRG	Wärmerückgewinnung
ZUB	Zentrum für Umweltbewusstes Bauen

1 Einleitung

Zum Ziel des Klimaschutzes soll laut Bundesregierung der Energieverbrauch in Deutschland reduziert werden. Dabei sollen der Primärenergiebedarf um 80 % und der Bruttostromverbrauch um 25 % im Vergleich zum Jahr 2008 gesenkt werden ([BMUB 2015]). Diese Ziele sollen bis zum Jahr 2050 umgesetzt werden. Der Gebäudesektor macht in Deutschland 40 % des Endenergieverbrauches aus ([BMWi 2014]). Ein nicht unerheblicher Teil des Strombedarfes von Gebäuden entsteht durch mechanische Lüftungsanlagen. Dabei wird die Energie hauptsächlich zur Beförderung von Luft genutzt. Die [Europäische Union 2011] schätzt den Stromverbrauch von Ventilatoren (125 W bis 500 kW) in mechanischen Lüftungsanlagen auf 344 TWh/a (Jahr 2011) und erwartet Steigerungen in der Zukunft. Eine Reduzierung der Förderenergie von mechanischen Lüftungsanlagen trägt damit zur Umsetzung der Ziele der Bundesregierung bei. Erste Vorgaben sind bereits vorhanden, so müssen laut [Bundesgesetzblatt 2007] Ventilatoren mit einem Volumenstrom $\geq 4000 \text{ m}^3/\text{h}$ den Grenzwert der spezifischen Ventilatorleistung SFP 4 nach [DIN EN 13779] einhalten. Des Weiteren wird bei Versorgungsbereichen mit einem Zuluftvolumenstrom von $\geq 9 \text{ m}^3/\text{h}$ je m^2_{NGF} eine Regelung des Volumenstromes je nach Situation im Raum gefordert. Dies wird im Folgenden als bedarfsgerechte Lüftung bezeichnet.

Eine mechanische Lüftungsanlage zur bedarfsgerechten Lüftung wird in der gängigen Literatur [Recknagel, Sprenger 2011], [Pistohl 2009] und [Krimmling 2014] wie folgt beschrieben. Sie besteht in der Regel aus einem Zentralgerät und einem Kanalnetz. Im Zentralgerät wird die Luft aufbereitet und die Druckdifferenz für die Luftförderung mittels Zentralventilatoren erzeugt. Die erforderliche Druckdifferenz entspricht dem größten Druckverlust eines Stranges im Kanalnetz. Für die bedarfsgerechte Verteilung der Luft sind im Kanalnetz Volumenstromregler angeordnet, welche über eine Regelung bedient werden (Abbildung 1.1 links). Dieses System wird im Folgenden als VSR-System bezeichnet. Volumenstromregler sind Einbauten, welche den freigegebenen Kanalquerschnitt verändern. Somit drosseln sie einzelne Stränge gezielt ab, um den Luftvolumenstrom anzupassen. Laut [Alsen, Knissel 2013] sind prinzipiell zwei Drosselvorgänge vorhanden:

- Drosselung zur Luftmengenverteilung (entspricht hydraulischem Abgleich bei Heizungssystemen) und
- Drosselung zur Luftmengenreduzierung (stellt die Luftmenge bei Bedarfsreduzierung ein).

Diese Drosselungen sind energetisch ungünstig und können vermieden werden.

Am Fachgebiet Technische Gebäudeausrüstung der Universität Kassel wird im Forschungsprojekt „Dezentrale Ventilatoren in zentralen raumluftechnischen Anlagen“ ein Lüftungssystem untersucht, welches diese Drosselungen vermeidet. Dieses System wird im Folgenden als dVt-System (Abbildung 1.1 rechts) bezeichnet. Im Rahmen des Forschungsprojektes werden zwei Dissertationen erstellt. Die Arbeit von [Alsen 2017] ist bereits veröffentlicht und beschäftigt sich mit der energetischen und wirtschaftlichen Betrachtung des dVt-Systems. Die zweite Dissertation ist die vorliegende und untersucht die nächste Konkretisierungsstufe des dVt-Systems. Dabei wird die anlagentechnische Umsetzung des dVt-Systems behandelt.

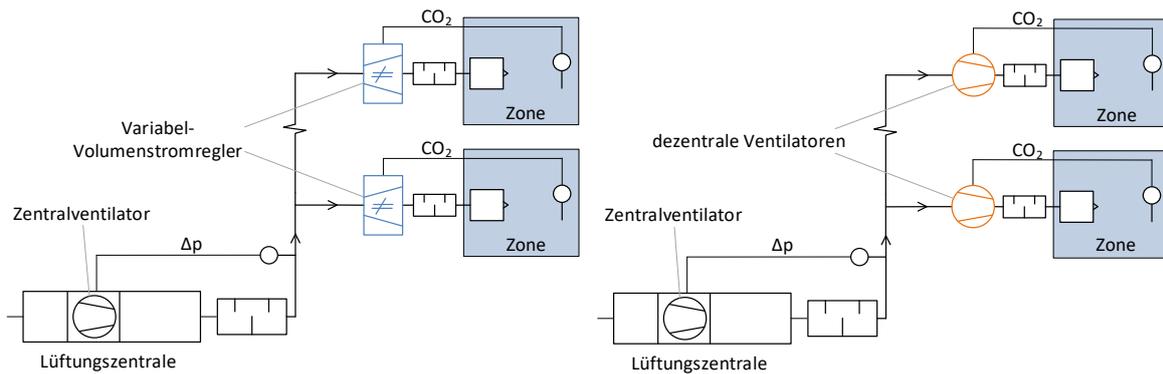


Abbildung 1.1: Mechanische Lüftungsanlage mit Volumenstromreglern (links); mechanische Lüftungsanlage mit dezentralen Ventilatoren (rechts) [Klimmt, Alsen, Knissel 2017]

1.1 Stand des Wissens

Das dVt-System ist in dieser Form noch nicht in der Praxis verbreitet. Es sind aber ähnliche Systemansätze in der Lüftungstechnik vorhanden, welche im Folgenden besprochen werden.

Ein Ansatz ist mit der Verwendung von dezentralen Schubventilatoren gegeben. Dieses System wird in [Hörner, Schmidt 2011] geschildert. In großen Gebäuden mit langen und weitverzweigten Lüftungssystemen (z.B. Krankenhäuser) übernehmen Schubventilatoren die Luftförderung in entfernte Gebäudebereiche. Die erneute Druckerhöhung der Schubventilatoren in diesen Systemen wird auch benötigt, um die Mindestvordrücke der nachgeschalteten Volumenstromregler zu liefern. Somit erfolgt die Aufteilung und Einregulierung der Luft auf die einzelnen Nutzungseinheiten mittels Drosselvorgang. Ein gemeinsamer Punkt mit dem dVt-System ist die Verwendung von mehreren Ventilatoren im Kanalnetz (Zentralventilatoren und Schubventilatoren).

Weitere Umsetzungen finden sich im Wohnungsbau. Das erste bekannte Projekt sind die Passivhäuser Marbachshöhe in Kassel, welche in [Feist 2000; Feist 2007] beschrieben werden. Dabei handelt es sich um Wohnungsbauten mit fünf belüfteten Vollgeschossen. In diesen Gebäuden wird jede Wohneinheit von einem Zuluft- und einem Abluftventilator versorgt. Diese folgen einer Konstant-Volumenstromregelung, d.h. die Luftmenge wird nicht bedarfsgerecht angepasst. Der Nutzer kann manuell zwischen verschiedenen Lüfterstufen umschalten. Zunächst waren in der Anlage keine Zentralventilatoren verbaut. Da die dezentralen Ventilatoren Probleme mit dem Aufbau der erforderlichen Drücke hatten, wurden Zentralventilatoren nachgerüstet.

Auch aus Österreich sind einige Umsetzungen von ähnlichen Lüftungssystemen im Wohnungsbau bekannt. Im Jahr 2010 waren 24 Lüftungsanlagen installiert, welche als semizentrale Lüftungsanlagen umgesetzt wurden [Kapferer u. a. 25.02.2011, S. 18–18]. Des Weiteren ist im Jahr 2011 ein „Planungsleitfaden für Wohnungslüftungen im Mehrfamilienhaus (MFH)“ [Leitzinger 2011] erschienen. In diesen Quellen wird ausdrücklich die Verwendung eines Zentralventilators (Stützventilator) empfohlen, welcher die dezentralen Ventilatoren bei der Luftbereitstellung unterstützt. Des Weiteren werden negative Geruchsübertragungen bei abgeschalteten dezentralen Ventilatoren erwähnt. Diese Geruchsübertragungen finden trotz eingebauter Rückschlagklappen statt.

Im Bereich des mehrgeschossigen Passivhauswohnungsbaus ist ein Konzept mit semizentralen Ventilatoreinheiten bekannt [drexel und weiss energieeffiziente haustechniksysteme gmbh 2010]. Hierbei

ist ein Zentralgerät zur Luftfilterung, Vorerwärmung und Wärmerückgewinnung vorhanden, welches als Regelaufgabe einen konstanten Druck in der Luftverteilung bereitstellt. Die semizentralen Ventilatoren sind für die bedarfsgerechte Regelung der Luftmenge je Wohneinheit zuständig. Dieses Konzept ist in dieser Form nicht mehr am Markt vorhanden. Mittlerweile werden von [drexel und weiss energieeffiziente haustechniksysteme gmbh 2011] im semizentralen Lüftungssystem motorisch betriebene Blenden verwendet. Der Volumenstrom wird durch die Änderung des freien Blendenquerschnittes geregelt. Dieser Vorgang entspricht dem des Volumenstromreglers. Der benötigte Volumenstrom wird entweder über ein Zeitprofil vorgegeben oder anhand der CO₂-Konzentration der Raumluft bestimmt. Eine Nachfrage beim Hersteller zu den Gründen des Systemwechsels bleibt unbeantwortet.

Des Weiteren sind zwei Patente bekannt, welche ähnliche Systeme beschreiben. In [Detzer 2009] wird eine Klimaanlage insbesondere für Schiffe dargestellt, welche über ein Zentralgerät (inklusive Zentralventilator) verfügt und über einen Hauptkanal und mehrere Zweigkanäle verschiedene Räume versorgt. In jedem Zweigkanal befindet sich ein „Lüfter“ (Ventilator). Als Vorteile der aktiven Volumenstromregelung mittels Ventilator gegenüber der konventionellen Regelung mittels Drosselung werden vermiedene Geräuschentwicklungen und Leistungseinsparungen aufgeführt. Beide Vorteile werden über die vermiedenen starken Drosselungen bei sehr langen Strömungswegen begründet. Außerdem werden im beschriebenen System „Luft-Gleichrichter“ verwendet, um zu verhindern das Luft aus dem Raum angesaugt und zurück in den Hauptkanal gefördert wird. Das zweite Patent beschreibt ein ähnliches System für Wohn- und Nichtwohngebäude. In [Hauser 2014] werden im Kanalnetz angeordnete „Luftfördereinrichtungen“ (Ventilatoren) zur Verteilung der Luft auf verschiedene Gebäudebereiche genutzt. Dabei werden die Vorteile von dezentralen außenwandintegrierten Lüftungseinheiten und zentralen Lüftungsanlagen kombiniert. So kann im System mit jenen „Luftfördereinrichtungen“ eine effiziente zentrale Wärmerückgewinnung bei gleichzeitiger effizienter Luftförderung erfolgen. Auf Zentralventilatoren wird in diesem System verzichtet.

Die Arbeit von [Alsen 2017] untersucht konkret die energetischen Vorteile des neuartigen dVt-Systems. Prinzipiell wird beschrieben, dass durch den Ersatz von Volumenstromreglern mit dezentralen Ventilatoren die erwähnten Drosselungen vermieden werden. Die erforderliche Druckerhöhung zum Lufttransport wird im dVt-System an der benötigten Stelle in entsprechender Höhe erzeugt, wie in Abbildung 1.1 rechts zu sehen. Außerdem werden Wirtschaftlichkeitsrechnungen durchgeführt. Die Arbeit kommt zum Schluss, dass je nach Nutzung und Auslegungsvolumenstrom ein energetischer Vorteil des dVt-Systems gegenüber dem VSR-System besteht. [Alsen 2017] untersucht dabei anlagentechnische Umsetzungen, welche der vorliegenden Arbeit entstammen. Je nach anlagentechnischer Umsetzung ist durch den energetischen Vorteil auch eine Wirtschaftlichkeit gegeben.

Aus [Alsen 2017] gehen außerdem die verschiedenen Regelaufgaben der Ventilatoren im dVt-System hervor. Diese werden im Folgenden erläutert.

Die Zentralventilatoren haben im dVt-System die Aufgabe, den Druckverlust der Lüftungszentrale zu überwinden und somit an einem bestimmten Punkt des Kanalnetzes einen definierten Vordruck zu halten.

Der dezentrale Zuluftventilator des dVt-Systems hat im Rahmen der durchgeführten Betrachtungen folgende Regelaufgaben, welche nach Priorität erfüllt werden:

- Die Begrenzung der CO₂-Konzentration im Raum (Luftqualität),
- die Bereitstellung eines definierten Volumenstromes bei Personenabwesenheit während der Nutzungszeit und
- die Bereitstellung eines definierten Volumenstromes außerhalb der Nutzungszeit.

Die Begrenzung der CO₂-Konzentration im Raum stellt die Hauptaufgabe dar: CO₂ wird in Gebäuden vor allem durch Personen emittiert. Laut [VDI 4300-7] ist bei einer CO₂-Konzentration unter 1000 ppm eine gute Luftqualität vorhanden. Außerdem besagt die [VDI 4300-7], dass bei CO₂-Konzentrationen über 1000 ppm 25 % der Testpersonen eine nennenswerte Geruchsbelästigung feststellen und bei höheren CO₂-Konzentration vereinzelt Müdigkeit und Unbehagen auftreten können. Die maximale Arbeitsplatzkonzentration für CO₂ liegt laut [Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe 2016] bei 5000 ppm. Anstatt der Begrenzung der CO₂-Konzentration könnte die Aufgabe auch in der Regelung der Raumluftheuchte oder der Raumlufttemperatur bestehen.

Bei Personenabwesenheit während der Nutzungszeit wird in der [DIN V 18599-10] die Förderung eines Mindestluftvolumenstromes in Ansatz gebracht. Die Förderung eines Mindestluftvolumenstromes wird im Folgenden Mindestlüftung genannt. Der Mindestluftvolumenstrom kann je nach Nutzung variieren, für die meisten Nutzungen beträgt er laut [DIN V 18599-10] 2,5 m³/(h m²). Die Mindestlüftung dient dazu, Raumluftbelastungen, welche unabhängig von Personen sind, abzuführen. Dies sind zum Beispiel Gerüche und Emissionen von Möbeln oder Bauteilen im Raum.

Befindet sich der Raum außerhalb der Nutzungszeit, kann von dem Mindestluftvolumenstrom abgewichen werden. Entweder es wird durchgehend ein minimaler Volumenstrom gefördert (im Folgenden Grundlüftung genannt) oder der Raum wird vor Beginn der Nutzung für einen begrenzten Zeitraum mit einem höheren Volumenstrom beaufschlagt (im Folgenden Vorspülung genannt). Ziel dieser Regelaufgabe ist eine gute Raumlufqualität (CO₂-Konzentration, Geruch) zu Beginn der Nutzung. Wie die Bereitstellung eines definierten Volumenstromes außerhalb der Nutzungszeit erfolgt, muss für jede Nutzung individuell entschieden werden.

Die Regelaufgabe der dezentralen Abluftventilatoren ist der Ausgleich der Luftbilanz zwischen Zuluft- und Abluftseite, d.h. die durch die mechanische Lüftungsanlage zu- und abgeführten Volumenströme eines Raumes sind zu jedem Zeitpunkt gleich groß.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das dVt-System hinsichtlich energetischen und wirtschaftlichen Vorteilen bereits untersucht ist und die wenigen praktischen Erfahrungen mit ähnlichen Systemen ausschließlich auf im Wohnungsbau umgesetzten Lüftungsanlagen beruhen. Zwar sind auch Ansätze für andere Gebäudekategorien vorhanden, jedoch sind hier keine praktischen Umsetzungen bekannt. Die Quellen geben interessante Hinweise, wie zum Beispiel die Geruchsübertragung über das Kanalnetz und die Ansaugung von Luft aus dem Raum entgegen der konventionellen Strömungsrichtung. Für die konkrete anlagentechnische Umsetzung des dVt-Systems in Nichtwohngebäuden sind keine Erfahrungen vorhanden. Aufgrund anderer Gebäudegeometrien und abweichender Nutzungen bei Nichtwohngebäuden muss der Einsatz von Lüftungssystemen mit dezentralen Ventilatoren für neue Volumenstrom- und Druckbereiche untersucht werden.

Aus dieser aufgeführten Problematik ergibt sich das Hauptziel dieser Arbeit. Es wird überprüft, ob mit dem dVt-System eine bedarfsgerechte Lüftung für Nichtwohngebäude umgesetzt werden kann und was dabei zu beachten ist.

Dieses Ziel wird erfüllt, indem drei Forschungsfragen beantwortet werden.

1.2 Forschungsfragen der Arbeit

Die erste Forschungsfrage dieser Arbeit ist: *Wie ist das dVt-System im Vergleich zum konventionellen VSR-System zu bewerten?* Es wird herausgearbeitet, welche Vor- bzw. Nachteile das dVt-System aufweist und ob beim Einsatz prinzipielle Besonderheiten zu beachten sind. Dabei sind vor allem die Funktionsweise und der Aufbau der Lüftungssysteme von Interesse, ein energetischer und wirtschaftlicher Vergleich wird in [Alsen 2017] durchgeführt.

Die zweite Forschungsfrage lautet: *Wie kann das dVt-System anlagentechnisch umgesetzt werden?* Ausgehend von einer Basisvariante sollen weitere anlagentechnische Umsetzungen mit reduziertem Komponentenaufwand entstehen. Dabei werden die Auswirkungen der vorgenommenen Reduzierungen auf die Regelung untersucht und eventuelle Vor- und Nachteile bestimmt. Aus den Untersuchungen ergeben sich Einsatzrandbedingungen für die einzelnen anlagentechnischen Umsetzungen.

Die dritte Forschungsfrage ist: *Welche strömungstechnischen Besonderheiten können beim Einsatz von mehreren Ventilatoren im Kanalnetz auftreten?* Aufgrund der hydraulischen Verbindung über gemeinsam durchströmte Kanalabschnitte beeinflussen sich die dezentralen Ventilatoren gegenseitig. Dies hat Einfluss auf die Betriebspunkte der Ventilatoren und kann zu ungewollten Strömungssituationen im Kanalnetz führen. Im Vordergrund steht dabei die ungewollte Umkehrung des Luftvolumenstromes in einem bestimmten Kanalabschnitt, welche als Fehlströmung bezeichnet und in Abbildung 1.2 (rote Pfeile) dargestellt wird.

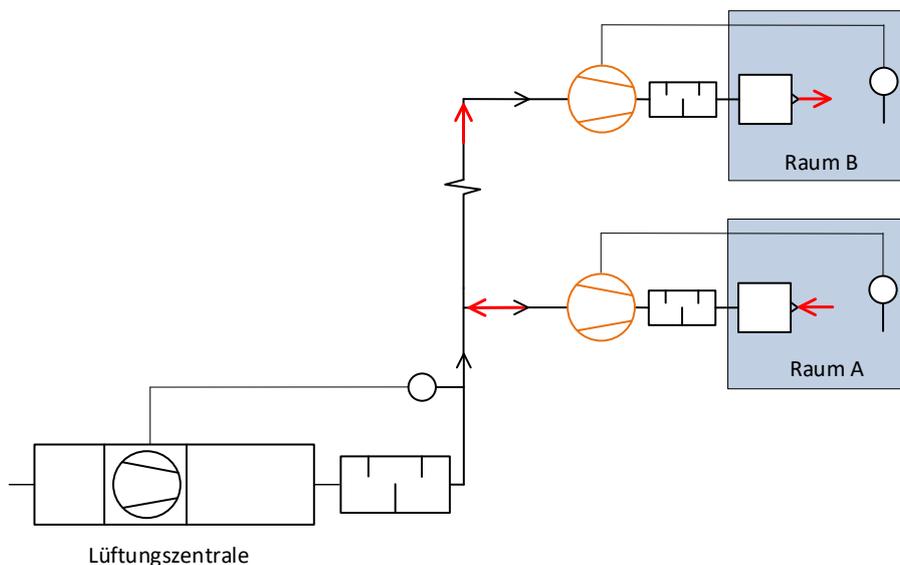


Abbildung 1.2: Schematische Darstellung einer Lüftungsanlage zur Versorgung von Raum A und Raum B mit vorliegender Fehlströmung

Eine Fehlströmung kann eine Geruchs- und Schadstoffübertragung von einem Raum auf einen anderen zur Folge haben und muss deshalb verhindert werden. Ziel ist es, die Entstehung dieser strömungstechnischen Besonderheiten zu untersuchen und entsprechende Konsequenzen zu ziehen. So sollen für die Fehlströmung konkrete Detektions- und Vermeidungsstrategien entwickelt und angewandt werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Mit folgendem Aufbau wird das dVt-System in dieser Arbeit untersucht. Abbildung 1.3 gibt einen Überblick und geht darauf ein, welche Themen in den einzelnen Kapiteln behandelt werden. Dabei beschreibt das blaue Dreieck die Detailtiefe der einzelnen Themen.

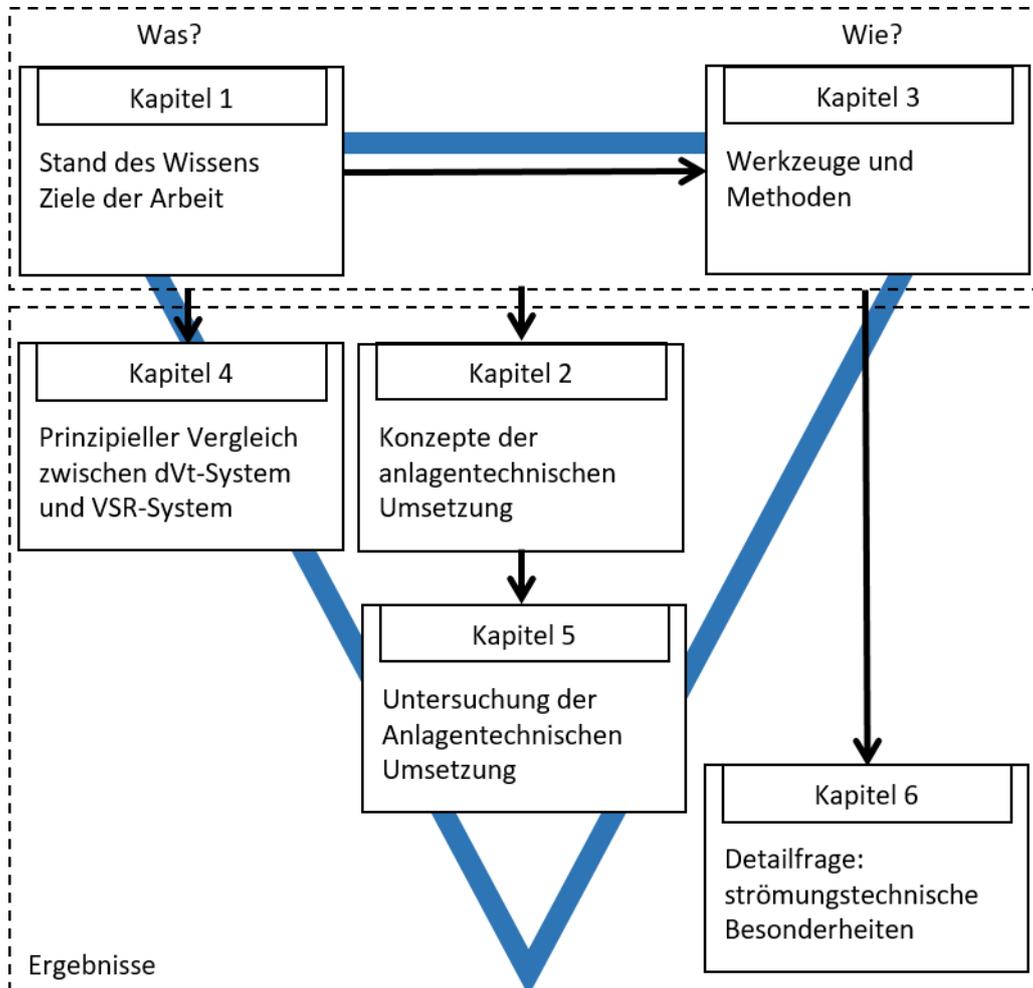


Abbildung 1.3: Übersichtsschaubild zum Aufbau der Arbeit

In Kapitel 1 „Einleitung“ wird prinzipiell geklärt, was in der vorliegenden Arbeit untersucht wird. Dafür werden in der Einleitung der energiepolitische Rahmen und die daraus resultierende Motivation der Arbeit aufgezeigt. Danach wird im Kapitel 1.1 „Stand des Wissens“ die bisher bekannten Grundlagen des dVt-Systems beschrieben und in einer Literaturrecherche vergleichbare Systeme analysiert. Aus den gewonnenen Erkenntnissen werden die Hauptzielsetzung deutlich sowie die Forschungsfragen („Forschungsfragen der Arbeit“ Kapitel 1.2) abgeleitet. Insgesamt werden drei Forschungsfragen gestellt.

Kapitel 2 „Anlagentechnische Umsetzung des dVt-Systems“ führt die im weiteren Verlauf der Arbeit untersuchten anlagentechnischen Umsetzungen des dVt-Systems ein. Es werden sechs anlagentechnische Umsetzungen des dVt-Systems erstellt. Dabei wird eine Komponentenreduzierung der eingeführten Basisvariante vorgenommen.

Kapitel 3 „Werkzeuge zur Untersuchung des dVt-Systems“ beschreibt die Werkzeuge, welche zur Beantwortung der Forschungsfragen genutzt werden. Das dVt-System wird theoretisch und empirisch untersucht. Die theoretischen Analysen werden mittels „Simulationsrechnungen“ durchgeführt, diese werden in Kapitel 3.1 beschrieben. Die Simulationsrechnungen finden an einer definierten Raumgruppe (Kapitel 3.1.1) statt. In verschiedenen Simulationsläufen werden Randbedingungen wie der Druckverlust des Kanalnetzes und die Undichtigkeit der Gebäudehülle variiert. Die definierten Randbedingungen werden in Kapitel 3.1.2 aufgeführt. Des Weiteren wird das dVt-System unter verschiedenen Bedingungen messtechnisch untersucht. Zur empirischen Untersuchung werden der „RLT-Versuchsstand“ (Kapitel 3.2) und der „Anwendungstest“ (Kapitel 3.3) genutzt. Am „Anwendungstest“ wird konkret die Praxistauglichkeit der anlagentechnischen Umsetzungen an einem realen Gebäude demonstriert und überprüft.

In Kapitel 4 „Vergleich dVt-System und VSR-System“ erfolgt ein übergeordneter Vergleich zwischen dem neuartigen dVt-System und dem konventionellen VSR-System, welcher losgelöst von den konkreten anlagentechnischen Umsetzungen durchgeführt wird. Dadurch kann das dVt-System als Lüftungssystem besser eingeordnet werden. Neben den theoretischen Untersuchungen werden auch Messungen am RLT-Versuchsstand durchgeführt. Dieses Kapitel beantwortet die erste Forschungsfrage dieser Arbeit.

In Kapitel 5 „Untersuchung der anlagentechnischen Umsetzungen des dVt-Systems“ werden die in Kapitel 2 eingeführten anlagentechnischen Umsetzungen im Detail untersucht. Hauptwerkzeug dieser Untersuchung sind die Simulationsrechnungen. Mittels der am RLT-Versuchsstand validierten Simulationsmodelle werden die anlagentechnischen Umsetzungen theoretisch an der definierten Raumgruppe angewandt und für verschiedene Randbedingungen untersucht. Aus den Ergebnissen der Simulationen werden Einsatzrandbedingungen für die einzelnen anlagentechnischen Umsetzungen abgeleitet.

Das letzte inhaltliche Kapitel 6 beschäftigt sich mit der Detailfrage der strömungstechnischen Besonderheiten des dVt-Systems. Diese sind neue Betriebspunkte der Ventilatoren und Fehlströmungen im Kanalnetz des dVt-Systems. Der Hintergrund und die Entstehung dieser Besonderheiten werden theoretisch erläutert. Darauf aufbauend wird bestimmt, wie mit diesen strömungstechnischen Besonderheiten umzugehen ist.

Kapitel 7 fasst die erzielten Ergebnisse der Arbeit zusammen, es wird ein Fazit gezogen und ein Ausblick für das dVt-System gegeben.

2 Anlagentechnische Umsetzung des dVt-Systems

Da das dVt-System in dieser Form noch nicht verbreitet ist, müssen zunächst anlagentechnische Umsetzungen erstellt werden. Diese anlagentechnischen Umsetzungen des dVt-Systems werden grundlegend aus dem konventionellen VSR-System abgeleitet.

Wie bereits beschrieben (Abbildung 1.1 S.2) besteht eine konventionelle Lüftungsanlage aus Zentralgerät und Kanalnetz mit Volumenstromreglern. Der Komponentenaufwand für das Zentralgerät und die Regelung der Zentralventilatoren ist für beide Lüftungssysteme identisch und wird für alle folgenden anlagentechnischen Umsetzungen beibehalten. Die prinzipielle Regelung der Zentralventilatoren wird in Abbildung 2.1 gezeigt.

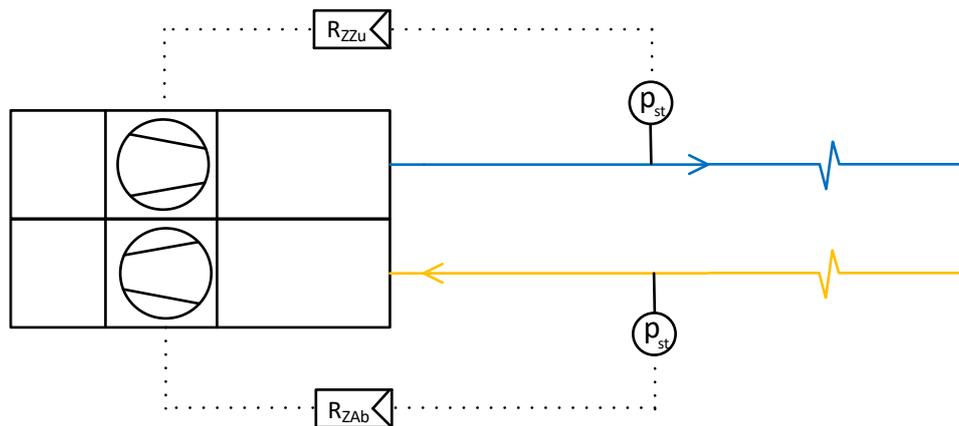


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung einer Lüftungszentrale mit dargestellter Regelung der Zentralventilatoren

Der Regler des Zentralventilators R_z vergleicht den statischen Druck p_{st} an einem bestimmten Punkt im Kanalnetz mit dem vorgegebenen Sollwert und erzeugt daraus das Stellsignal für den zentralen Zu- bzw. Abluftventilator. Auf die Darstellung des Zentralgeräts wird in den folgenden Abbildungen der einzelnen anlagentechnischen Umsetzungen verzichtet.

2.1 Basisvariante vollständige Einzelraumregelung (Regelung 1a)

Zur Erstellung der Basisvariante (vollständige Einzelraumregelung) des dVt-Systems werden lediglich die im Kanalnetz angeordneten Volumenstromregler durch dezentrale Ventilatoren ersetzt. Der gezeigte Komponentenaufwand wird bereits in [Klimmt, Alsen, Knissel 2017] beschrieben und in Abbildung 2.2 dargestellt.

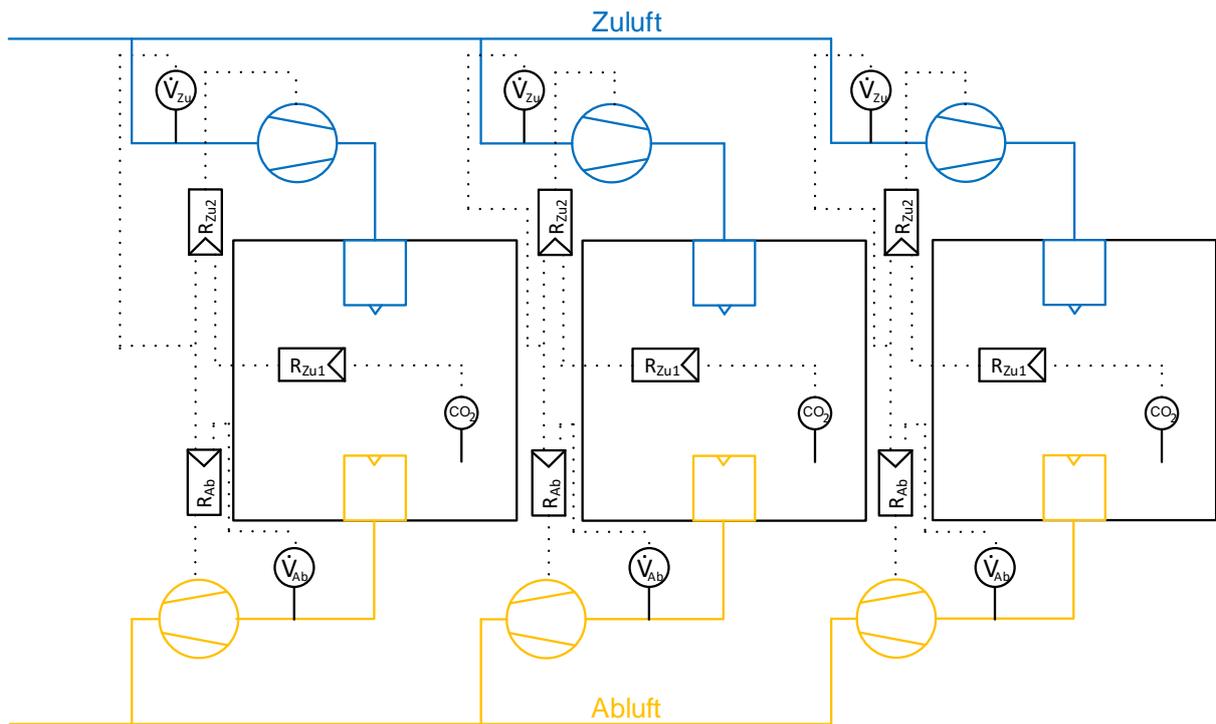


Abbildung 2.2: Schema der vollständigen Einzelraumregelung (Basisvariante des dVt-Systems) [Klimmt, Alsen, Knissel 2017]

Mit dieser Anlagentechnik ist es möglich, jeden Raum mit einem bedarfsgerechten Luftvolumenstrom zu versorgen, da sowohl zu- als auch abluftseitig raumweise dezentrale Ventilatoren vorhanden sind. Außerdem verfügt jeder dezentrale Ventilator über eine Volumenstrommessung und jeder Raum über einen CO₂-Sensor.

Für diese Anlagentechnik wird ein vorteilhaftes robustes Betriebsverhalten erwartet, welches dem nachteiligen hohen Komponentenaufwand mit entsprechenden Investitions- und Wartungskosten entgegensteht. Die Regelung wird in Kapitel 5.1.1 (S.71) beschrieben und untersucht.

Für die weiteren anlagentechnischen Umsetzungen werden auf die vollständige Einzelraumregelung aus Abbildung 2.2 aufgebaut und Komponentenreduzierungen vorgenommen.

2.2 Komponentenreduzierung

Es ist denkbar, das dVt-System mit unterschiedlich großem Komponentenaufwand umzusetzen. Der Komponentenaufwand hat sowohl Einfluss auf die Investitions- sowie die Wartungs- und Inspektionskosten des dVt-Systems als auch auf die Erfüllung der beschriebenen Regelaufgaben. Im Folgenden wird für jede anlagentechnische Umsetzung davon ausgegangen, dass drei Zuluftströme zu versorgen sind.

Um die Komponentenreduzierung vorzunehmen und verschiedene anlagentechnische Umsetzungen zu erstellen, werden mögliche Ausprägungen des dVt-Konzeptes ermittelt und variiert. Diese Ausprägungen sind:

- die Anordnung von Zu- und Abluftdurchlässen,
- die Position der dezentralen Ventilatoren,
- die Position der Volumenstrommessung und
- die Position der CO₂-Messung.

Die Zu- und Abluftdurchlässe können wie folgt angeordnet sein:

- je Raum oder
- in getrennten Räumen (Überströmung der Raumluft).

Sind die Abluftdurchlässe „Je Raum“ angeordnet, ist keine räumliche Trennung zwischen Zuluftzone und Abluftzone vorhanden. Getrennte Abluftzonen erfordern eine Überströmung durch das Gebäude.

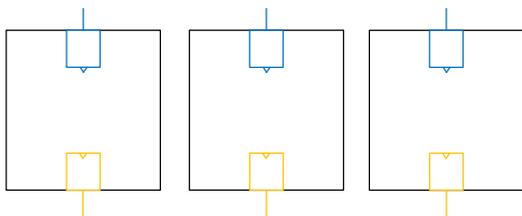


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der Anordnung von Zu- und Abluftdurchlässen „Je Raum“

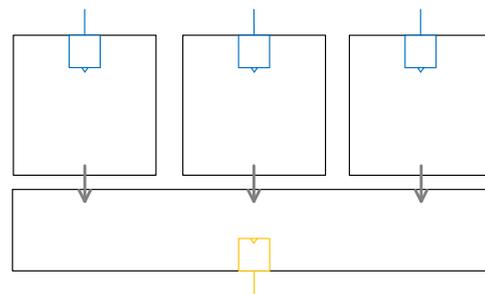


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung der Anordnung von Zu- und Abluftdurchlässen „In getrennten Räumen“

Eine Überströmung erhöht die mechanisch belüftete Fläche im Gebäude.

Die Position der dezentralen Ventilatoren und der Volumenstrommessung müssen für Zuluft und Abluft einzeln definiert werden. Zwei verschiedene Positionen der dezentralen Ventilatoren sind denkbar:

- raumweise oder
- strangweise.

Bei raumweise angeordneten dezentralen Ventilatoren wird der Ventilator direkt einem Raum zugeordnet und erhält aus diesem sein Regelsignal, dies entspricht einer Einzelraumversorgung. Werden mehrere Räume zu einer Raumgruppe zusammengefasst und von einem dezentralen Ventilator versorgt, entspricht dies der Position strangweise.

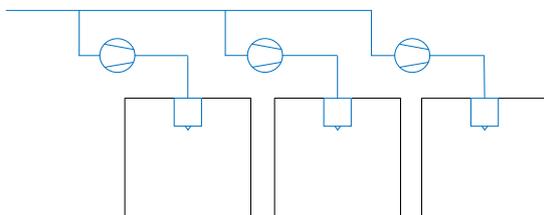


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung der Position der dezentralen Ventilatoren „Raumweise“

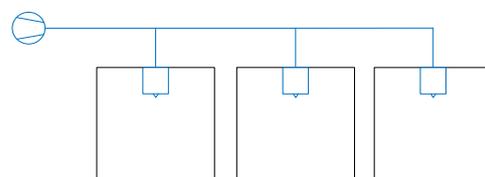


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung der Position der dezentralen Ventilatoren „Strangweise“

Bei einer strangweisen Verteilung der Ventilatoren wird die Ventilatoranzahl reduziert.

Eine Volumenstrommessung kann für die Regelung der Ventilatoren notwendig sein. Für die Varianten wird unterschieden, ob eine Volumenstrommessung vorhanden ist oder nicht. Ist keine Volumenstrommessung zur Regelung der dezentralen Ventilatoren vorhanden, kann zum Beispiel eine Messung der Druckerhöhung der Ventilatoren notwendig werden.

Als Raumsignal wird in dieser Arbeit die CO₂-Konzentration der Raumluft verwendet. Die CO₂-Messung kann dabei folgende Positionen einnehmen:

- raumweise oder
- strangweise im Abluftkanal.

Die CO₂-Konzentration kann somit direkt in der Raumluft oder im Abluftkanal als CO₂-Mischkonzentration mehrerer Räume erfasst werden. Dabei wird die Anzahl der CO₂-Sensoren reduziert.

Durch Variation und Kombination dieser verschiedenen Ausprägungen sind 40 sinnvolle anlagentechnische Umsetzungen möglich. Für die Untersuchung werden sechs anlagentechnische Umsetzungen ausgewählt. Jede einzelne anlagentechnische Umsetzung hat Besonderheiten, welche notwendige Einsatzrandbedingungen erzeugen.

Die erstellten anlagentechnischen Umsetzungen können prinzipiell in Einzelraumversorgungen (Variante 1) und in Raumgruppenversorgungen (Variante 2) eingruppiert werden. Aus der Arbeit von [Alsen 2017] wird abgeleitet, dass die bedarfsgerechte Einzelraumversorgung bei Räumen mit großen Auslegungsvolumenströmen ($\dot{V}_R^* \geq 250 \text{ m}^3/\text{h}$) wirtschaftlich ist. Die Wirtschaftlichkeit der bedarfsgerechten Einzelraumversorgung steigt laut [Alsen 2017] bei hohen Teillastanteilen ($\dot{V}_{dc}/\dot{V}_R^* \leq 70\%$). Der mittlere Außenluftvolumenstrom \dot{V}_{dc} kann nach [DIN V 18599-7] bestimmt werden und stellt den mittleren benötigten Volumenstrom bei bedarfsgerechter Lüftung dar. Dieser ist abhängig von:

- dem Teillastbetriebsfaktor der Gebäudebetriebszeit F_{RLT} der Nutzung nach [DIN V 18599-10] und
- der relativen Abwesenheit der RLT-Anlage c_{RLT} der Nutzung nach [DIN V 18599-10].

Der Teillastbetriebsfaktor der Gebäudebetriebszeit gibt die durchschnittliche Belegung einer Nutzung während der Betriebszeit an, wenn überhaupt Personen anwesend sind. Je größer dieser Wert, desto geringer das Teillastverhalten. Die relative Abwesenheit der RLT-Anlage macht Angaben, zu welchem Teil der Betriebszeit gar keine Personen im Raum sind. Je größer dieser Wert, desto höher das Teillastverhalten. Diese beiden Werte können außerdem zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit einer Vollbelegung (Kapitel 5.2.1.2 S.97) herangezogen werden.

Laut [Alsen 2017] sollen Räume mit einem geringen Auslegungsvolumenstrom ($\dot{V}_R^* < 250 \text{ m}^3/\text{h}$) aus Wirtschaftlichkeitsgründen mit einer Konstant-Volumenstromregelung versorgt werden, d.h. während der Nutzungszeit wird der Raum konstant mit dem Auslegungsvolumenstrom beaufschlagt, eine CO₂-Messung ist hier nicht notwendig. Eine solche Konstant-Volumenstromregelung kann mittels dVt-System umgesetzt werden, indem dezentrale Ventilatoren entsprechende Sollvolumenströme erhalten. Für eine Konstant-Volumenstromregelung ist es sinnvoll, konstant versorgte Räume über einen dezentralen Ventilator zusammenzufassen. Diese Räume können gegebenenfalls aber auch zu einer Raumgruppe mit einem Gesamtauslegungsvolumenstrom von $\dot{V}_{Ges}^* > 250 \text{ m}^3/\text{h}$ zusammengefasst und bedarfsgerecht belüftet werden (Kapitel 5.2.1.2 S.97).

In Tabelle 2.1 werden die Eigenschaften der unterschiedlichen Einzelraum- und Raumgruppenversorgungen zusammengefasst.

Tabelle 2.1: Zusammenfassung der Eigenschaften der ausgewählten anlagentechnischen Umsetzung [Klimmt, Alsen, Knissel 2017]

Regelung	Zu- und Abluftdurchlässe	dezentrale Ventilatoren		Volumenstrommessung		CO ₂ -Messung	
		Zuluft	Abluft	Zuluft	Abluft		
Einzelraumversorgung	1a	Je Raum	Raumweise		Vorhanden		Raumweise
	1b				Keine		
	1c	In getrennten Räumen	Raumweise	Strangweise	Vorhanden	Keine	
	1d						
Raumgruppenversorgung	2a	Je Raum	Strangweise		Vorhanden		Abluftstrang
	2b						

Wie bereits vergleichbar in [Klimmt, Alsen, Knissel 2017] beschrieben, sind die Regelungen 1a bis 1d Einzelraumversorgungen, bei denen jeder Raum einen Zuluftventilator hat. Die Besonderheit der Regelung 1b ist der Verzicht auf Volumenstrommessungen zur Regelung der dezentralen Ventilatoren. Regelung 1c zeichnet sich durch den strangweisen Abluftventilator aus, welcher nicht über eine Volumenstrommessung, sondern eine Druckhaltung geregelt wird. Regelung 1d hat als Besonderheit eine getrennte Abluftzone. Die Regelungen 2a und 2b sind Raumgruppenversorgungen. Es werden auf der Zuluft- und der Abluftseite strangweise dezentrale Ventilatoren verwendet. Die beiden Regelungen unterscheiden sich durch die Anzahl der CO₂-Messungen und deren Position.

2.3 Einzelraumversorgungen

In diesem Kapitel werden die erstellten Einzelraumversorgungen beschrieben. Zur besseren Übersicht gibt Tabelle 2.2 die Abbildung der einzelnen Regelungen und das Kapitel der Beschreibung sowie der Untersuchung an.

Tabelle 2.2: Übersicht der Einzelraumregelungen

Regelungen	Name	Abbildung	Beschreibung	Untersuchung
1a	Vollständige Einzelraumregelung	Abbildung 2.2	Kapitel 2.1	Kapitel 5.1.1
1b	Einzelraumregelung ohne Volumenstrommessung	Abbildung 2.7	Kapitel 2.3.1	Kapitel 5.1.2
1c	Einzelraumregelung mit strangweisen Abluftventilator	Abbildung 2.8	Kapitel 2.3.2	Kapitel 5.1.3
1d	Einzelraumregelung mit Überströmung	Abbildung 2.9	Kapitel 2.3.3	Kapitel 5.1.4

Folgende Nutzungen der [DIN V 18599-10] sind für die Einzelraumversorgung geeignet:

- Klassenzimmer (Schule), Gruppenraum (Kindergarten),
- Hörsaal, Auditorium und
- Besprechung, Sitzung, Seminar.

Bei diesen Nutzungen wird von Auslegungsvolumenströmen $\dot{V}_R^* \geq 250 \text{ m}^3/\text{h}$ ausgegangen. Die Aufzählung hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

2.3.1 Einzelraumregelung ohne Volumenstrommessung (Regelung 1b)

Bei dieser Regelung wird auf Volumenstrommessungen verzichtet. Die notwendige Anlagentechnik geht aus Abbildung 2.7 hervor.

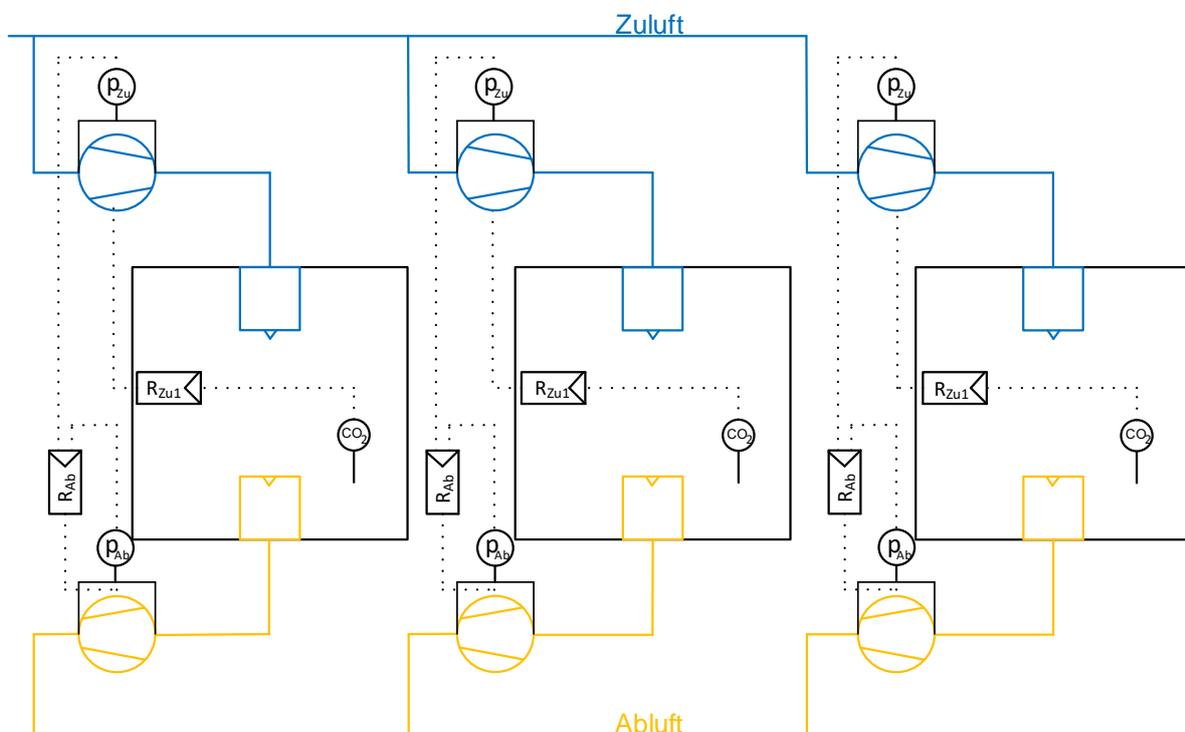


Abbildung 2.7: Schema der Einzelraumregelung ohne Volumenstrommessung

Wie auch bei der vollständigen Einzelraumregelung (Abbildung 2.2 S.9) verfügt jeder Raum über einen dezentralen Zu- und einen dezentralen Abluftventilator, sowie einen CO₂-Sensor und kann damit bedarfsgerecht belüftet werden. Jedoch sind keine Volumenstrommessungen vorhanden. Stattdessen werden die Druckerhöhungen der einzelnen Ventilatoren gemessen.

Vorteil ist, dass auf strömungstechnisch schwierige und verschmutzungsanfällige Volumenstrommessungen zur bedarfsgerechten Belüftung verzichtet wird. Es werden allerdings nachteilige Disbalancen zwischen Zu- und Abluftvolumenstrom der Räume erwartet.

Die notwendige Regelung für diese Anlagentechnik wird in Kapitel 5.1.2 (S.77) beschrieben.

2.3.2 Einzelraumregelung mit strangweisem Abluftventilator (Regelung 1c)

Die Einzelraumregelung mit strangweisem Abluftventilator weist eine reduzierte Anzahl an Abluftventilatoren auf. Die Unterschiede zur vollständigen Einzelraumregelung sind in Abbildung 2.8 zu erkennen.

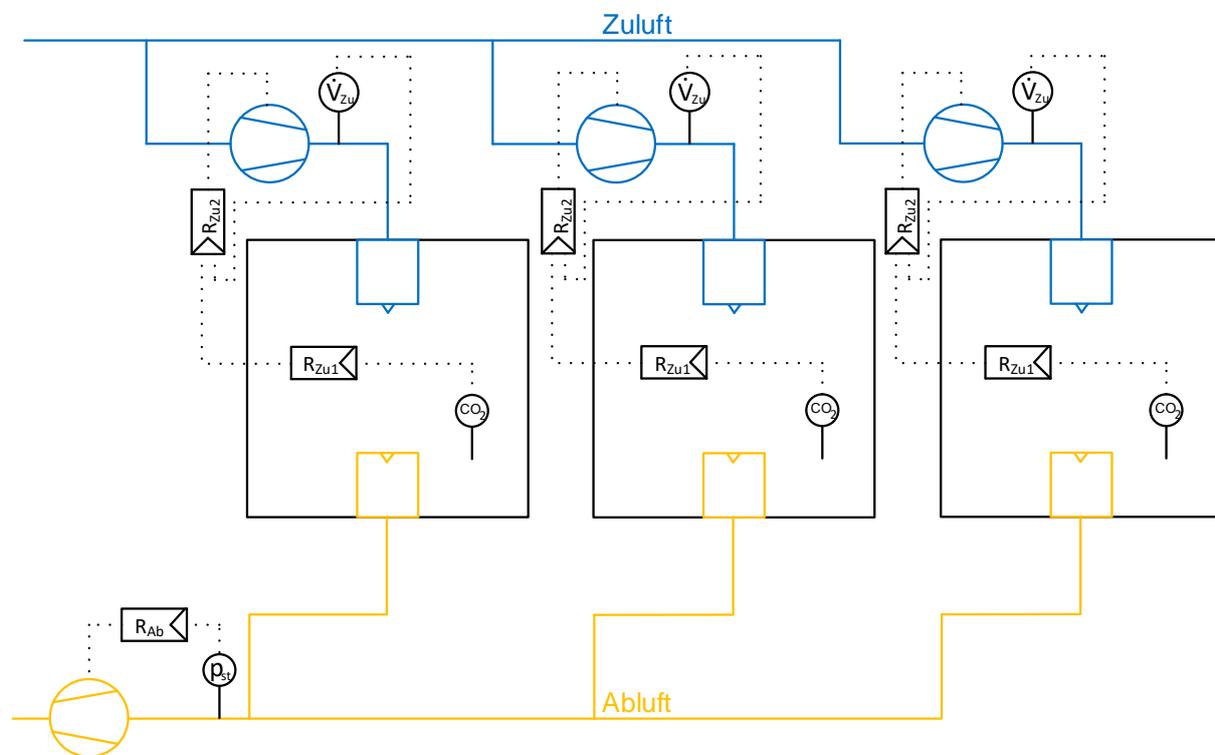


Abbildung 2.8: Schema der Einzelraumregelung mit strangweisem Abluftventilator

Die Zuluftseite entspricht der vollständigen Einzelraumregelung (Abbildung 2.2 S.9). Die Zuluftventilatoren gestatten eine bedarfsgerechte Versorgung der Räume mit Frischluft. Auf der Abluftseite ist eine Reduzierung der Anzahl der dezentralen Ventilatoren vorhanden. Hier ist keine Volumenstrommessung, sondern eine Messung des Kanaldruckes vorhanden.

Vorteile dieser Variante sind die reduzierten Investitions- und Wartungskosten für die Abluftseite. Der Nachteil dieser Variante könnte aufgrund der Druckregelung des Abluftventilators eine erhöhte Anfälligkeit bei geöffneten Fenstern oder Türen sein. Des Weiteren werden Disbalancen zwischen Zu- und Abluftvolumenströmen erwartet.

Die Druckregelung des dezentralen Abluftventilators wird in Kapitel 5.1.3 (S.89) beschrieben und untersucht.

2.3.3 Einzelraumregelung mit Überströmung (Regelung 1d)

Auch die Einzelraumregelung mit Überströmung reduziert die Anzahl der notwendigen dezentralen Abluftventilatoren und wird bereits in [Klimmt, Alsen, Knissel 2017] beschrieben. Es ist eine räumliche Trennung von Zu- und Abluftzone vorhanden. Die notwendige Überströmung von der Zu- in die Abluftzone ist in Abbildung 2.9 durch die Pfeile zu erkennen.

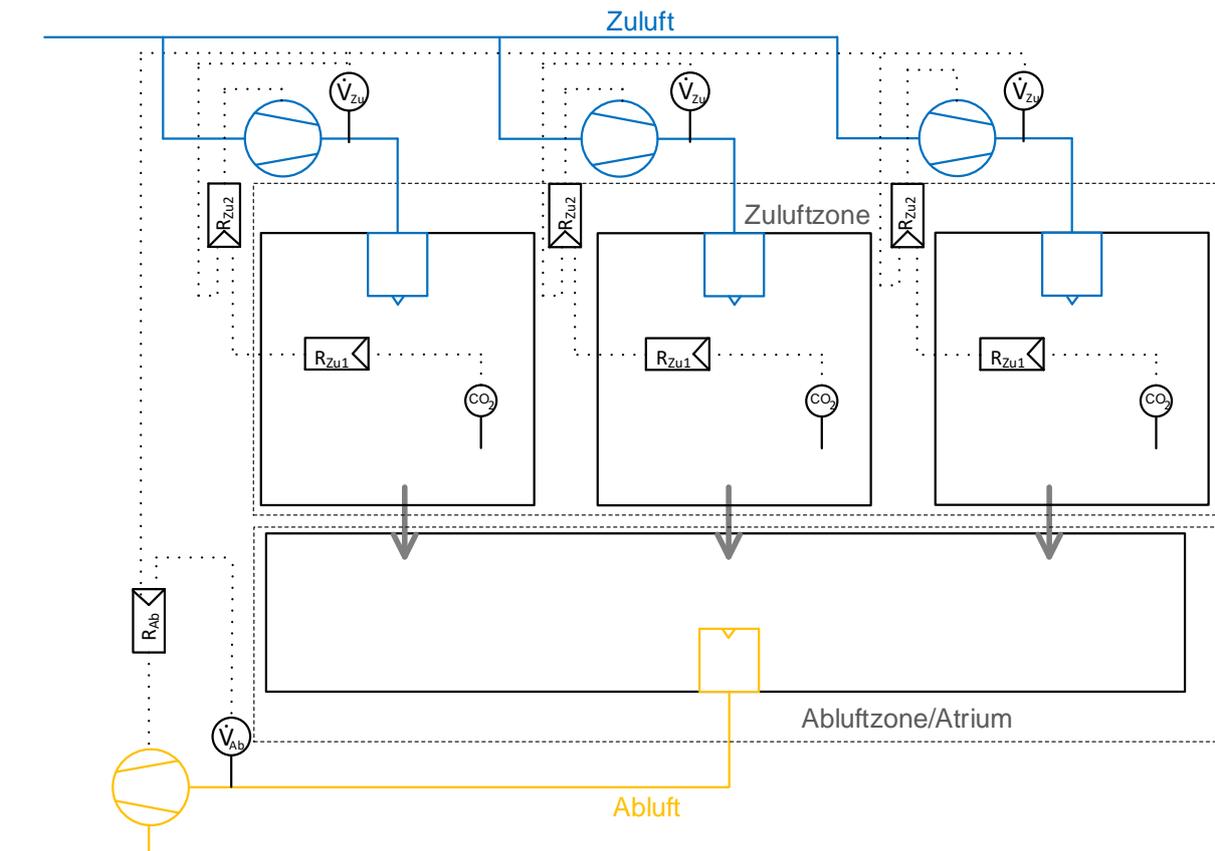


Abbildung 2.9: Schema der Einzelraumregelung mit Überströmung [Klimmt, Alsen, Knissel 2017]

Die Zuluftseite entspricht der vollständigen Einzelraumregelung (Abbildung 2.2 S.9). Die Abluft wird mittels dezentralem Ventilator aus einer separaten Zone gesaugt, sodass zwischen Zu- und Abluftzone eine Überströmung vorhanden ist. Der dezentrale Abluftventilator verfügt über eine Volumenstrommessung.

Vorteil dieser Anlagentechnik sind die ebenfalls reduzierten Investitions- und Wartungskosten bei gegebener Einzelraumregelung und die Mehrfachnutzung der Luft aufgrund der Überströmung. Eine vermehrte Anfälligkeit durch geöffnete Fenster und Türen könnte nachteilig sein.

Diese Regelung wird in Kapitel 5.1.4 (S.92) beschrieben und untersucht.

2.4 Raumgruppenversorgungen

Vorteil der Raumgruppenversorgungen ist, dass auch kleine Räume mit wenigen Teillastzuständen energieeffizient mittels dezentralen Ventilatoren versorgt werden. Durch das Zusammenfassen der

Räume erhöht sich der zu fördernde Auslegungsvolumenstrom des dezentralen Ventilators. Laut [Alsen 2017] haben Ventilatoren mit größeren Auslegungsvolumenströmen höhere Wirkungsgrade. Des Weiteren ist mit geringeren Investitionskosten im Vergleich zu einer Einzelraumversorgung zu rechnen.

Wie bereits erwähnt, empfiehlt [Alsen 2017] bei Nutzungen mit $\dot{V}_R^* < 250 \text{ m}^3/\text{h}$ eine Konstant-Volumenstromregelung, sodass die Räume während der Nutzungszeit konstant mit Auslegungsvolumenstrom versorgt werden. In dieser Arbeit werden zwei Regelungen zur Raumgruppenversorgung beschrieben und untersucht, welche je nach Bedarf den Zuluftvolumenstrom der Raumgruppe anpassen.

Tabelle 2.3: Übersicht der Regelungen zur Raumgruppenversorgungen

Variante	Name	Abbildung	Beschreibung	Untersuchung
2a	Schlechtraumregelung	Abbildung 2.10	Kapitel 2.4.1	Kapitel 5.2.1
2b	Mischkonzentrationsregelung	Abbildung 2.11	Kapitel 2.4.2	Kapitel 5.2.2

Es wird überprüft, welche Auswirkungen die unterschiedlichen Bedarfsregelungen haben. Geeignete Nutzungen für eine Raumgruppenversorgung nach [DIN V 18599-10] sind:

- Einzelbüro,
- Gruppenbüro,
- Bettzimmer,
- Hotelzimmer,
- Sonstige Aufenthaltsräume sowie
- Untersuchungs- und Behandlungsräume.

Bei diesen Nutzungen wird von einem Auslegungsvolumenstrom $\dot{V}_R^* < 250 \text{ m}^3/\text{h}$ ausgegangen.

2.4.1 Schlechtraumregelung (Regelung 2a)

Die Schlechtraumregelung ist in [Klimmt, Alsen, Knissel 2017] beschrieben. Wie bei jeder Raumgruppenversorgung wird auch bei der Schlechtraumregelung die Anzahl der notwendigen dezentralen Ventilatoren reduziert. Abbildung 2.10 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Raumgruppenversorgung mit Schlechtraumregelung.

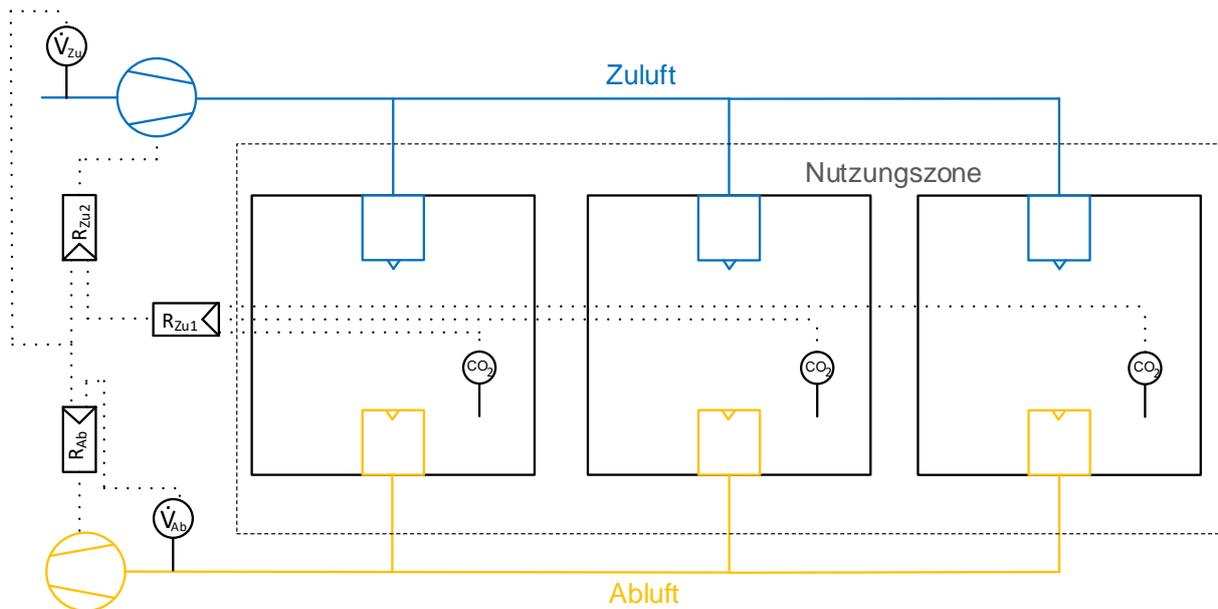


Abbildung 2.10: Schema der Raumgruppenversorgung mit Schlechtraumregelung [Klimmt, Alsen, Knissel 2017]

Der Hauptunterschied zur Einzelraumversorgung ist, dass die Räume zu einer Raumgruppe zusammengefasst sind und zu- als auch abluftseitig von einem gemeinsamen dezentralen Ventilator versorgt werden. Jeder Ventilator verfügt über eine Volumenstrommessung und jeder Raum über einen CO_2 -Sensor. Die Luftqualität wird damit in jedem Raum der Raumgruppe erfasst.

Im Vergleich zu einer Einzelraumversorgung werden nachteilige systembedingte Überlüftungen einzelner Räume erwartet, welche aber geringer sind als bei einer Konstant-Volumenstromregelung. Sobald kein Raum der Raumgruppe seinen Auslegungsvolumenstrom benötigt, wird der Zuluftvolumenstrom der Raumgruppe angepasst. Außerdem wird der Komponentenaufwand gegenüber einer Einzelraumregelung reduziert. Daraus ergeben sich vorteilige Investitions- und Wartungskosten.

Die Schlechtraumregelung wird in Kapitel 5.2.1 (S.94) beschrieben und untersucht.

2.4.2 Mischkonzentrationsregelung (Regelung 2b)

Die Mischkonzentrationsregelung ähnelt der Schlechtraumregelung. Der Unterschied liegt in Anzahl und Position des Messfühlers zur Bestimmung der CO_2 -Konzentration, wie aus Abbildung 2.11 ersichtlich wird.

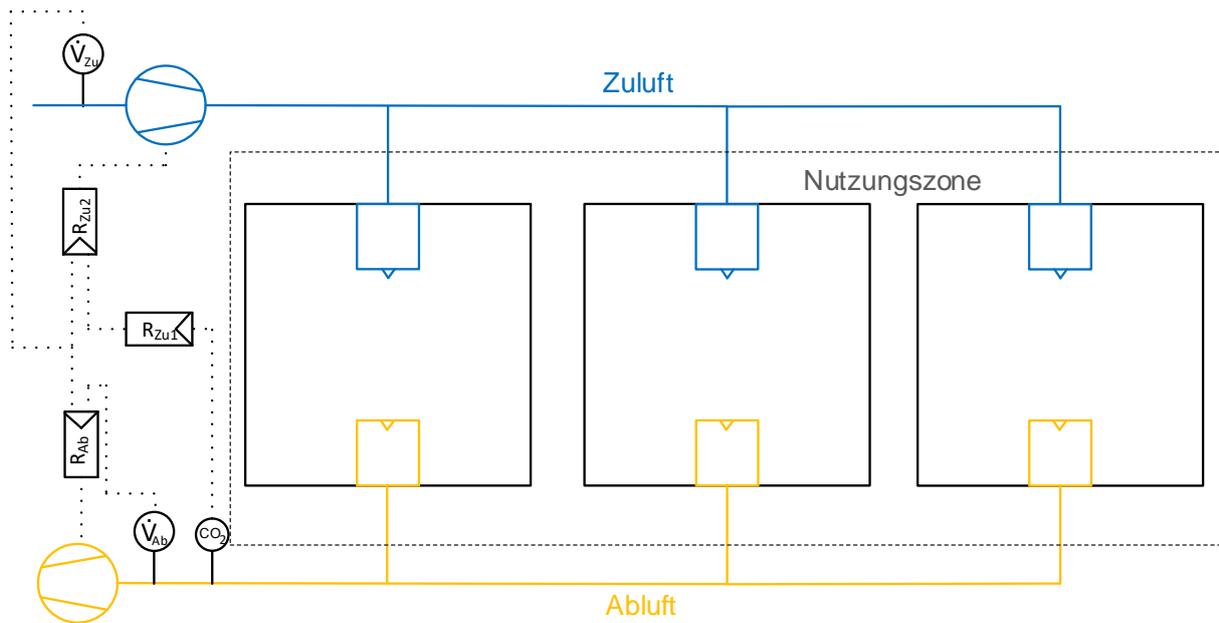


Abbildung 2.11: Schema der Raumgruppenversorgung mit Mischkonzentrationsregelung

In diesem Fall wird die CO_2 -Konzentration im gemeinsam durchströmten Abluftkanal gemessen und es ist nur ein CO_2 -Sensor je Raumgruppe notwendig. Es sind ebenfalls auf Zu- und Abluftseite dezentrale Ventilatoren mit Volumenstrommessungen vorhanden.

Ein zusätzlicher Vorteil gegenüber der Schlechtraumregelung ist die weitere Reduzierung der notwendigen Messtechnik und damit verbundenen geringere Investitions- und Wartungskosten. Auch werden nachteilige systembedingte Überlüftungen gegenüber einer Einzelraumregelung erwartet. Es wird überprüft, inwieweit die systembedingten Überlüftungen gegenüber einer Konstant-Volumenstromregelung mit dieser Regelung reduziert werden können.

Die Mischkonzentrationsregelung wird in Kapitel 5.2.2 (S.104) beschrieben und untersucht.

3 Werkzeuge zur Untersuchung des dVt-Systems

Die Untersuchungen des dVt-Systems erfolgen unter Nutzung dreier Werkzeuge. Diese sind:

- Simulationsrechnungen,
- RLT-Versuchsstand und
- Anwendungstest.

Über diese Werkzeuge werden sowohl theoretische als auch praktische Ergebnisse erzielt. Zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage werden die erstellten anlagentechnischen Umsetzungen des dVt-Systems und die entsprechenden Regelungen mittels Simulationsrechnungen und Anwendungstest untersucht. Die beiden anderen Forschungsfragen werden hauptsächlich mithilfe von analytischen Betrachtungen und des RLT-Versuchsstandes beantwortet. Im Folgenden werden die drei Werkzeuge vorgestellt.

3.1 Simulationsrechnungen

Anhand der Simulationsrechnungen werden die erstellten anlagentechnischen Umsetzungen des dVt-Systems an einer definierten Raumgruppe theoretisch untersucht. In mehreren Simulationsdurchläufen wird diese Raumgruppe über unterschiedliche Kanalnetze versorgt. Des Weiteren wird die Undichtigkeit der Gebäudehülle variiert. Aus den Ergebnissen dieser Simulationsrechnungen ergeben sich Einsatzrandbedingungen für die anlagentechnischen Umsetzungen.

Für die Untersuchungen werden Simulationsmodelle entwickelt und verwendet. Diese Modelle basieren auf der frei verfügbaren, objektorientierten Modelliersprache Modelica. Modelica-Modelle bestehen grundsätzlich aus physikalischen Gleichungen. Dabei muss die Anzahl der zur Verfügung stehenden Gleichungen der Anzahl der Unbekannten entsprechen, die Gleichungen müssen aber nicht nach den Unbekannten aufgelöst sein. Der Modelica-Übersetzer übersetzt die so erstellten Modelle in mathematische Modelle, welche dann simuliert werden können. Für die Modelliersprache Modelica existieren verschiedene Entwicklungs- und Simulationsumgebungen, in dieser Arbeit wird Dymola genutzt. Dymola bietet eine grafische Entwicklungsoberfläche, in welcher Einzelmodelle über Schnittstellen zu Gesamtmodellen verknüpft werden können. Über die Schnittstellen interagieren die Einzelmodelle miteinander. Zur Durchführung der Simulationen wird der in Dymola integrierte Standardlöser DASSL (Differential-Algebraic System Solver) verwendet. Dieser Löser wird in [Dr.-Ing. Felgner, Liu, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frey, G. Juni 2011] als effizientester der getesteten, in Dymola integrierten Löser beschrieben. Der DASSL-Löser erkennt sogenannte „Events“ und passt, um die vorgegebenen Gleichungen für das „Event“ zu lösen, die Simulationsschritte automatisch an. Ein „Event“ ist laut [Dr.-Ing. Felgner, Liu, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frey, G. Juni 2011] die Änderung des Wertes einer im Modell formulierten logischen Bedingung. Grundsätzlich werden 3500 Simulationsschritte eingestellt. Dies ist die Anzahl der Simulationsschritte, wenn während der Simulation kein „Event“ vorhanden ist. Die Anzahl der Simulationsschritte wird durch den Löser automatisch erhöht und kann zwischen den Simulationsmodellen, je nach Anzahl der „Events“, variieren.

3.1.1 Definition der Raumgruppe

Grundlegend wird eine Raumgruppe mit drei parallelen Zulufräumen untersucht. Die betrachtete Raumgruppe stellt damit nur einen Ausschnitt eines gesamten Gebäudes dar. Dies hat zur Folge, dass

auch die untersuchten anlagentechnischen Umsetzungen nur Ausschnitte einer kompletten Lüftungsanlage sind. Die Raumgruppe wird so definiert, dass verschiedene Raumgrößen abgedeckt werden. Aus verschiedenen Lastzuständen resultieren unterschiedliche Volumenströme und damit Druckverluste im gemeinsam durchströmten Kanal. Die Ventilatoren und deren Regelung müssen auf diese Veränderungen reagieren. Die Räume beeinflussen sich somit gegenseitig. Diese Raumgruppe erfüllt zwar nicht die von [Alsen 2017] abgeleiteten Empfehlungen zur Nutzung einer Raumgruppenversorgung, wird aber trotzdem zur Untersuchung aller anlagentechnischen Umsetzungen aus Kapitel 2 (S.8) genutzt. Dies gewährleistet die Vergleichbarkeit der Ergebnisse aller sechs erstellten anlagentechnischen Umsetzungen.

Die verwendeten Auslegungsparameter der drei Räume werden in Tabelle 3.1 aufgeführt.

Tabelle 3.1: Grundlegende Auslegungsparameter der simulierten Raumgruppe

	„Raum klein“	„Raum mittel“	„Raum groß“
Auslegungsvolumenstrom [m³/h]	200	500	6000
Nutzung [-]	Gruppenbüro	Besprechung, Sitzung, Seminar	Hörsaal
personenbezogener Mindestaußenluftvolumenstrom [m³/(h P)]	56	45	30
Maximale Personenanzahl [-]	3,57	11,11	200
CO₂-Grenzwert [ppm]	770	850	1050
Raumfläche [m²]	50	33,33	200
Grundlüftungsvolumenstrom (außerhalb der Nutzungszeit) [m³/h]	36	24	144
Luftwechselrate über Undichtigkeiten in der Gebäudehülle bei 50 Pa Druckdifferenz [h⁻¹]	0,6	0,7	0,28

Im Folgenden wird die Bestimmung der aufgeführten Auslegungsparameter der Raumgruppe in der aufgeführten Reihenfolge erläutert.

Die drei Räume werden in die von [Alsen 2017] verwendeten Volumenstromkategorien (siehe Auslegungsvolumenströme) eingruppiert. Dabei werden ein kleiner, ein mittlerer und ein großer Raum gewählt. Auch die zugehörigen Nutzungen aus der [DIN V 18599-10] sind aufgeführt.

Die personenbezogenen Mindestaußenluftvolumenströme unterscheiden sich je nach Nutzung. Sie berücksichtigen nicht nur die durch Personen verursachten Belastungen (CO₂), sondern auch Belastungen durch Luftverunreinigungen aufgrund von Bauteilen und Mobiliar. Diese Belastungen beziehen sich auf die Grundfläche und sind beim personenbezogenen Mindestaußenluftvolumenstrom den Personen zugeordnet. Bei einer Nutzung mit geringer Personenbelegungsdichte wird jeder Person eine größere Grundfläche zugeordnet als bei hoher Personenbelegungsdichte. Damit muss der personenbezogene

Mindestaußenluftvolumenstrom größer sein, um die entsprechenden Gebäudelasten zu berücksichtigen. Die [DIN V 18599-10] gibt personenbezogene Mindestaußenluftvolumenströme für verschiedene Nutzungen an. Für die Nutzung Gruppenbüro ist dies $40 \text{ m}^3/(\text{h P})$ und für die Nutzung Besprechung, Sitzung, Seminar $20 \text{ m}^3/(\text{h P})$. Diese werden für die angesprochenen Nutzungen als zu gering erachtet. Die in Tabelle 3.1 angegebenen personenbezogenen Mindestaußenluftvolumenströme werden aus dem Produkt des flächenbezogenen Mindestaußenluftvolumenstromes und der maximalen Personenbelegungsichte (mittel) errechnet.

$$\dot{V}_{Pers}^* = f_{A/p} \cdot \dot{V}_A \quad 3.1$$

\dot{V}_{Pers}^*	$[\text{m}^3/(\text{h P})]$	Personenbezogener Auslegungsvolumenstrom
$f_{A/p}$	$[\text{m}^2/\text{P}]$	Maximale Personenbelegungsichte nach [DIN V 18599-10] (mittel)
\dot{V}_A	$[\text{m}^3/(\text{h m}^2)]$	Flächenbezogener Mindestaußenluftvolumenstrom nach [DIN V 18599-10]

Beide Größen sind für die Nutzung Gruppenbüro und Besprechung, Sitzung, Seminar in der [DIN V 18599-10] angegeben. Die entstehenden Werte erscheinen sinnvoller. Für die Nutzung Hörsaal gibt die [DIN V 18599-10] keinen flächenbezogenen Mindestvolumenstrom an, deshalb wird direkt der personenbezogene Mindestaußenluftvolumenstrom aus der Norm verwendet. Dieser wird mit $30 \text{ m}^3/(\text{h P})$ als angemessen angesehen.

Die maximale Personenanzahl errechnet sich aus dem vorgegebenen Auslegungsvolumenstrom und dem personenbezogenen Mindestaußenluftvolumenstrom.

Die CO_2 -Grenzwerte sind in allen drei Räumen unterschiedlich und bilden jeweils den sich einstellenden stationären Zustand ab, wenn einer Person mit einer CO_2 -Emissionsrate von 18 l/h (entspricht sitzender Tätigkeit laut [VDI 4300-7]) der entsprechende personenbezogene Mindestaußenluftvolumenstrom der Nutzung zugeordnet wird. Dabei wird von einer konstanten CO_2 -Außenluftkonzentration von 450 ppm ausgegangen. Dies stellt eine Vereinfachung dar, da die CO_2 -Außenluftkonzentration laut [VDI 4300-7] zwischen 350 und 600 ppm liegen kann.

Die Raumfläche wird aus der maximalen Personenbelegungsichte der [DIN V 18599-10] Kategorie mittel und der maximalen Personenanzahl berechnet.

Der Grundlüftungsvolumenstrom resultiert aus dem Produkt von Raumfläche und dem Richtwert für Grundlüftung aus der [DIN EN 13779] von $0,2 \text{ l}/(\text{s m}^2)$. Dabei ist auffällig, dass der Grundlüftungsvolumenstrom des mittleren bzw. großen Raumes nur $4,8 \%$ bzw. $2,4 \%$ des entsprechenden Auslegungsvolumenstromes entspricht. Hier werden Probleme mit dem Regelbereich der Ventilatoren erwartet.

Für die Luftwechselraten über die Undichtigkeiten in der Gebäudehülle bei 50 Pa Druckdifferenz wird von zwei Wandflächen gegen Außenluft ausgegangen. „Raum klein“ und „Raum mittel“ haben eine Raumtiefe von 5 m . Bei „Raum groß“ mit einer Grundfläche von 200 m^2 wird eine Raumtiefe von 15 m angesetzt. Unter den Voraussetzungen, dass das Gebäude ein Nettoraumvolumen von größer 1500 m^3 und eine Gebäudedichtheit gemäß [DIN 4108-7] hat, gibt die [DIN V 18599-2] eine hüllflächenbezogene Luftdurchlässigkeit bei 50 Pa Druckdifferenz (q_{50}) von $2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ h})$ an. Über die Außenwandfläche kann so der Leckagevolumenstrom über Undichtigkeiten in der Gebäudehülle bei 50 Pa Druckdifferenz berechnet werden. Bei einer Raumhöhe von 3 m ergeben sich die angegebenen Luftwechselraten über die Gebäudehülle.

3.1.2 Definition von Kanalnetz und Undichtigkeiten der Gebäudehülle

Die Ausprägungen von Kanalnetz und Undichtigkeiten in der Gebäudehülle werden in Simulationsrechnungen variiert, um die anlagentechnischen Umsetzungen verschiedenen Bedingungen auszusetzen.

Die Parametervariationen beziehen sich auf:

- Geometrische Anordnung der Raumgruppe im Gebäude
- Symmetrie des Zu- und Abluftkanalnetzes
- Undichtigkeit der Gebäudehülle

Die geometrische Anordnung der Raumgruppe im Gebäude und die Symmetrie von Zu- und Abluftkanalnetz haben Auswirkungen auf die Länge und die Druckverluste des Kanalnetzes.

Die Undichtigkeit der Gebäudehülle hat Einfluss auf die Drucksituation im Raum. Bei sehr dichten Räumen können sich durch Disbalancen der mechanischen Lüftungsanlage hohe Über- bzw. Unterdrücke im Raum aufbauen. Bei sehr undichten Gebäuden kann je nach Drucksituation außerhalb des Gebäudes Luft über die Gebäudehülle in oder aus dem Raum strömen. Dies beeinflusst eventuell die Betriebspunkte der Ventilatoren.

In der Tabelle 3.2 werden die ausschlaggebenden Parameter der Variationen aufgelistet. In Grün sind die Veränderungen zur Parametervariation „Netz-mittel“ dargestellt.

Tabelle 3.2: Parametervariationen und die ausschlaggebenden Parameter

Parametervariation	$\Delta p_{R\text{klein}}$	$\Delta p_{R\text{mittel}}$	$\Delta p_{R\text{groß}}$	Δp_{gem}	Luftwechselrate über Gebäudehülle	Symmetrie
Netz-mittel	250 Pa	270 Pa	288 Pa	200 Pa		1
Netz-lang	350 Pa	370 Pa	384 Pa	300 Pa		1
Netz-kurz	150 Pa	170 Pa	192 Pa	100 Pa	Tabelle 3.1 (S.20)	1
Symmetrie-0,5	250 Pa	270 Pa	288 Pa	200 Pa		0,5
Symmetrie-1,5	250 Pa	270 Pa	288 Pa	200 Pa		1,5
Fenster offen	250 Pa	270 Pa	288 Pa	200 Pa	Fenster offen	1
n₅₀-0	250 Pa	270 Pa	288 Pa	200 Pa	0 h ⁻¹	1

Für die Parametervariationen wird von einer Lüftungsanlage mit zuluftseitigem Gesamtdruckverlust von 960 Pa ausgegangen. Dies entspricht dem in [DIN V 18599-7] angegebenen Standardwert. Außerdem führt die [DIN V 18599-7] den Standardwert für die Druckverhältniszahl von 0,4 ein. Damit weist die Lüftungszentrale einen Druckverlust von 576 Pa auf. Dieser Druckverlust wird nicht variiert. Da in den ersten Parametervariationen von einer symmetrischen Lüftungsanlage ausgegangen wird, sind die Druckverluste der Abluftseite mit denen der Zuluftseite identisch. Abbildung 3.1 zeigt die Zuluftseite der Lüftungsanlage mit den Räumen der Parametervariationen „Netz-kurz“, „Netz-mittel“ und „Netz-lang“, welche aber nur einzeln betrachtet werden. Somit sind für die Untersuchung der Parametervariation „Netz-kurz“ die Räume der Parametervariation „Netz-mittel“ und „Netz-lang“ nicht existent.

Dies gilt für die Untersuchungen der Parametervariationen „Netz-mittel“ und „Netz-lang“ entsprechend.

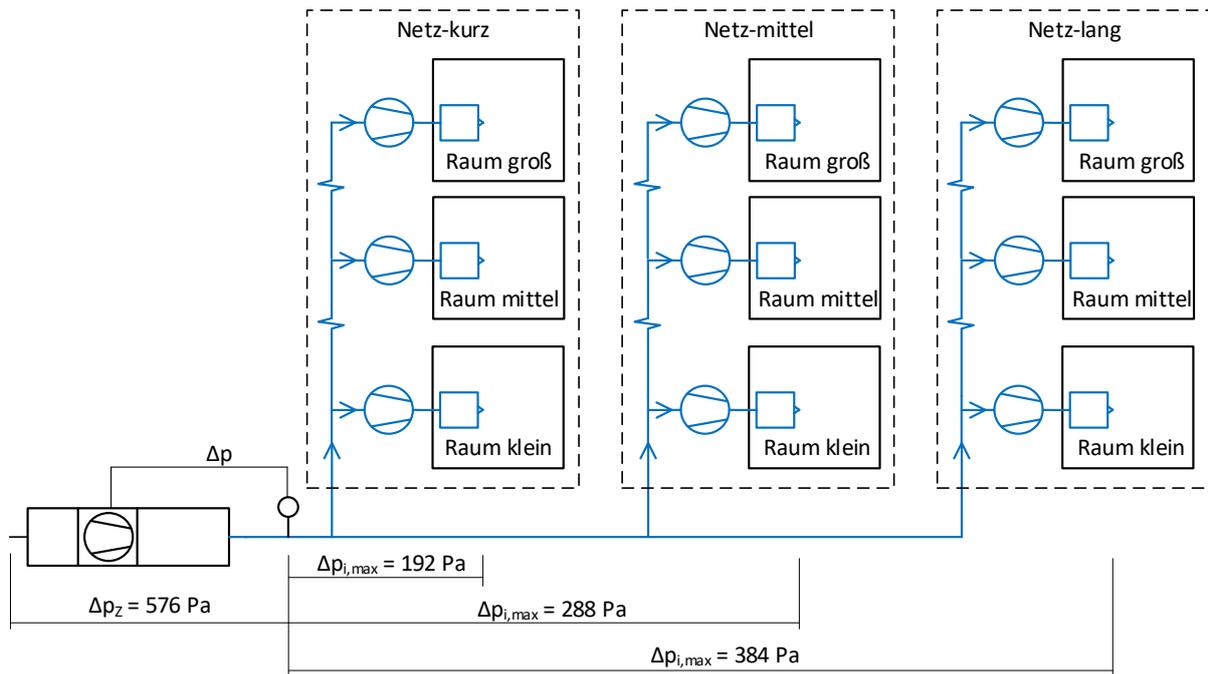


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der Lüftungsanlage zur Untersuchung der Varianten

Der Schlechtstrang der Raumgruppe in der Variation „Netz lang“ ist auch der Schlechtstrang der Lüftungsanlage und versorgt „Raum groß“. Über die Druckverhältniszahl von 0,4 wird ein Druckverlust von 384 Pa für diesen Strang bestimmt. „Raum groß“ hat in jeder Parametervariation den größten Druckverlust im Vergleich zu den anderen Räumen der Raumgruppe. Bei der Raumgruppe „Netz mittel“ beträgt dieser Druckverlust 75 %, bei „Netz kurz“ sind es 50 % des Druckverlustes des Schlechtstranges. Die Druckverluste der Stränge zu „Raum klein“ und „Raum mittel“ werden so gewählt, dass die Druckverluste zwischen den Räumen der Raumgruppe in allen Parametervariationen nahezu identisch sind. Somit bilden die ersten drei Parametervariationen unterschiedliche Positionen der betrachteten Raumgruppe im Gebäude ab. Dies wird auch an den unterschiedlichen Druckverlusten des gemeinsam durchströmten Kanalabschnittes (Δp_{gem}) deutlich. In der Parametervariation „Netz lang“ hat dieser Kanalabschnitt einen Druckverlust von 300 Pa, die Raumgruppe ist damit weit von der Lüftungszentrale entfernt. Bei der Parametervariation „Netz kurz“ befindet sich die Raumgruppe näher an der Lüftungszentrale, der Druckverlust des gemeinsam durchströmten Kanalabschnittes beträgt 100 Pa.

Für die Parametervariationen „Symmetrie 0,5“, „Symmetrie 1,5“, „Fenster offen“ und „n₅₀-0“ wird grundlegend von der Parametervariation „Netz mittel“ ausgegangen, wobei einzelne Parameter verändert werden.

In den Parametervariationen „Symmetrie 0,5“ und „Symmetrie 1,5“ werden die Druckverluste des Abluftkanalnetzes variiert. Bei der Parametervariation „Symmetrie 0,5“ entsprechen die Druckverluste der Abluftseite 50 % der Druckverluste der Zuluftseite. Die Parametervariation „Symmetrie 1,5“ untersucht eine Lüftungsanlage mit 1,5-fachem Druckverlust des Abluftkanalnetzes im Vergleich zum Zuluftkanalnetz.

Bei den zwei Parametervariationen „Fenster offen“ und „n₅₀-0“ wird ausschließlich die Dichtheit der Gebäudehülle variiert. Für „Fenster offen“ gilt für alle drei Räume, dass über die Gebäudehülle kein Strömungswiderstand vorhanden ist. In der Parametervariation „n₅₀-0“ wird von einer komplett dichten Gebäudehülle ausgegangen, somit ist die Luftwechselrate über die Gebäudehülle für alle drei Räume auf 0 h⁻¹ festgelegt. Im Gegensatz zu den restlichen Parametervariationen ist hier keine Luftströmung über die Gebäudehülle möglich.

3.1.3 Bewertung der Simulationsergebnisse

Für die Bewertung aller Simulationsergebnisse der in Kapitel 2 (S.8) erstellten anlagentechnischen Umsetzungen werden die Regelaufgaben der Ventilatoren in jeder Parametervariation (Tabelle 3.2 S.22) überprüft. Diese Regelaufgaben werden bereits in Kapitel 1.1 (S.2) beschrieben. Tabelle 3.3 gibt die Regelaufgaben der Ventilatoren an und nennt die Soll- bzw. Grenzwerte und den zugehörigen Istwert.

Tabelle 3.3: Regelaufgaben der Ventilatoren mit ihren Soll- bzw. Grenz- und Istwerten

Regelaufgabe	Ventilator	Sollwert oder Grenzwert	Istwert
Luftqualität	Dezentrale Zuluft	Grenzwert je nach Raum Tabelle 3.1 S.20	CO_2
Lüftung bei Personenabwesenheit		Sollwert je nach Raum Tabelle 3.1 S.20	\dot{V}_{Grund}
Luftbilanz zwischen Zu- und Abluft	Dezentrale Abluft	Sollwert = 0 m ³ /h	$\Delta\dot{V} = \dot{V}_{Zu} - \dot{V}_{Ab} $
Vordruck nach (Zuluft) bzw. vor (Abluft) der Lüftungszentrale	Zentral	Sollwert = 0 Pa	$p_{st,Zu}$ oder $p_{st,Ab}$

Prinzipiell gilt eine Regelaufgabe als erfüllt, wenn der Sollwert der betrachteten Regelaufgabe vom zugehörigen Istwert eingehalten bzw. der Grenzwert der betrachteten Regelaufgabe vom zugehörigen Istwert nicht überschritten wird. Entspricht der aktuelle Istwert dem vorgegebenen Sollwert nicht, kommt es zu Abweichungen. Der Istwert ist dann größer oder kleiner als der Sollwert. Es sind bestimmte Abweichungen von den Sollwerten und Überschreitungen der Grenzwerte zulässig. Diese zulässigen Abweichungen und Überschreitungen der einzelnen Soll- und Grenzwerte werden unter Tabelle 3.4 (S.26) erläutert.

Die Regelaufgaben werden für jede Parametervariation aus Tabelle 3.2 (S.22) in verschiedenen Zuständen überprüft. Können einzelne Regelaufgaben in bestimmten Parametervariationen nicht erfüllt werden, gibt dies Hinweise auf die Einsatzrandbedingungen der betrachteten anlagentechnischen Umsetzung. Um verschiedene Zustände zu erzeugen, werden für die drei Zulufräume aus Tabelle 3.1 (S.20) systematisierte Personenbelegungsprofile erstellt. Jedes Personenbelegungsprofil variiert zwischen 0 %, 50 % und 100 % relativer Personenbelegung, damit sind unter anderem die Extremzustände (nicht belegt und voll belegt) der einzelnen Räume abgebildet. Die einzelnen Profile werden in Abbildung 3.2 gezeigt und sind so aufgebaut, dass jeder der 27 möglichen Zustände während einer Simulation vorhanden ist.

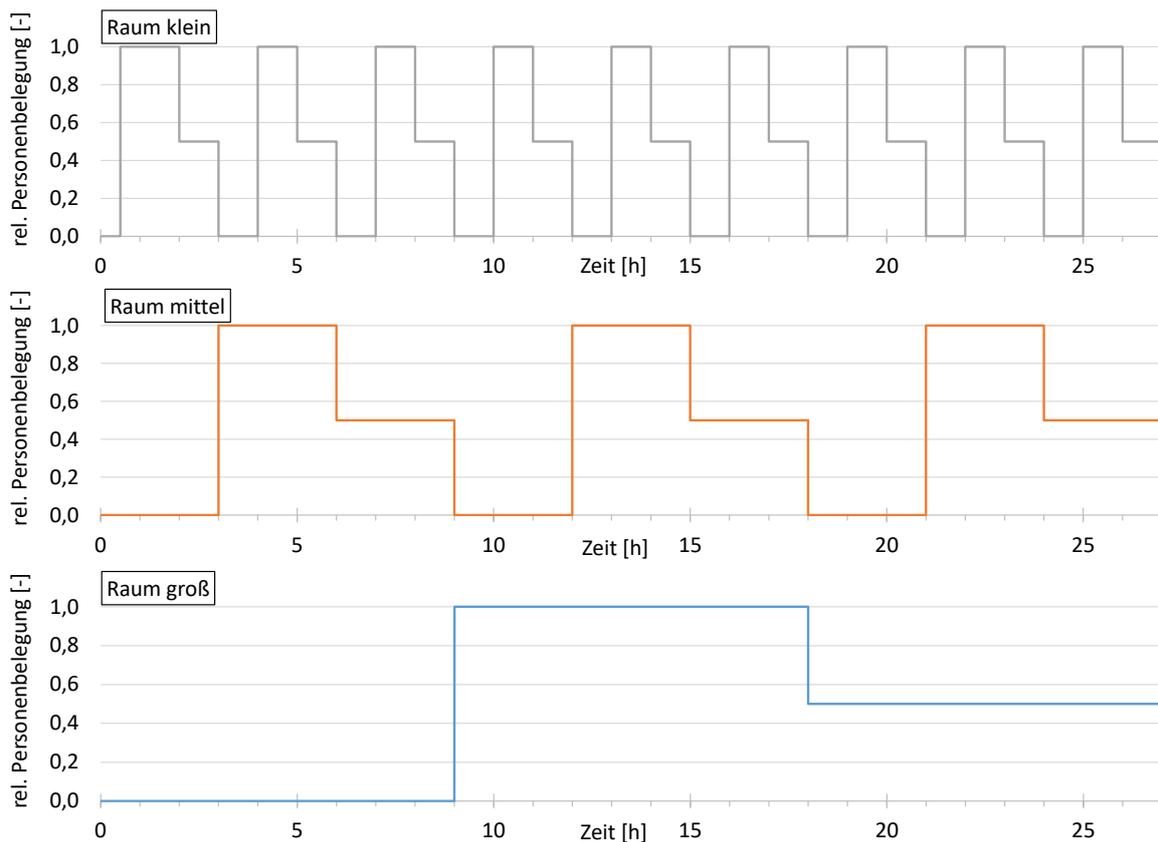


Abbildung 3.2: Relative Personenbelegung im zeitlichen Verlauf der drei Räume einer Raumgruppe

Jeder Zustand dauert 1 h an, innerhalb dieser Stunde wird ein stationärer Zustand erreicht. Ausnahmen bilden der erste und zweite Zustand von „Raum klein“. Diese dauern 0,5 h bzw. 1,5 h an. Der zweite Zustand wird hier verlängert, da die geringe absolute Personenbelegung und das dafür relativ große Raumvolumen von „Raum klein“ einen langsamen CO_2 -Anstieg verursachen und somit erst nach ca. 1 h der CO_2 -Grenzwert und damit der Auslegungsvolumenstrom von „Raum klein“ erreicht wird.

Eine Veränderung einer Personenbelegung hat Auswirkungen auf die Erfüllung der entsprechenden Regelaufgaben und damit auf alle Ventilatoren der Lüftungsanlage. Jede Person emittiert CO_2 und hat damit Einfluss auf die CO_2 -Konzentration C_{O_2} der Raumluft. Dies hat wiederum eine Veränderung des benötigten Zuluftvolumenstromes \dot{V}_{Zu} zur Folge, welcher vom dezentralen Zuluftventilator bereitgestellt wird. Der Abluftvolumenstrom \dot{V}_{Ab} muss aufgrund der Regelaufgabe des dezentralen Abluftventilators dem Zuluftvolumenstrom folgen. Somit muss auch der dezentrale Abluftventilator auf die Veränderung der Personenbelegung reagieren. Auch die Zentralventilatoren werden durch die Personenbelegung im Raum beeinflusst. Wird der Volumenstrom eines dezentralen Ventilators (Zuluft oder Abluft) verändert, ändert sich der geförderte Gesamtvolumenstrom in der Lüftungszentrale und die Druckverhältnisse im Kanalnetz ($p_{st,Zu}$ und $p_{st,Ab}$). Diese Zusammenhänge werden in Abbildung 3.3 verdeutlicht.

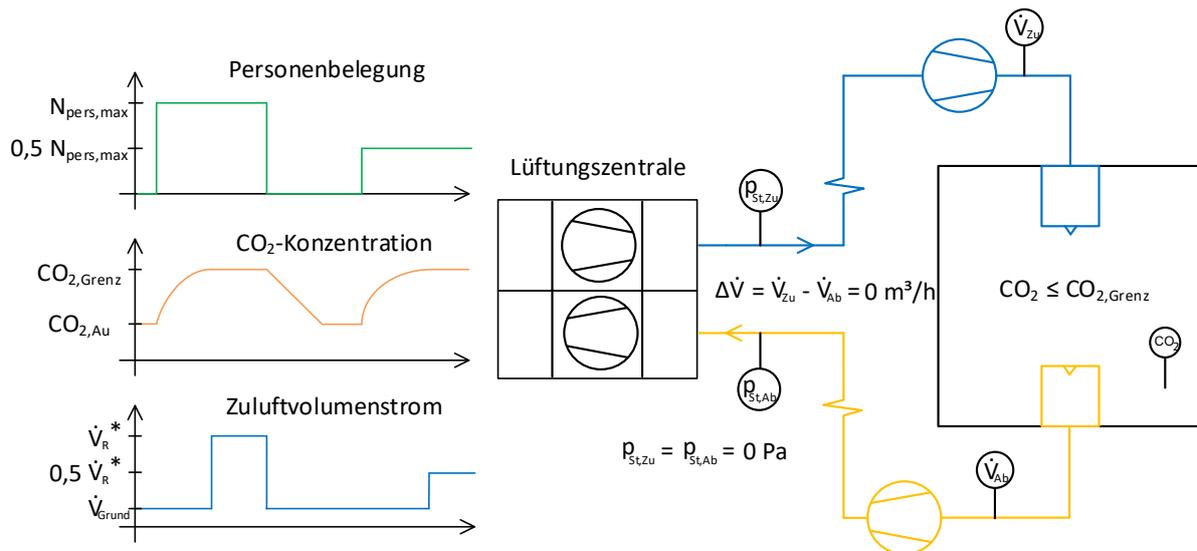


Abbildung 3.3: Schaubild zur Auswertung der Simulationsrechnungen

Für die übersichtliche Darstellung der Ergebnisse werden Tabellen erstellt. Im Tabellenkopf sind die zu bewertenden Größen der Regelaufgaben aus Tabelle 3.3 (S.24) aufgeführt. In den drei Zeilen darunter sind die Stränge, die entsprechenden Soll- bzw. Grenzwerte (Grün hinterlegt) der zu bewertenden Größe und die zulässigen Abweichungen aufgeführt. Die Stränge entsprechen den Räumen aus Tabelle 3.1 (S.20) und werden für die Darstellung der Ergebnisse abgekürzt. Dabei ist „Raum klein“ → Rk, „Raum mittel“ → Rm und „Raum groß“ → Rg. Bei der Regelaufgabe der Zentralventilatoren wird auf die Zuluft- und die Abluftseite einzeln eingegangen. In den Zeilen darunter werden die extremsten Istwerte der entsprechenden Regelaufgabe für die einzelnen Stränge bei eingestellter Parametervariation aus Tabelle 3.2 (S.22) eingetragen. Dies entspricht den Ergebnissen der Simulationsrechnung. In der ersten Spalte wird aufgeführt, um welche Parametervariation es sich handelt. Abweichungen bzw. Überschreitungen der Soll- bzw. Grenzwerte werden in Rot dargestellt.

Tabelle 3.4: Darstellung der Ergebnisse der Simulationsrechnungen der anlagentechnischen Umsetzungen

Stellglied	dezentraler Zuluftventilator			dezentraler Abluftventilator			Zentralventilatoren				
	CO ₂ -Konzentration [ppm]			Grundlüftung [%] $\frac{V_{Grund}}{V_R}$			Luftbilanz [%] $\frac{ V_{Zu} - V_{Ab} }{ V_{Zu} }$			Vordruck Zentrale [Pa]	
Stränge	Rk	Rm	Rg	Rk	Rm	Rg	Rk	Rm	Rg	Zuluft	Abluft
Grenz-/Sollwert	770	850	1050	18	4,8	2,4	0			0	
Zul. Abweichung	+ 50			± 5			+ 5			± 3	
Parametervariation aus Tabelle 3.2	Ergebnisse der einzelnen Stränge der entsprechenden Regelaufgabe bei eingestellter Parametervariation										

Im Folgenden werden die verwendeten Soll- bzw. Grenzwerte mit ihren zulässigen Abweichungen bzw. Überschreitungen der einzelnen Regelaufgaben erläutert. Grundlegend werden die angegebenen Soll-

bzw. Grenzwerte und deren zulässige Abweichungen angesetzt, da bei diesen Werten mit keinen negativen Auswirkungen auf den Nutzer, den Raum oder die Lüftungsanlage gerechnet wird.

Die CO₂-Grenzwerte der einzelnen Räume sind in Tabelle 3.1 (S.20) aufgeführt. Überschreitungen bis 50 ppm werden als akzeptabel betrachtet.

Auch die Sollwerte der Grundlüftung sind in Tabelle 3.1 (S.20) angegeben. Für die Auswertung der Simulationsrechnungen wird der Sollwert der Grundlüftung auf den Auslegungsvolumenstrom bezogen. Bei Personenabwesenheit wird der geförderte Zuluftvolumenstrom (Istwert), ebenfalls auf den Auslegungsvolumenstrom bezogen $\frac{\dot{V}_{Grund}}{\dot{V}_R^*}$, mit dem bezogenen Sollwert verglichen. Dies lässt einen Vergleich unter den Räumen zu. Des Weiteren kann eine Überschreitung des vorgegebenen Sollwertes festgestellt werden. Es sind Abweichungen bis 5 % zulässig. Dies entspricht dem Fehler einer üblichen Volumenstrommessung

Mit der Luftbilanz wird überprüft, ob sich die Zu- und Abluftvolumenströme eines Raumes gleichen oder ob Disbalancen entstehen. Da der Abluftvolumenstrom definitionsbedingt ein negatives Vorzeichen hat, werden die Beträge der Volumenströme subtrahiert. Die Differenz wird auf den geförderten Zuluftvolumenstrom bezogen, um verschiedene Zustände miteinander vergleichen zu können.

$$\frac{\Delta \dot{V}}{\dot{V}_{Zu}} = \frac{|\dot{V}_{Zu}| - |\dot{V}_{Ab}|}{|\dot{V}_{Zu}|} \quad 3.2$$

$\Delta \dot{V}$	[m ³ /h]	Differenz zwischen Zu- und Abluftvolumenstrom
\dot{V}_{Ab}	[m ³ /h]	Abluftvolumenstrom

Da es sich ebenfalls um Volumenstrommessungen handelt, werden wie bei der Grundlüftung Abweichungen von bis zu 5 % toleriert.

Für den Vordruck der Zentralventilatoren liegt der Sollwert bei 0 Pa gegen Umgebung, wie auch aus Tabelle 3.3 (S.24) hervorgeht. Es werden Abweichungen von bis zu 3 Pa akzeptiert. Auch dies liegt im Fehlerbereich von Drucksensoren.

3.1.4 Simulationsmodelle

Zur Untersuchung der anlagentechnischen Umsetzungen werden Simulationsmodelle für Raum, Kanalnetz, Ventilator und Regler benötigt. Die Einzelmodelle werden zu den anlagentechnischen Umsetzungen verknüpft. Abbildung 3.4 gibt einen Überblick über die Anordnung der Einzelmodelle für die Zuluft eines Raumes. Die Abluft ist analog aufgebaut.

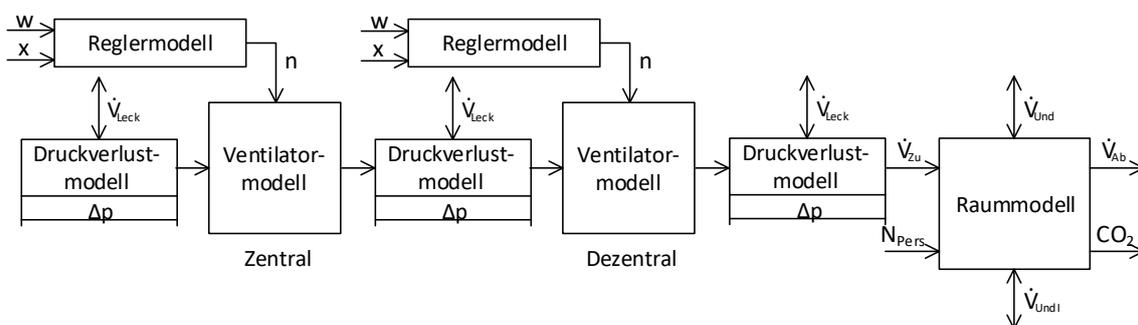


Abbildung 3.4: Übersicht der genutzten Simulationsmodelle zur Untersuchung der anlagentechnischen Umsetzungen für die Zuluftseite

Das Raummodell erstellt die CO₂-Bilanz (CO_2) und bildet Undichtigkeiten in der Gebäudehülle (\dot{V}_{Und} und \dot{V}_{Undl}) ab. Das Druckverlustmodell bildet das Kanalnetz ab und hat die Eigenschaften Druckverlust Δp und Leckage (\dot{V}_{Leck}). Der Druckverlust eines Stranges wird auf mehrere Druckverlustmodelle verteilt. Das Ventilatormodell wird genutzt, um sowohl die zentralen als auch dezentralen Ventilatoren abzubilden. Über die vom Reglermodell vorgegebene Drehzahl n wird der Betriebspunkt des Ventilators bestimmt. Das Reglermodell nimmt je nach Aufgabe einen Abgleich zwischen Sollwert w und Istwert x vor und erzeugt so die Drehzahlvorgabe.

Alle Modelle, welche die Strömung von Luft simulieren (Raum, Druckverlust und Ventilator), basieren auf Modellen der Modelica.Fluid-Bibliothek ([Modelica Association 2009]). Als strömendes Medium ist Luft verfügbar. Die Eigenschaften der Luft werden aus der Modelica.Media-Bibliothek ([Modelica Association 2005]) generiert, dabei wird das Modell „SimpleAir“ ([Modelica Association 2016b]) verwendet. Dieses Modell bildet ein ideales Gas ab. Des Weiteren werden Modelle der Modelica.Blocks-Bibliothek ([Martin Otter 2016]) verwendet.

Die Modelle Raum (Kapitel 3.1.4.1.2 und Kapitel 3.1.4.1.3) und Druckverlust (Kapitel 3.1.4.2.1 und Kapitel 3.1.4.2.2) verwenden das in der Modelica.Fluid-Bibliothek vorhandene Strömungsmodell „VolumeFlowRate“. In der Modellbeschreibung ([Modelica Association 2016a]) wird es zur Verwendung empfohlen, wenn geometrische Parameter wie Zeta-Wert, Rohrreibungsbeiwert, Länge und Durchmesser nicht bekannt sind. Das Modell verwendet eine lineare und quadratische Abhängigkeit von Druckverlust und Volumenstrom. Es wird davon ausgegangen, dass weder Masse noch Energie in der Komponente gespeichert werden. Der beschriebene Zusammenhang geht aus Gl. 3.3 hervor.

$$\Delta p = a \cdot \dot{V}^2 + b \cdot \dot{V} \quad 3.3$$

Δp	[Pa]	Druckverlust des Strömungsmodells
a	[Pa s ² /m ⁶]	Koeffizient a zur Abbildung des turbulenten Strömungsanteils
\dot{V}	[m ³ /s]	Volumenstrom des Strömungsmodells
b	[Pa s/m ³]	Koeffizient b zur Abbildung des laminaren Strömungsanteils

Dieser Zusammenhang wird in [Baumgartner u. a. 1989] zur Beschreibung von Luftströmungen durch Öffnungen angegeben. Die Gleichung enthält sowohl einen turbulenten Strömungsanteil ($a \cdot \dot{V}^2$) als auch einen laminaren Strömungsanteil ($b \cdot \dot{V}$) und kann somit verschiedene Strömungsformen abbilden. Die Koeffizienten a und b können der betrachteten Problemstellung entsprechend parametrisiert werden. Die gezeigte Berechnung wird für einen einfachen Fall (mehrere Werte für a , $b = 0$, Medium Luft) verifiziert. Diese Verifizierung ist in der Modellbeschreibung ([Modelica Association 2016a]) einsehbar.

Bei der Beschreibung der Modelle wird auf getroffene Vereinfachungen eingegangen. Anschließend werden die beschriebenen Modelle validiert.

3.1.4.1 Raummodell

Mit dem Raummodell werden die drei Zulufräume der verschiedenen anlagentechnischen Umsetzungen simuliert. Das Raummodell dient der Erstellung der CO₂-Bilanz.

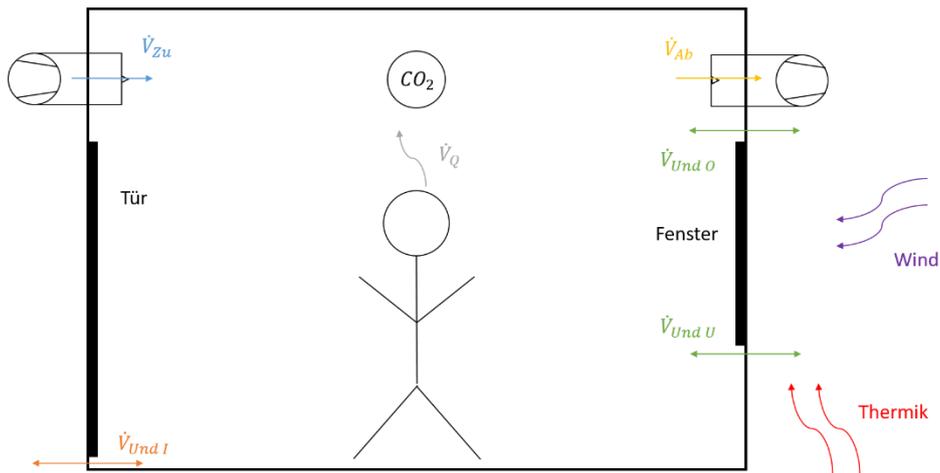


Abbildung 3.5: Skizze des Raummodells mit Einflussgrößen

Im Modell wird der Raum mit den Zu- (\dot{V}_{Zu}) und Abluftvolumenströmen (\dot{V}_{Ab}) der mechanischen Lüftungsanlage beaufschlagt. Außerdem bildet es Volumenströme über die Undichtigkeiten in der Gebäudehülle (\dot{V}_{UndU} und \dot{V}_{UndO}) und im Inneren des Gebäudes (\dot{V}_{UndI}) ab. Die restlichen Räume des Gebäudes werden nicht explizit oder nur stark vereinfacht betrachtet. Im Inneren des Raumes sind aus Vereinfachungsgründen keine Strömungswiderstände vorhanden. Die thermische Raumkonditionierung ist für die gegebenen Problemstellungen nicht von Interesse und wird vernachlässigt. Die jeweiligen Dichten von Luft und CO_2 werden vereinfachend als konstant angenommen.

3.1.4.1.1 CO_2 -Konzentration

Mit der zentralen Berechnung des Raummodells wird die CO_2 -Konzentration im Raum bestimmt. Dafür wird zunächst die CO_2 -Massenbilanz des Raumes gebildet. Diese ist in Abbildung 3.6 veranschaulicht.

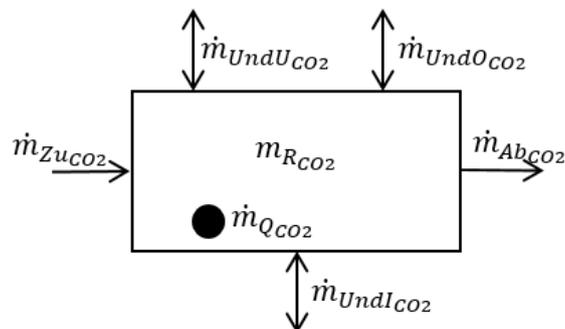


Abbildung 3.6: Darstellung der CO_2 -Massenbilanz des Raumes

Die Veränderung der CO_2 -Masse im Raum über einen bestimmten Zeitraum ist die Summe aus:

- Über Zuluft zugeführte CO_2 -Masse,
- über Abluft abgeführte CO_2 -Masse,
- über Undichtigkeiten in der Gebäudehülle transportierte CO_2 -Masse,
- über Undichtigkeiten im Inneren des Gebäudes transportierte CO_2 -Masse und
- durch Quellen im Raum eingebrachte CO_2 -Masse.

Dabei wird die CO₂-Masse über Undichtigkeiten in der Gebäudehülle auf den oberen und den unteren Bereich der Fassade aufgeteilt. Somit ergibt sich die CO₂-Massenbilanz über eine bestimmte Zeitspanne (t_0 bis t_1) zu:

$$dm_{RCO_2} = \int_{t_0}^{t_1} (\dot{m}_{ZuCO_2} + \dot{m}_{AbCO_2} + \dot{m}_{UndU_{CO_2}} + \dot{m}_{UndO_{CO_2}} + \dot{m}_{UndI_{CO_2}} + \dot{m}_{Q_{CO_2}}) \cdot dt \quad 3.4$$

m_{RCO_2}	[kg]	CO ₂ -Masse im Raum
\dot{m}_{ZuCO_2}	[kg/s]	Über Zuluft zugeführter CO ₂ -Massenstrom
\dot{m}_{AbCO_2}	[kg/s]	Über Abluft abgeführter CO ₂ -Massenstrom
$\dot{m}_{UndU_{CO_2}}$	[kg/s]	Über Undichtigkeiten im unteren Bereich der Gebäudehülle transportierter CO ₂ -Massenstrom
$\dot{m}_{UndO_{CO_2}}$	[kg/s]	Über Undichtigkeiten im oberen Bereich der Gebäudehülle transportierter CO ₂ -Massenstrom
$\dot{m}_{UndI_{CO_2}}$	[kg/s]	Über interne Undichtigkeiten im Inneren des Gebäudes transportierter CO ₂ -Massenstrom
$\dot{m}_{Q_{CO_2}}$	[kg/s]	Durch Quellen im Raum entstehender CO ₂ -Massenstrom

Für sehr kleine Zeitspannen ist die CO₂-Massenbilanz damit:

$$\frac{\Delta m_{RCO_2}}{\Delta t} = \dot{m}_{ZuCO_2} + \dot{m}_{AbCO_2} + \dot{m}_{UndU_{CO_2}} + \dot{m}_{UndO_{CO_2}} + \dot{m}_{UndI_{CO_2}} + \dot{m}_{Q_{CO_2}} \quad 3.5$$

Δt [s] Betrachtete Zeitspanne

Die CO₂-Masse bzw. der CO₂-Massenstrom kann prinzipiell über die Dichte von CO₂ und das CO₂-Volumen bzw. den CO₂-Volumenstrom ersetzt werden.

$$m_{CO_2} = \rho_{CO_2} \cdot V_{CO_2} \quad 3.6$$

$$\dot{m}_{CO_2} = \rho_{CO_2} \cdot \dot{V}_{CO_2} \quad 3.7$$

m_{CO_2}	[kg]	CO ₂ -Masse
ρ_{CO_2}	[kg/m ³]	Dichte von CO ₂
V_{CO_2}	[m ³]	CO ₂ -Volumen
\dot{m}_{CO_2}	[kg/s]	CO ₂ -Massenstrom
\dot{V}_{CO_2}	[m ³ /s]	CO ₂ -Volumenstrom

Durch Ersetzen von CO₂-Masse und CO₂-Massenstrom durch Dichte von CO₂ und das CO₂-Volumen bzw. den CO₂-Volumenstrom nach Gl. 3.6 und Gl. 3.7 und unter der Annahme einer einheitlichen Dichte von CO₂ entsteht:

$$\frac{\Delta V_{RCO_2}}{\Delta t} = \dot{V}_{ZuCO_2} + \dot{V}_{AbCO_2} + \dot{V}_{UndU_{CO_2}} + \dot{V}_{UndO_{CO_2}} + \dot{V}_{UndI_{CO_2}} + \dot{V}_{Q_{CO_2}} \quad 3.8$$

V_{RCO_2}	[m ³]	CO ₂ -Volumen im Raum
\dot{V}_{ZuCO_2}	[m ³ /s]	Über Zuluft zugeführter CO ₂ -Volumenstrom
\dot{V}_{AbCO_2}	[m ³ /s]	Über Abluft abgeführter CO ₂ -Volumenstrom
$\dot{V}_{UndU_{CO_2}}$	[m ³ /s]	Über Undichtigkeiten im unteren Bereich der Gebäudehülle transportierter CO ₂ -Volumenstrom
$\dot{V}_{UndO_{CO_2}}$	[m ³ /s]	Über Undichtigkeiten im oberen Bereich der Gebäudehülle transportierter CO ₂ -Volumenstrom
$\dot{V}_{UndI_{CO_2}}$	[m ³ /s]	Über interne Undichtigkeiten im Inneren des Gebäudes transportierter CO ₂ -Volumenstrom
$\dot{V}_{Q_{CO_2}}$	[m ³ /s]	Durch Quellen im Raum entstehender CO ₂ -Volumenstrom

In dem Raummodell sind die reinen CO₂-Volumen bzw. CO₂-Volumenströme nicht bekannt, sondern nur die Volumenströme der Zuluft, der Abluft und über die Undichtigkeiten in der Gebäudehülle bzw. im Inneren des Gebäudes. Diese Volumenströme sind ein Mischgas aus verschiedensten Bestandteilen.

CO₂ ist nur ein Bestandteil dieses Gases. Wie groß dieser Bestandteil ist, wird über die CO₂-Konzentration angegeben. Für das Raumvolumen gilt dasselbe.

$$V_{CO_2} = \sigma_{CO_2} \cdot V \quad 3.9 \qquad \dot{V}_{CO_2} = \sigma_{CO_2} \cdot \dot{V} \quad 3.10$$

V_{CO_2}	[m ³]	CO ₂ -Volumen
σ_{CO_2}	[ppm]	CO ₂ -Konzentration
V	[m ³]	Luftvolumen
\dot{V}_{CO_2}	[m ³ /s]	CO ₂ -Volumenstrom
\dot{V}	[m ³ /s]	Luftvolumenstrom

Durch Einsetzen von Gl. 3.9 und Gl. 3.10 in Gl. 3.11 entsteht:

$$\frac{\Delta \sigma_{RCO_2} \cdot V_R}{\Delta t} = \sigma_{ZuCO_2} \cdot \dot{V}_{Zu} + \sigma_{AbCO_2} \cdot \dot{V}_{Ab} + \sigma_{UndU CO_2} \cdot \dot{V}_{UndU} + \sigma_{UndO CO_2} \cdot \dot{V}_{UndO} + \sigma_{UndI CO_2} \cdot \dot{V}_{UndI} + \sigma_{Q CO_2} \cdot \dot{V}_Q \quad 3.11$$

σ_{RCO_2}	[ppm]	CO ₂ -Konzentration in der Raumluft
V_R	[m ³]	Raumluftvolumen
σ_{ZuCO_2}	[ppm]	CO ₂ -Konzentration in der Zuluft
\dot{V}_{Zu}	[m ³ /s]	Zuluftvolumenstrom
σ_{AbCO_2}	[ppm]	CO ₂ -Konzentration in der Abluft
\dot{V}_{Ab}	[m ³ /s]	Abluftvolumenstrom
$\sigma_{UndU CO_2}$	[ppm]	CO ₂ -Konzentration in der Luft über Undichtigkeiten im unteren Bereich der Gebäudehülle
\dot{V}_{UndU}	[m ³ /s]	Luftvolumenstrom über Undichtigkeiten im unteren Bereich der Gebäudehülle
$\sigma_{UndO CO_2}$	[ppm]	CO ₂ -Konzentration in der Luft über Undichtigkeiten im oberen Bereich der Gebäudehülle
\dot{V}_{UndO}	[m ³ /s]	Luftvolumenstrom über Undichtigkeiten im oberen Bereich der Gebäudehülle
$\sigma_{UndI CO_2}$	[ppm]	CO ₂ -Konzentration in der Luft über interne Undichtigkeiten innerhalb des Gebäudes
\dot{V}_{UndI}	[m ³ /s]	Luftvolumenstrom über interne Undichtigkeiten innerhalb des Gebäudes
$\sigma_{Q CO_2}$	[ppm]	CO ₂ -Konzentration in der Luft durch CO ₂ -Quellen
\dot{V}_Q	[m ³ /s]	Luft durch CO ₂ -Quellen

Das Raumluftvolumen ist konstant und kann durch Division auf die rechte Seite der Gleichung gebracht werden.

$$\frac{\Delta \sigma_{RCO_2}}{\Delta t} = \sigma_{ZuCO_2} \cdot \frac{\dot{V}_{Zu}}{V_R} + \sigma_{AbCO_2} \cdot \frac{\dot{V}_{Ab}}{V_R} + \sigma_{UndU CO_2} \cdot \frac{\dot{V}_{UndU}}{V_R} + \sigma_{UndO CO_2} \cdot \frac{\dot{V}_{UndO}}{V_R} + \sigma_{UndI CO_2} \cdot \frac{\dot{V}_{UndI}}{V_R} + \sigma_{Q CO_2} \cdot \frac{\dot{V}_Q}{V_R} \quad 3.12$$

Für das Raummodell wird festgelegt, dass ein positiver Volumenstrom in den Raum hineinströmt und ein negativer aus dem Raum herausströmt. Somit bewirkt ein negativer Volumenstrom eine Verringerung und ein positiver Volumenstrom eine Erhöhung der CO₂-Konzentration.

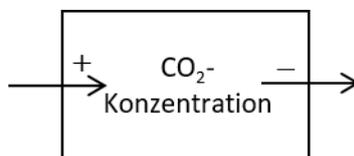


Abbildung 3.7: Einfluss der Strömungsrichtung auf die CO₂-Konzentration der Raumluft

Unter der Annahme einer ideal durchmischten Raumluft werden den Volumenströmen folgende CO₂-Konzentrationen zugeordnet.

Tabelle 3.5: CO₂-Konzentrationen der Volumenströme

Volumenstrom	CO ₂ -Konzentration
Zuluftvolumenstrom \dot{V}_{Zu}	Außenluft
Abluftvolumenstrom \dot{V}_{Ab}	Raumluft
Luftvolumenstrom über Undichtigkeiten im unteren Bereich der Gebäudehülle \dot{V}_{UndU}	Je nach Strömungsrichtung Außen- oder Raumluft
Luftvolumenstrom über Undichtigkeiten im oberen Bereich der Gebäudehülle \dot{V}_{UndO}	Je nach Strömungsrichtung Außen- oder Raumluft
Luftvolumenstrom über interne Undichtigkeiten innerhalb des Gebäudes \dot{V}_{UndI}	Raumluft

Für die CO₂-Konzentration der Luft, welche über Undichtigkeiten innerhalb des Gebäudes strömt, wird für beide Strömungsrichtungen vereinfachend die CO₂-Konzentration der Raumluft angesetzt. Diese Vereinfachung wird getroffen, da das Restgebäude über einen angrenzenden Raum nur ganz stark vereinfacht simuliert und somit keine CO₂-Konzentration der Mischluft berechnet wird. Die Verwendung der CO₂-Konzentration der Raumluft stellt eine plausible Näherung dar.

Die internen CO₂-Quellen können für den Anwendungsfall genau definiert werden. Im Raum anwesende Personen stellen die CO₂-Quellen dar. Der durch Personen abgegebene CO₂-Volumenstrom \dot{V}_Q wird anhand der Personenanzahl und der CO₂-Emission einer Person ermittelt.

$$\dot{V}_{Q_{CO_2}} = N_{R,Pers} \cdot \dot{V}_{CO_2_{Pers}} \quad 3.13$$

$N_{R,Pers}$	[-]	Absolute Personenanzahl des Raumes
$\dot{V}_{CO_2_{Pers}}$	[m ³ /s]	CO ₂ -Emission einer Person

Die CO₂-Emission einer Person ist ein wählbarer Parameter. Laut [VDI 4300-7] produziert und emittiert eine Person bei sitzender Tätigkeit 15 l/h bis 20 l/h CO₂. Für die gegebenen Nutzungen wird von einer sitzenden Tätigkeit ausgegangen. Somit wird im Raummodell eine CO₂-Emission einer Person von 18 l/h hinterlegt. Da es sich bei der CO₂-Emission einer Person um reines CO₂ handelt, beträgt die CO₂-Konzentration 1.000.000 ppm. Die aktuelle Personenanzahl wird wie folgt festgelegt:

$$N_{R,Pers} = N_{R,Pers}^* \cdot f_{R,Pers,rel} \quad 3.14$$

$N_{R,Pers}^*$	[-]	Personenanzahl des Raumes im Auslegungszustand
$f_{R,Pers,rel}$	[%]	Relative Personenbelegung des Raumes

Die relative Personenbelegung unterscheidet sich je nach hinterlegtem Nutzungsprofil und variiert zwischen 0 und 100 % der maximalen Personenanzahl des Raumes (Abbildung 3.2 S.25).

3.1.4.1.2 Undichtigkeit in der Gebäudehülle

Das verwendete Raummodell bildet die Volumenströme, welche über die Gebäudehülle hinein- oder hinausströmen, ab. Diese Volumenströme sind abhängig vom Strömungswiderstand der Gebäudehülle und den herrschenden Drucksituationen auf der Hüllfläche des betrachteten Raumes. Die Simulation erfolgt durch jeweils eine Öffnung im unteren und eine Öffnung im oberen Bereich. Dies erfolgt, weil

sich die Strömungsrichtungen des Volumenstromes über Undichtigkeiten aufgrund der thermischen Auftriebsdrücke vom oberen zum unteren Teil der Hüllfläche unterscheiden können. Es wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die Undichtigkeiten in der Gebäudehülle homogen auf die komplette Hüllfläche verteilt sind. Damit wird für die Undichtigkeit im oberen Bereich 50 % der Hüllfläche angesetzt. Gleiches gilt für den unteren Bereich der Hüllfläche. Abbildung 3.8 zeigt im Schnitt, wie die simulierten Öffnungen auf der Hüllfläche verteilt sind.

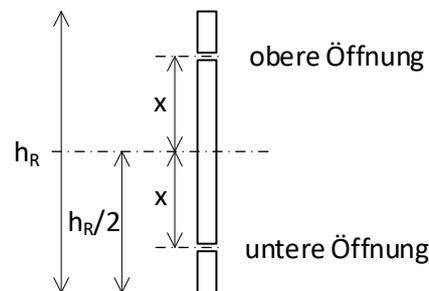


Abbildung 3.8: Verteilung der simulierten Öffnungen auf die Hüllfläche

Beide Öffnungen liegen im selben Abstand zur halben Raumhöhe $\frac{h_R}{2}$. Dabei liegt die untere Öffnung bei $\frac{h_R}{2} - x$ und die obere Öffnung bei $\frac{h_R}{2} + x$. x beträgt in den Simulationsrechnungen 1 m. Bei einer Raumhöhe von 3 m liegt die untere Öffnung damit bei 0,5 m und die obere bei 2,5 m Höhe.

Strömungswiderstand der Gebäudehülle

Für den Volumenstrom über die Gebäudehülle wird jeweils das bereits beschriebene Strömungsmodell „VolumeFlowRate“ mit dem Zusammenhang aus Gl. 3.3 (S.28) zwischen Volumenstrom und Druckverlust verwendet. In [Baumgartner u. a. 1989] wird außer diesem Ansatz auch der Zusammenhang aus Gl. 3.15 für die Luftströmung durch Öffnungen angegeben:

$$\dot{V} = k_{Und} \cdot \Delta p^{n_{Und}} \quad 3.15$$

k_{Und}	[m ³ /(sPa ⁿ)]	Durchflusskoeffizient der Undichtigkeiten
n_{Und}	[-]	Strömungsexponent der Undichtigkeiten

Mit diesem Ansatz kann der Durchflusskoeffizient der Undichtigkeit bestimmt werden.

$$k_{Und} = \frac{\dot{V}_{50}}{\Delta p_{50}^{n_{Und}}} \quad 3.16$$

\dot{V}_{50}	[m ³ /s]	Volumenstrom über Undichtigkeiten bei 50 Pa Druckdifferenz
Δp_{50}	[Pa]	Druckdifferenz von 50 Pa

[Baumgartner u. a. 1989] gibt an, dass für Undichtigkeiten der Gebäudehülle häufig ein Strömungsexponent von 2/3 verwendet wird, somit wird von einer Mischströmung mit turbulentem und laminarem Anteil ausgegangen. Der Volumenstrom über die Undichtigkeiten bei 50 Pa Druckdifferenz kann je nach Außenwandfläche des Raumes berechnet werden.

$$\dot{V}_{50} = q_{50} \cdot A_{Fassade} \quad 3.17$$

q_{50}	[m ³ /(m ² s)]	Hüllflächenbezogene Luftdurchlässigkeit bei 50 Pa Druckdifferenz
$A_{Fassade}$	[m ²]	Außenwandfläche

Die [DIN V 18599-2] gibt für Gebäude mit einem Nettoraumvolumen von größer 1500 m³, einer Gebäudedichtheit gemäß der [DIN 4108-7] und raumluftechnischer Anlage eine erforderliche hüllflächenbezogene Luftdurchlässigkeit bei 50 Pa Druckdifferenz von 2m³/(m² h) an.

Nach der Bestimmung des Durchflussexponenten der Leckage über Gl. 3.16 und Gl. 3.17 werden in Gl. 3.15 verschiedene Volumenströme eingesetzt und der zugehörige Druckverlust berechnet. Die entstandenen Wertepaare aus Druckverlust und Volumenstrom ermöglichen die Bildung einer quadratischen Regression und somit die Ermittlung der Koeffizienten a und b aus Gl. 3.3 (S.28).

Drucksituation auf der Hüllfläche

Die Drucksituation auf der Hüllfläche ist laut [Baumgartner u. a. 1989] abhängig von den natürlichen Einflüssen Wind und Thermik. Der absolute Druck, welcher auf die Öffnungen wirkt, errechnet sich somit zu:

$$p_o = p_{atm} - \frac{\Delta p_T}{2} + \Delta p_W \quad 3.18$$

$$p_U = p_{atm} + \frac{\Delta p_T}{2} + \Delta p_W \quad 3.19$$

p_o	[Pa]	Absoluter Druck obere Öffnung außerhalb des Raumes
p_U	[Pa]	Absoluter Druck untere Öffnung außerhalb des Raumes
p_{atm}	[Pa]	Atmosphärischer absoluter Druck
Δp_W	[Pa]	Druckdifferenz aufgrund von Wind zum atmosphärischen Druck
Δp_T	[Pa]	Druckdifferenz aufgrund von Thermik zum atmosphärischen Druck

Die absoluten Drücke der unteren und oberen Öffnung unterscheiden sich im Vorzeichen der Druckdifferenz aufgrund von Thermik, dies wird in den unterschiedlichen Höhen der Öffnungen begründet.

Der Thermikeffekt entsteht laut [Baumgartner u. a. 1989] durch die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft. Ist die Innenlufttemperatur höher als die Außenlufttemperatur, strömt Luft durch die unteren Öffnungen ein und über die oberen aus. Das bedeutet, an der unteren Öffnung entsteht ein Unterdruck und an der oberen Öffnung ein Überdruck im Raum. Zwischen Unter- und Überdruckbereich bildet sich eine neutrale Zone aus. [Baumgartner u. a. 1989] gibt Gl. 3.20 zur Berechnung der Druckdifferenz aufgrund von Thermik an.

$$\Delta p_T = \rho_N \cdot T_N \cdot g \cdot \Delta h \cdot \left(\frac{1}{T_{Au}} - \frac{1}{T_I} \right) \quad 3.20$$

ρ_N	[kg/m ³]	Dichte von Luft bei Normbedingungen
T_N	[K]	Temperatur bei Normbedingungen
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
Δh	[m]	Höhendifferenz zwischen den Öffnungen
T_{Au}	[K]	Außentemperatur
T_I	[K]	Innentemperatur

Unter der Voraussetzung, dass sich die neutrale Zone genau in der Mitte zwischen unterer und oberer Öffnung befindet, werden 50 % der Druckdifferenz aufgrund von Thermik der oberen und 50 % der unteren Öffnung zugeordnet. Damit Luft über die obere Öffnung ausströmt, muss dort der absolute Druck außerhalb des Raumes kleiner sein als innerhalb des Raumes. Deshalb erhält die Druckdifferenz

durch Thermik in Gl. 3.18 ein negatives Vorzeichen. Für die untere Öffnung (Gl. 3.19) wird analog ein positives Vorzeichen verwendet. Für die Druckunterschiede durch Thermik wird von einer Innentemperatur von 20°C und einer Außentemperatur von -10°C ausgegangen. Bei einer Raumhöhe von 3 m sind diese trotz der großen Temperaturdifferenz relativ gering.

Wesentlich größere Druckunterschiede können durch Wind hervorgerufen werden. Wird ein Körper angeströmt bzw. umströmt, entstehen an den verschiedenen Seiten des Körpers Über- bzw. Unterdruckbereiche. Die dadurch hervorgerufene Druckdifferenz beschreibt [Baumgartner u. a. 1989] mit Gl. 3.21.

$$\Delta p_W = C \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_W^2 \quad 3.21$$

C	[-]	Winddruckbeiwert
ρ	[kg/m ³]	Dichte der Luft

Der Winddruckbeiwert berücksichtigt die Anströmung des Windes auf die betrachtete Hüllfläche. Darauf haben der Anströmwinkel und die Anströmrichtung des Windes auf das Gebäude einen Einfluss. Des Weiteren geht die Abschirmung des Gebäudes durch zum Beispiel andere Gebäude über den Winddruckbeiwert in die Berechnung ein.

[Baumgartner u. a. 1989] weist ausdrücklich auf die Verwendung der korrekten Windgeschwindigkeit hin. Im Normalfall muss für die Bestimmung der Windgeschwindigkeit auf Daten einer Wetterstation zurückgegriffen werden. Die Bedingungen an der Wetterstation unterscheiden sich aber von denen des betrachteten Gebäudes. Deshalb gibt [Baumgartner u. a. 1989] Gl. 3.22 zur Korrektur der an der Wetterstation gemessenen Geschwindigkeit an.

$$v_W = K \cdot h_{ref}^a \cdot v_{W_m} \quad 3.22$$

K	[m ^{-a}]	Parameter der Oberflächenrauigkeit
h_{ref}	[m]	Referenzhöhe (Gebäudehöhe)
a	[-]	Parameter der Oberflächenrauigkeit
v_{W_m}	[m/s]	Mittlere Windgeschwindigkeit bei der Wetterstation

Für die in [Baumgartner u. a. 1989] erläuterte Berechnungsmethode soll als Referenzhöhe die Gebäudehöhe angesetzt werden, d.h. die Windgeschwindigkeit ist über die komplette Gebäudehöhe konstant. Dies stellt eine Vereinfachung der Problematik dar, welche getroffen wird, um die Handhabbarkeit des Modells zu gewährleisten. Die mittlere Windgeschwindigkeit bei der Wetterstation beträgt für die Simulationsrechnungen 6 m/s und der Wind strömt parallel zur Fassade. Die Parameter K und a werden in [Baumgartner u. a. 1989] für unterschiedliche Grade der Umgebungsbebauung angegeben. Für die Simulationsrechnungen wird vom Extremfall einer ungeschützten Fassade im offenen, flachen Gelände ausgegangen.

Tabelle 3.6: Geländekoeffizienten [Baumgartner u. a. 1989]

Geländekoeffizienten	K	α
offenes, flaches Gelände	0,68	0,17
Landschaft mit einzelnen Hindernissen	0,52	0,20
Stadt	0,35	0,25
City	0,21	0,33

Unter den aufgeführten Randbedingungen entsteht ein Unterdruck von ca. 20 Pa auf der Fassade. Dieser Unterdruck aufgrund von Wind wird über die gesamte Simulation konstant gehalten, um eine Art stationären Extremzustand abzubilden.

3.1.4.1.3 Undichtigkeit im Inneren des Gebäudes

Auch die Undichtigkeiten innerhalb des Gebäudes werden vereinfachend betrachtet. Diese bilden die Volumenströme des betrachteten Raumes zu einem unmittelbar angrenzenden fiktiven Raum (zum Beispiel Flur) ab. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Räume im selben Geschoss befinden und die Geschossdecken keine Undichtigkeiten aufweisen. Die Undichtigkeit im Inneren des Gebäudes soll dem Raum lediglich die Möglichkeit bieten, dessen Innendruck durch Zu- oder Abströmen von Luft auszugleichen.

Im Folgenden werden die Strömungswiderstände zum angrenzenden Raum und der dort herrschende absolute Druck betrachtet. Der Strömungswiderstand wird durch ein Überströmelement definiert.

Strömungswiderstand des Überströmelementes

Für die folgenden Betrachtungen wird für das Überströmelement von einem Türspalt ausgegangen. Der Türspalt ist laut [Pfluger u. a. 2013] das am häufigsten verwendete Überströmelement. In [Pfluger u. a. 2013] wird der Zusammenhang aus Gl. 3.23 zwischen Volumenstrom und Druckverlust über ein Überströmelement angegeben.

$$\dot{V}_{Ueber} = k_{Ueber} \cdot (\Delta p_{Ueber})^{n_{Ueber}} \quad 3.23$$

\dot{V}_{Ueber}	[m ³ /h]	Volumenstrom über das Überströmelement
k_{Ueber}	[m ³ /(hPa ⁿ)]	Durchflusskoeffizient des Überströmelementes
Δp_{Ueber}	[Pa]	Druckverlust über das Überströmelement
n_{Ueber}	[-]	Strömungsexponent des Überströmelementes

Dieser Ansatz entspricht dem aus Gl. 3.15 (S.33) und kann somit auf den von [Baumgartner u. a. 1989] zurückgeführt werden. Somit kann hier dasselbe Strömungswiderstandsmodell wie für die Undichtigkeiten in der Gebäudehülle (Gl. 3.3 S.28) verwendet werden.

[Pfluger u. a. 2013] gibt außerdem einen messtechnisch bestimmten Zusammenhang für den Durchflusskoeffizienten k_{Ueber} und den Strömungsexponent n_{Ueber} an.

$$k_{Ueber} = (c \cdot h_{Türspalt} + d) \cdot l_{Türspalt} \cdot N_{Türspalt} \quad 3.24 \quad n_{Ueber} = \frac{A}{h - B} + 0,5 \quad 3.25$$

c	[-]	Parameter
$h_{Türspalt}$	[mm]	Höhe des Türspaltes
d	[-]	Parameter
$l_{Türspalt}$	[m]	Länge des Türspaltes (Breite der Tür)
$N_{Türspalt}$	[-]	Anzahl der Türspalte (Anzahl der Türen)
A	[-]	Parameter
B	[-]	Parameter

Aus dem Strömungsexponenten n_{Ueber} kann die Art der Strömung abgeleitet werden. Für einen Türspalt werden in [Pfluger u. a. 2013] die Parameter $A = 0,12$ und $B = 1,17$ bestimmt. Bei einer Türspalthöhe von 15 mm ergibt sich ein Strömungsexponent n von 0,5087. Die Strömung über einen solchen Türspalt kann deshalb näherungsweise als rein turbulent betrachtet werden. Somit entfällt der lineare Anteil ($b \cdot \dot{V}$) der Gl. 3.3 (S.28). Für kleinere Türspalthöhen kann sich eine laminare oder eine Mischströmung einstellen, dann darf der lineare Teil der Gl. 3.3 (S.28) nicht vernachlässigt werden.

Durch Gleichstellen von Gl. 3.3 (S.28) und Gl. 3.23 ergibt sich Gl. 3.26.

$$\Delta p_{Ueber} = \frac{1}{k_{Ueber}} \cdot \dot{V}_{Ueber}^2 = a \cdot \dot{V}_{Ueber}^2 \quad 3.26$$

Daraus wird deutlich, dass der im Strömungsmodell verwendete Koeffizient a mit dem Kehrwert des in [Pfluger u. a. 2013] eingeführten Durchflusskoeffizienten k_{Ueber} zusammenhängt.

Drucksituation im angrenzenden Raum

Im angrenzenden Raum herrscht über die gesamte Simulationszeit aus Vereinfachungsgründen atmosphärischer Druck, um das Zu- bzw. Abströmen zu einem neutralen Druckniveau zu ermöglichen.

3.1.4.2 Druckverlustmodell

Das Druckverlustmodell bildet das Kanalnetz ab und berücksichtigt die Eigenschaften Druckverlust und Leckage.

3.1.4.2.1 Druckverlust des Kanalnetzes

Das verwendete Modell berücksichtigt Druckverluste durch Rohrreibung und Druckverluste durch Einbauten. Die Berechnung des Gesamtdruckverlusts ist in Gl. 3.27 angegeben.

$$\Delta p_{Ges} = \Delta p_{Rohr} + \Delta p_{Ein} \quad 3.27$$

Δp_{Ges}	[Pa]	Gesamtdruckverlust
Δp_{Rohr}	[Pa]	Druckverlust durch Rohrreibung
Δp_{Ein}	[Pa]	Druckverlust durch Einbauten

Dies ist ein üblicher Ansatz für die Druckverlustberechnung in der Lüftungstechnik [Hörner, Schmidt 2011]. Die Druckverluste der Einbauten enthalten in diesem Fall die Druckverluste der Einzelwiderstände und der Apparate.

Zur Abbildung der Druckverluste durch Rohrreibung und durch Einbauten wird für die Simulationen ebenfalls das Strömungsmodell „VolumeFlowRate“ (S. 28) verwendet, mit dem in Gl. 3.3 (S. 28) gezeigten Zusammenhang. Hierbei werden zwei dieser Modelle in Reihe geschaltet und der Gesamtdruckverlust auf beide Modelle aufgeteilt. Die Aufteilung erfolgt so, dass zwischen den Modellen der über den betrachteten Kanalabschnitt mittlere Druck vorliegt. An dieser Stelle wird das Modell zur Berücksichtigung der Leckage des Kanalnetzes angebunden. Der Aufbau ist anhand von Abbildung 3.9 zu erkennen.

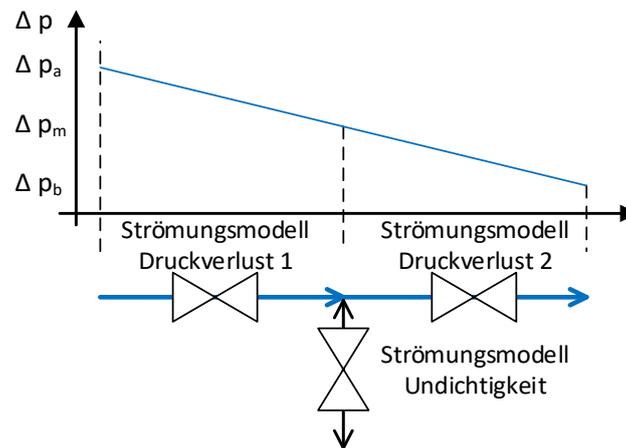


Abbildung 3.9: Prinzipieller Druckverlauf des Druckverlustmodells

Die in [Hörner, Schmidt 2011] verwendete Ansätze zur Bestimmung der Druckverluste durch Rohrreibung und zur Bestimmung der Druckverluste durch Einbauten sind folgende:

$$\Delta p_{Rohr} = \lambda \cdot \frac{l_{Kanal}}{d_{Kanal}} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \quad 3.28$$

$$\Delta p_{Ein} = \sum \zeta \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \quad 3.29$$

λ	[-]	Rohrreibungsbeiwert
l_{Kanal}	[m]	Länge des betrachteten Kanalabschnittes
d_{Kanal}	[m]	Durchmesser des betrachteten Kanalabschnittes
ρ	[kg/m ³]	Dichte der Luft
v	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeit
ζ	[-]	Widerstandsbeiwert

Damit ergibt sich für die Berechnung des Gesamtdruckverlustes Gl. 3.30:

$$\Delta p_{Ges} = \left(\lambda \cdot \frac{l_{Kanal}}{d_{Kanal}} \cdot \frac{\rho}{2} + \sum \zeta \cdot \frac{\rho}{2} \right) \cdot v^2 \quad 3.30$$

Durch Verwendung der Kontinuitätsgleichung kann die Strömungsgeschwindigkeit durch Volumenstrom und Kanalquerschnitt ersetzt werden [Ihle, Bader, Golla c 2008].

$$v = \frac{\dot{V}}{A} \quad 3.31$$

\dot{V}	[m ³ /s]	Volumenstrom
A	[m ²]	Querschnittsfläche

Durch Ersetzen der Strömungsgeschwindigkeit mit Gl. 3.31 in Gl. 3.30 entsteht Gl. 3.32.

$$\Delta p_{Ges} = \left(\lambda \cdot \frac{l_{Kanal}}{d_{Kanal}} \cdot \frac{\rho}{2 \cdot A^2} + \sum \zeta \cdot \frac{\rho}{2 \cdot A^2} \right) \cdot \dot{V}^2 \quad 3.32$$

Es ist erkennbar, dass ein quadratischer Zusammenhang zwischen Druckverlust und Volumenstrom vorhanden ist und eine ausschließlich turbulente Strömung angenommen wird.

Aufgrund der in Gl. 3.32 verwendeten turbulenten Strömungsform kann der zweite Summand der Gl. 3.3 (S. 28) bei beiden Strömungsmodellen der Druckverluste vernachlässigt werden. Damit ist der Koeffizient $b = 0$. Für einen betrachteten Kanalabschnitt sind bei konstanter Temperatur der Rohrreibungsbeiwert, die Länge, der Durchmesser, der Widerstandsbeiwert, die Dichte und die Querschnittsfläche konstant und können zum Koeffizienten a aus Gl. 3.3 (S. 28) zusammengefasst werden.

$$a = \left(\lambda \cdot \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \cdot \frac{\rho}{A^2} \quad 3.33$$

Bei Kenntnis von Druckverlust und Volumenstrom im Auslegungszustand kann somit der Koeffizient a bestimmt werden.

3.1.4.2.2 Leckage des Kanalnetzes

Zur Abbildung der Leckagen des Kanalnetzes wird ebenfalls das „VolumeFlowRate“ Modell verwendet (Gl. 3.3 S. 28). Dieses wird zwischen den Druckverlustmodellen durch Rohrreibung und Einbauten angebunden (Abbildung 3.9), sodass je nach Drucksituation Luft über den Druckverlust der Undichtigkeit strömt.

Der Leckagevolumenstrom einer Luftleitung wird laut der [DIN EN 15242] mit Gl. 3.34 bestimmt.

$$\dot{V}_{Leck} = A_{Kanal} \cdot k_{Leck} \cdot \Delta p_m^{0,65} \quad 3.34$$

\dot{V}_{Leck}	[m ³ /s]	Leckagevolumenstrom
A_{Kanal}	[m ²]	Mantelfläche des Kanals
k_{Leck}	[m ³ /(s m ²)]	Durchflusskoeffizient der Leckage (Luftdichtheit der Luftleitung)
Δp_m	[Pa]	Mittlerer Differenzdruck zwischen Luftleitung und Umgebung

Anhand des Strömungsexponenten von 0,65 wird deutlich, dass hier eine Mischströmung aus turbulenter und laminarer Strömung vorliegt. Für einen gegebenen Kanalabschnitt sind die Mantelfläche und der Durchflusskoeffizient der Leckage konstant. Dieser Durchflusskoeffizient wird für vier verschiedene Klassen in [DIN EN 13779] vorgegeben. Laut [DIN EN 15242] kann der mittlere Druck mit Gl. 3.35 berechnet werden.

$$\Delta p_m = \left(\frac{1}{2} \cdot \Delta p_a^{0,65} + \frac{1}{2} \cdot \Delta p_b^{0,65} \right)^{\frac{1}{0,65}} \quad 3.35$$

Δp_a	[Pa]	Differenzdruck zwischen Luftleitung und Umgebung an Punkt a
Δp_b	[Pa]	Differenzdruck zwischen Luftleitung und Umgebung an Punkt b

Zur Bestimmung der Koeffizienten a und b aus Gl. 3.3 (S. 28) wird bei vorgegebenem Druckverlust der Leckagevolumenstrom \dot{V}_{Leck} nach Gl. 3.34 bestimmt. Mit den entstehenden Wertepaaren (Druckverlust, Leckagevolumenstrom) lässt sich eine Regression bilden, aus welcher die Koeffizienten a und b ableitbar sind.

3.1.4.3 Ventilatormodell

Das verwendete Ventilatormodell ist Bestandteil der Modelica.Fluid-Bibliothek ([Modelica Association 2009]). Dort wird es als Pumpenmodell beschrieben, welches die Proportionalitätsgesetze zugrunde legt. Diese werden laut [Hörner, Schmidt 2011] zur Abbildung der Zusammenhänge von Drehzahl zu gefördertem Volumenstrom, Druckerhöhung und hydraulischer Leistung eines Ventilators genutzt. Durch Auswahl von Luft als gefördertes Medium ist dieses Modell zur Abbildung der Ventilatoren geeignet.

$$\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad 3.36 \qquad \frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \quad 3.37 \qquad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^3 \quad 3.38$$

n_1	[min ⁻¹]	Drehzahl 1
n_2	[min ⁻¹]	Drehzahl 2
\dot{V}_1	[m ³ /s]	Volumenstrom bei Drehzahl 1
\dot{V}_2	[m ³ /s]	Volumenstrom bei Drehzahl 2
Δp_1	[Pa]	Druckerhöhung bei Drehzahl 1
Δp_2	[Pa]	Druckerhöhung bei Drehzahl 2
P_1	[W]	hydraulische Leistung des Ventilators bei Drehzahl 1
P_2	[W]	hydraulische Leistung des Ventilators bei Drehzahl 2

Dem Modell werden durch die Parametrierung die Maximaldrehzahl und die maximale Kennlinie, welche für einen Ventilator konstant sind, vorgegeben. Ein externes Signal gibt die aktuelle Drehzahl vor und über die Proportionalitätsgesetze wird der aktuelle Betriebspunkt über Interaktion mit dem Druckverlustmodell bestimmt. Die vorgegebene Drehzahl kann nur zwischen der Minimaldrehzahl und der Maximaldrehzahl des verwendeten Ventilators liegen.

3.1.4.4 Reglermodell

Die Reglermodelle basieren auf der Modelica.Blocks-Bibliothek ([Martin Otter 2016]). Der schematische Wirkungsplan zeigt die prinzipielle Funktion eines Reglers.

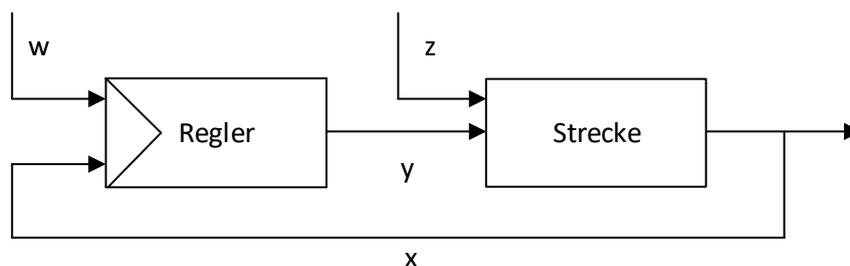


Abbildung 3.10: Schematischer Wirkungsplan einer Regelung

Es sind der Regler und die zu regelnde Strecke mit ihren entsprechenden Eingangs- und Ausgangsgrößen zu sehen. Ein Regler dient der Erfüllung seiner Regelaufgabe in dem er, je nach Abweichung der Regelgröße x vom Sollwert w , die Stellgröße y verändert. Abweichungen werden durch Störgrößen z hervorgerufen. Die Strecke ist je nach Regelaufgabe eine andere, aber beinhaltet im vorliegenden Fall den Ventilator als Stellglied.

Die Stellgröße y ist bei einem Ventilator ein Spannungssignal. Dieses Spannungssignal ist proportional zur Drehzahl. Bei Ventilatoren entsprechen 1 V üblicherweise der minimalen Drehzahl und 9,7 V der maximalen Drehzahl. Da das Ventilatormodell die Drehzahl benötigt, wird diese im Reglermodell aus dem Spannungssignal direkt berechnet.

$$n = \frac{(y - 1V) \cdot (n_{max} - n_{min})}{9,7V - 1V} + n_{min} \quad 3.39$$

n	[min ⁻¹]	Drehzahl
y	[V]	Spannungssignal
n_{max}	[min ⁻¹]	Maximaldrehzahl
n_{min}	[min ⁻¹]	Minimaldrehzahl

Das Reglermodell gibt also keine Spannung, sondern eine Drehzahl aus.

Im dVt-System müssen verschiedene Regelaufgaben (Tabelle 3.3 S.24) erfüllt werden. Es werden P-Regler und PI-Regler verwendet, welche die entsprechenden Stellgrößen erzeugen.

3.1.5 Validierung der Simulationsmodelle

Eine Validierung überprüft, ob das Modell den abgebildeten realen Prozess beschreiben kann. Die verwendeten Validierungsverfahren sind empirische Validierungen. Für die Validierungen werden die Ergebnisse der Simulationsrechnungen mit Messungen am RLT-Versuchsstand (Kapitel 3.2 S.43) verglichen. Es wird überprüft, ob das Teillastverhalten der Simulationsmodelle dem realen Teillastverhalten der Komponenten entspricht. Dabei wird explizit das Teillastverhalten des Druckverlustmodells (Kapitel 3.1.4.2) und des Ventilatormodells (Kapitel 3.1.4.3) untersucht.

3.1.5.1 Überprüfung Ventilatormodell

Zur Überprüfung des Teillastverhaltens des Ventilatormodells werden Ventilator Kennlinien am RLT-Versuchsstand messtechnisch aufgenommen und mit simulierten verglichen. Betrachtet wird der Zuluftventilator von Raum 1 (Typ: K3G-175-RC05-03) des RLT-Versuchsstandes (Kapitel 3.2 S.43). Insgesamt werden fünf Messreihen erhoben. Diese Messreihen unterscheiden sich durch die Druckverluste des Kanalnetzes, welche durch die vorhandenen Irisblenden im Einzelstrang und im Hauptstrang (Abbildung 3.14 S. 44) angepasst werden. Dem Ventilator werden pro Messreihe fünf verschiedene Stellsignale vorgegeben, welche konstanten Drehzahlen entsprechen.

Tabelle 3.7: Stellsignale und zugehörige Drehzahlen zur Validierung des Ventilatormodells

Stellsignal [V]	10	8	6	4	2
Drehzahl [min ⁻¹]	3733	3237	2479	1687	915

Daraus resultieren fünf Ventilator Kennlinien, welche mit jeweils fünf Betriebspunkten (Volumenstrom und Druckerhöhung) erfasst werden.

Dem Simulationsmodell werden die maximale Drehzahl des Ventilators und die zugehörige Ventilator-kennlinie vorgegeben. Des Weiteren werden die zu überwindenden Druckverluste der verschiedenen Messreihen entsprechend dem RLT-Versuchsstand parametrisiert. Während der Simulationsrechnung werden dem Ventilatormodell die Drehzahlen aus Tabelle 3.7 aufgeprägt, sodass auch aus der Simulationsrechnung fünf Ventilator-kennlinien mit je fünf Betriebspunkten hervorgehen. Abbildung 3.11 zeigt sowohl die gemessenen als auch die simulierten Ventilator-kennlinien.

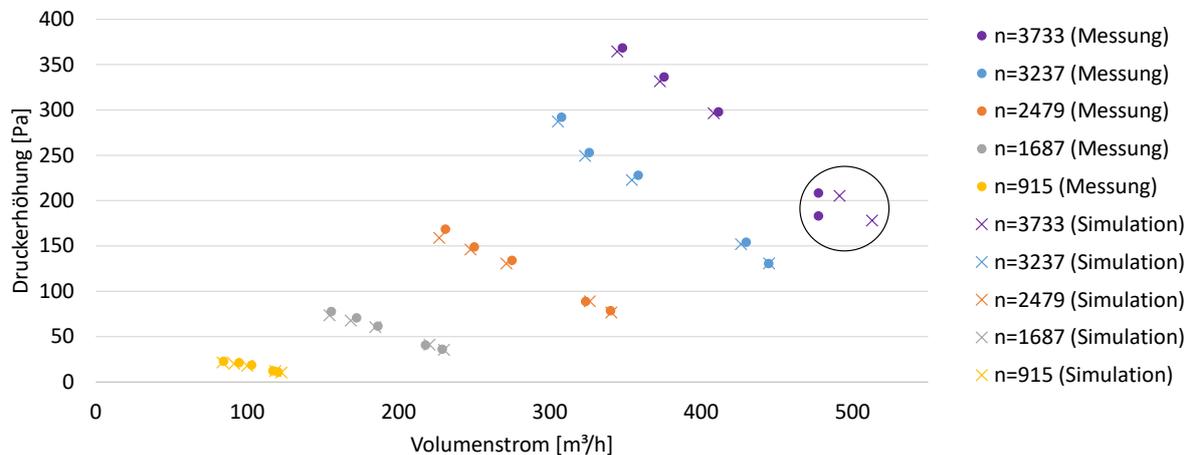


Abbildung 3.11: Ventilator-kennlinien von Simulation und Messung

Es ist prinzipiell zu erkennen, dass sich die Betriebspunkte der Ventilator-kennlinien von Simulation und Messung mit geringen Abweichungen decken. Lediglich die markierten Betriebspunkte weisen deutlichere Abweichungen zwischen Simulation und Messung auf. Grund dafür ist der Messbereichsendwert der Volumenstrommessung am RLT-Versuchsstand. Dieser liegt bei ca. 477 m³/h. Die Volumenströme der angesprochenen Betriebspunkte sind größer als der Messbereichsendwert und können deshalb am RLT-Versuchsstand nicht mehr messtechnisch erfasst werden. Die Druckerhöhungen der betroffenen Betriebspunkte stimmen aber gut überein. Es ist davon auszugehen, dass bei geeigneter Volumenstrommessung die Betriebspunkte eine ähnliche Deckung zwischen Simulation und Messung aufweisen wie die restlichen dargestellten Betriebspunkte.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Teillastverhalten eines Ventilators mit dem verwendeten Ventilatormodell mit hinreichender Genauigkeit abgebildet werden kann.

3.1.5.2 Überprüfung Druckverlustmodell

Das Teillastverhalten des Druckverlustmodells wird über die Anlagenkennlinien überprüft. Dafür werden am RLT-Versuchsstand (Kapitel 3.2 S.43) verschiedene Anlagenkennlinien erzeugt und überprüft, ob diese mit dem Druckverlustmodell (Kapitel 3.1.4.2 S.37) in der Simulationsrechnung reproduziert werden können. Als Eingabe erhält das Druckverlustmodell den Auslegungspunkt (Volumenstrom, Druckverlust) der am RLT-Versuchsstand erzeugten Anlagenkennlinie.

Tabelle 3.8: Auslegungspunkte der Anlagenkennlinien

	Raum 1	Raum 2	Raum 3
Volumenstrom [m³/h]	470	132	180
Druckverlust [Pa]	185	220	137

Die Auslegungspunkte werden an den drei Zuluftsträngen des RLT-Versuchsstandes erzeugt, indem die Irisblenden eingestellt und die Ventilatoren mit maximaler Drehzahl arbeiten.

Während des Validierungsprozesses wird der Volumenstrom über die Ventilatoren kontinuierlich reduziert. So werden verschiedene Teillastzustände erzeugt. Die entstehenden Anlagenkennlinien von Simulation und Messung sind in Abbildung 3.12 beispielhaft für Raum 1 zu sehen. Entsprechende Abbildungen für Raum 2 und Raum 3 sind in Anhang 9.1 (S.134).

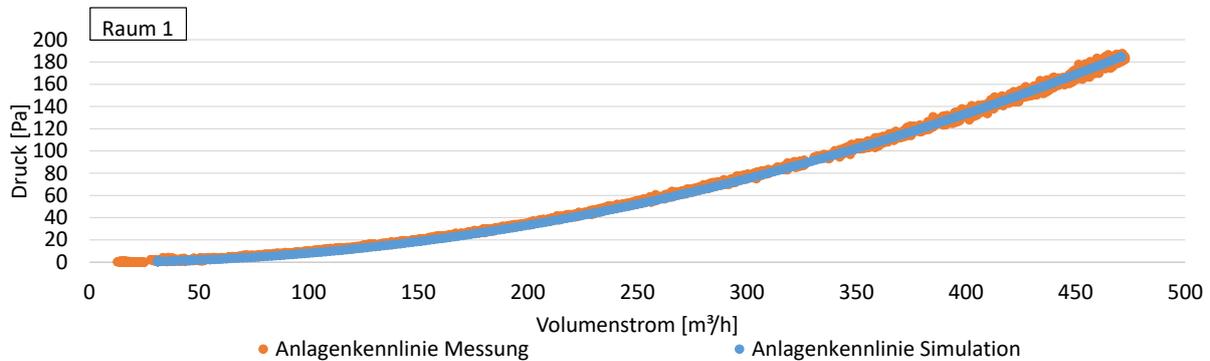


Abbildung 3.12: Anlagenkennlinien von Simulation und Messung von Raum1

Es wird deutlich, dass alle drei Anlagenkennlinien mittels Simulationsrechnungen reproduziert werden können. Das Druckverlustmodell bildet das reale Teillastverhalten gut ab.

3.2 RLT-Versuchsstand

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Forschungsprojektes: „Dezentrale Ventilatoren in zentralen raumlufttechnischen Anlagen“ unter der Leitung des Fachgebietes TGA der Universität Kassel wird eine Lüftungsanlage im Labormaßstab erstellt und betreut. Diese Lüftungsanlage wird RLT-Versuchsstand genannt. Am RLT-Versuchsstand erfolgt die Untersuchung des dVt-Systems unter Laborbedingungen. Laborbedingungen bedeuten dabei, dass verschiedene Eigenschaften wie Volumenstrom und Druckverlust des Kanalnetzes definiert vorgegeben werden können. Es ist keine Möglichkeit der Vorgabe von realen Raumlasten vorhanden. Die Vorgabe von Raumlasten kann theoretisch über ein Raummodell erfolgen. Der RLT-Versuchsstand dient der Validierung der Simulationsmodelle, der Überprüfung von strömungstechnischen Besonderheiten des dVt-Systems und dem prinzipiellen Vergleich von dVt-System und VSR-System. Auch in der Arbeit von [Alsen 2017] wird dieser RLT-Versuchsstand genutzt, um zum Beispiel die Validierung von Leistungsberechnungen für das dVt-System durchzuführen.

3.2.1 Beschreibung des RLT-Versuchsstandes

Teile des RLT-Versuchsstandes werden bereits in [Alsen, Klimmt, Knissel 2016] beschrieben. Abbildung 3.13 zeigt Bilder des RLT-Versuchsstandes.



Abbildung 3.13: Bilder des RLT-Versuchsstandes links das modulare Zentralgerät und rechts die Verteilung der Luft

Auf dem linken Bild sind das modulare Zentralgerät und einer von drei Strängen zu sehen. Dieser Strang versorgt den Luftraum der Aufstellhalle. Das rechte Bild zeigt die anderen zwei Stränge und die von ihnen versorgten Testräume. Abbildung 3.14 zeigt das Strangschema des RLT-Versuchsstandes.

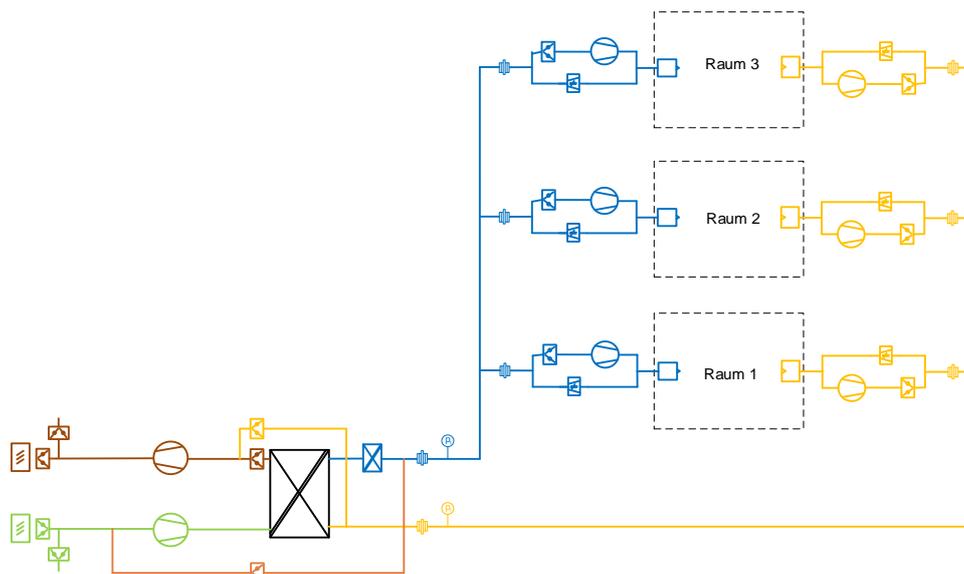


Abbildung 3.14: Strangschema des zur Untersuchung des dVt-Systems verwendeten RLT-Versuchsstandes [Alsen, Klimmt, Knissel 2016]

Das Zentralgerät beinhaltet ein kombiniertes Heiz- bzw. Kühlregister und eine Wärmerückgewinnung. Des Weiteren sind sowohl Filter als auch Schalldämpfer vorhanden, auf diese wird in der Abbildung 3.14 aus Übersichtlichkeitsgründen verzichtet.

In jedem Strang findet sich eine Parallelanordnung von dezentralem Ventilator mit Absperrklappe und Variabel-Volumenstromregler, welche alternativ betrieben werden können und es ermöglichen, beide Lüftungssysteme zu vermessen. Außerdem sind in jedem Strang wie auch nach dem Zentralgerät Irisblenden angeordnet. Diese dienen zur Variierung des Druckverlustes des jeweiligen Kanalabschnittes und ermöglichen es somit, längere Kanalnetze abzubilden.

Abbildung 3.15 zeigt die Messstellen für jeden der drei Zu- bzw. Abluftstränge.

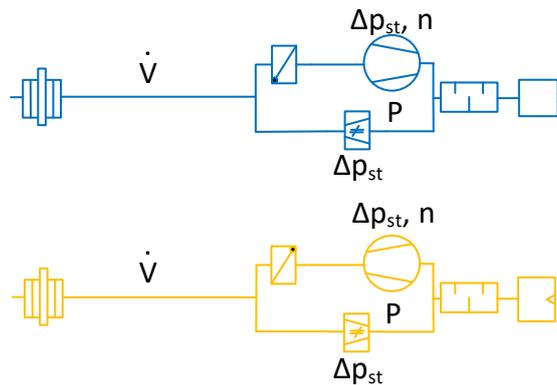


Abbildung 3.15: Messstellen der Zuluft- bzw. Abluftstränge

Der Volumenstrom jedes Stranges wird erfasst. Auch im gemeinsam durchströmten Kanal (nicht dargestellt) ist eine Volumenstrommessung vorhanden, welche den Gesamtvolumenstrom der Lüftungsanlage misst. Von jedem Ventilator (auch Zentralventilatoren) werden die Druckerhöhung, die Leistungsaufnahme und die Drehzahl gemessen. Dazu kommt die Messung des Druckverlustes über den Variabel-Volumenstromreglern. Mit diesen Messgrößen kann sowohl das Betriebsverhalten des dVt-Systems als auch das Betriebsverhalten des VSR-Systems überprüft werden.

3.2.2 Messtechnik und Messunsicherheit am RLT-Versuchsstand

Für die vorliegende Arbeit sind die Erfassung von Druckerhöhung und Volumenstrom des Ventilators von Interesse. Im Folgenden werden die benötigte Messtechnik und deren Messunsicherheit beschrieben.

Prinzipiell wird zur Bestimmung der Messunsicherheit ein an die [DIN EN 16211] angelehntes Verfahren genutzt. Dort gibt es drei Unsicherheiten, welche sich per Gaußscher Fehlerfortpflanzung zu einer Gesamtunsicherheit zusammensetzen. Die Standardunsicherheit der Messung wird in der [DIN EN 16211] mit Gl. 3.40 angegeben:

$$u_{Mes} = \sqrt{u_{Messgerät}^2 + u_{Verfahren}^2 + u_{Ablesung}^2} \quad 3.40$$

u_{Mes}	[-]	Standardunsicherheit der Messung
$u_{Messgerät}$	[-]	Standardunsicherheit des Messgerätes
$u_{Verfahren}$	[-]	Standardunsicherheit des Verfahrens
$u_{Ablesung}$	[-]	Standardunsicherheit der Ablesung

Diese Standardunsicherheiten weisen eine Überdeckungswahrscheinlichkeit von 68 % auf. Die [DIN EN 16211] gibt an, dass zur abschließenden Bewertung der Messunsicherheit eine Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95 % verwendet werden soll. Normalverteilte Standardunsicherheiten müssen deshalb noch mit einem Erweiterungsfaktor von 2 multipliziert werden. Daraus ergibt sich Gl. 3.41.

$$U_{Mes} = 2 \cdot u_{Mes} \quad 3.41$$

U_{Mes}	[-]	Erweiterte Standardmessunsicherheit der Messung mit einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95 %
-----------	-----	---

Für die Gesamtunsicherheit der Druck und Volumenstrommessung wird das in [Alsen 2017] beschriebene Verfahren genutzt. [Alsen 2017] gibt für beide Gesamtunsicherheiten jeweils eine Gleichung an, mit welcher die Standardmessunsicherheit für jeden Sensor und jeden Messwert bestimmt werden kann. Für die Druckmessung ist dies Gl. 3.42.

$$u_{Mes \Delta p} = \sqrt{\left(\frac{f_{u_{Messgerät,i}} \cdot \Delta p}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(a \cdot \frac{0,01\% \cdot 5V}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad 3.42$$

$u_{Mes \Delta p}$	[Pa]	Standardmessunsicherheit der Druckmessung
$f_{u_{Messgerät,i}}$	[%]	Maximale prozentuale Abweichung des jeweiligen Sensors i
Δp	[Pa]	Messwert des Drucksensors
a	[Pa/V]	Lineares Glied der Kalibrierung

Der erste Summand unter der Wurzel berücksichtigt die Unsicherheit des Messgerätes und damit die Unsicherheit des gerade betrachteten Sensors. Der zweite Summand stellt die Unsicherheit der Ableseung dar, also die Unsicherheit der Analogsignal-Eingangsklemme, welche das Signal des Sensors verarbeitet. Am RLT-Versuchsstand wird eine Beckhoff EL3602 mit einem Messbereichsendwert von 5 V und einem Fehler von 0,01 % verwendet. Diese Werte sind bereits eingesetzt, da sie für alle Druckmessungen identisch sind. Auf die Berücksichtigung der Unsicherheit des Messverfahrens wird nach [Alsen 2017] verzichtet.

Die Druckmessungen werden zu unterschiedlichen Zwecken durchgeführt, zum einen um die Druckerhöhungen der zentralen und dezentralen Ventilatoren festzustellen und zum anderen zur Wirkdruckmessung an den Messkreuzen zur Bestimmung der Volumenströme in den Strängen. Für diese unterschiedlichen Messungen werden die Drucksensoren aus Tabelle 3.9 eingesetzt.

Tabelle 3.9: Verwendete Drucksensortypen des RLT-Versuchsstandes

Messung	Sensortyp	Messbereich [Pa]	Fehler f_{u_1} [%]	Lineares Glied der Kalibrierung a [Pa/V]
Druckerhöhung	Sensirion SDP1000-L	0 bis 500	2,5	125,6
Volumenstrom	Sensirion SDP1000-L05	0 bis 125	1,4	32,7

Diese haben unterschiedliche Messbereiche und deshalb weisen sie auch unterschiedliche durchschnittliche prozentuale Abweichungen auf, welche in einer Kalibrierung festgestellt werden. Die linearen Glieder ergeben sich aus den ermittelten Kalibrierkurven der Sensoren.

Für die Gesamtunsicherheit der verschiedenen Druckmessungen ergeben sich die Zusammenhänge aus Abbildung 3.16.

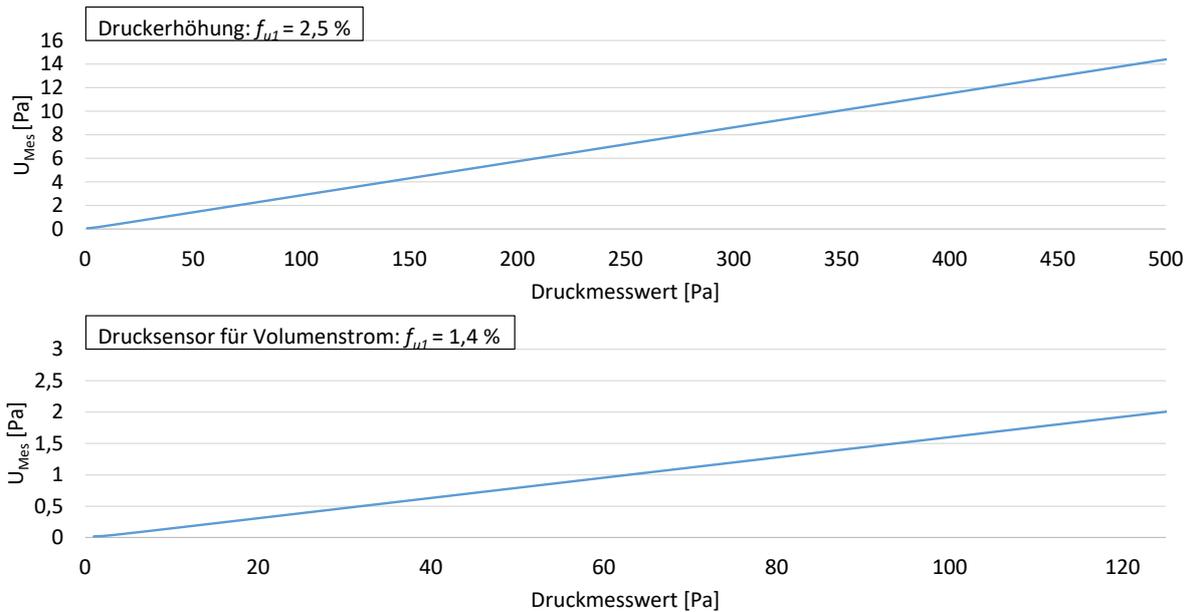


Abbildung 3.16: Erweiterte Standardmessunsicherheit der Druckerhöhung und der Druckmessung zur Volumenstrombestimmung in Abhängigkeit vom Druckmesswert des RLT-Versuchsstandes

Im unteren Messbereich ist die erweiterte Standardmessunsicherheit maßgeblich von der Standardunsicherheit der Ablesung beeinflusst. Da diese sehr gering ist, ist auch die erweiterte Standardmessunsicherheit für kleine Messwerte gering. Je größer der Messbereich, desto größer ist die Standardunsicherheit der Ablesung und damit auch die erweiterte Standardmessunsicherheit. Bei größeren Druckmesswerten gewinnt die Standardunsicherheit des Messgerätes an Einfluss. Der unterschiedliche Anstieg der Kurven wird durch die unterschiedlichen durchschnittlichen prozentualen Abweichungen der verschiedenen Messgeräte erzeugt.

Für die Volumenströme wird der Wirkdruck über Messkreuze der Firma Schako Typ MKA gemessen. Da die Volumenstrommessung auf die Druckmessung aufbaut, geht in die Unsicherheit der Volumenstrommessung auch die Unsicherheit der Druckmessung ([Alsen 2017]) ein, wie in Gl. 3.43 zu sehen.

$$u_{Mes\dot{V}} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot k_{Messkrenz} \cdot \Delta p^{-1/2} \cdot u_{Mes\Delta p}\right)^2 + (0,0802 \cdot \Delta p^{-0,469} \cdot \dot{V})^2} \quad 3.43$$

$u_{Mes\dot{V}}$	[m ³ /h]	Standardmessunsicherheit der Volumenstrommessung
$k_{Messkrenz}$	[m ³ /(hPa ^{0,5})]	Durchflusskoeffizient des Messkreuzes (Messkreuzkonstante)
Δp	[Pa]	Messwert des Drucksensors zur Volumenstromberechnung
\dot{V}	[m ³ /h]	Volumenstrommesswert

Auch hier sind unter der Wurzel zwei Summanden vorhanden, dabei ist der erste Ausdruck die Unsicherheit des Messgerätes (Drucksensor). Der Einfluss des Drucksensors auf die Volumenstromberechnung ist die erste Ableitung nach dem Druck, wie [Alsen 2017] schreibt. Der zweite Summand bildet die Unsicherheit des Verfahrens ab, welche in einem Vorversuch über ein Referenzmessgerät bestimmt wird. Die Standardunsicherheit der Ablesung geht bereits bei der Standardmessunsicherheit der Druckmessung mit ein und muss nicht erneut betrachtet werden.

Für die verschiedenen Auslegungsvolumenströme werden unterschiedliche Messkreuze eingesetzt.

Tabelle 3.10: Verwendete Messkreuze zur Volumenstrommessung des RLT-Versuchsstandes

Strang	Volumenstrombereich [m ³ /h]	Messkreuzkonstante k [m ³ /(h Pa ^{1/2})]
Raum 2, 3	15 bis 150	21
Raum 1	30 bis 300	39
Gesamt	60 bis 600	109

Die erweiterte Standardunsicherheit für diese Messungen wird mit der Gl.3.43 bestimmt und in Abbildung 3.17 für die aufgeführten Volumenstrombereiche gezeigt.

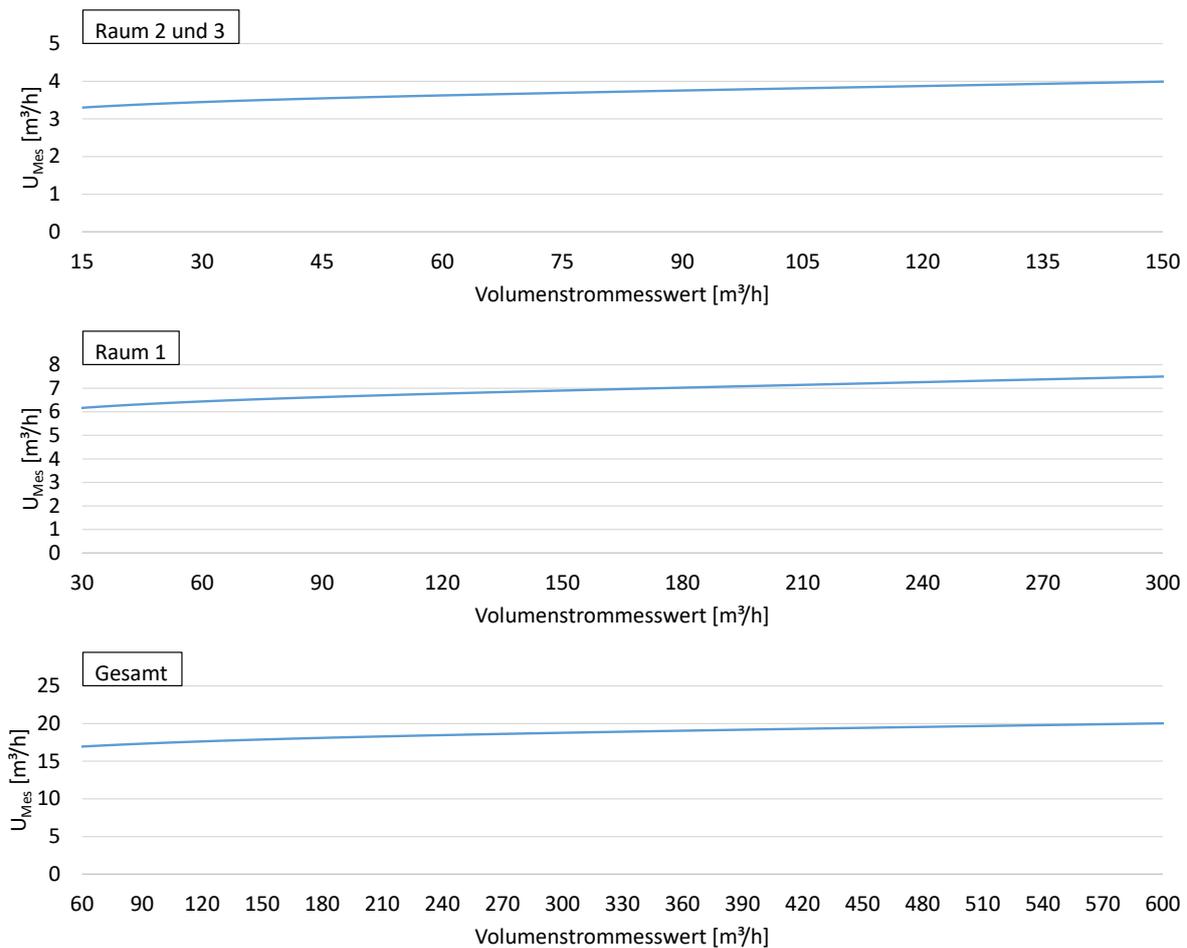


Abbildung 3.17: Erweiterte Standardmessunsicherheit Volumenstrommessung in Abhängigkeit vom Volumenstrommesswert des RLT-Versuchsstandes

Über die Volumenstrombereiche ist ein leichter Anstieg der erweiterten Standardmessunsicherheit festzustellen. Den größten Einfluss auf die erweiterte Standardmessunsicherheit der Volumenstrommessung am RLT-Versuchsstand hat die Standardunsicherheit des Verfahrens. Diese steigt ebenfalls mit zunehmendem Volumenstrommesswert an. Die geringe Standardunsicherheit der Druckmessung am RLT-Versuchsstand gerade bei kleinen Wirkdrücken (Abbildung 3.16 unteres Diagramm) wirkt sich positiv auf die erweiterte Standardmessunsicherheit der Volumenstrommessung aus.

3.3 Anwendungstest

Durch die praktische Anwendung der anlagentechnischen Umsetzungen im Anwendungstest wird überprüft, ob diese ausreichend sind, um eine Lüftungsanlage für ein reales Gebäude zu erstellen. Im Folgenden wird konkret auf die Planung und Umsetzung des dVt-Systems am Anwendungstest eingegangen.

3.3.1 Beschreibung der Lüftungsanlage

Der Anwendungstest findet im Zentrum für Umweltbewusstes Bauen (ZUB) (Abbildung 3.18 rechtes Gebäude) in Kassel statt.



Abbildung 3.18: Zentrum für Umweltbewusstes Bauen (ZUB)

Das Gebäude verfügt über drei Vollgeschosse und ist unterkellert. Der Eigentümer des Gebäudes ist die Universität Kassel, die beiden Obergeschosse weisen Büronutzung auf. Im Erdgeschoss befindet sich ein Hörsaal, welcher für Seminare, Tagungen und Vorlesungen genutzt wird. Die drei Vollgeschosse werden von einer, im Untergeschoss befindlichen, mechanischen Lüftungsanlage versorgt.

Abbildung 3.19 zeigt das Strangschema der Lüftungsanlage nach der Umrüstung auf das dVt-System.

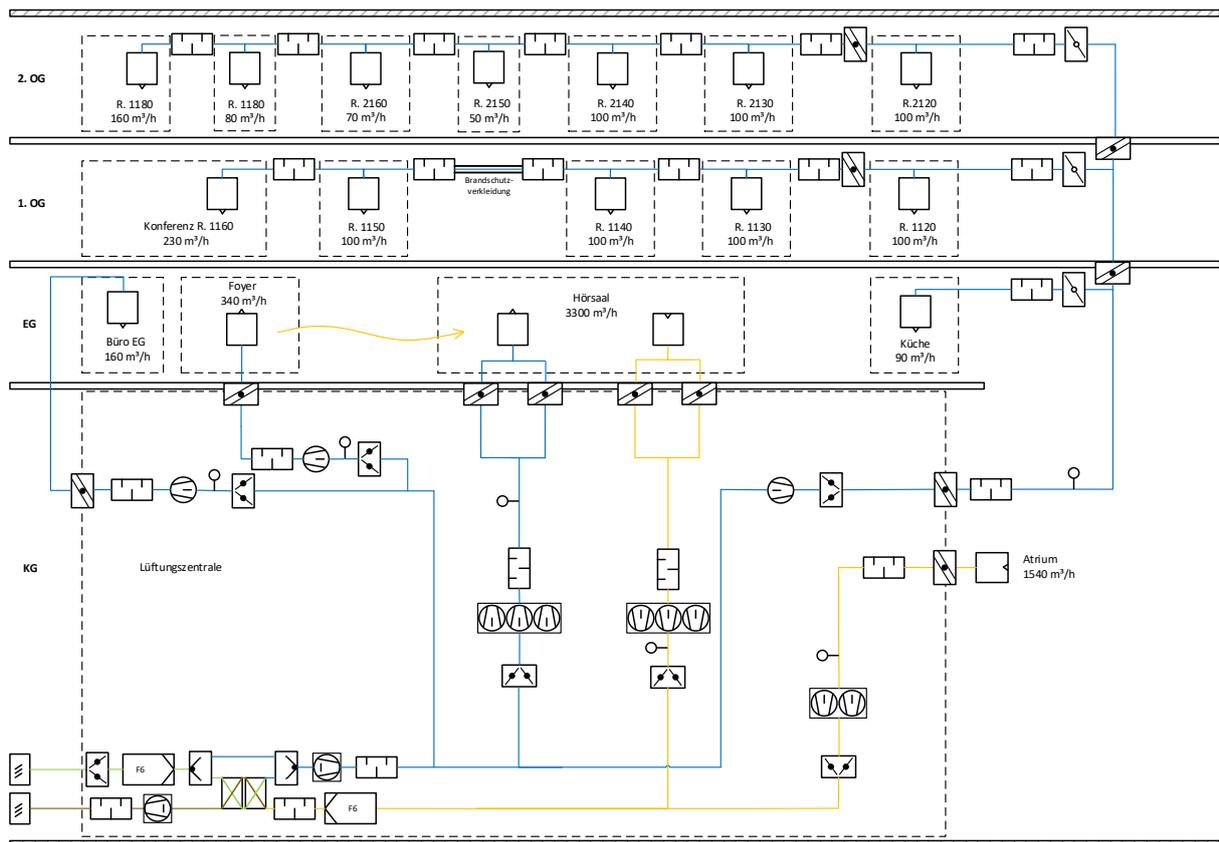


Abbildung 3.19: Strangenschema der Lüftungsanlage des Anwendungstestes nach Umbau auf das dVt-System

Jeder der sechs Stränge (vier Zuluft, zwei Abluft) ist mit dezentralen Ventilatoren, einer Absperrklappe und einem Schalldämpfer ausgestattet. Des Weiteren werden in jedem Strang der Volumenstrom und die Druckerhöhung der Ventilatoren gemessen. Im Hörsaal, im Foyer und im Büro EG wird außerdem die CO₂-Konzentration der Raumluft messtechnisch erfasst.

Die prinzipielle Aufteilung der Stränge ist erhalten geblieben. Die Auslegungspunkte und die Typen der dezentralen Ventilatoren sind in Tabelle 3.11 aufgeführt. Am Anwendungstest werden als dezentrale Ventilatoren Axialventilatoren mit EC-Technik der Firma SystemAir verbaut. Diese kombinieren hohe Wirkungsgrade mit kompakter Bauweise.

Tabelle 3.11: Auslegungsdaten und Ventilatorarten des Anwendungstestes

Strang	Anlagentechnische Umsetzung	Druckverlust [Pa]	Volumenstrom [m³/h]	Ventilatorart
Büro EG	1d	150	160	V3G-160-GJ03XA
Foyer	1d	164	340	V3G-250-GJ5110
Hörsaal Zu	1a oder 1b	107	3300	3xV3G-250-GJ5110
Obergeschoße	2 mit konstantem Volumenstrom	74	1380	V3G-250-GJ5110
Hörsaal Ab	Abluft von Hörsaal Zu und Foyer	210	3640	3xV3G-250-GJ5110
Atrium	Abluft von Büro EG und Obergeschoße	48	1540	2xV3G-250-GJ02XC

Grundlegend werden alle dezentralen Zuluftventilatoren über die Vorgabe eines Sollvolumenstromes und die Anpassung des aktuellen Istvolumenstromes geregelt. Der Sollvolumenstrom wird während der Nutzungszeit aus der CO₂-Konzentration der Raumluft bestimmt (außer Obergeschoße). Ist keine CO₂-Belastung vorhanden, wird während der Nutzungszeit eine Mindestlüftung bereitgestellt. Die Abluftventilatoren fördern den Volumenstrom der entsprechenden Zuluftstränge ab. Mit welchem Volumenstrom die Zonen außerhalb der Nutzungszeit beaufschlagt werden, wird anhand der Untersuchungen von [Alsen 2017] entschieden. Für die Zuluftstränge von Hörsaal und Foyer ist eine Vorspülung mit Klappe geeigneter. Sollte also kein Volumenstrom in diesen Strängen gefördert werden, verschließt die Klappe diesen Kanalabschnitt. Aufgrund der prinzipiellen Master-Slave-Regelung zwischen Zuluft und Abluft wird auch der Abluftstrang des Hörsaals mit einer Klappe versehen. Die Grundlüftung ist bei den Büronutzungen energetisch sinnvoller und wird deshalb bei Büro EG und den Obergeschoßen angewandt.

Die Versorgung des Büros im Erdgeschoss und des Foyers entspricht der Einzelraumregelung mit Überströmung (1d, Kapitel 2.3.3 S. 15). Der Zuluftvolumenstrom kann mittels Einzelraumregelung an die Bedürfnisse der Zone angepasst werden. Die Abluft wird nach Überströmung in einer anderen Zone abgeführt. Beim Büro EG ist dies das Atrium und beim Foyer der Hörsaal. Dabei dürfte das Büro EG nach den Kriterien von [Alsen 2017] aus Wirtschaftlichkeitsgründen nicht mit einer Einzelraumregelung versehen werden. Aufgrund der Bestandsmodernisierung und der Beibehaltung der Kanalführung wird von diesen Wirtschaftlichkeitsgründen abgesehen.

Der Hörsaal ist anlagentechnisch mit einer Einzelraumregelung (1a, Abbildung 2.2 S. 9) ausgerüstet. Die benötigten Komponenten für die Einzelraumregelung mit Volumenstrommessung sind installiert, müssen aber nicht genutzt werden, so kann auch die Einzelraumregelung ohne Volumenstrommessung (1b, Kapitel 2.3.1 S.13) untersucht werden. Aufgrund der eher geringen Druckverluste bei hohem Auslegungsvolumenstrom werden sowohl auf der Zuluftseite als auch auf der Abluftseite drei identische Axialventilatoren parallelgeschaltet und in einer Box zusammengefasst. Eine solche Ventilatorbox ist in Abbildung 3.20 zu sehen.



Abbildung 3.20: Ventilatorbox mit drei parallelgeschalteten Axialventilatoren

Die Zusammenfassung der Räume in den Obergeschossen wird aufgrund der Büronutzung als sinnvoll erachtet ([Alsen 2017]) und beibehalten. Hier wird keine Einzelraumregelung umgesetzt, auch auf die Luftqualitätserfassung in den Räumen wird verzichtet. In Kapitel 5.2.1.2 (S.97) wird gezeigt, dass mehrere Büros aus wirtschaftlicher Sicht am besten mit einem Konstantvolumenstrom belüftet werden. Dies entspricht auf der Zuluftseite anlagentechnisch einer Raumgruppenversorgung (Kapitel 2.4.1 S. 16) ohne Luftqualitätsmessung.

Über das Atrium wird die Luft von Büro EG und der Obergeschosse abgeführt. Auch hier wird aufgrund des geringen Druckverlustes und des dafür hohen Auslegungsvolumenstromes eine Parallelschaltung von zwei identischen Ventilatoren vorgenommen.

Zusammenfassend ist feststellbar, dass die eingeführten anlagentechnischen Umsetzungen ausreichend sind, um die bestehende Lüftungsanlage des ZUB auf ein dVt-System umzurüsten. Die anlagentechnischen Umsetzungen werden in [Alsen 2017] auf weitere Nichtwohngebäude angewandt. Die betrachteten Gebäude haben drei bis vier belüftete Vollgeschosse mit Lüftungszentralen auf dem Dach oder innerhalb des Gebäudes. Es hat sich gezeigt, dass sich jedes der Gebäude im Wesentlichen aus den erstellten anlagentechnischen Umsetzungen zusammensetzen lässt.

3.3.2 Messtechnik und Messunsicherheit am Anwendungstest

Beim Anwendungstest sind für die vorliegende Arbeit Druckerhöhungen, Volumenströme und CO₂-Konzentrationen von Interesse. Für die benötigten Druckmessungen werden dieselben Sensortypen wie beim RLT-Versuchstand verwendet (Tabelle 3.9 S.46). Aufgrund des größeren Zentralgerätes wird ein zusätzlicher Drucksensor zur Messung der Druckerhöhung der Zentralventilatoren benötigt. Tabelle 3.12 zeigt die verwendeten Sensoren mit ihren Eigenschaften.

Tabelle 3.12: Verwendete Drucksensortypen des Anwendungstestes

Messung	Sensortyp	Messbereich [Pa]	Fehler f_{u_1} [%]	Lineares Glied der Kalibrierung a [Pa/V]
Druckerhöhung zentral	Sensirion SDP2000-L	0 bis 3500	4,7	898,7
Druckerhöhung dezentral	Sensirion SDP1000-L	0 bis 500	1,6	127,3
Volumenstrom	Sensirion SDP1000-L05	0 bis 125	0,6	31,9

Bei der hier durchgeführten Kalibrierung der Sensoren werden kleinere durchschnittliche Fehler als bei den Sensoren des RLT-Versuchsstandes festgestellt. Der Grund für die unterschiedlichen Kalibrierergebnisse kann nicht festgestellt werden. In beiden Fällen wird dasselbe Verfahren zur Kalibrierung verwendet. Zwischen Ausrüstung des RLT-Versuchsstandes und des Anwendungstestes mit Drucksensoren liegt über 1 Jahr. Eventuell entstammen die verwendeten Sensoren unterschiedlichen Produktionsreihen.

Die Messunsicherheit der Druck- und Volumenstrommessung kann analog mit dem Verfahren zur Bestimmung der Messunsicherheiten am RLT-Versuchsstand (Kapitel 3.2.2 S. 45) bestimmt werden. Die Berechnungen unterscheiden sich lediglich in der Standardunsicherheit für die Ablesung. Grund ist die andere Analogsignal-Eingangsklemme. Beim Anwendungstest wird die Analogsignal-Eingangsklemme der Firma Saia Typ PCD3.W340 mit einem Messbereich von 0 bis 10 V und einem Fehler von 0,3 % verwendet. Aufgrund des größeren Messbereiches und Messfehlers erhöht sich die Standardunsicherheit durch Ablesung.

Für die Gesamtmessunsicherheit der Messung der Druckerhöhungen und der Druckmessung zur Volumenstrombestimmung ergeben sich mit den durchschnittlichen Fehlern der verwendeten Drucksensoren folgende Zusammenhänge zwischen Druckmesswert und erweiterter Standardmessunsicherheit. Die beiden oberen Diagramme in Abbildung 3.21 zeigen die erweiterte Standardmessunsicherheit der Druckerhöhungen und das untere Diagramm die der Druckmessung zur Volumenstrombestimmung.

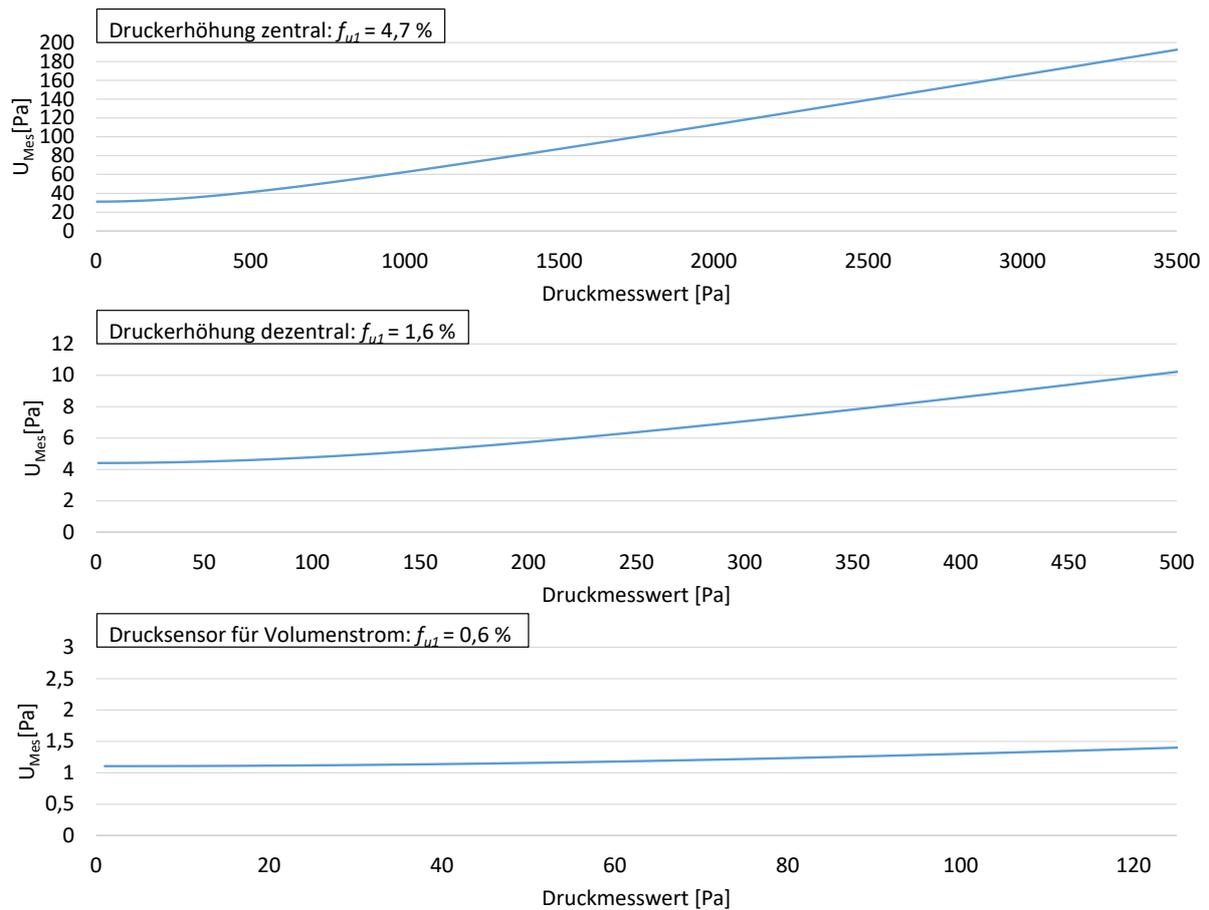


Abbildung 3.21: Erweiterte Standardmessunsicherheit der Druckerhöhungen und der Druckmessung zur Volumenstrombestimmung in Abhängigkeit vom Druckmesswert des Anwendungstestes

Aufgrund der deutlich größeren Standardunsicherheit durch Ablesung sind auch die erweiterten Standardmessunsicherheiten (vor allem im unteren Messbereich) dieser Messungen größer als die des RLT-Versuchsstandes (Abbildung 3.16 S.54). Im oberen Messbereich erzeugt die kleinere Standardunsicherheit der Messgeräte am Anwendungstest eine kleinere erweiterte Standardmessunsicherheit als beim RLT-Versuchsstand.

Wie bereits in Kapitel 3.2.2 (S. 45) beschrieben, baut auch am Anwendungstest die Volumenstrommessung auf die Druckmessung auf. Die verschiedenen Stränge des Anwendungstestes weisen unterschiedliche Auslegungsvolumenströme auf. Deshalb müssen die eingesetzten Messkreuze unterschiedliche Volumenstrombereiche abdecken (Tabelle 3.13).

Tabelle 3.13: Verwendete Messkreuze zur Volumenstrommessung des Anwendungstestes

Strang	Volumenstrombereich [m ³ /h]	Messkreuzkonstante k [m ³ /(h Pa ^{1/2})]
Büro EG	16 bis 160	21
Foyer	34 bis 340	39
Hörsaal Zu	330 bis 3300	550,25
Obergeschosse	138 bis 1380	237,33
Hörsaal Ab	3640 bis 3640	448,77
Atrium	154 bis 1540	293,95

Daraus resultieren unterschiedliche Abmessungen der Messkreuze und auch unterschiedliche Messkreuzkonstanten.

Das Diagramm in Abbildung 3.22 zeigt die erweiterte Standardmessunsicherheit der Volumenstrommessungen des Stranges Büro EG. Dieser Verlauf ist beispielhaft für alle Stränge. Die restlichen Diagramme werden im Anhang 9.2 (S.135) gezeigt.

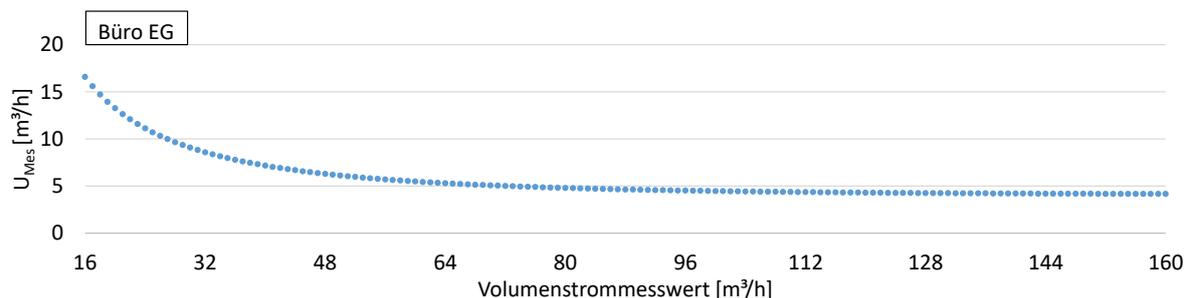


Abbildung 3.22: Erweiterte Standardmessunsicherheit Volumenstrommessung in Abhängigkeit vom Volumenstrommesswert des Anwendungstestes

Die größten erweiterten Standardmessunsicherheiten treten im unteren Messbereich auf. Im unteren Messbereich müssen über die Messkreuze sehr geringe Wirkdrücke (kleiner 1 Pa) gemessen werden. Wie aus dem unteren Diagramm der Abbildung 3.21 ableitbar, ist der relative Fehler bei solchen geringen Messwerten über 100 %. Dies wirkt sich deutlich auf die Volumenstrommessung aus. Je größer der Volumenstrommesswert, desto größer der gemessene Wirkdruck und desto kleiner der relative Fehler der Druckmessung. Dadurch kann der abnehmende Verlauf der erweiterten Standardmessunsicherheit erklärt werden.

Zur Bestimmung der erweiterten Standardmessunsicherheit der CO₂-Messung wird ebenfalls das Verfahren aus [DIN EN 16211] verwendet (Gl.3.44).

$$u_{MesCO_2} = \sqrt{\left(\frac{f_{u_{Messgerät,CO_2}}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(a \cdot \frac{0,3\% \cdot 10V}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad 3.44$$

u_{MesCO_2}	[-]	Standardmessunsicherheit der CO ₂ -Messung
$f_{u_{Messgerät,CO_2}}$	[%]	Absolute Abweichung des CO ₂ -Messumformers
a	[ppm/V]	Lineares Glied der Kalibrierung

Die Standardmessunsicherheit des Messverfahrens wird nicht betrachtet. Dies wäre zum Beispiel bei einer nicht den Vorgaben entsprechenden Positionierung des Messgerätes der Fall. Es wird von einer korrekten Positionierung ausgegangen. Auch hier wird die Analogsignal-Eingangsklemme der Firma Saia Typ PCD3.W340 mit dem entsprechenden Fehler und Messbereich verwendet. Für die CO₂-Messungen wird der CO₂-Messumformer der Firma Sauter Typ EGQ222 F002 mit einem Messbereich von 0 bis 2000 ppm eingesetzt (Tabelle 3.14: Verwendeter CO₂-Sensortyp des Anwendungstestes).

Tabelle 3.14: Verwendeter CO₂-Sensortyp des Anwendungstestes

Messung	Sensortyp	Messbereich [ppm]	Fehler f_{u_1} [ppm]	Lineares Glied der Kalibrierung a [ppm/V]
Luftqualität	Sauter EGQ222F002	0 bis 2000	50	200

Unter Verwendung von Gl.3.44 und mithilfe der Daten des verwendeten Sensors ergibt sich eine, über den Messbereich konstante, erweiterte Standardmessunsicherheit $U_m = \pm 58,16$ ppm.

4 Vergleich dVt-System und VSR-System

In diesem Kapitel soll ein übergeordneter Vergleich des dVt-Systems hinsichtlich Aufbau und Funktionsweise mit dem konventionellen VSR-System mit konstantem Vordruck durchgeführt werden. Dabei wird versucht, prinzipielle Unterschiede und Gemeinsamkeiten unabhängig von konkreten Umsetzungen aufzuzeigen. Der Vergleich wird für das Zentralgerät, das Kanalnetz und die dezentralen Stellglieder durchgeführt.

4.1 Zentralgerät und Zentralventilator

Das Zentralgerät einer Lüftungsanlage weist verschiedene Komponenten zur Konditionierung der Zuluft auf. Diese sind zum Beispiel WRG, Erhitzer, Kühler sowie Be- und Entfeuchter. Das dVt-System hat keine Einschränkungen bezüglich der im Zentralgerät eingesetzten Komponenten zur Luftbehandlung. Außerdem befinden sich im Zentralgerät die zwei Zentralventilatoren. Die Regelaufgabe der Zentralventilatoren im dVt-System ähnelt der Regelaufgabe der Zentralventilatoren im VSR-System. In beiden Systemen dienen sie der Bereitstellung eines definierten Vordruckes an einem bestimmten Punkt im Kanalnetz und fördern den Gesamtvolumenstrom der Lüftungsanlage. Dieser definierte Punkt kann sich je nach System an unterschiedlichen Stellen im Kanalnetz befinden.

Im dVt-System muss sich der zur Regelung des Zentralventilators verwendete Vordrucksensor zwischen Zentralgerät und erster Verzweigung des Kanalnetzes befinden. Dort wird ein Druck von 0 Pa gegen die Umgebung gehalten. Das heißt, alle Druckverluste, welche vor diesem Vordrucksensor vorhanden sind, werden durch den Zentralventilator überwunden, alle danach durch die dezentralen Ventilatoren.

Beim VSR-System sind in der Literatur verschiedene Platzierungen des Vordrucksensors zur Regelung des Zentralventilators zu finden. In der [DIN V 18599-3] wird der Vordrucksensor ähnlich wie beim dVt-System zwischen Zentralgerät und erster Verzweigung des Kanalnetzes gesetzt. Nach Planungsleitfaden der [LTG Aktiengesellschaft 2015] soll der Vordrucksensor im letzten Drittel des Kanalnetzes platziert werden. Die Höhe des Vordrucks sollte je nach Platzierung des Vordrucksensors angepasst werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Zentralgerät in beiden Systemen dieselben Funktionen erfüllt. Die Platzierung des Vordrucksensors und die Wahl des dort zu haltenden Vordruckes sind im dVt-System eindeutig. Die Auslegungspunkte der Zentralventilatoren von dVt-System und VSR-System unterscheiden sich für eine identische Lüftungsanlage nur in der Druckerhöhung der Ventilatoren. Da im dVt-System nur die Lüftungszentrale überwunden werden muss, können für das dVt-System eventuell kleinere Zentralventilatoren eingesetzt werden. Dies ist ein prinzipieller Vorteil des dVt-Systems. Auch Axialventilatoren mit instabilen Kennlinien (Abbildung 6.4 S.117) können im dVt-System als Zentralventilatoren eingesetzt werden, da diese nicht von parallelen Ventilatoren beeinflusst werden.

4.2 Kanalnetz

Das Kanalnetz der Lüftungsanlage dient zur Verteilung der Luft im Gebäude und wird im Folgenden von dem Vordrucksensor der Zuluft und dem Vordrucksensor der Abluft begrenzt. Für beide Systeme wird davon ausgegangen, dass sich die Vordrucksensoren zwischen Zentralgerät und erster Verzweigung des Kanalnetzes befinden.

Im dVt-System sind neue Druckbereiche im Kanalnetz gegenüber dem VSR-System vorhanden. Diese neuen Druckbereiche haben Auswirkungen auf die Strömungsrichtung der Leckagevolumenströme im Kanalnetz. Wie Abbildung 4.1 zeigt, entstehen durch die Unterdruck- und Überdrucksituationen auf Zu- und Abluftseite insgesamt vier verschiedene Druckbereiche im Kanalnetz des dVt-Systems. Im VSR-System sind nur zwei Druckbereiche vorhanden.

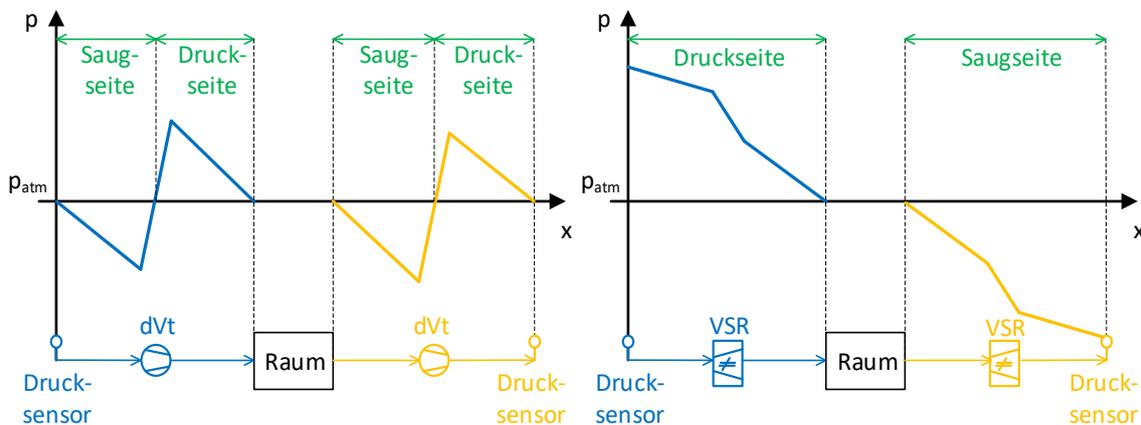


Abbildung 4.1: Druckbereiche im Kanalnetz des dVt-Systems und des VSR-Systems

Diese Druckbereiche führen zu Leckagevolumenströmen. Die Leckagevolumenströme können entweder in das Kanalnetz hinein oder aus dem Kanalnetz heraus gerichtet sein. Die [DIN EN 15242] bewertet die Leckagen einer konventionellen Lüftungsanlage. Sie berücksichtigt dabei auf der Zuluftseite nur die Leckagen vom Lüftungsgerät bis zum Luftauslass (aus dem Kanalnetz heraus) und auf der Abluftseite vom Luftauslass bis zum Lüftungsgerät (in das Kanalnetz hinein), wobei auch bei Ansaugung und Ausblausung von Außenluft und Fortluft je nach Position des Zentralgerätes im Gebäude Leckagen vorhanden sind. Die [DIN EN 13779] empfiehlt, dass weniger als 2 % des geförderten Volumenstromes über Leckagen durch Infiltration oder Exfiltration strömt. Die prinzipiell auftretenden Leckagevolumenströme beider Systeme sind in Tabelle 4.1 aufgeführt und beschrieben.

Tabelle 4.1: Leckagevolumenströme abhängig vom Lüftungssystem

Leckagevolumenstrom	System	Strömungsrichtung Leckagevolumenstrom	Skizze
Saugseite Zuluft	dVt	In das Kanalnetz hinein	
Druckseite Zuluft	VSR/dVt	Aus dem Kanalnetz heraus	
Saugseite Abluft	VSR/dVt	In das Kanalnetz hinein	
Druckseite Abluft	dVt	Aus dem Kanalnetz heraus	

Im Vergleich zu einem komplett dichten Kanalnetz wird der Volumenstrom im Kanalnetz durch die Leckagen erhöht oder verringert. Dies kann einen Mehraufwand für den Ventilator bedeuten. Außerdem wird die Luftqualität im Kanalnetz durch die Leckagevolumenströme beeinflusst. Im Nachfolgenden wird auf die vier in Tabelle 4.1 angegebenen Leckagen ausführlich eingegangen.

4.2.1 Leckagevolumenstrom Saugseite Zuluft

Aufgrund des Unterdruckes im Kanalnetz des dVt-Systems wird Luft angesaugt. Je nach Qualität dieser angesaugten Luft verändert sich die Luftqualität der Zuluft. Dies kann vor allem Auswirkungen auf die Hygiene der Zuluft haben. Die Ansaugung von Luft in den Zuluftkanal ist hygienisch mit einer Überströmung bzw. Umluftnutzung nach [DIN EN 13779] vergleichbar. Bei der Überströmung wird die Zuluft in einen Raum eingebracht, überströmt in einen angrenzenden Raum und wird dort abgeführt, d.h. die Abluft des ersten Raumes wird dem zweiten Raum als Zuluft zugeführt. Bei der Umluft wird Abluft eines Raumes der Zuluft beigemischt und wiederverwendet. Abluft der Kategorie ETA 1 (geringer Verunreinigungsgrad) nach [DIN EN 13779] ist als Überströmluft bzw. Umluft geeignet. Abluft der Kategorie ETA 2 (mäßiger Verunreinigungsgrad) darf als Überströmluft in Bereichen wie Toiletten, Garagen, Waschräume und ähnlichen Nutzungen verwendet werden.

Bei einer Kanalführung, bei der zwischen Zu- und Abluft keine räumliche Trennung (selber Schacht, selbe abgehängte Decke) vorhanden ist, kann mit Überdruck geführte Abluft als Leckagevolumenstrom (Kapitel 4.2.4 S.63) im Zuluftkanal angesaugt werden. Ist die Abluft der Kategorie ETA 1 (geringer Verunreinigungsgrad) zuzuordnen, wird die entstehende Verunreinigung für die Luft im dVt-System als akzeptabel betrachtet, da bei dieser Abluftkategorie auch eine Überströmung bzw. Umluftnutzung möglich wäre. Stark verunreinigte Luft (Toilettenabluft) darf nicht mit Überdruck ohne räumliche Trennung geführt werden. Hier ist eine gesonderte Abluftanlage vorzusehen.

Auch der benötigte Zuluftvolumenstrom kann durch diese Leckage beeinflusst werden. Die wichtigste Regelaufgabe des Zuluftventilators ist die Einhaltung der Luftqualität (CO₂-Konzentration) im Raum. Wird die Luftqualität der Zuluft durch die Leckage verschlechtert, so muss dem Raum bei konstanter interner CO₂-Belastung ein höherer Volumenstrom zugeführt werden, um den CO₂-Grenzwert einzuhalten. Zur Abschätzung dieser Problematik wird folgende Berechnung angestellt.

Zunächst muss die Veränderung der CO₂-Konzentration durch die Leckage in der Zuluft bestimmt werden. Dies erfolgt mithilfe der Gl. 4.1.

$$\dot{V}_{Zu} \cdot \sigma_{Zu} = \dot{V}_{Au} \cdot \sigma_{Au} + \dot{V}_{Leck} \cdot \sigma_{Leck} \quad 4.1$$

\dot{V}_{Zu}	[m ³ /h]	Zuluftvolumenstrom
σ_{Zu}	[ppm]	CO ₂ -Konzentration der Zuluft
\dot{V}_{Au}	[m ³ /h]	Außenluftvolumenstrom
σ_{Au}	[ppm]	CO ₂ -Konzentration der Außenluft
\dot{V}_{Leck}	[m ³ /h]	Leckagevolumenstrom
σ_{Leck}	[ppm]	CO ₂ -Konzentration des Leckagevolumenstromes

Aus energetischer Sicht besagt die [DIN EN 13779], dass die Luftdichtheit der Anlage so gewählt werden soll, dass weniger als 2 % des geförderten Volumenstromes im betrachteten Kanalabschnitt über

Leckagen zu- bzw. abströmt. Somit können der Leckagevolumenstrom und der Zuluftvolumenstrom durch den Außenluftvolumenstrom beschrieben werden.

$$\dot{V}_{Leck} = f_{Leck} \cdot \dot{V}_{Au} \quad 4.2 \quad \dot{V}_{Zu} = \dot{V}_{Au} + f_{Leck} \cdot \dot{V}_{Au} \quad 4.3$$

f_{Leck} [%] Leckagerate (2 % nach [DIN EN 13779])

Nach Einsetzen dieser Gleichungen in Gl. 4.1 und Kürzen des Außenluftvolumenstromes entsteht Gl. 4.4 zur Bestimmung der resultierenden CO₂-Konzentration der Zuluft:

$$\sigma_{Zu} = \frac{\sigma_{Au} + f_{Leck} \cdot \sigma_{Leck}}{1 + f_{Leck}} \quad 4.4$$

Bei einer CO₂-Konzentration der Außenluft von 450 ppm, einer Leckagerate von 2 % und einer CO₂-Konzentration des Leckagevolumenstromes von 1000 ppm erhöht sich die resultierende CO₂-Konzentration beispielsweise auf 460 ppm. Für die Praxis wird von höheren Leckageraten ausgegangen. Selbst bei einer Leckagerate von 30 % liegt die resultierende CO₂-Konzentration unter 600 ppm.

Wie bereits beschrieben, bedingt eine erhöhte CO₂-Konzentration der Zuluft eine Erhöhung des benötigten Zuluftvolumenstromes zur Einhaltung des CO₂-Grenzwertes des Raumes bei konstanter CO₂-Emission durch Personen. Diese Erhöhung wird durch die folgende Untersuchung abgeschätzt.

Der benötigte Zuluftvolumenstrom in Abhängigkeit von der CO₂-Konzentration des Zuluftvolumenstromes wird mit folgendem vereinfachten Knotenmodell bestimmt:

$$\dot{V}_{Ab} \cdot \sigma_R = \dot{V}_{Zu} \cdot \sigma_{Zu} + N_{Pers} \cdot \dot{V}_{Pers} \cdot \sigma_{Pers} \quad 4.5$$

\dot{V}_{Ab}	[m ³ /h]	Abluftvolumenstrom
σ_R	[ppm]	CO ₂ -Konzentration der Raumluft (CO ₂ -Grenzwert)
N_{Pers}	[-]	Anzahl Personen im Raum
\dot{V}_{Pers}	[m ³ /(hP)]	Von einer Person emittierter CO ₂ -Volumenstrom
σ_{Pers}	[ppm]	CO ₂ -Konzentration des Volumenstromes durch Personen zugeführt

Prinzipiell wird dem Raum Luft mit einer bestimmten CO₂-Konzentration zugeführt, zusätzlich emittieren Personen CO₂. Außerdem wird aus dem Raum Luft mit bestimmter CO₂-Konzentration abgeführt. Zugeführter und abgeführter Luftvolumenstrom sind gleich groß. Da zur Abschätzung der Problematik stationäre Zustände interessant sind, kann das Raumvolumen vernachlässigt werden.

Die Gl. 4.5 wird nach dem zugeführten und abgeführten Volumenstrom umgestellt, dadurch entsteht Gl. 4.6.

$$\dot{V} = \dot{V}_{Zu} = \dot{V}_{Ab} = \frac{N_{Pers} \cdot \dot{V}_{Pers} \cdot \sigma_{Pers}}{\sigma_R - \sigma_{Zu}} \quad 4.6$$

Zur Bestimmung der Erhöhung des Zuluftvolumenstromes von dichtem Kanalnetz ($\sigma_{Zu} = 450 \text{ ppm}$) zu realistischen Leckageraten von bis zu 30 % ($450 \text{ ppm} < \sigma_{Zu} < 600 \text{ ppm}$) wird der Quotient der Zuluftvolumenströme von beiden Fällen gebildet. Dabei wird die CO₂-Konzentration in Abhängigkeit von

der Leckagerate nach Gl. 4.4 bestimmt. Die CO₂-Konzentration des Leckagevolumenstromes σ_{Leck} wird ebenfalls mit 1000 ppm angesetzt.

$$\frac{\dot{V}_{undicht}}{\dot{V}_{dicht}} = \frac{\frac{N_{Pers} \cdot \dot{V}_{Pers} \cdot \sigma_{Pers}}{\sigma_R - \sigma_{Zu}}}{\frac{N_{Pers} \cdot \dot{V}_{Pers} \cdot \sigma_{Pers}}{\sigma_R - 450 \text{ ppm}}} = \frac{\sigma_R - 450 \text{ ppm}}{\sigma_R - \sigma_{Zu}} \quad 4.7$$

$\dot{V}_{undicht}$	[m ³ /h]	Zu- und Abluftvolumenstrom bei undichten Kanalnetzen Leckagerate < 30 % (σ_{Zu} = 450-600 ppm)
\dot{V}_{dicht}	[m ³ /h]	Zu- und Abluftvolumenstrom bei dichtem Kanalnetz (σ_{Zu} = 450 ppm)

Ein Quotient größer 1 bedeutet dabei, dass bei undichtem Kanalnetz ein größere Zuluftvolumenstrom benötigt wird als bei dichtem Kanalnetz. Dies hat eine erhöhte elektrische Leistung des Ventilators zur Folge.

$$P_{Vent} = \frac{\dot{V}_{Vent} \cdot \Delta p_{Vent}}{\eta_{GesVent}} \quad 4.8$$

\dot{V}_{Vent}	[m ³ /s]	Volumenstrom des Ventilators
P_{Vent}	[W]	Leistungsaufnahme des Ventilators
$\eta_{GesVent}$	[-]	Gesamtwirkungsgrad des Ventilators
Δp_{Vent}	[Pa]	Druckerhöhung des Ventilators

Die CO₂-Konzentration der Raumluft σ_R wird zwischen den zulässigen CO₂-Grenzwerten der drei Räume der Raumgruppe aus Tabelle 3.1 (S.20) variiert. Die Ergebnisse der Berechnung sind in Abbildung 4.2 dargestellt.

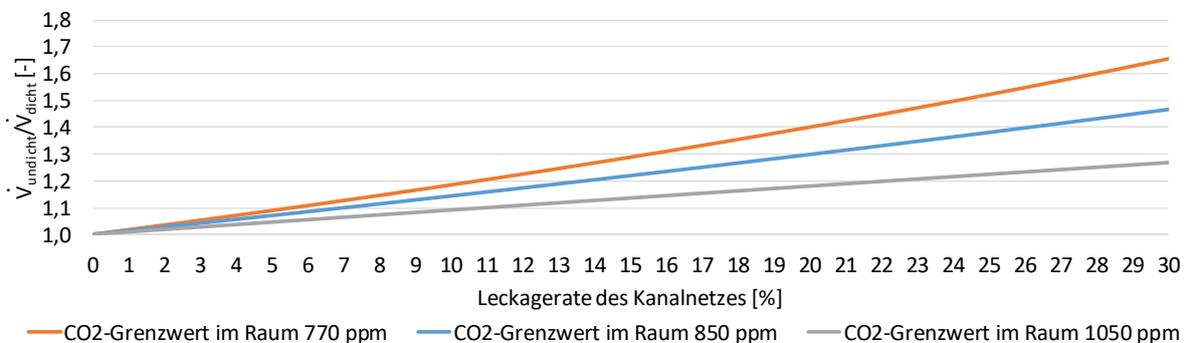


Abbildung 4.2: Einfluss der Leckagerate des Kanalnetzes auf den benötigten Zuluftvolumenstrom

Je undichter das Kanalnetz, desto größer ist der benötigte Volumenstrom zur Begrenzung der CO₂-Konzentration im Raum. Wobei der Mehraufwand geringer ist, wenn im Raum ein höherer CO₂-Grenzwert zulässig ist. Bei einer CO₂-Konzentration des Leckagevolumenstromes σ_{Leck} , welcher dem CO₂-Grenzwert des betrachteten Raumes entspricht, ergibt sich ein Mehraufwand in Höhe der angesetzten Leckagerate. Dies ist der Fall, wenn ausschließlich Abluft des betrachteten Raumes der entsprechenden Zuluft über Leckagen beigemischt wird.

In beiden Systemen kann die CO₂-Konzentration der Zuluft durch Leckagen an einer weiteren Stelle beeinflusst werden, und zwar bei der Ansaugung von Außenluft und der Ausblasung von Fortluft. In der [DIN EN 15242] werden diese Leckagen aber nicht berücksichtigt.

4.2.2 Leckagevolumenstrom Druckseite Zuluft

Die Leckage im Überdruckbereich der Zuluft verringert den Luftvolumenstrom im Kanalnetz und ist in beiden Systemen vorhanden. Diese hat keine hygienischen Auswirkungen auf die Zuluft, welche in den Raum gelangt. Auch für die Umgebung des Kanalnetzes sollten die hygienischen Auswirkungen gering sein, da davon auszugehen ist, dass es sich um saubere Luft handelt.

Die aktuelle Regelaufgabe (Personenanwesenheit oder Personenabwesenheit) des Zuluftventilators bedingt, dass ein Sollvolumenstrom in den Raum gefördert wird, deshalb hat diese Leckage direkten energetischen Einfluss. Der benötigte Sollvolumenstrom wird an der Volumenstrommessung eingehalten. Da sich die Volumenstrommessung in der Regel nicht direkt am Raum (also am Luftdurchlass) befindet, wird diese Leckage in zwei Bereiche unterteilt. Diese sind in Abbildung 4.3 zu sehen.

- vor der Volumenstrommessung $\dot{V}_{LeckZu1}$
- nach der Volumenstrommessung $\dot{V}_{LeckZu2}$

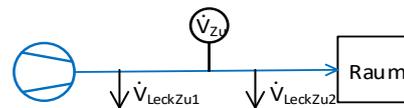


Abbildung 4.3: Aufteilung Leckagevolumenstrom Druckseite Zuluft

Der Volumenstrom, welcher durch Leckagen vor der Volumenstrommessung $\dot{V}_{LeckZu1}$ entweicht, muss vom Ventilator mehr gefördert werden, um seine Regelaufgabe zu erfüllen. Der Einfluss der Leckagen nach der Volumenstrommessung $\dot{V}_{LeckZu2}$ ist von der aktuellen Regelaufgabe abhängig. Bei Personenanwesenheit wird der CO_2 -Grenzwert durch die Leckagen zwischen der Sollvolumenstrombereitstellung (Volumenstrommessung) und dem Raum überschritten, da weniger Luft in den Raum strömt als notwendig. Dies erhöht den Sollvolumenstrom bis der CO_2 -Grenzwert eingehalten wird. Aus der Erhöhung des Sollvolumenstromes ergeben sich Erhöhungen der Leckagevolumenströme sowohl vor als auch nach der Volumenstrommessung. Bei Personenabwesenheit entsteht durch die Leckagen nach der Volumenstrommessung eine Differenz zwischen Sollvolumenstrom (Mindest- bzw. Grundlüftung) und tatsächlichem Zuluftvolumenstrom am Durchlass. Der Zuluftvolumenstrom am Durchlass ist geringer als der Sollvolumenstrom. Diese Differenz wird nicht festgestellt und hat damit keine weiteren Konsequenzen auf die Regelung, es entsteht keine Mehrförderung von Luft.

Durch die Mehrförderung von Luft erhöht sich die elektrische Leistungsaufnahme des Ventilators (Gl.4.8 S.61). Das dVt-System hat bei dieser Leckage Vorteile gegenüber dem VSR-System. Aufgrund geringerer Überdrücke im Kanalnetz sowie geringerer Kanallänge im Überdruck entstehen kleinere Leckagevolumenströme.

4.2.3 Leckagevolumenstrom Saugseite Abluft

Bei dieser Leckage wird im Abluftnetz Luft angesaugt. Auch diese Leckage ist sowohl im dVt-System als auch im VSR-System vorhanden. Die hygienischen Auswirkungen dieser Leckage sind irrelevant, da es sich bereits um belastete Abluft handelt und die Luftqualität nicht für die Erfüllung einer Regelaufgabe relevant ist.

Aufgrund der Regelaufgabe des Abluftventilators hat diese Leckage einen energetischen Einfluss. Zum Ausgleich der Luftbilanz zwischen Zu- und Abluft muss die Luft, welche dem Raum über das Zuluftnetz zugeführt wird, über das Abluftnetz wieder abgeführt werden. Damit ist diese Leckage sowohl von der Zuluftvolumenstrommessung als auch von der Abluftvolumenstrommessung abhängig. Auch hier werden die Leckagen in vor und nach der Volumenstrommessung unterschieden (Abbildung 4.4).

- vor der Volumenstrommessung $\dot{V}_{LeckAb1}$
- nach der Volumenstrommessung $\dot{V}_{LeckAb2}$

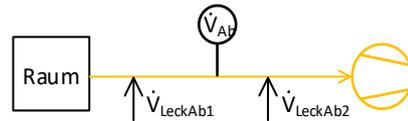


Abbildung 4.4: Aufteilung Leckagevolumenstrom Saugseite Abluft

Jeder Volumenstrom $\dot{V}_{LeckAb2}$, welcher nach der Volumenstrommessung nicht aus dem Raum, sondern über Leckage zusätzlich in das Abluftnetz eingetragen wird, ist ein Mehraufwand für den Ventilator und kann analog zu dem Mehraufwand aus Kapitel 4.2.2 bewertet werden. Jede Sollvolumenstromerhöhung auf der Zuluftseite bedeutet eine Erhöhung des Abluftvolumenstromes und damit eine Erhöhung des Leckagevolumenstromes vor der Volumenstrommessung. Des Weiteren hat diese Leckage Auswirkungen auf den exakten Ausgleich der Luftbilanz zwischen Zu- (\dot{V}_{ZuR}) und Abluft (\dot{V}_{AbR}) des Raumes.

$$\dot{V}_{ZuR} = \dot{V}_{Zu} - \dot{V}_{LeckZu2}$$

$$\dot{V}_{AbR} = \dot{V}_{Ab} - \dot{V}_{LeckAb1}$$



Bedingung:

$$\dot{V}_{Zu} = \dot{V}_{Ab}$$

$$\dot{V}_{LeckZu2} = \dot{V}_{LeckAb1}$$

dann:

$$\dot{V}_{ZuR} = \dot{V}_{AbR}$$

Abbildung 4.5: Ausgleich der Luftbilanz bei Leckagevolumenströmen

Dadurch wird deutlich, dass nur bei gleichen Leckagevolumenströmen ($\dot{V}_{LeckZu2} = \dot{V}_{LeckAb1}$) die Luftbilanz des Raumes eingehalten werden kann, wenn aufgrund der Regelaufgabe die gemessenen Volumenströme gleich sind ($\dot{V}_{Zu} = \dot{V}_{Ab}$).

Das dVt-System weist prinzipiell Vorteile, sowohl energetisch als auch hinsichtlich des Ausgleiches der Luftbilanz, gegenüber dem VSR-System auf. Grund dafür sind geringere Unterdrücke im Kanalnetz.

4.2.4 Leckagevolumenstrom Druckseite Abluft

Dieser Leckagevolumenstrom kann im Kanalnetz nur im dVt-System auftreten. Unter dem hygienischen Aspekt besagt die [DIN EN 13779], dass Abluftleitungen in der Regel mit Unterdruck betrieben werden sollen. Unter den Voraussetzungen, dass

- die Abluft Kategorie ETA 1 (geringer Verunreinigungsgrad) oder ETA 2 (mäßiger Verunreinigungsgrad) angehört,
- die Dichtheit der Kanäle der Klasse C (nach [DIN EN 12237]) entspricht und
- keine Zuluftkanäle im selben Schacht mit Unterdruck betrieben werden,

darf die Abluft laut [DIN EN 13779] auch mit Überdruck gefördert werden. Die Empfehlungen der [DIN EN 13779] sind für die Druckverhältnisse in konventionellen Lüftungsanlagen (zum Beispiel VSR-System) entstanden. Im dVt-System herrschen geringere Über- bzw. Unterdrücke. Bei den genannten Ab-

Luftkategorien ETA 1 und ETA 2 ist die Wiederverwendung von Abluft als Zuluft (Umluft bzw. Überströmung) zulässig. Also sollten Leckagen im Kanalnetz für diese Fälle auch zulässig sein. Höher verunreinigte Abluft (ETA 3) sollte nicht mit Überdruck geführt werden. Dies betrifft vor allem Toiletten-Abluft. Für das dVt-System wird empfohlen, stark verunreinigte Abluft über ein gesondertes Abluftnetz zu führen. Diese Vorgaben sollen aus hygienischer Sicht gewährleisten, dass keine verunreinigte Abluft der Zuluft über Leckagen beigemischt wird.

Energetischen Einfluss hat diese Leckage höchstens einen indirekten, indem sie eventuell die Zuluft belastet (Kapitel 4.2.1 S.59). Die Regelaufgabe des dezentralen Abluftventilators wird nicht beeinträchtigt, da es für den Ventilator unerheblich ist, wo die von ihm geförderte Luft hinströmt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das Kanalnetz in beiden Systemen gleich aufgebaut sein kann, jedoch sind die neuen Drucksituationen im dVt-System zu beachten. Das dVt-System hat größere Anforderungen an die Dichtheit des Kanalnetzes unter hygienischen Gesichtspunkten. Für Toiletten-Abluft muss bei Verwendung eines dVt-Systems eine extra Lüftungsanlage erstellt werden. In Bezug auf den energetischen Aspekt weist das dVt-System aber Vorteile auf. Die zu einem Mehraufwand für den Ventilator führenden Leckagen werden beim dVt-System prinzipiell geringere Leckagevolumenströme erzeugen als beim VSR-System. Grund dafür sind die geringeren Über- bzw. Unterdrücke im dVt-System.

4.3 Dezentrale Stellglieder

Im Kanalnetz befinden sich die dezentralen Stellglieder (dezentrale Ventilatoren und Volumenstromregler). Diese dienen in beiden Systemen der Bedarfslüftung, d.h. sie passen den geförderten Volumenstrom je nach Bedarf des Raumes an. Dabei werden unterschiedliche Funktionsweisen verwendet. Der dezentrale Ventilator erzeugt eine Druckerhöhung und passt seinen Betriebspunkt und damit den geförderten Volumenstrom je nach Situation an. Im Gegensatz dazu erzeugt der Volumenstromregler einen Druckverlust durch Anpassung seines Klappenwinkels bzw. des geöffneten Kanalquerschnittes. Der Volumenstromregler baut eine durch den Zentralventilator erzeugte Druckerhöhung aktiv ab. Beide Stellglieder müssen entsprechend ihres benötigten Auslegungsvolumenstromes gewählt werden und sind durch ihren Regelbereich begrenzt.

4.3.1 Regelbereich

Der Regelbereich wird eingegrenzt durch die untere und die obere Regelgrenze. Für den Vergleich der Stellglieder kann der Regelbereich durch den maximalen und den minimalen Volumenstrom definiert werden.

Die obere Regelgrenze muss so gewählt werden, dass sowohl beim Volumenstromregler als auch beim dezentralen Ventilator der Auslegungsvolumenstrom gefördert werden kann. Bei vernünftiger Auslegung und Wahl der Komponente sind theoretisch bei beiden Systemen keine Einschränkungen für die obere Regelgrenze vorhanden. In der Praxis kann die Wahl des geeigneten dezentralen Ventilators zu Problemen führen, da der Ventilatorenmarkt derzeit auf Zentralventilatoren mit großen Volumenströmen und Druckerhöhungen ausgerichtet ist. Die dezentralen Ventilatoren haben Auslegungspunkte mit eher kleinen Volumenströmen bei geringeren Druckerhöhungen, da sie nur einen begrenzten Abschnitt eines Gebäudes mit Luft versorgen. Es sind geeignete Ventilatoren am Markt vorhanden, jedoch ist die Produktvielfalt begrenzt. Überdimensionierung von Ventilatoren und damit ein nicht energieeffizienter Betrieb sind die Folge. Für das dVt-System sollten weitere Ventilatoren mit entsprechend

guten Wirkungsgraden entwickelt werden. Durch Parallelschaltung und Zusammenfassung mehrerer Ventilatoren in einer „Box“ können verschiedene Auslegungspunkte erzeugt werden (Abbildung 3.20 S.52). Bei Volumenstromreglern ist diese Problem in der Praxis aufgrund der größeren Verbreitung des Systems nicht vorhanden.

Laut Herstellerangaben liegt die untere Regelgrenze bei Volumenstromreglern als auch bei Ventilatoren bei 10 % des maximalen Volumenstromes. Der Maximalvolumenstrom des Stellgliedes muss aber nicht mit dem Auslegungsvolumenstrom des Raumes übereinstimmen. Somit kann die untere Regelgrenze aufgrund mangelnder Möglichkeiten der Ventilator- bzw. Volumenstromreglerauswahl sogar bei mehr als 10 % des Auslegungsvolumenstromes liegen. In diesem Punkt unterscheiden sich die Stellglieder nicht.

Somit sind die Regelbereiche von Ventilator und Volumenstromregler ziemlich identisch. Dabei ist die aktuell eingeschränkte Produktvielfalt für dezentrale Ventilatoren negativ zu bewerten. Allerdings hat der Volumenstromregler im Auslegungszustand bei Nennstellwinkel eine gewisse Mindestdruckdifferenz, um die Regelfähigkeit zu gewährleisten. Diese liegt je nach Hersteller, Nennweite und Auslegungsvolumenstrom zwischen 5 Pa und 100 Pa und bedeutet, dass der Volumenstromregler auch im Auslegungszustand einen nicht unerheblichen Druckverlust erzeugt. Dieser Druckverlust muss zusätzlich vom Zentralventilator überwunden werden. Dies ist ein Nachteil des Einsatzes von Volumenstromreglern gegenüber dezentralen Ventilatoren.

4.3.2 Inbetriebnahme und Übergabe

Laut [DIN 12599] ist eine Lüftungsanlage bei Übergabe auf die Gebrauchstauglichkeit zu prüfen. Dabei sind unter anderem Funktionsprüfungen und Funktionsmessungen durchzuführen. Diese bilden den Nachweis, dass die Anlage betriebsfähig ist, die vereinbarten Bedingungen erfüllt und entsprechende Sollwerte erbringt. Nach Tabelle 2 der [DIN 12599] sind für jede Lüftungsanlage verschiedene Messungen zu erbringen. Dabei handelt es sich unter anderem um die Messung verschiedener Volumenströme. Es werden die Messungen des Volumenstromes in der Zentrale und des Zuluftvolumenstromes in den Räumen gefordert. Außerdem kann die Messung der Abluftvolumenströme der Räume vertraglich vereinbart werden. Diese Messungen sind bei Nennvolumenstrom durchzuführen und dürfen von den vorgegebenen Sollwerten um $\pm 10\%$ (Zentrale) bzw. $\pm 15\%$ (Raum) abweichen. Diese Bestimmungen sind auf beide Systeme gleichermaßen anzuwenden.

Werden die vorgegebenen Volumenströme nicht erreicht, sollten zuerst die eingesetzten Stellglieder überprüft werden. Sind die Stellglieder richtig ausgelegt und entsprechend verbaut, resultieren die Abweichungen der Volumenströme von ihren Sollwerten entweder aus Leckagevolumenströmen (Kapitel 4.2 S.57) oder aus der Abweichung von den geplanten bzw. berechneten Druckverlusten zu den gebauten bzw. realen Druckverlusten der Lüftungsanlage.

Sind die realen Druckverluste größer als die berechneten, kann es sein, dass bei der Übergabe der Anlage gemessene Volumenströme zu klein sind.

Beim dVt-System bedeutet das, dass der dezentrale Ventilator seine obere Regelgrenze erreicht hat und somit für die realen Druckverluste zu klein ist. In diesem Fall muss der dezentrale Ventilator durch einen größeren ersetzt werden. Je nach Position des Vordrucksensors und Eigenschaften des gemeinsam durchströmten Kanals kann auch der Vordruck des Zentralventilators erhöht werden. Hierbei ist

jedoch zu beachten, dass der Zentralventilator maximal die Druckverluste bis zur ersten Verzweigung des Kanalnetzes überwinden darf.

Der Grund für die Unterschreitung des Sollvolumenstromes beim VSR-System ist, dass der Vordruck am Volumenstromregler nicht ausreicht, um die entsprechende Mindestdruckdifferenz des Volumenstromreglers herzustellen. Der durch den Zentralventilator bereitgestellte Vordruck ist zu erhöhen. Dabei kann es zur Überschreitung der oberen Regelgrenze des Zentralventilators kommen. In diesem Fall muss der Zentralventilator durch einen größeren ersetzt werden.

Bei kleineren Druckverlusten als in der Planung errechnet, wird der Regelbereich der Stellglieder reduziert.

Für die Inbetriebnahme der beiden Systeme sind keine prinzipiellen Unterschiede vorhanden.

4.3.3 Reaktion auf einen Sollwertsprung

Ein Sollwertsprung ist die sprunghafte Veränderung eines Sollwertes von einem Wert auf einen anderen Wert. Die Reaktion auf einen Sollwertsprung von Ventilator und Volumenstromregler wird am RLTVersuchsstand (Kapitel 3.2 S. 43) des Fachgebietes Technische Gebäudeausrüstung der Universität Kassel untersucht. Ziel der Untersuchung ist festzustellen, ob eines der Stellglieder veränderte Sollvolumenströme schneller und genauer ausregeln kann. Den drei Volumenstromreglern bzw. dezentralen Ventilatoren werden in getrennten Versuchen dieselben Profile für die Sollvolumenströme vorgegeben. Jedes Profil variiert zwischen hohen und niedrigen Sollvolumenströmen. Zum Vergleich der Systeme werden die an den Messkreuzen erfassten Volumenströme über die Zeit dargestellt.

Prinzipiell zeigen die Ergebnisse der Messungen, dass die vorgegebenen Sollvolumenströme von beiden Stellgliedern ausgeregelt werden können. Auch die Regelabweichungen sind identisch. In Abbildung 4.6 werden zwei Ausschnitte der Messung gezeigt, aus denen die zeitliche Veränderung des Volumenstromes zu erkennen ist.

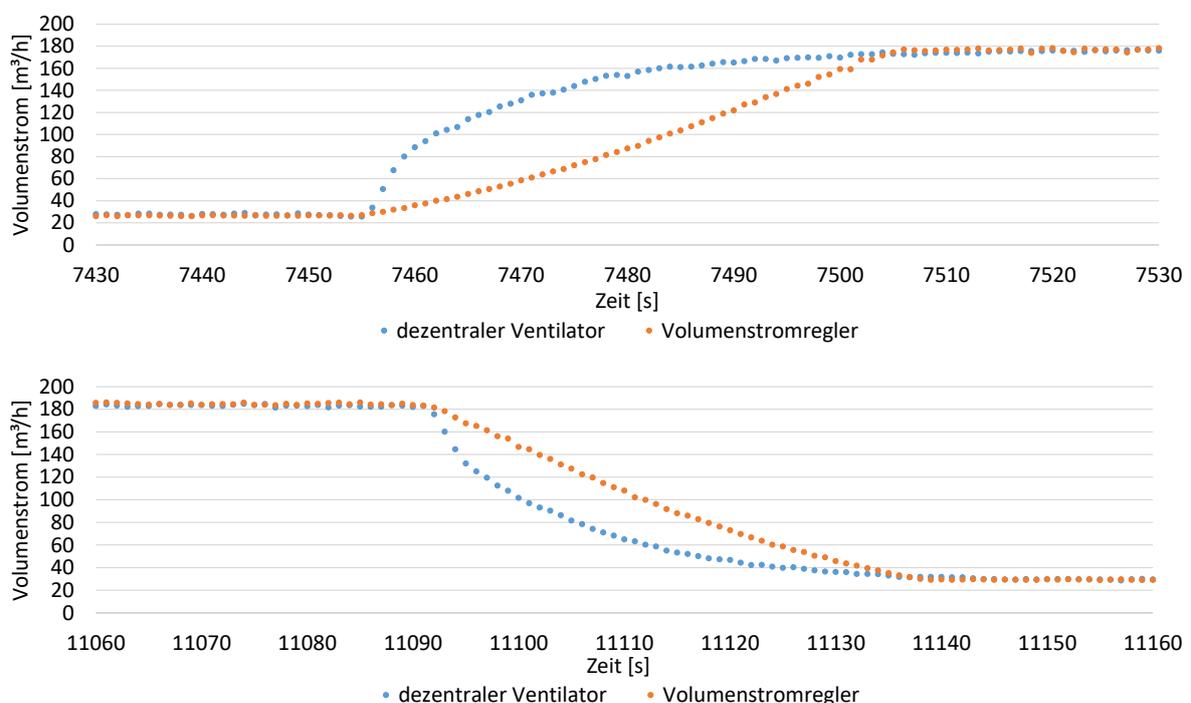


Abbildung 4.6: Reaktion auf Sollwertsprung von dVt und VSR

Es wird deutlich, dass der dezentrale Ventilator zu Beginn schneller auf die Veränderung des Sollwertes reagiert, bei der vollständigen Ausregelung des neuen Sollwertes jedoch keine Zeit- oder Stabilitätsvorteile aufweist. Es sind keine ausschlaggebenden Unterschiede zwischen dezentralem Ventilator und Volumenstromregler vorhanden. Da zum Vergleich der Systeme die identischen Messungen verwendet werden, sind die vorhandenen Messfehler des RLT-Versuchsstandes (Kapitel 3.2.2 S.45) unerheblich.

Um diese Ergebnisse zu bestätigen, sollten weitere Untersuchungen mit Stellgliedern für größere Volumenstrombereiche und anderen Reglereinstellungen durchgeführt werden.

4.3.4 Anfahrverhalten

Jede Volumenstromänderung im Kanalnetz hat Auswirkungen auf den Vordruck, welcher zur Regelung des Zentralventilators genutzt wird. Betreiber berichten von Problemen, wenn der Gesamtvolumenstrom der RLT-Anlage sprunghaft erhöht wird. Dies liegt zum Beispiel vor, wenn ein Raum vom Zustand nicht belegt in den Zustand voll belegt wechselt. Gerade bei großen Räumen wird bei diesem „Anfahren“ von Disbalancen und Schwankungen im Vordruck berichtet. Am RLT-Versuchsstand wird das Anfahrverhalten von dVt-System und VSR-System untersucht und überprüft, ob zwischen den Systemen prinzipielle Unterschiede vorhanden sind.

Für die Untersuchung werden den dezentralen Stellgliedern beider Systeme Profile mit Sollvolumenströmen vorgegeben. Die Profile sind so aufgebaut, dass insgesamt vier Anfahrvorgänge vorhanden sind. Bei jedem Anfahrvorgang wird der Sollvolumenstrom von mindestens einem dezentralen Stellglied von 0 auf 100 % des Auslegungsvolumenstromes verändert. Zwischen den Anfahrvorgängen sind Phasen vorhanden, in denen der Sollvolumenstrom jedes dezentralen Stellgliedes 0 m³/h beträgt. Die drei Profile für die Sollvolumenströme sind in Abbildung 4.7 zu sehen.

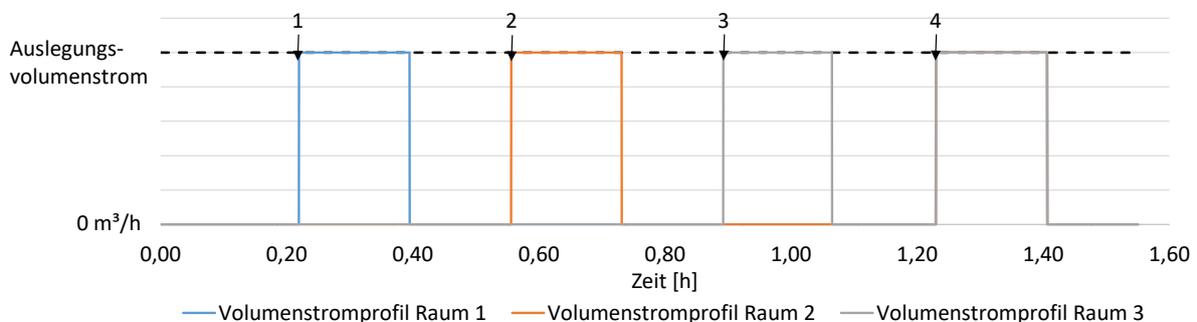


Abbildung 4.7: Volumenstromprofile zur Untersuchung des Anfahrverhaltens

So werden während des Messablaufes vier Anfahrvorgänge erzeugt. Abbildung 4.8 zeigt den Vordruck zur Regelung des zentralen Zuluftventilators. Dabei sollen an dieser Stelle im dVt-System 0 Pa und im VSR-System 175 Pa Differenzdruck gegenüber der Umgebung herrschen.

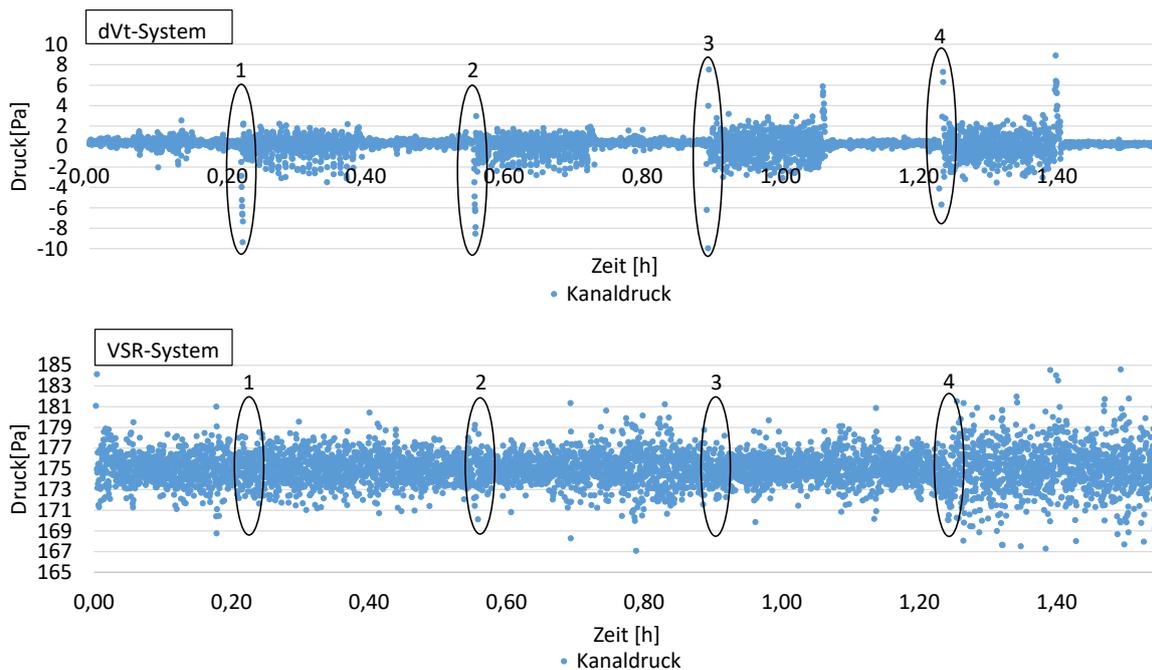


Abbildung 4.8: Gemessener Vordruck der Zentralventilatoren bei verschiedenen Anfahrvorgängen des dVt-Systems und VSR-Systems

Die Ergebnisse sind Folge der Reaktion der dezentralen Stellglieder auf den Sollwertsprung (Abbildung 4.6 S.66). Beim dVt-System können die vier Anfahrvorgänge eindeutig identifiziert werden. Dies ist beim VSR-System nicht der Fall. Die dezentralen Ventilatoren erhöhen den geförderten Volumenstrom bei Sollwertsprung schneller als die Volumenstromregler (Abbildung 4.6 S.66). Durch die schnellere Reaktion auf den Sollwertsprung der dezentralen Ventilatoren entsteht zu Beginn des Sollwertsprungs eine größere Regeldifferenz zwischen Soll- und Istvordruck. Der Regler des Zentralventilators reagiert darauf mit einer stärkeren Änderung des Stellsignales als beim VSR-System. Dies erklärt die sichtbaren Über- und Unterschreitungen in den Markierungen des Vordruckes des dVt-Systems. Wird die Reaktion auf den Sollwertsprung der Stellglieder durch andere Reglereinstellungen angepasst, so gleichen sich auch die hier gezeigten Ergebnisse an.

Des Weiteren ist beim dVt-System zu erkennen, dass sich nach den Anfahrvorgängen die Abweichungen des Vordruckes leicht erhöhen. Zwischen den Anfahrvorgängen sind die Ventilatoren aus und es muss keine Regelung des Vordruckes stattfinden.

Prinzipiell kann gesagt werden, dass der Sollwert in beiden Systemen gut eingehalten wird. Die Abweichungen betragen ca. ± 5 Pa. Es ergeben sich aus dieser Untersuchung keine prinzipiellen Unterschiede oder weitere Konsequenzen. Auch hier sollten wie in Kapitel 4.3.3 weitere Untersuchungen mit anderen Reglereinstellungen durchgeführt werden.

4.3.5 Schall

Sowohl für den dezentralen Ventilator als auch den Volumenstromregler als Stellglied ist zu beachten, dass gewisse Schallgrenzwerte im Raum eingehalten werden. Diese liegen zum Beispiel bei einer Büronutzung laut [DIN EN 15251] bei 35 dB(A). Für beide Stellglieder sind entsprechend ausgelegte Schalldämpfer vorzusehen. Die Höhe der notwendigen Schalldämpfung hängt von verschiedenen Einflussgrößen wie:

- der Position des Stellgliedes im Kanalnetz (Entfernung zum Raum) und
- dem Arbeitspunkt des Stellgliedes

ab. Prinzipiell kann festgestellt werden, dass Volumenstromregler laut [Kober, Müller 2013] die größten Geräusche im unteren Regelbereich verursachen. Je größer die Abdrosselung am Volumenstromregler, desto größer das Geräusch. Ventilatoren hingegen emittieren laut [Bommes 2003] im oberen Regelbereich den größten Schall, d.h. gerade im häufig vorliegenden Teillastbereich haben Ventilatoren ihre geringsten Schallemissionen.

4.3.6 Umnutzung des Raumes

In diesem Abschnitt werden die Auswirkungen einer Umnutzung des Raumes auf die beiden Systeme und vor allem die Stellglieder untersucht. Unter Umnutzung des Raumes wird eine Veränderung der maximalen Personenanzahl des Raumes verstanden, d.h. der Auslegungsvolumenstrom des Raumes verändert sich. Laut [VDI 3804] ist die Umnutzung von Räumen beim VSR-System nur eingeschränkt und mit entsprechender Vorplanung möglich. Die Auswirkungen einer Erhöhung des Auslegungsvolumenstromes werden für das VSR-System in Abbildung 4.9 und für das dVt-System in Abbildung 4.10 dargestellt. Im VSR-System kann diese Erhöhung des Auslegungsvolumenstromes Auswirkungen auf folgende Punkte haben:

- Die Größe des Volumenstromreglers und damit die notwendige Mindestdruckdifferenz des Volumenstromreglers.
- Den Schlechtstrang und damit den benötigten Vordruck.

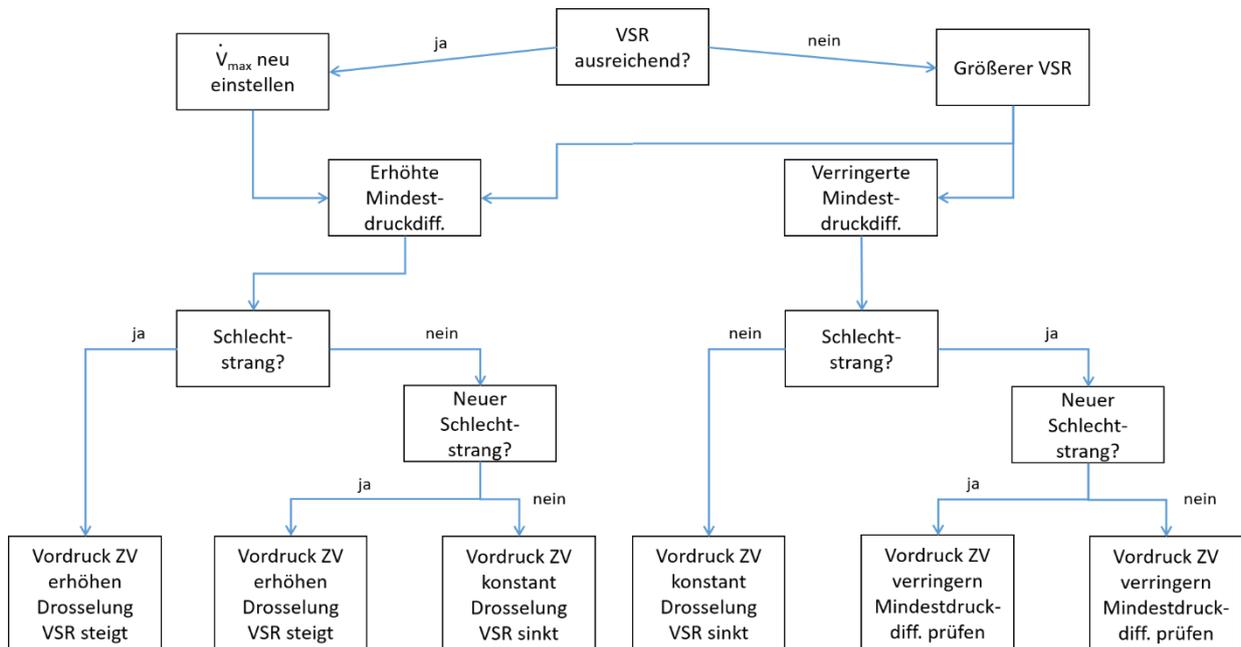


Abbildung 4.9: Konsequenzen der Erhöhung des Auslegungsvolumenstromes im VSR-System

Beim VSR-System ist zunächst zu überprüfen, ob der verbaute Volumenstromregler des Raumes für den größeren Volumenstrom geeignet ist. Gegebenenfalls muss ein neuer Volumenstromregler eingebaut werden. Dabei ist zu beachten, dass sich die Mindestdruckdifferenz des Volumenstromreglers ändert. Die veränderte Mindestdruckdifferenz verändert den Druckverlust im Kanalnetz. Es ist zu überprüfen, ob die Veränderung des Druckverlustes im Schlechtstrang stattfindet. Ist dies nicht der Fall,

kann es eventuell einen neuen Schlechtstrang geben. Erhöht sich der Druckverlust im Schlechtstrang, muss der durch den Zentralventilator bereitgestellte Vordruck erhöht werden. Ein erhöhter Vordruck und der erhöhte Gesamtvolumenstrom können zur Folge haben, dass der Zentralventilator seine obere Regelgrenze erreicht und durch einen größeren Ventilator ersetzt werden muss. Verringert sich der Druckverlust im Schlechtstrang, kann der durch den Zentralventilator bereitgestellte Vordruck verringert werden. Dabei müssen aber die Mindestdruckdifferenzen aller Volumenstromregler beachtet werden.

Im dVt-System stellen sich die Auswirkungen einer Veränderung des Nennvolumenstromes anders dar. Diese haben Auswirkungen auf:

- Die Größe des dezentralen Ventilators und die Betriebspunkte der parallelen dezentralen Ventilatoren.

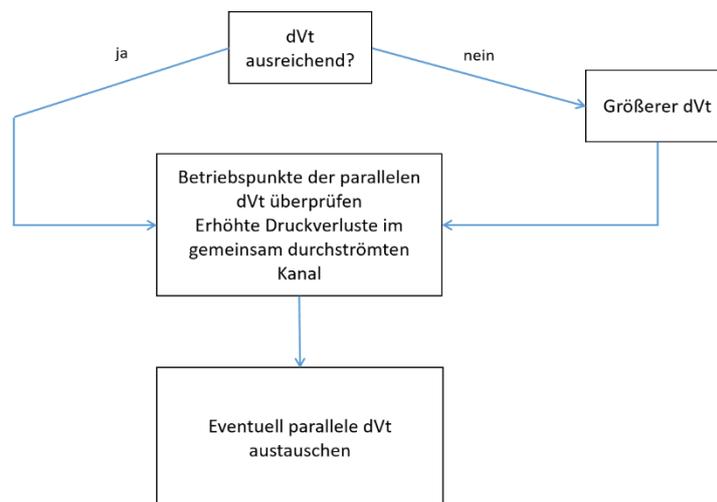


Abbildung 4.10: Konsequenzen der Erhöhung des Auslegungsvolumenstromes im dVt-System

Auch hier muss zunächst überprüft werden, ob der neue Betriebspunkt vom verbauten dezentralen Ventilator erfüllt werden kann. Ist dies nicht der Fall, muss der Ventilator ausgetauscht werden. Durch den erhöhten Volumenstrom der Zone erhöht sich der Druckverlust im gemeinsam durchströmten Kanal. Dies hat Auswirkungen auf die parallel angeordneten dezentralen Ventilatoren (Kapitel 6 S.112). Deren Betriebspunkte müssen überprüft und die Ventilatoren gegebenenfalls ausgetauscht werden.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass die Veränderung der Nutzung eines Raumes dazu führen kann, dass in beiden Systemen das Stellglied ausgetauscht werden muss. Außerdem muss in beiden Systemen mit Auswirkungen auf die parallel angeordneten Stellglieder gerechnet und der Betriebspunkt des Zentralventilators überprüft werden, wobei der Vordruck im dVt-System im Gegensatz zum VSR-System nicht angepasst werden muss.

5 Untersuchung der anlagentechnischen Umsetzungen des dVt-Systems

Aus dem Vergleich zwischen dVt-System und VSR-System geht hervor, dass zwischen den Systemen Unterschiede vorhanden sind, das dVt-System aber prinzipiell für eine bedarfsgerechte Lüftung geeignet ist. Im Folgenden werden die konkreten anlagentechnischen Umsetzungen des dVt-Systems (Kapitel 2 S.8) und ihre Regelungen auf Einsatzrandbedingungen untersucht. Mit diesen Untersuchungen wird die zweite Forschungsfrage der vorliegenden Arbeit beantwortet. Danach liegen anlagentechnische Umsetzungen mit bekannten Einsatzrandbedingungen für das dVt-System vor.

5.1 Untersuchungen der Einzelraumversorgungen

In diesem Kapitel werden die vier Regelungen der erstellten Einzelraumversorgungen aus Tabelle 2.2 (S.13) beschrieben und untersucht.

5.1.1 Vollständige Einzelraumregelung (Regelung 1a)

Die vollständige Einzelraumregelung ist die grundlegende Basisvariante. Der Komponentenaufwand geht bereits aus Abbildung 2.2 (S.9) hervor. Die Regelung der dezentralen Ventilatoren stellt sich wie folgt dar:

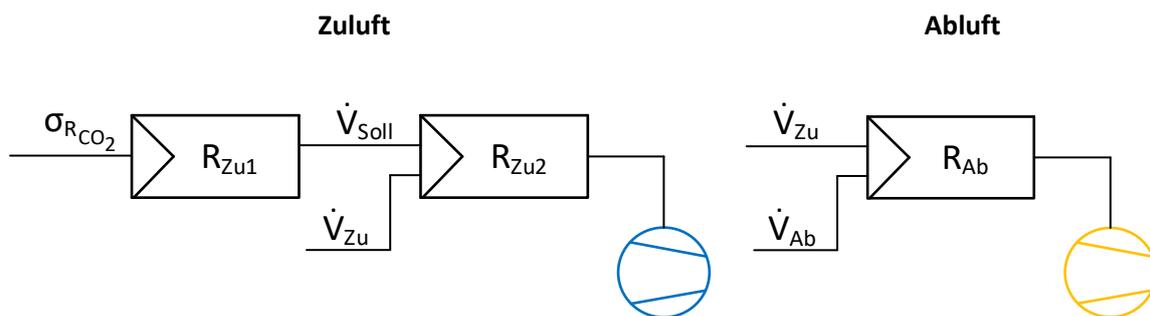


Abbildung 5.1: Regelung von dezentralem Zu- und Abluftventilator bei der vollständigen Einzelraumregelung

Aus dem CO₂-Raumsignal σ_{RCO_2} wird über den Regler R_{Zu1} und den hinterlegten CO₂-Grenzwert der Sollvolumenstrom \dot{V}_{Soll} für den Zuluftventilator bestimmt. Dieser Sollvolumenstrom wird über einen weiteren Regler (R_{Zu2}) und den Zuluftvolumenstrom \dot{V}_{Zu} am Zuluftventilator eingestellt. Außerdem wird der Zuluftvolumenstrom zur Regelung des zugehörigen Abluftventilators genutzt. Diese Regelung (R_{Ab}) vergleicht den Volumenstrom der Abluft (\dot{V}_{Ab}) mit dem Volumenstrom der Zuluft (\dot{V}_{Zu}) und stellt die Drehzahl des Abluftventilators so ein, dass die Luftbilanz ausgeglichen ist.

Ob diese Regelung das angestrebte robuste Betriebsverhalten erreicht wird im Folgenden überprüft.

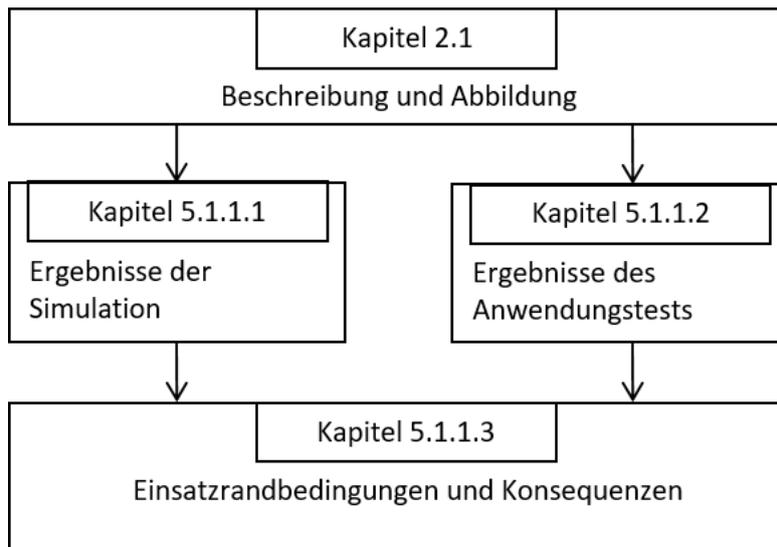


Abbildung 5.2: Aufbau der Untersuchungen zur vollständigen Einzelraumregelung (Variante 1a)

Diese Regelung wird sowohl in den Simulationen (Kapitel 5.1.1.1) als auch im Anwendungstest (Kapitel 5.1.1.2 S.75) umgesetzt und untersucht. Aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen werden die Einsatzrandbedingungen und Konsequenzen (Kapitel 5.1.1.3 S.77) für diese anlagentechnische Umsetzung abgeleitet.

5.1.1.1 Ergebnisse der Simulation

Tabelle 5.1 gibt einen Überblick über die Simulationsergebnisse der vollständigen Einzelraumregelung. Die Auswertung erfolgt wie in Kapitel 3.1.3 (S.24) beschrieben.

Tabelle 5.1: Überblick der Ergebnisse der Einzelraumregelung (Erläuterung der Tabelle siehe Tabelle 3.4 S.26)

Parameter-variation	CO ₂ -Konzentration [ppm]			Grundlüftung [%]			Luftbilanz [%]			Regelaufgabe Zentral [Pa]	
	Rk	Rm	Rg	Rk	Rm	Rg	Rk	Rm	Rg	Zuluft	Abluft
Grenz-/Sollwert	770	850	1050	18	4,8	2,4	0			0	
Zul. Abweichung	+ 50			± 5			+ 5			± 3	
Netz-mittel	770	850	1052	30	15	14	0,4	0,5	0,4	3	-3
Netz-lang	770	850	1052	28	21	14	0,6	0,6	0,6	3	-3
Netz-kurz	770	850	1051	18	17	15	0,2	0,3	0,3	2	-2
Symmetrie-0,5	770	850	1053	30	15	14	0,8	1,1	4,4	2	-1
Symmetrie-1,5	770	850	1052	30	15	14	0,5	0,5	0,7	2	-2
Fenster offen	526	689	1051	48	31	18	0	0	2	0	0
n₅₀-0	770	850	1052	27	15	14	0,4	0,5	0,5	3	-3

Die Grenzwerte der CO₂-Konzentrationen werden in keinem Raum in keiner Parametervariation nennenswert überschritten.

Die Grundlüftungsvolumenströme werden in allen Parametervariationen überschritten (Ausnahme „Netz-kurz“). Diese Überschreitungen werden auf den begrenzten Regelbereich der Ventilatoren zurückgeführt. Die Ventilatoren arbeiten in den angesprochenen Zuständen auf minimaler Drehzahl und können ihren Betriebspunkt nicht noch weiter verringern. Für „Raum klein“ und „Raum mittel“ kann der Grundlüftungsvolumenstrom bereitgestellt werden, wenn „Raum groß“ belegt ist. Dann ist der Druckverlust im gemeinsam durchströmten Kanalabschnitt so groß, dass die Ventilatoren die entsprechenden reduzierten Volumenströme bereitstellen können. „Raum groß“ überschreitet den Grundlüftungsvolumenstrom immer. Der dort geforderte Sollwert ist extrem klein im Vergleich zum Auslegungsvolumenstrom, da sich der Grundlüftungsvolumenstrom aus der Raumfläche und der Auslegungsvolumenstrom aus der maximalen Personenanzahl ergibt und die Hörsaalnutzung mit 1 m²/P eine hohe Personenbelegungsdichte aufweist. Bei der Parametervariation „Netz-kurz“ kann der eingesetzte Ventilator die Grundlüftung von „Raum klein“ bereitstellen und es findet keine Überlüftung statt. Auffallend sind die höheren Überschreitungen der Grundlüftung in der Variation „Fenster offen“. Anhand der Abbildung 5.3 wird dieses Phänomen erklärt. Dargestellt sind ein schematischer Raum mit geöffnetem Fenster sowie Zu- und Abluftventilator.

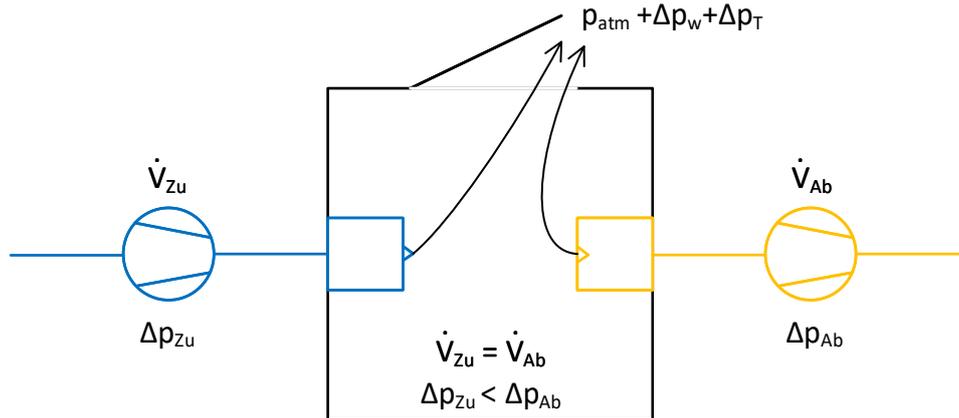


Abbildung 5.3: Strömungssituation bei geöffnetem Fenster Einzelraumregelung

Diese Überschreitungen sind mit den geöffneten Fenstern zu erklären. Hauptsächlich durch die angenommene Windgeschwindigkeit stellt sich ein stark ausgeprägter Unterdruck auf der Fassade und damit in den Räumen ein. Der Unterdruck erzeugt einen Sog (schwarze Pfeile) und erleichtert es dem Zuluftventilator, Luft in den entsprechenden Raum zu fördern, gleichzeitig muss der Abluftventilator diesen Druck zusätzlich überwinden. In der Simulation herrscht ein Unterdruck von ca. 20 Pa auf der Fassade. Daraus folgt, dass der Zuluftventilator auf minimaler Drehzahl mehr Luft fördert und sich die Druckerhöhungen der Zu- und Abluftventilatoren bei gleich parametrisierten Kanalnetzen unterscheiden. Beispielfhaft werden in Abbildung 5.4 die Druckerhöhungen von dezentralem Zu- und Abluftventilator von „Raum klein“ aus der Parametervariation „Fenster offen“ gezeigt.

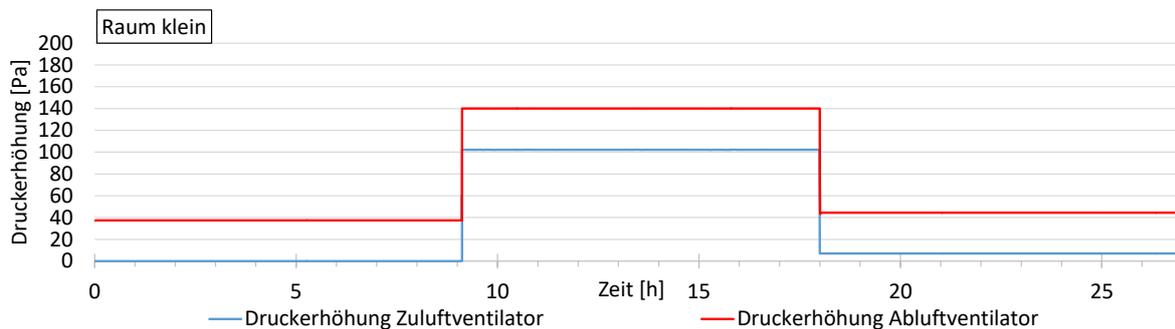


Abbildung 5.4: Verlauf der Druckerhöhungen Raum klein: Einzelraumregelung; „Fenster offen“

Die beschriebenen Auswirkungen sind in dem Diagramm zu erkennen. Der Abluftventilator muss zusätzlich 20 Pa überwinden und der Zuluftventilator muss 20 Pa weniger überwinden. Daraus ergibt sich eine Differenz zwischen den Druckerhöhungen von ca. 40 Pa. Der Zuluftventilator arbeitet mit seiner minimalen Drehzahl und muss bei offenem Fenster 20 Pa weniger Druckerhöhung bereitstellen als bei geschlossenem Fenster. Dies wird in Abbildung 5.5 an einer beispielhaften Ventilator Kennlinie skizziert. Der blaue Punkt stellt dabei den Betriebspunkt bei geschlossenem Fenster und der rote bei geöffnetem Fenster dar.

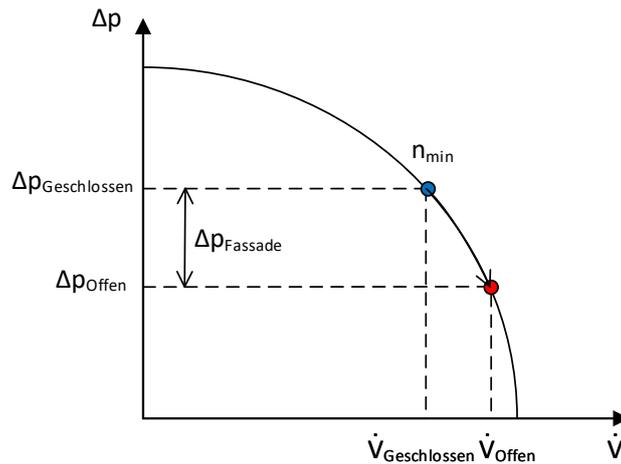


Abbildung 5.5: Veränderung des Betriebspunktes des dezentralen Zuluftventilators bei geöffnetem Fenster mit Unterdruck auf der Fassade

Verringert sich bei konstanter Drehzahl die benötigte Druckerhöhung, so erhöht sich der Volumenstrom. Da der Ventilator bereits auf minimaler Drehzahl arbeitet, kann diese nicht weiter verringert werden. Deshalb ist der minimale Volumenstrom bei geöffnetem Fenster größer als bei geschlossenem. Unter der Voraussetzung, dass ein Unterdruck auf der Fassade herrscht, ist das Verhalten plausibel. Sollte bei geöffnetem Fenster ein Überdruck (Wind von Luv) vorhanden sein, kehrt sich das Phänomen um, die zu überwindenden Druckverluste für den Zuluftventilator erhöhen sich und ein geringerer Volumenstrom kann gefördert werden.

Bei der Luftbilanz können keine nennenswerten Abweichungen festgestellt werden. Die Volumendstromdifferenz zwischen Zu- und Abluftvolumenstrom von „Raum groß“ ist bei der Parametervariation „Symmetrie-0,5“ im Vergleich zu den anderen Parametervariationen erhöht. Die dargestellte Abweichung ist vorhanden, wenn alle Räume nicht belegt sind und Grundlüftung gefördert wird. Grund für die größere Disbalance sind die unterschiedlichen Druckverluste auf Zu- und Abluftseite. Auf beiden Luftseiten wird der gleiche Ventilator eingesetzt. Der Abluftventilator soll denselben Volumenstrom wie der Zuluftventilator bereitstellen. Aufgrund der geringeren Druckverluste im Netz erreicht der Abluftventilator seine untere Regelgrenze an einem anderen Punkt als der Zuluftventilator und kann nicht denselben Volumenstrom fördern.

Auch die Vordrücke der zentralen Zu- und Abluftventilatoren werden eingehalten.

5.1.1.2 Ergebnisse des Anwendungstestes

Die vollständige Einzelraumreglung ist am Anwendungstest am Strang Hörsaal umgesetzt. Abbildung 5.6 zeigt die CO₂-Konzentration und die Beträge von Zu- und Abluftvolumenstrom für einen beispielhaften Tag. Der CO₂-Grenzwert liegt bei 800 ppm. Es werden wie bei den Simulationsrechnungen die Regelaufgaben der Ventilatoren überprüft (Kapitel 3.1.3 S.24).

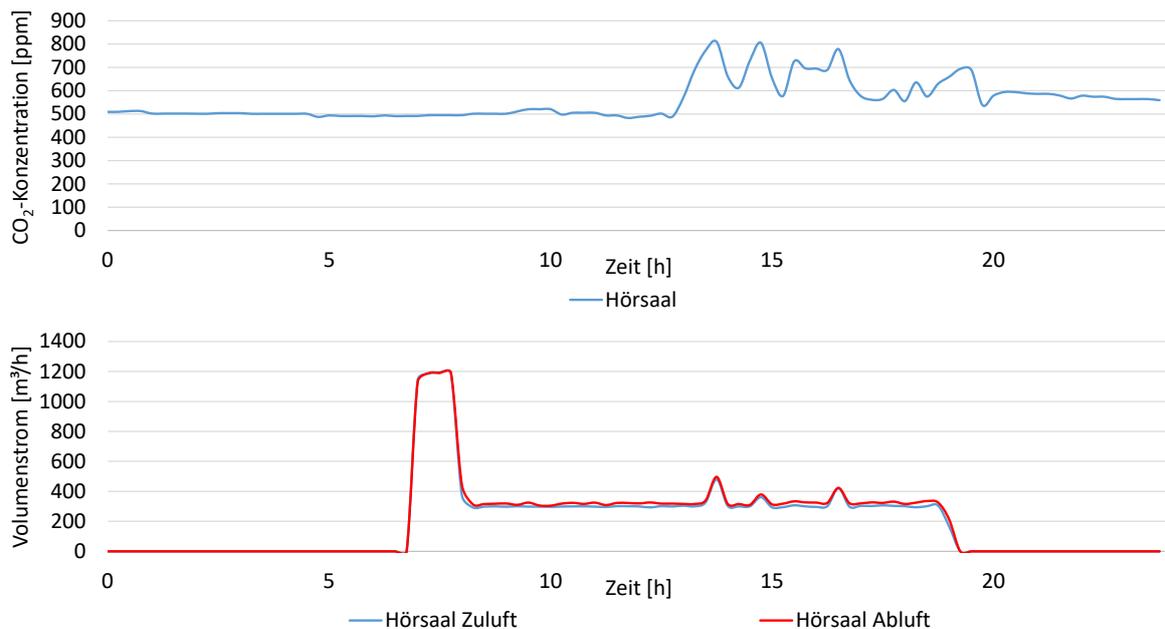


Abbildung 5.6: Gemessene CO₂-Konzentration und Volumenströme der Zone Hörsaal

Der CO₂-Grenzwert wird nicht nennenswert überschritten. Wie aus der CO₂-Konzentration zu erkennen wird der Hörsaal nur in der zweiten Hälfte des Tages genutzt. Anhand der Volumenströme sind sowohl die Vorspülung vor der Nutzungszeit (7 bis 8 Uhr) als auch die CO₂-Regelung und Mindestlüftung während der Nutzungszeit (8 bis 19 Uhr) zu erkennen. Wird während der Nutzungszeit der vorgegebene CO₂-Grenzwert erreicht, wird wie vorgesehen ein höherer Volumenstrom als die Mindestlüftung gefördert.

Der Abluftvolumenstrom und der Zuluftvolumenstrom zeigen in Ihren Beträgen eine gute Übereinstimmung, die maximale Abweichung beträgt 5 %. Bedingt durch die Regelaufgabe fördert der Abluftventilator des Hörsaals die Zuluft von Hörsaal und Foyer ab. Im dargestellten Verlauf ist der Zuluftvolumenstrom des Foyers vom Abluftvolumenstrom des Hörsaals abgezogen. Der Ausgleich der Luftbilanz ist sowohl für die ausschließliche Betrachtung von Hörsaal Zuluft und Hörsaal Abluft als auch unter Berücksichtigung des Foyers gegeben und wird damit positiv bewertet.

Sowohl der Fehler der CO₂-Messung als auch der Fehler der Volumenstrommessung hat auf die Überprüfung der Regelaufgaben der hier gezeigten Regelung keinen Einfluss. Grund dafür ist, dass die gezeigten Regelaufgaben auch direkt in der Regelung genutzt werden, um die Stellsignale der Ventilatoren zu erzeugen. Wird zum Beispiel eine Überschreitung des CO₂-Grenzwertes festgestellt, so muss der dezentrale Zuluftventilator den geförderten Volumenstrom erhöhen. In der Regelung werden also zwei Zahlen (CO₂-Konzentration und CO₂-Grenzwert) verglichen. Ob die CO₂-Konzentration dabei der realen CO₂-Konzentration entspricht, ist für die Überprüfung dieser Regelaufgabe unerheblich bzw. kann nicht auf das dVt-System zurückgeführt werden. Ähnlich ist es bei der Bereitstellung der Vorspülung bzw. Mindestlüftung der dezentralen Zuluftventilatoren und dem Abgleich der Luftbilanz der dezentralen Abluftventilatoren.

Die Abweichungen des Vordrucks der Zentralventilatoren von ihren vorgegebenen Sollwerten sind nicht nennenswert.

Diese Ergebnisse sind beispielhaft für einen längeren Messzeitraum. Somit ist die Funktionalität der vollständigen Einzelraumregelung unter realen Bedingungen überprüft.

5.1.1.3 Einsatzrandbedingungen und Konsequenzen

Die vollständige Einzelraumregelung sollte bei Nutzungen mit großen Auslegungsvolumenströmen und starkem Teillastverhalten angewandt werden. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass für die vollständige Einzelraumregelung keine einschränkenden Einsatzrandbedingungen vorhanden sind. Die vollständige Einzelraumregelung weist das angestrebte robuste Betriebsverhalten und damit eine hohe Betriebssicherheit auf. Durch die Regelung über die Vorgabe von Sollvolumenströmen kann auf verschiedene Situationen im Raum (zum Beispiel geöffnete Fenster) reagiert werden. Aus diesen Gründen hat die vollständige Einzelraumregelung eine hohe Relevanz für die praktische Umsetzung des dVt-Systems.

Einzig die Bereitstellung von geringen Volumenströmen (zum Beispiel Grundlüftung) bereitet Probleme. Diese Probleme können aber nicht auf die Einzelraumregelung zurückgeführt werden. Grund dafür ist der nach unten begrenzte Regelbereich des Ventilators. Die Überschreitungen der Grundlüftung können energetisch negativ bewertet werden, da mehr Luftvolumen gefördert wird als notwendig ist. Dies hat einen höheren Ventilatorstrombedarf zur Folge. Außerdem führen diese Überlüftungen im Winter zu einer stärkeren Entfeuchtung der Raumluft. Mit den derzeit verfügbaren Ventilatoren sind diese Probleme nicht vermeidbar. Hier müssten Ventilatoren entwickelt werden, welche auf die Eigenschaften des dVt-Systems angepasst sind. Diese Eigenschaften sind geringe Druckerhöhungen bei großen Volumenströmen und hohen Wirkungsgraden im Auslegungszustand.

5.1.2 Einzelraumregelung ohne Volumenstrommessung (Regelung 1b)

Der notwendige Komponentenaufwand geht aus Abbildung 2.7 (S.13) hervor. Abbildung 5.7 zeigt die Regelung der dezentralen Ventilatoren im Schema.

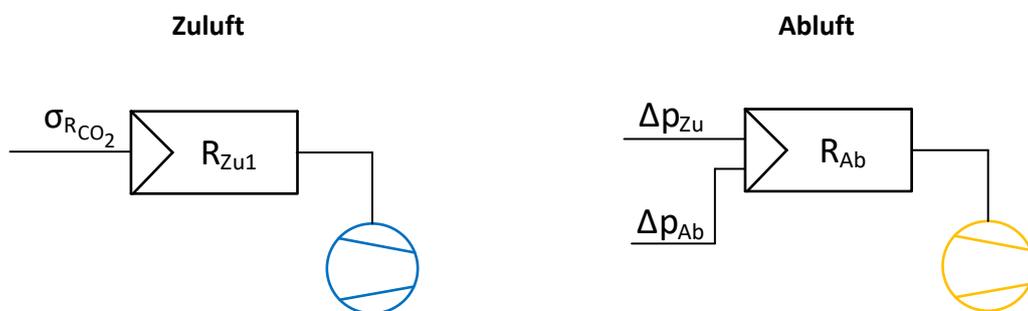


Abbildung 5.7: Regelung von dezentralem Zu- und Abluftventilator bei der Einzelraumregelung ohne Volumenstrommessung

Aufgrund des Verzichts auf Volumenstrommessung wird der dezentrale Zuluftventilator direkt nach der CO_2 -Konzentration des Raumes $\sigma_{R\text{CO}_2}$ geregelt. Der Regler R_{Zu1} vergleicht die CO_2 -Konzentration des Raumes mit dem hinterlegten Grenzwert und ermittelt so das Stellsignal für den dezentralen Zuluftventilator. Der dezentrale Abluftventilator wird über die gemessene Druckerhöhung des dezentralen Zuluftventilators geregelt (R_{Ab}).

$$\Delta p_{Ab} = \Delta p_{Zu} \cdot f_s \quad 5.1$$

f_s	[-]	Symmetriefaktor
Δp_{ab}	[Pa]	Druckerhöhung Abluftventilator
Δp_{zu}	[Pa]	Druckerhöhung Zuluftventilator

Dieser innovative Ansatz ist in der Lüftungstechnik nicht verbreitet. Die Druckerhöhung des Zuluftventilators wird mit dem Symmetriefaktor modifiziert. Je nach Aufbau der Lüftungsanlage ist ein mehr oder minder symmetrisches Kanalnetz vorhanden. Der Symmetriefaktor f_s beschreibt diese Ausprägung. Ein Symmetriefaktor von 1 bedeutet, dass die Druckverluste der Zuluftseite identisch mit denen der Abluftseite sind. Die Druckverluste müssen von den Ventilatoren der Luftseiten überwunden werden und entsprechen somit deren Druckerhöhungen.

Ein weiterer innovativer Ansatz zur Regelung des Abluftventilators ist die Skalierung der Drehzahl des Zuluftventilators nach Gl. 5.2.

$$n_{ab} = f_{skal} \cdot n_{zu} \quad 5.2$$

n_{ab}	[s ⁻¹]	Drehzahl des Abluftventilators
f_{skal}	[-]	Skalierungsfaktor
n_{zu}	[s ⁻¹]	Drehzahl des Zuluftventilators

Hierfür wird der Skalierungsfaktor eingeführt. Bei einem Ventilator kann der geförderte Volumenstrom aus der elektrischen Leistung, dem Wirkungsgrad und der Druckerhöhung berechnet werden (Gl. 4.8 S.61).

$$\dot{V}_{vent} = \frac{P_{vent} \cdot \eta_{Gesvent}}{\Delta p_{vent}} \quad 5.3$$

\dot{V}_{vent}	[m ³ /s]	Volumenstrom des Ventilators
P_{vent}	[W]	Leistungsaufnahme des Ventilators
$\eta_{Gesvent}$	[-]	Gesamtwirkungsgrad des Ventilators
Δp_{vent}	[Pa]	Druckerhöhung des Ventilators

Dafür müssen Druckerhöhung und Leistung zu jedem Zeitpunkt bekannt sein. Aus den detaillierten Kennfelddaten des Ventilators kann eine Regression zur Bestimmung des Wirkungsgrades ermittelt werden. [Alsen 2017] hat dies für eine Reihe von Ventilatoren getan.

$$\eta_{vent} = A + \frac{C}{1 + T \cdot e^{-B \cdot \left(\frac{n}{n_{max}} - M\right)^{\frac{1}{T}}}} \cdot \eta_{max} \quad 5.4$$

η_{vent}	[-]	Wirkungsgrad des Ventilators
A	[-]	Regressionsparameter A
C	[-]	Regressionsparameter C
T	[-]	Regressionsparameter T
B	[-]	Regressionsparameter B
n	[min ⁻¹]	Drehzahl des Ventilators
n_{max}	[min ⁻¹]	Maximale Drehzahl des Ventilators
M	[-]	Regressionsparameter M
η_{max}	[-]	Maximaler Wirkungsgrad des Ventilators

Die angegebenen Regressionsparameter, die maximale Drehzahl und der maximale Wirkungsgrad ergeben sich aus der Analyse der Kennfelddaten des Ventilators, wobei in den meisten Fällen der Parameter $A = 0$ und der Parameter $C = 1$ ist. Die Drehzahl des Ventilators kann bei den untersuchten Ventilatoren direkt ausgegeben werden.

Ziel ist es die Luftbilanz auszugleichen und deshalb wird der Zuluftvolumenstrom dem Abluftvolumenstrom gleichgesetzt ($\dot{V}_{Zu} = \dot{V}_{Ab}$).

Für das weitere Vorgehen werden die dimensionslosen Kennzahlen aus [Eck 2003]: Lieferzahl und Druckzahl verwendet, um \dot{V}_{Vent} und Δp_{Vent} zu quantifizieren.

$$\varphi = \frac{\dot{V}_{Vent}}{\frac{\pi^2}{4} \cdot d^3 \cdot n} \quad 5.5$$

$$\psi = \frac{\Delta p_{Vent}}{\frac{\rho}{2} \cdot \pi^2 \cdot d^2 \cdot n^2} \quad 5.6$$

φ	[-]	Lieferzahl des Ventilators
ψ	[-]	Druckzahl des Ventilators
ρ	[kg/m ³]	Dichte des geförderten Mediums (Luft)
d	[m]	Durchmesser des Laufrades

Des Weiteren wird auf die von [Alsen 2017] erstellte Regression zwischen diesen Größen zurückgegriffen.

$$\psi = c_0 + c_1 \cdot \varphi + c_2 \cdot \varphi^2 + c_3 \cdot \varphi^3 \quad 5.7$$

ψ	[-]	Druckzahl
c_0	[-]	Regressionsparameter
c_1	[-]	Regressionsparameter
φ	[-]	Lieferzahl
c_2	[-]	Regressionsparameter
c_3	[-]	Regressionsparameter

Diese Regression basiert auf einer Analyse der Kennfelddaten des Ventilators.

Für jede Luftseite wird die Druckzahl nach der Druckerhöhung wie in Gl. 5.8 umgestellt.

$$\Delta p = (c_0 + c_1 \cdot \varphi + c_2 \cdot \varphi^2 + c_3 \cdot \varphi^3) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \pi^2 \cdot d^2 \cdot n^2 \quad 5.8$$

ρ	[kg/m ³]	Dichte des geförderten Mediums
d	[m]	Durchmesser des Laufrades
n	[s ⁻¹]	Drehzahl

Durch Aufstellen dieses Zusammenhangs für jede Luftseite und Einsetzen in Gl. 5.1 (S.77) entsteht eine Gleichung, welche abhängig ist von den Ventilatorgrößen, der Drehzahl, der Lieferzahl und dem Symmetriefaktor.

$$\begin{aligned} & (c_{0Ab} + c_{1Ab} \cdot \varphi_{Ab} + c_{2Ab} \cdot \varphi_{Ab}^2 + c_{3Ab} \cdot \varphi_{Ab}^3) \cdot \pi^2 \cdot d_{Ab}^2 \cdot n_{Ab}^2 \\ & = \left((c_{0Zu} + c_{1Zu} \cdot \varphi_{Zu} + c_{2Zu} \cdot \varphi_{Zu}^2 + c_{3Zu} \cdot \varphi_{Zu}^3) \cdot \pi^2 \cdot d_{Zu}^2 \cdot n_{Zu}^2 \right) \cdot f_S \end{aligned} \quad 5.9$$

In der Drehzahl des Abluftventilators ist der gesuchte Skalierungsfaktor enthalten (Gl. 5.2 S.78). Zusätzlich wird die Lieferzahl mit dem errechneten Volumenstrom (Gl. 5.5) ersetzt.

Nun ergibt sich ein komplexer Zusammenhang, in dem der Skalierungsfaktor mit verschiedenen Potenzen auftritt. In folgender Gleichung werden aus Gründen der Übersichtlichkeit alle Größen außer dem Skalierungsfaktor zusammengefasst und danach weiter erläutert.

$$0 = k_2 \cdot f_{Skal}^2 + k_1 \cdot f_{Skal} + k_0 + k_{-1} \cdot f_{Skal}^{-1} \quad 5.10$$

$$k_2 = c_{0Ab} \cdot d_{Ab}^2 \cdot \pi^2 \cdot n_{Zu}^2 \quad 5.11$$

$$k_1 = \frac{c_{1Ab} \cdot \dot{V}_{Ab} \cdot 4 \cdot n_{Zu}}{d_{Ab}} \quad 5.12$$

$$k_0 = \frac{c_{2Ab} \cdot \dot{V}_{Ab}^2 \cdot 16}{d_{Ab}^4 \cdot \pi^2} - \left(c_{0Zu} \cdot d_{Zu}^2 \cdot \pi^2 \cdot n_{Zu}^2 + \frac{c_{1Zu} \cdot \dot{V}_{Zu} \cdot 4 \cdot n_{Zu}}{d_{Zu}} + \frac{c_{2Zu} \cdot \dot{V}_{Zu}^2 \cdot 16}{d_{Zu}^4 \cdot \pi^2} + \frac{c_{3Zu} \cdot \dot{V}_{Zu}^3 \cdot 64}{d_{Zu}^7 \cdot \pi^4 \cdot n_{Zu}} \right) \cdot f_S \quad 5.13$$

$$k_{-1} = \frac{c_{3Ab} \cdot \dot{V}_{Ab}^3 \cdot 64}{d_{Ab}^7 \cdot \pi^4 \cdot n_{Zu}} \quad 5.14$$

Mithilfe der vier Faktoren k_2 , k_1 , k_0 und k_{-1} kann der Skalierungsfaktor f_{Skal} durch Lösen der Gl. 5.10 errechnet und damit die benötigte Drehzahl des Abluftventilators bestimmt werden.

Dieses Verfahren benötigt zum einen die genaue Kenntnis der Kennfelder der eingesetzten Ventilatoren, zum anderen müssen die Druckerhöhung, die Leistung und die Drehzahl des Zuluftventilators bekannt sein. Es sind Ventilatoren am Markt verfügbar, welche die Drehzahl und die Leistung direkt ausgeben können, somit muss nur die Druckerhöhung messtechnisch erfasst werden. Bei weiteren Untersuchungen dieses Verfahrens sollten schwankende Kennfelder von baugleichen Ventilatoren und die Strömungswiderstände der Einbausituation berücksichtigt werden.

Für die Untersuchung wird der dezentrale Abluftventilator über den Abgleich der Druckerhöhung von Zu- und Abluftventilator geregelt, die Drehzahlskalierung wird aufgrund des zusätzlichen Aufwandes zur Drehzahl- und Leistungserfassung hier nicht weiterverfolgt.

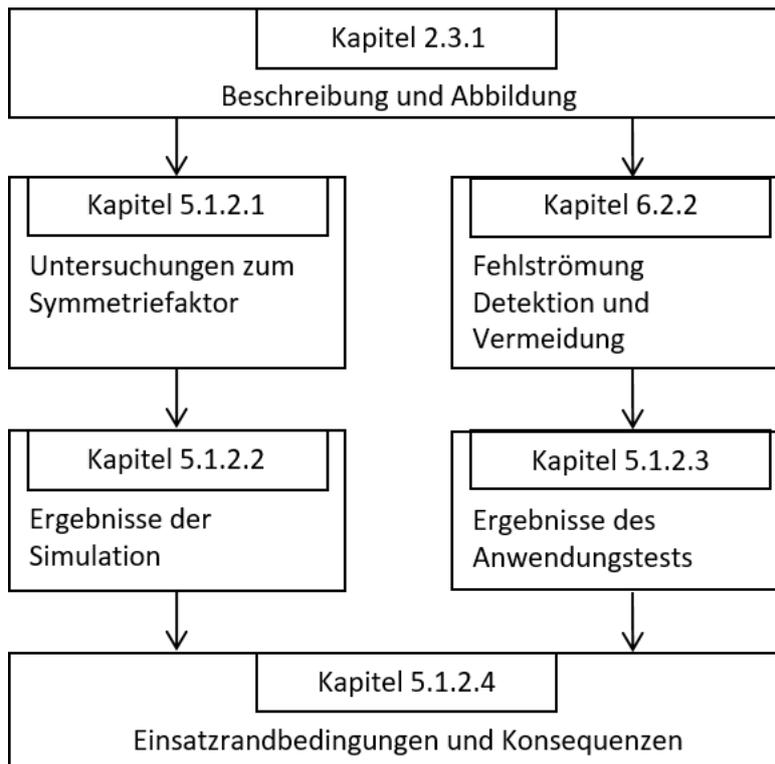


Abbildung 5.8: Aufbau der Untersuchungen zur Einzelraumregelung ohne Volumenstrommessung (Variante 1b)

Zur Regelung der Abluftventilatoren wird der Symmetriefaktor eingeführt, welcher im nachfolgenden Kapitel 5.1.2.1 untersucht wird. Des Weiteren bedingt der Verzicht auf Volumenstrommessungen eine Fehlströmungsvermeidungsstrategie. Diese wird in Kapitel 6.2.2 (S.121) untersucht. Mit den Ergebnissen dieser beiden Untersuchungen wird die Einzelraumregelung ohne Volumenstrommessung theoretisch mittels Simulationsrechnungen (Kapitel 5.1.2.2 S.85) und praktisch über den Anwendungstest (Kapitel 5.1.2.3 S.88) untersucht. Aus allen durchgeführten Untersuchungen ergeben sich Einsatzrandbedingungen und Konsequenzen (Kapitel 5.1.2.4 S.89) für die Einzelraumregelung ohne Volumenstrommessung.

5.1.2.1 Untersuchungen zum Symmetriefaktor

Der Symmetriefaktor wird zur Regelung des Abluftventilators genutzt und dient dem Ausgleich der Luftbilanz zwischen Zu- und Abluftvolumenstrom ($\dot{V}_{Zu} = \dot{V}_{Ab}$). Er stellt die Druckerhöhungen von zusammengehörenden Zu- und Abluftventilatoren ins Verhältnis (Gl. 5.1 S.77). Wie aus Kapitel 6 (S.112) hervorgeht, ist die Druckerhöhung eines Ventilators im dVt-System abhängig vom gemeinsam durchströmten Kanal und den Betriebspunkten der parallel geschalteten Ventilatoren. Es sind Betriebspunkte möglich, welche von einer rein quadratischen Anlagenkennlinie abweichen. Im Folgenden wird untersucht unter welchen Bedingungen ein konstanter Symmetriefaktor zum Ausgleich der Luftbilanz genutzt werden kann. Die Untersuchungen werden für:

- rein quadratische Anlagenkennlinien (kein gemeinsam durchströmter Kanal oder gleiche Teillastzustände der sich beeinflussenden Ventilatoren) und
- nicht rein quadratischen Anlagenkennlinien (unterschiedlich ausgeprägte gemeinsam durchströmte Kanäle und unterschiedliche Teillastzustände der sich beeinflussenden Ventilatoren)

durchgeführt.

Rein quadratische Anlagenkennlinien

Zunächst wird theoretisch untersucht, wie sich der Symmetriefaktor bei ausgeglichener Luftbilanz ($\dot{V}_{Zu} = \dot{V}_{Ab}$) ohne die gegenseitige Beeinflussung eines gemeinsam durchströmten Kanals verhält. Ist kein gemeinsam durchströmter Kanal vorhanden und liegen turbulente Strömungen vor, so werden quadratische Anlagenkennlinien beschrieben und das Proportionalitätsgesetz [Hörner, Schmidt 2011] findet Anwendung (Kapitel 6 S.112).

$$\Delta p = \left(\frac{\dot{V}}{\dot{V}^*} \right)^2 \cdot \Delta p^* \quad 5.15$$

Δp	[Pa]	Druckerhöhung beliebiger Zustand
\dot{V}	[m ³ /s]	Volumenstrom beliebiger Zustand
\dot{V}^*	[m ³ /s]	Volumenstrom im Auslegungszustand
Δp^*	[Pa]	Druckerhöhung im Auslegungszustand

Die Annahme einer turbulenten Strömung ist berechtigt, da sich die Betrachtung auf das Kanalnetz beschränkt. Aus der Arbeit von [Harbusch 2016] geht hervor, dass für Komponenten wie Filter und Wärmerückgewinnungen dieser Zusammenhang nicht zutreffend ist. Solche Komponenten werden aber vorrangig in der Lüftungszentrale eingesetzt, welche hier nicht betrachtet wird. Durch Einsetzen des Proportionalitätsgesetzes in Gl. 5.1 (S.77) entsteht nach Umstellung Gl. 5.16.

$$\left(\frac{\dot{V}_{Ab}}{\dot{V}_{Ab}^*} \right)^2 \cdot \Delta p_{Ab}^* = \left(\frac{\dot{V}_{Zu}}{\dot{V}_{Zu}^*} \right)^2 \cdot \Delta p_{Zu}^* \cdot f_S \quad 5.16$$

\dot{V}_{Ab}^*	[m ³ /s]	Abluftvolumenstrom im Auslegungszustand
\dot{V}_{Zu}^*	[m ³ /s]	Zuluftvolumenstrom im Auslegungszustand
Δp_{Ab}^*	[Pa]	Druckerhöhung Abluftventilator im Auslegungszustand
Δp_{Zu}^*	[Pa]	Druckerhöhung Zuluftventilator im Auslegungszustand

Da der Symmetriefaktor genutzt wird um die Luftbilanz ($\dot{V}_{Zu} = \dot{V}_{Ab}$) auszugleichen, kann der Abluftvolumenstrom durch den Zuluftvolumenstrom ersetzt werden und es entsteht Gl. 5.17.

$$\Delta p_{Ab}^* = \Delta p_{Zu}^* \cdot f_S \quad 5.17$$

Dies entspricht dem Zusammenhang aus Gl. 5.1 (S.77). Somit kann zusammengefasst werden, dass:

$$f_S = \frac{\Delta p_{Ab}}{\Delta p_{Zu}} = \frac{\Delta p_{Ab}^*}{\Delta p_{Zu}^*} = konst. \quad 5.18$$

der Symmetriefaktor in jedem Betriebszustand konstant ist, wenn auf beiden Luftseiten keine gemeinsam durchströmten Kanäle vorhanden sind und somit die Betriebspunkte der Ventilatoren nicht von

parallelen Ventilatoren beeinflusst werden. In diesem Fall ist der Ausgleich der Luftbilanz über den Abgleich der Druckerhöhungen von Zu- und Abluftventilator mithilfe des Symmetriefaktors möglich.

Sind auf den Luftseiten gemeinsam durchströmte Kanäle vorhanden, so werden quadratische Anlagenkennlinien beschrieben, wenn sich alle Ventilatoren im selben Teillastzustand befinden (Kapitel 6 S.112). Diese quadratischen Anlagenkennlinien sind dann unabhängig von den Ausprägungen der gemeinsam durchströmten Kanäle. Auch hier ist der Symmetriefaktor für jeden Zustand konstant, wie aus dem eben geführten Nachweis hervorgeht und ermöglicht den Ausgleich der Luftbilanz über den Abgleich der Druckerhöhungen von Zu- und Abluftventilator.

Nicht rein quadratische Anlagenkennlinien

In der Praxis kann nicht gewährleistet werden, dass die Ventilatoren eines gemeinsam durchströmten Kanals immer im selben Teillastzustand sind. Deshalb werden im Folgenden die Auswirkungen der Annahme eines konstanten Symmetriefaktors auf die Volumenstromdifferenz ($\Delta\dot{V} = |\dot{V}_{Zu}| - |\dot{V}_{Ab}|$) bei nicht rein quadratischen Anlagenkennlinien untersucht. Angestrebt wird, dass $\Delta\dot{V} = 0 \text{ m}^3/\text{h}$ ist und somit keine Disbalancen vorhanden sind. Wie sehr die Anlagenkennlinien vom rein quadratischen Verlauf abweichen wird über die unterschiedlichen Teillastzustände der Ventilatoren und die Ausprägungen der gemeinsam durchströmten Kanäle definiert (Kapitel 6 S.112).

Die Untersuchungen finden mittels Simulationsrechnungen anhand der definierten Raumgruppe (Kapitel 3.1.1 S.19) und den Druckverlusten von „Netz-mittel“ (Tabelle 3.2 S.22) statt, wobei zwei reduzierte Raumgruppen untersucht werden.

- Reduzierte Raumgruppe 1: „Raum klein“ und „Raum mittel“
- Reduzierte Raumgruppe 2: „Raum klein“ und „Raum groß“

Die Raumgruppen werden um einen Raum reduziert. Das prinzipielle Verhalten wird an nur zwei sich gegenseitig beeinflussenden Ventilatoren deutlich. Somit bestehen die Raumgruppen jeweils aus einem kleinen Raum („Raum klein“) und einem großen Raum („Raum mittel“ oder „Raum groß“). Für jede Raumgruppe werden die Untersuchungen für Symmetriefaktoren von 1,5; 1 und 0,5 durchgeführt. Für die Untersuchungen werden zwei Teillastzustände der einzelnen Räume betrachtet. Diese Teillastzustände sind:

- Teillastzustand 1: kleiner Raum: Auslegungsvolumenstrom; großer Raum: 10 % des Auslegungsvolumenstromes
- Teillastzustand 2: kleiner Raum: 10 % des Auslegungsvolumenstromes; großer Raum: Auslegungsvolumenstrom.

Aufgrund der Regelbereiche der Ventilatoren (4.3.1 S.64) sind das die extremsten möglichen Teillastzustände. In diesen Zuständen weichen die Betriebspunkte am deutlichsten von der quadratischen Anlagenkennlinie ab. Aus diesen Teillastzuständen resultieren vier Volumenstromdifferenzen ($\Delta\dot{V} = |\dot{V}_{Zu}| - |\dot{V}_{Ab}|$) zwischen Zu- und Abluftvolumenstrom (zwei je Raum). Für alle weniger extremen Teillastzustände ergeben sich geringere Differenzen.

Abweichungen vom quadratischen Verlauf der Anlagenkennlinie resultieren zusätzlich aus den Ausprägungen der gemeinsam durchströmten Kanäle. Für jede Untersuchung wird der Anteil des Druckverlustes des gemeinsam durchströmten Kanals bezogen auf den Auslegungsdruckverlust von „Raum klein“ für die Zu- und Abluftseite in Schritten von 0,1 zwischen 0,1 und 0,9 variiert.

$$f_{gemZu} = \frac{\Delta p_{gemZu}^*}{\Delta p_{Zu}^*} \quad 5.19$$

$$f_{gemAb} = \frac{\Delta p_{gemAb}^*}{\Delta p_{Ab}^*} \quad 5.20$$

f_{gemZu}	[-]	Anteil des gemeinsam durchströmten Kanals an der Druckverlusten von „Raum klein“ im Auslegungszustand Zuluftseite
Δp_{gemZu}^*	[Pa]	Druckverlust des gemeinsam durchströmten Kanals im Auslegungszustand Zuluftseite
Δp_{Zu}^*	[Pa]	Druckverlust von „Raum klein“ im Auslegungszustand Zuluftseite
f_{gemAb}	[-]	Anteil des gemeinsam durchströmten Kanals an den Druckverlusten von „Raum klein“ im Auslegungszustand Abluftseite
Δp_{gemAb}^*	[Pa]	Druckverlust des gemeinsam durchströmten Kanals im Auslegungszustand Abluftseite
Δp_{Ab}^*	[Pa]	Druckverlust von „Raum klein“ im Auslegungszustand Abluftseite

In Abbildung 5.9 werden beispielhaft die vier Volumenstromdifferenzen ($\Delta \dot{V} = |\dot{V}_{Zu}| - |\dot{V}_{Ab}|$) der reduzierten Raumgruppe 1 in Abhängigkeit von f_{gemZu} und f_{gemAb} für den Symmetriefaktor 1 gezeigt und erläutert. Für die reduzierte Raumgruppe 2 und die anderen untersuchten Symmetriefaktoren ergeben sich Ergebnisse, die sich im Verlauf ähneln und die gleichen Eigenschaften besitzen (Anhang 9.3 S.136).

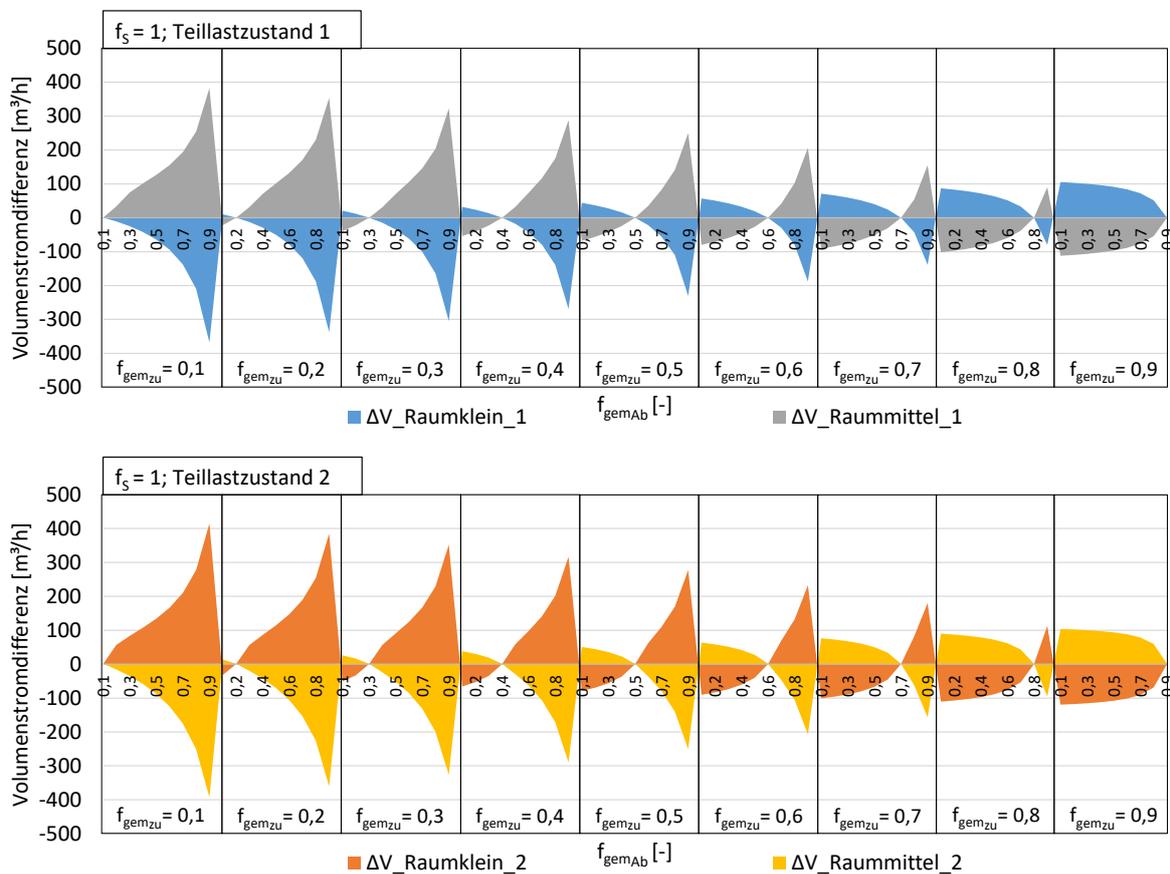


Abbildung 5.9: Volumenstromdifferenzen der Raumgruppe 1 für die beiden Teillastzustände in Abhängigkeit von den Anteilen der gemeinsam durchströmten Kanäle der Zu- und Abluftseite bei Symmetriefaktor 1

Die Beeinflussung der Anlagenkennlinien durch den gemeinsam durchströmten Kanal wird für diese Betrachtung auf der Zuluftseite durch die Regelung der Ventilatoren erfasst (Sollvolumenströme werden vorgegeben) und somit berücksichtigt. Auf der Abluftseite werden die Ventilatoren mithilfe des konstanten Symmetriefaktors geregelt. Die geringsten Volumenstromdifferenzen (nahezu = 0 m³/h)

sind immer bei $f_{gem_{Zu}} = f_{gem_{Ab}}$ vorhanden. In diesem Fall haben die gemeinsam durchströmten Kanäle der Luftseiten den gleichen Anteil an ihren Auslegungsdruckverlusten. Das Verhältnis der Druckverluste der gemeinsam durchströmten Kanäle entspricht dem angesetzten Symmetriefaktor ($\frac{\Delta p_{gem_{Ab}}^*}{\Delta p_{gem_{Zu}}^*} = f_S$). Die Teillastzustände haben dann keine Auswirkung auf die Volumenstromdifferenz und der konstante Symmetriefaktor eignet sich zum Ausgleich der Luftbilanz. In allen anderen Fällen ($f_{gem_{Zu}} \neq f_{gem_{Ab}}$) sind deutliche Volumenstromdifferenzen vorhanden, denn die gemeinsam durchströmten Kanäle der Luftseiten haben unterschiedliche Auswirkungen auf die Anlagenkennlinien, welche durch den im Auslegungszustand bestimmten Symmetriefaktor nicht erfasst werden ($\frac{\Delta p_{gem_{Ab}}^*}{\Delta p_{gem_{Zu}}^*} \neq f_S$). Es zeigt sich zudem, dass bei $f_{gem_{Zu}} < f_{gem_{Ab}}$ deutlich größere Volumenstromdifferenzen entstehen als bei $f_{gem_{Zu}} > f_{gem_{Ab}}$. Dies wird durch den erfassten Einfluss des gemeinsam durchströmten Kanals auf die Anlagenkennlinien der Zuluftseite hervorgerufen.

Aus den vorangegangenen Untersuchungen ergibt sich, dass der Ausgleich der Luftbilanz zwischen Zu- und Abluftvolumenstrom über einen konstanten Symmetriefaktor prinzipiell möglich ist. Sind keine gemeinsam durchströmten Kanäle vorhanden oder kann gewährleistet werden, dass alle Ventilatoren zu jedem Zeitpunkt im selben Teillastzustand arbeiten, ist der Ausgleich ohne Einschränkungen möglich. Sind unterschiedliche Teillastzustände möglich, sollten die Symmetriefaktoren der Räume, sowie die Anteile der Druckverluste der gemeinsam durchströmten Kanäle an ihren Auslegungsdruckverlusten auf Zu- und Abluftseite ($f_{gem_{Zu}} = f_{gem_{Ab}}$ bzw. $\frac{\Delta p_{gem_{Ab}}^*}{\Delta p_{gem_{Zu}}^*} = f_S$) möglichst identisch sein. Ansonsten muss mit Differenzen der Zu- und Abluftvolumenströme gerechnet werden.

5.1.2.2 Ergebnisse der Simulation

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Simulationsrechnungen der Einzelraumregelung ohne Volumenstrommessung mit aktiver Fehlströmungsvermeidungsstrategie aufgeführt. Die Voraussetzungen zur Nutzung des Symmetriefaktors aus Kapitel 5.1.2.1 sind in jeder Paramtervariation erfüllt. Es gilt in jeder Parametervariation $f_{gem_{Zu}} = f_{gem_{Ab}}$ bzw. $\frac{\Delta p_{gem_{Ab}}^*}{\Delta p_{gem_{Zu}}^*} = f_S$. Als Fehlströmungsdetektion wird die am RLT-Versuchsstand erprobte Druckmessung gegen den Raum (Kapitel 6.2.2 S.121) verwendet. Auf der Zuluftseite ist die Messung druckseitig und auf der Abluftseite saugseitig vom Ventilator angeordnet. Wird an dieser Stelle eine Unterschreitung (Zuluft) bzw. Überschreitung (Abluft) des Raumdruckes festgestellt, erfolgt die Ausregelung des Ventilators bis der Raumdruck wieder erreicht ist. Tabelle 5.2 zeigt die Ergebnisse der Simulationen im Überblick. Die Tabelle und das Verfahren zur Auswertung der Ergebnisse werden in Kapitel 3.1.3 (S.24) erläutert.

Tabelle 5.2: Überblick der Ergebnisse der Einzelraumregelung ohne Volumenstrommessung mit Fehlströmungsvermeidungsstrategie (Erläuterung der Tabelle siehe Tabelle 3.4 S.26)

Parameter-variation	CO ₂ -Konzentration [ppm]			Grundlüftung [%]			Luftbilanz [%]			Regelaufgabe Zentral [Pa]	
	Rk	Rm	Rg	Rk	Rm	Rg	Rk	Rm	Rg	Zu-luft	Ab-luft
Grenz-/Sollwert	770	850	1050	18	4,8	2,4	0			0	
Zul. Abweichung	+ 50			± 5			+ 5			± 3	
Netz-mittel	771	851	1051	29 u. 0	15 u. 0	14	24	7,7	3,9	3	-3
Netz-lang	771	851	1051	27 u. 0	19 u. 0	14	22	6,7	6,2	3	-3
Netz-kurz	771	851	1051	18 u. 0	18 u. 0	15	20	8,8	4,6	3	-3
Symmetrie-0,5	771	851	1051	30 u. 0	16 u. 0	14	21	7,8	6,9	3	-3
Symmetrie-1,5	771	851	1051	29 u. 0	15 u. 0	14	21	8,7	6,6	3	-3
Fenster offen	508	688	1051	48 u. 0	31 u. 0	17	100	100	26	3	-3
n₅₀-0	771	852	1052	27 u. 0	15 u. 0	14	0,2	0,4	0,3	3	-3

Ähnlich wie bei der vollständigen Einzelraumregelung sind keine nennenswerten Überschreitungen der CO₂-Konzentrationen festzustellen. Die Grenzwerte können eingehalten werden.

Auch bei der Einzelraumregelung ohne Volumenstrommessung sind Überschreitungen der Grundlüftung vorhanden. Die Überschreitungen der drei Räume gleichen denen bei der vollständigen Einzelraumregelung. Grund sind ebenfalls die unteren Regelgrenzen der Ventilatoren, wenn die Räume nicht belegt sind. Zusätzlich sind in allen Parametervariationen bei „Raum klein“ und „Raum mittel“ Unterschreitungen der Grundlüftung vorhanden. Dies ist auf die Fehlströmungsvermeidung zurückzuführen. Ist „Raum groß“ belegt, während „Raum klein“ und/oder „Raum mittel“ nicht belegt sind, detektiert die Fehlströmungsvermeidung beider Luftseiten eine ungewollte Abweichung vom Raumdruck und erhöht die Drehzahl der entsprechenden Ventilatoren, bis der Raumdruck wieder erreicht ist. In diesem Fall entspricht der Druck auf der Druckseite des Zuluftventilators und auf der Saugseite des Abluftventilators dem Raumdruck und dem Raum wird kein Volumenstrom über die Lüftungsanlage zu- bzw. abgeführt. Die Drehzahl der Ventilatoren ist größer als die minimale Drehzahl, dient aber nur der Fehlströmungsvermeidung. Die Parametervariation „Fenster offen“ hat wie die Einzelraumregelung bei „Raum klein“ und „Raum mittel“ erhöhte Werte bei der Grundlüftung. Die größeren Überschreitungen resultieren ebenfalls aus dem Unterdruck auf der Fassade von ca. 20 Pa und den geöffneten Fenstern. Der stattfindende Vorgang wird bereits mit Abbildung 5.3 (S.74) erläutert.

Die Abweichungen der Luftbilanz in allen anderen Parametervariationen (außer „n₅₀-0“) sind größer als bei der vollständigen Einzelraumregelung. Grund dafür ist der Unterdruck auf der Fassade und die Regelung der Abluftventilatoren. Auch bei geschlossenen Fenstern entsteht durch den Unterdruck auf der Fassade aufgrund von Undichtigkeiten der Gebäudehülle ein Unterdruck im Raum von ca. 2 Pa.

Diese 2 Pa Unterdruck erzeugen einen Sog, welcher den Zuluftventilator unterstützt und für den Abluftventilator einen zusätzlichen Strömungswiderstand bildet. Abbildung 5.10 zeigt die Verschiebung der Anlagenkennlinie bei Unterdruck im Raum.

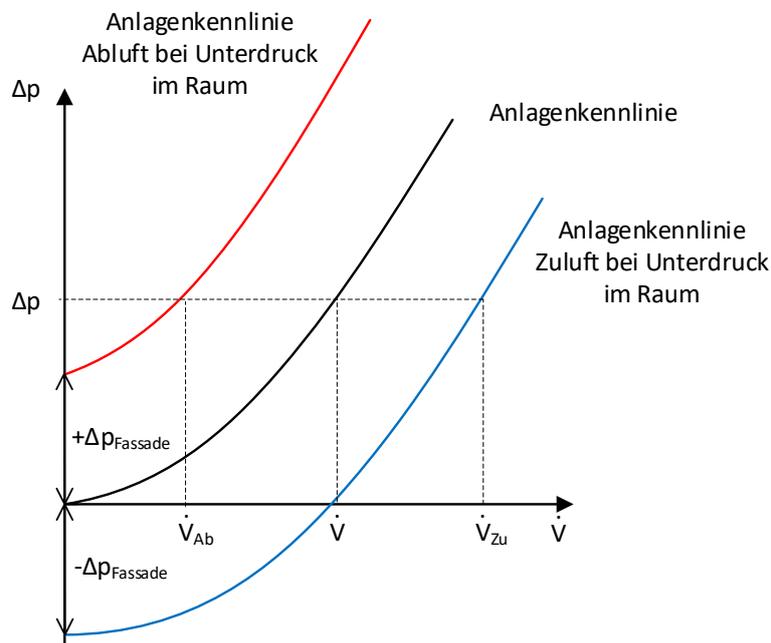


Abbildung 5.10: Verschiebung der Anlagenkennlinie bei Unterdruck im Raum

Die Anlagenkennlinie des jeweiligen Kanalnetzes wird parallel um den Betrag des Unterdruckes im Raum (für die Zuluftseite nach unten und für die Abluftseite nach oben) verschoben. Der Abluftventilator wird bei der Einzelraumregelung ohne Volumenstrommessung auf die Druckerhöhung des Zuluftventilators eingeregelt. Bei gleichen Druckerhöhungen werden also unterschiedliche Volumenströme von Zu- und Abluftventilator gefördert. Die aufgeführten großen prozentualen Abweichungen zwischen Zu- und Abluftvolumenstrom sind bei kleinen absoluten Zuluftvolumenströmen vorhanden, da die absolute Abweichung relativ konstant bleibt. Die größten Abweichungen zwischen Zu- und Abluftvolumenstrom sind bei der Parametervariation „Fenster offen“ vorhanden. Der starke Unterdruck im Raum (geöffnetes Fenster, Unterdruck auf der Fassade) sorgt dafür, dass der Abluftventilator während der gesamten Simulation in Fehlströmungsvermeidung arbeitet, sodass kein Volumenstrom über die mechanische Lüftungsanlage abgeführt, während auf der Zuluftseite Luft zugeführt wird. Daraus ergeben sich deutliche Abweichungen in der Luftbilanz. Bei geringeren Unterdrücken im Raum würde sich die Disbalance verkleinern. Keine nennenswerte Disbalance ist vorhanden, wenn sich im Raum aufgrund der Situation auf der Gebäudehülle kein Unter- oder Überdruck ausprägt (Parametervariation „n₅₀-0“). Bei einem Überdruck im Raum kehrt sich die Disbalance um und der Abluftventilator fördert einen größeren Volumenstrom als der Zuluftventilator.

Die Regelaufgabe der Zentralventilatoren wird um maximal 3 Pa verfehlt, dies ist ebenfalls mit den gegebenen Regelbereichen der Ventilatoren zu erklären und akzeptabel.

5.1.2.3 Ergebnisse des Anwendungstestes

Die Untersuchung der Einzelraumregelung ohne Volumenstrommessung findet am Hörsaal des Anwendungstestes (Kapitel 3.3 S.49) statt. Dafür wird die Regelung angepasst. Die vorhandenen Volumenstrommessungen werden nicht für die Regelung genutzt. Dem Zuluftventilator wird direkt ein Stellsignal vorgegeben. Der Strang Foyer wird abgestellt, somit muss der Strang Hörsaal Ab nur noch die in den Hörsaal eingebrachte Zuluft abführen. Der Abluftventilator wird über den Symmetriefaktor und die Druckerhöhung des Zuluftventilators eingeregelt. Der Symmetriefaktor wird für mehrere Zustände bestimmt. Dieser beträgt 1,644 und ist konstant, da aufgrund der Kanalführung auf beiden Luftseiten quasi kein gemeinsam durchströmter Kanal vorhanden ist. Dadurch werden alle Voraussetzungen zur Nutzung eines konstanten Symmetriefaktors für den Ausgleich der Luftbilanz aus Kapitel 5.1.2.1 (S.81) erfüllt.

Abbildung 5.11 zeigt die CO₂-Konzentration (oben) und die Zu- und Abluftvolumenströme (unten) des Hörsaals für einen beispielhaften Tag bei Verzicht auf die Volumenstrommessung. Die Ergebnisse des Anwendungstestes werden mit dem Vorgehen zur Auswertung der Simulationsrechnungen aus Kapitel 3.1.3 (S.24) bewertet.

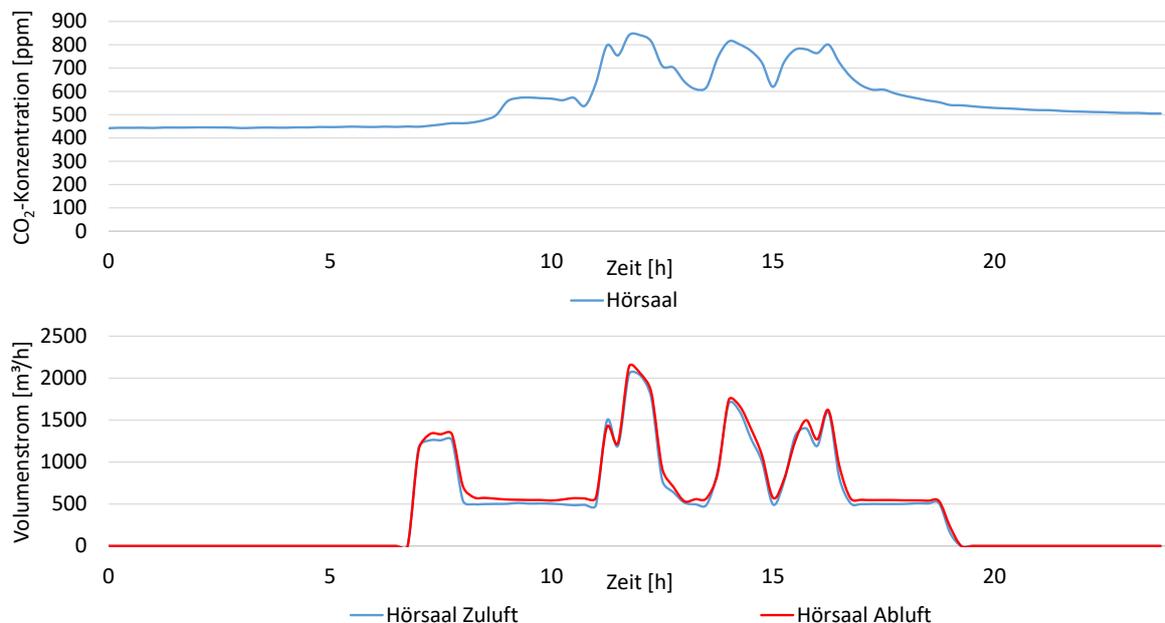


Abbildung 5.11: CO₂-Konzentration und Volumenströme der Zone Hörsaal (Einzelraumregelung ohne Volumenstrommessung)

Der CO₂-Grenzwert (800 ppm) wird zu keinem Zeitpunkt nennenswert überschritten. Die größte Überschreitung beträgt 40 ppm.

Anhand der Volumenströme sind sowohl die Vorspülung (7 bis 8 Uhr) als auch die Mindestlüftung während der Nutzungszeit zu erkennen. In beiden Situationen wird dem Zuluftventilator ein konstantes Stellsignal vorgegeben. Bei der Vorspülung sind das 2,5 V und bei der Mindestlüftung 1 V. Des Weiteren ist die CO₂-Begrenzung durch den Zuluftventilator sichtbar. Wird der CO₂-Grenzwert erreicht, erfolgt die Erhöhung des Zuluftvolumenstromes. Verlassen die Personen den Raum, sinkt die CO₂-Konzentration und die Mindestlüftung wird wieder gefördert. Dies ist ein plausibles Verhalten der Regelung.

Für die Luftbilanz sind, gerade im unteren Volumenstrombereich (Mindestlüftung), Abweichungen von über 15 % zwischen Zu- und Abluftvolumenstrom vorhanden. Die Regelung gleicht die Druckerhöhung des Abluftventilators, unter Berücksichtigung des Symmetriefaktors, der des Zuluftventilators an (Gl.5.1 S.77). Dabei kann der Fehler der Volumenstrommessung gerade im unteren Messbereich zu einer Differenz zwischen den Messwerten der Zu- und Abluftvolumenströme führen. Dies hat aber nicht zwingend reale Disbalancen zur Folge. Je größer der Volumenstrom wird, desto geringer werden die Abweichungen. Alle Abweichungen liegen im Bereich der erweiterten Standardmessunsicherheit der Volumenstrommessung (Kapitel 3.3.2 S.52).

Auch die Vordrücke der Zentralventilatoren weichen nicht nennenswert von ihrem vorgegebenen Sollwert ab.

Unter Berücksichtigung der erweiterten Standardmessunsicherheiten können alle Regelaufgaben auch ohne Volumenstrommessung erfüllt werden.

5.1.2.4 Einsatzrandbedingungen und Konsequenzen

Die Untersuchungen zeigen, dass eine Regelung des Zuluftventilators direkt nach CO₂-Konzentration möglich ist. Die Erfüllung der Luftbilanz wird in dieser Arbeit über den Abgleich der Druckerhöhungen der Ventilatoren mittels Symmetriefaktor realisiert. Dazu müssen die Verzweigungen von Zu- und Abluftnetz identisch sein. Außerdem sollten die Symmetriefaktoren der betrachteten Räume ähnlich sein und die Druckverluste der gemeinsam durchströmten Kanäle beider Luftseiten sollten identische Anteile an ihren Auslegungsdruckverlusten einnehmen, sonst entstehen Disbalancen. Disbalancen entstehen außerdem bei undichten Gebäudehüllen und extremen Drucksituationen auf der Fassade. Der verwendete Symmetriefaktor berücksichtigt den entstehenden Unter- bzw. Überdruck im Raum nicht. Bei sehr dichten Gebäuden sind nur geringe Disbalancen zu erwarten. Aus diesem Grund wird diese Regelung nur bei dichten Gebäudehüllen empfohlen.

Bei Verzicht auf Volumenstrommessung wird eine andere Fehlströmungsvermeidung notwendig, welche zur Nichtförderung von Luft über die mechanische Lüftungsanlage und damit zur Unterschreitung von Sollvolumenströmen führen kann. Bei aktiver Fehlströmungsvermeidung können eventuelle Gebäudelasten nicht abgeführt werden. Eine auf nur einer Luftseite aktive Fehlströmungsvermeidungsstrategie kann zu erheblichen Disbalancen führen. Diese einseitige Fehlströmungsvermeidung tritt bei sehr undichten Räumen (Fenster offen) und Unter- bzw. Überdruck auf der Fassade auf.

Identische Anteile der Druckverluste der gemeinsam durchströmten Kanäle an ihren Auslegungsdruckverlusten, sowie komplett dichte Gebäudehüllen lassen sich in der Praxis nur mit einem Mehraufwand umsetzen. Des Weiteren muss für die Fehlströmungsvermeidung ein zusätzlicher Mehraufwand gegenüber einer anlagentechnischen Umsetzung mit Volumenstrommessungen betrieben werden. Aus diesen Gründen wird davon ausgegangen, dass diese anlagentechnische Umsetzung für die Praxis nur wenig Relevanz hat und eher eine anlagentechnische Umsetzung mit Volumenstrommessung verwendet wird.

5.1.3 Einzelraumregelung mit strangweisem Abluftventilator (Regelung 1c)

Die Reduzierung der Anzahl der dezentralen Abluftventilatoren geht aus Abbildung 2.8 (S.14) hervor. Abbildung 5.12 zeigt schematisch die Regelung der dezentralen Zu- und Abluftventilatoren.

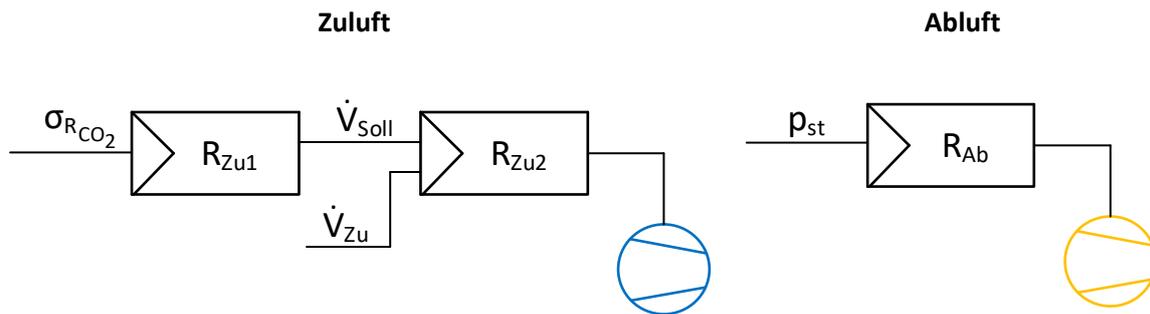


Abbildung 5.12: Regelung von dezentralem Zu- und Abluftventilator bei der Einzelraumregelung mit strangweisem Abluftventilator

Zuluftseitig entspricht diese Regelung der vollständigen Einzelraumregelung (Abbildung 5.1 S.71). Abluftseitig fördert ein gemeinsamer dezentraler Ventilator die verbrauchte Luft durch das Abluftkanalnetz, dabei hält dieser über den Regler (R_{Ab}) den Vordruck p_{st} an einem bestimmten Punkt im Abluftkanalnetz konstant. Mit folgender Untersuchung sollen Aussagen zu Anforderungen und Umsetzungsmöglichkeiten der Druckregelung des Abluftventilators getroffen werden.

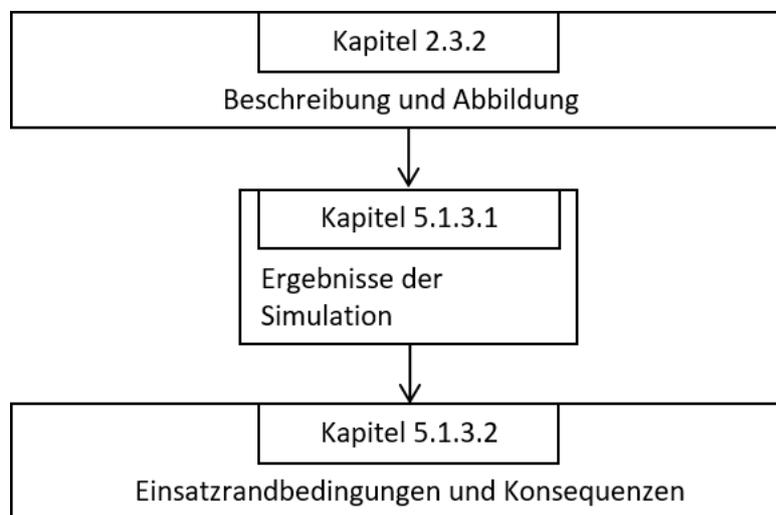


Abbildung 5.13: Aufbau der Untersuchungen zur Einzelraumregelung mit strangweisem Abluftventilator (Variante 1c)

Aus den Ergebnissen der Simulationsrechnungen (Kapitel 5.1.3.1 S.90) werden die Einsatzrandbedingungen und Konsequenzen (Kapitel 5.1.3.2 S.91) für diese anlagentechnische Umsetzung abgeleitet.

5.1.3.1 Ergebnisse der Simulation

Die Parametrierung der Simulationsmodelle wird hinsichtlich der Druckverluste der Abluftseite so angepasst, dass diese abgeglichen sind, d.h. die Druckverluste der Abluftseite von „Raum klein“ und „Raum mittel“ sind identisch und entsprechen dem Druckverlust von „Raum groß“. Der Sollwert des dezentralen Abluftventilators wird für den Auslegungszustand bestimmt und beträgt für die Parametervariation „Netz-mittel“ -88 Pa gegen Umgebung. Abbildung 5.14 zeigt die Zu- und Abluftvolumenströme der drei Räume der Parametervariation „Netz-mittel“.

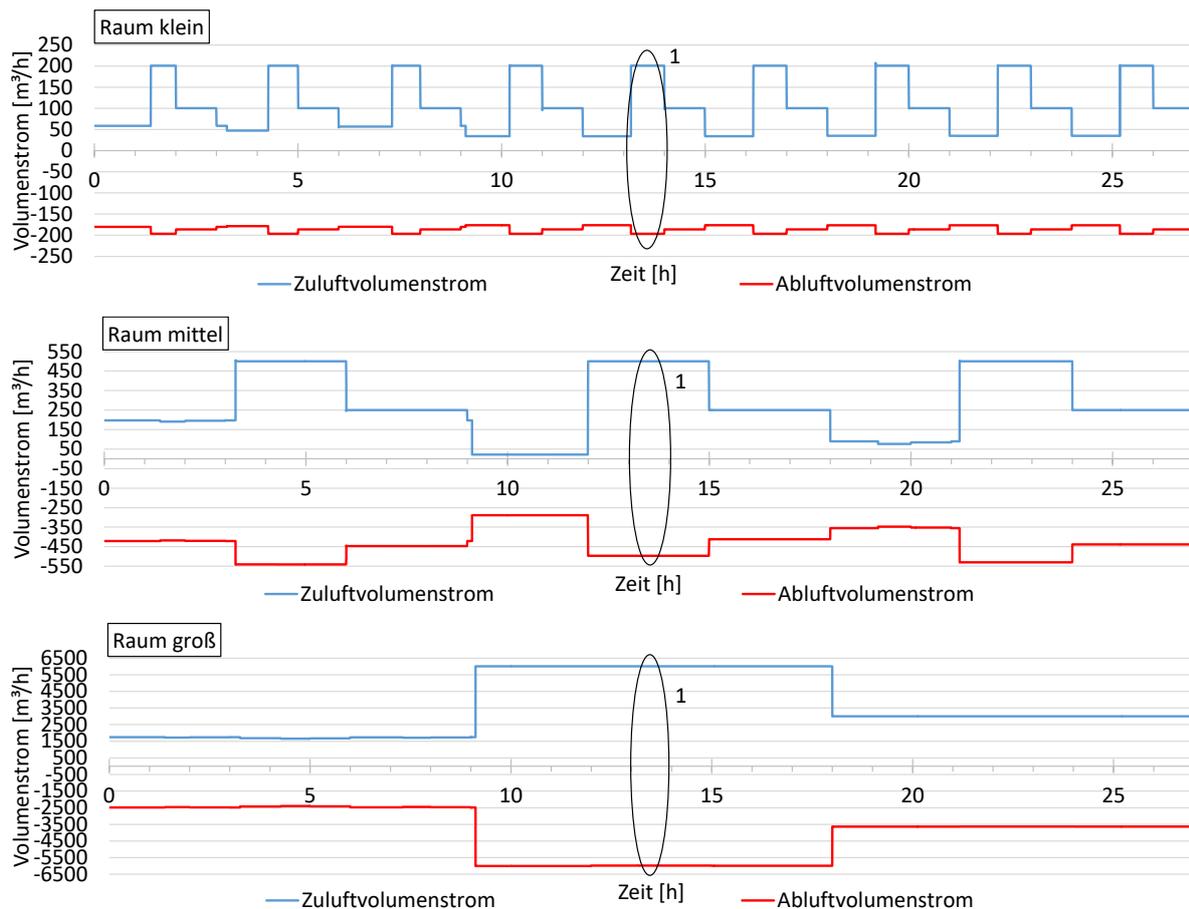


Abbildung 5.14: Verlauf der Volumenströme: Einzelraumregelung mit strangweisem Abluftventilator; „Netz mittel“

Aus den Verläufen wird deutlich, dass die Luftbilanz nur in einem Zustand (Markierung 1) für alle drei Räume gleichzeitig erfüllt ist. Dies ist der Auslegungszustand, für welchen der Sollwert des Vordruckes zur Regelung des dezentralen Abluftventilators vorgegeben ist. In allen anderen Zustand ist bei mindestens einem Raum ein deutlicher Abluftüberschuss vorhanden. In diesen Zuständen müsste der Abluftventilator einen geringeren Unterdruck erzeugen, um die Luftbilanz in allen Räumen zu erfüllen. Dies ist damit zu begründen, dass das Abluftnetz den konstanten Vordruck nicht abgleichen kann. Dieses System entspricht abluftseitig quasi einem VSR-System ohne Volumenstromregler.

Auf die Darstellung der restlichen Ergebnisse nach Kapitel 3.1.3 (S.24) wird verzichtet.

5.1.3.2 Einsatzrandbedingungen und Konsequenzen

Aufgrund der starken Disbalancen zwischen Zu- und Abluftvolumenstrom ist diese Regelung in dieser Form nicht geeignet und darf in der Praxis nicht angewandt werden.

Anstatt des Drucksensors zur Regelung des dezentralen Abluftventilators kann eine Volumenstrommessung vorgesehen und zum Abgleich der Gesamtvolumenströme genutzt werden. Dies wird in der nachfolgenden Einzelraumregelung mit Überströmung untersucht. Einziger Unterschied ist der zusätzliche Druckverlust der Überströmelemente, welcher keinen prinzipiellen Einfluss auf die Ergebnisse hat.

5.1.4 Einzelraumregelung mit Überströmung (Regelung 1d)

Abbildung 2.9 (S.15) zeigt die notwendigen Komponenten für diese Regelung. Die dezentralen Zu- und Abluftventilatoren werden nach Abbildung 5.15 geregelt:

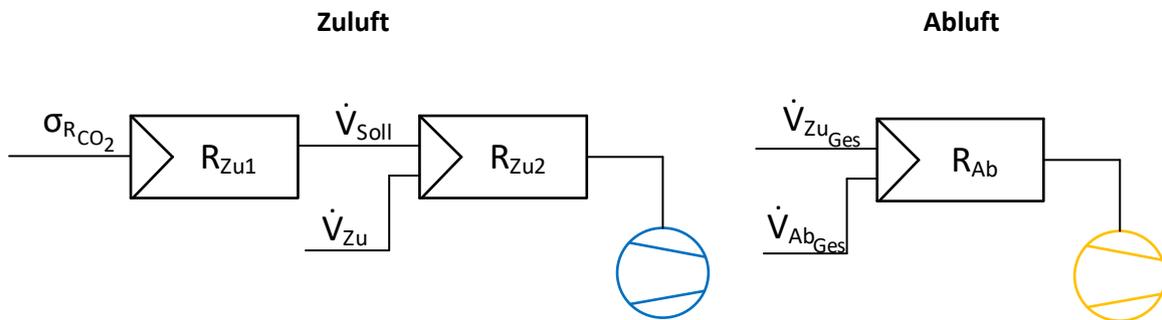


Abbildung 5.15: Regelung von dezentralem Zu- und Abluftventilator bei der Einzelraumregelung mit Überströmung

Zuluftseitig entspricht diese Regelung der vollständigen Einzelraumregelung (Abbildung 5.1 S.71). Der Volumenstrom der Abluft $\dot{V}_{Ab_{Ges}}$ wird mit dem Gesamtvolumenstrom der Zuluft $\dot{V}_{Zu_{Ges}}$ verglichen. Über diesen Vergleich wird das aktuelle Stellsignal (R_{Ab}) des Abluftventilators bestimmt. An dieser Regelung wird der Abgleich der Gesamtvolumenströme von mehreren dezentralen Zuluftventilatoren mit dem eines dezentralen Abluftventilators überprüft. Des Weiteren werden die Konsequenzen einer räumlichen Trennung von Zu- und Abluftzone und die damit verbundenen Auswirkungen einer Überströmung für das dVt-System untersucht.

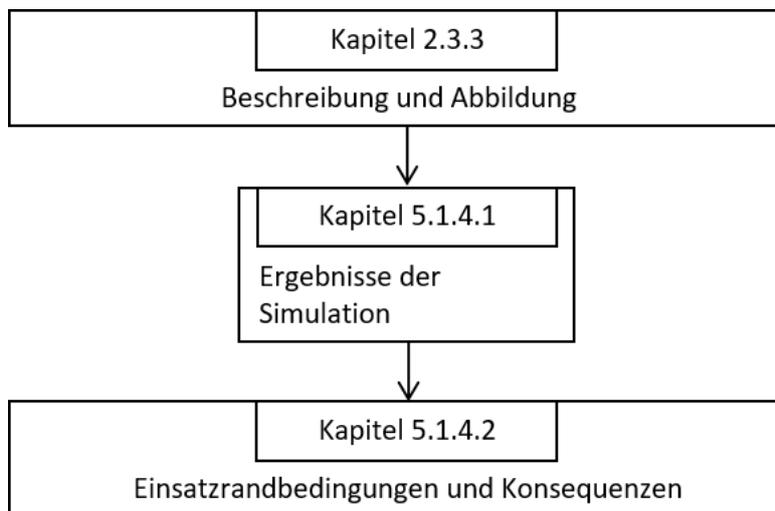


Abbildung 5.16: Aufbau der Untersuchungen zur Einzelraumregelung mit Überströmung (Variante 1d)

Die Ergebnisse der Simulationen (Kapitel 5.1.4.1 S.92) geben Auskunft über die Einsatzrandbedingungen und Konsequenzen (Kapitel 5.1.4.2 S.94).

5.1.4.1 Ergebnisse der Simulation

Auch bei dieser Variante muss eine Anpassung der Parametrierung der Simulationsmodelle vorgenommen werden. Der maximale Druckverlust der Abluftseite entspricht dem Druckverlust der Zuluftseite von „Raum groß“.

Für die Überströmelemente von Zulufräumen zu Ablufträumen wird ein Strömungswiderstand von 2 Pa im Auslegungszustand angesetzt. Für diesen Strömungswiderstand sind in der Literatur unterschiedliche Angaben zu finden. Laut [Kaufmann u. a. 2004] soll der Druckverlust von Überströmöffnungen 1 Pa nicht übersteigen. Dagegen gibt [Kah u. a. 2010] einen maximalen Gesamtdruckverlust über dem Überströmelement von 5 Pa an. Beide Quellen begründen ihre Angaben mit zusätzlicher In- und Exfiltration. Der verwendete maximale Druckverlust für das Überströmelement von 2 Pa liegt damit im Bereich der Literaturangaben und wird als sinnvoll betrachtet.

Tabelle 5.3 zeigt die Ergebnisse der Simulationsrechnungen der Einzelraumregelung mit Überströmung. Zur Auswertung wird ebenfalls das Verfahren aus Kapitel 3.1.3 (S.24) verwendet.

Tabelle 5.3: Überblick der Ergebnisse der Einzelraumregelung mit Überströmung (Erläuterung der Tabelle siehe Tabelle 3.4 S.26)

Parameter-variation	CO ₂ -Konzentration [ppm]			Grundlüftung [%]			Luftbilanz [%]			Regelaufgabe Zentral [Pa]	
	Rk	Rm	Rg	$\frac{\dot{V}_{Grund}}{\dot{V}_R^*}$			$\frac{ \dot{V}_{Zu} - \dot{V}_{Ab} }{ \dot{V}_{Zu} }$			Zuluft	Abluft
Grenz-/Sollwert	770	850	1050	18	4,8	2,4	0			0	
Zul. Abweichung	+ 50			± 5			+ 5			± 3	
Netz-mittel	770	850	1050	29	15	14	63	116	5	2	-2
Netz-lang	770	850	1051	24	23	13	58	107	5,2	2	-2
Netz-kurz	770	850	1051	18	17	14	59	107	4,5	3	-3
Symmetrie-0,5	770	850	1051	29	15	14	58	108	5,2	2	-2
Symmetrie-1,5	777	850	1051	29	15	14	63	116	5,2	2	-2
Fenster offen	520	664	1050	48	32	18	47	95	4,1	0	0
n₅₀-0	770	850	1052	27	15	14	59	108	4,8	2	-2

Der Grenzwert der CO₂-Konzentration wird in jeder Parametervariation in jedem Raum eingehalten.

Die Überschreitungen der Grundlüftung sind ähnlich groß wie bei der vollständigen Einzelraumregelung. Dies ist darin begründet, dass die Zuluftseiten beider Regelungen identisch aufgebaut sind. Deshalb werden die Überschreitungen auf die gleichen Gründe wie in Kapitel 5.1.1.1 (S.72) beschrieben zurückgeführt.

Bei der Luftbilanz sind deutliche Abweichungen festzustellen. Die Disbalancen werden von der Regelung des Abluftventilators nicht erkannt, da die Luftbilanz des Gesamtvolumenstromes ausgeglichen ist. Dies ist darin begründet, dass auf der Abluftseite nur ein dezentraler Ventilator zur Versorgung aller Räume eingesetzt ist, d.h. wird der Zuluftvolumenstrom eines Raumes erhöht, erhöhen sich aufgrund der Regelung des Abluftventilators automatisch die Abluftvolumenströme aller Räume, obwohl eine Erhöhung des Abluftvolumenstromes nur bei einem Raum notwendig ist. Das Abluftkanalnetz hat keine Möglichkeit, die Volumenströme unter den Räumen abzugleichen. Sobald sich der Zuluftvolu-

menstrom von „Raum groß“ verändert, hat dies erheblichen Einfluss auf die geförderten Abluftvolumenströme von „Raum klein“ und „Raum mittel“. Bei allen Parametervariationen außer „Fenster offen“ sind bei „Raum klein“ und „Raum mittel“ Disbalancen von 58 % bis 116 % vorhanden. Die größte Disbalance bei „Raum klein“ ist in jeder Parametervariation zwischen 12ter und 13ter Stunde der Simulation vorhanden. In diesem Zustand ist „Raum klein“ nicht belegt und die anderen beiden Räume sind voll belegt. Für „Raum mittel“ ist das zwischen 10ter und 11ter Stunde der Simulation der Fall. In diesen Zuständen ist die Differenz zwischen Zuluftvolumenstrom des betrachteten Raumes und Gesamtvolumenstrom am größten. In den Zuständen, in denen alle Räume denselben Belegungszustand aufweisen, sind keine nennenswerten Disbalancen vorhanden.

Die Disbalancen bei der Parametervariation „Fenster offen“ sind geringer als in den restlichen Parametervariationen. Dies ist darin begründet, dass „Raum klein“ und „Raum mittel“ aufgrund des Luftaustausches über das geöffnete Fenster ihren CO₂-Grenzwert nicht erreichen und somit die komplette Zeit in Grundlüftung sind. Auch „Raum groß“ benötigt zur CO₂-Begrenzung einen geringeren Zuluftvolumenstrom. Somit wird die Differenz zwischen gefördertem Zuluftvolumenstrom des betrachteten Raumes zum Gesamtvolumenstrom nicht so hoch wie in den restlichen Parametervariationen.

Die Regelaufgabe der Zentralventilatoren wird bei allen Parametervariationen erfüllt.

5.1.4.2 Einsatzrandbedingungen und Konsequenzen

Prinzipiell müssen zwischen Zuluft- und Abluftzone entsprechende Überströmelemente vorhanden sein, welche die vorteilhafte Mehrfachnutzung der Luft ermöglichen.

Die Zuluftseite dieser Variante entspricht einer vollständigen Einzelraumregelung und weist damit keine einschränkenden Einsatzrandbedingungen hinsichtlich der Einhaltung der Luftqualität auf. Auch eventuelle Überschreitungen von Sollvolumenströmen sind auf die Regelgrenzen der Ventilatoren zurückzuführen und nicht systembedingt.

Einschränkendes Kriterium dieser anlagentechnischen Umsetzung ist die Einhaltung der Luftbilanz zwischen Zu- und Abluft. Es treten wie erwartet Schwierigkeiten auf. Die Disbalancen sind nur sekundär abhängig von der Undichtigkeit der Gebäudehülle und damit von der Drucksituation auf der Fassade. Der primäre Grund ist der gemeinsame Abluftventilator. Die Disbalancen treten bei unterschiedlichen Belegungszuständen der Räume auf. Für die praktische Anwendung sollten die zu versorgenden Räume möglichst gleiche Nutzungszeiträume und ähnliche zeitliche Verläufe der relativen Personenbelegungen aufweisen.

5.2 Untersuchungen der Raumgruppenversorgungen

In diesem Kapitel werden die beiden Regelungen zur Raumgruppenversorgung aus Tabelle 2.3 (S.16) beschrieben und untersucht.

5.2.1 Schlechtraumregelung (Regelung 2a)

Die benötigten Komponenten zur Schlechtraumregelung werden in Abbildung 2.10 (S.17) gezeigt. Die Regelung von dezentralem Zu- und Abluftventilator geht aus Abbildung 5.17 hervor.

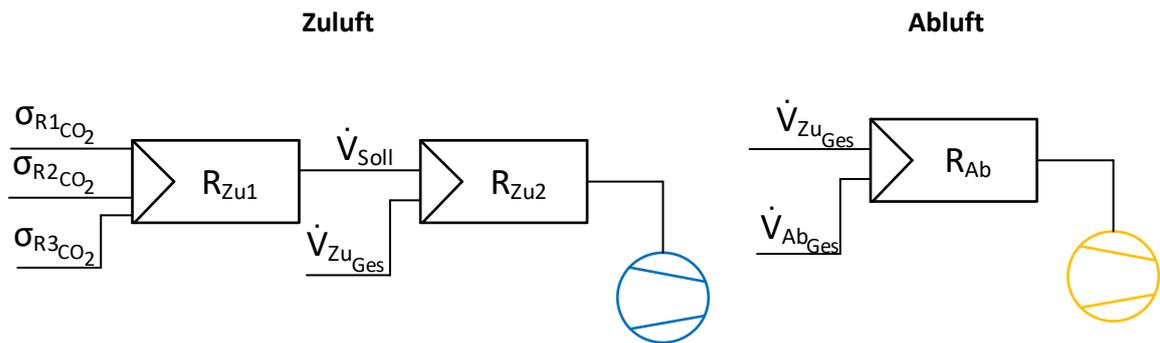


Abbildung 5.17: Regelung von dezentralem Zu- und Abluftventilator bei der Schlechtraumregelung

Für die Schlechtraumregelung wird die CO₂-Konzentration in jedem Raum der Raumgruppe erfasst. Die CO₂-Konzentrationen der Räume (σ_{R1CO_2} , σ_{R2CO_2} , σ_{R3CO_2} , usw.) werden an den Regler R_{Zu1} übermittelt. Dieser Regler bestimmt aus der größten Abweichung zu den vorgegebenen Grenzwerten einen Sollvolumenstrom und gibt diesen an den Regler R_{Zu2} des Zuluftventilators weiter. Wie bei der vollständigen Einzelraumregelung (Abbildung 5.1 S.71) wird der Zuluftvolumenstrom \dot{V}_{ZuGes} mit dem Sollvolumenstrom \dot{V}_{Soll} abgeglichen und der Betriebspunkt des Zuluftventilators eingestellt, so dass der Raum mit der größten CO₂-Belastung den benötigten Zuluftvolumenstrom erhält. Der Abluftventilator wird auf den Zuluftvolumenstrom über den Regler R_{Ab} geregelt. Bei der Untersuchung dieser Raumgruppenversorgung wird bestimmt unter welchen Bedingungen mehrere Räume mit einem dezentralen Zu- und Abluftventilator versorgt werden können, wenn in jedem Raum die CO₂-Konzentration gemessen wird.

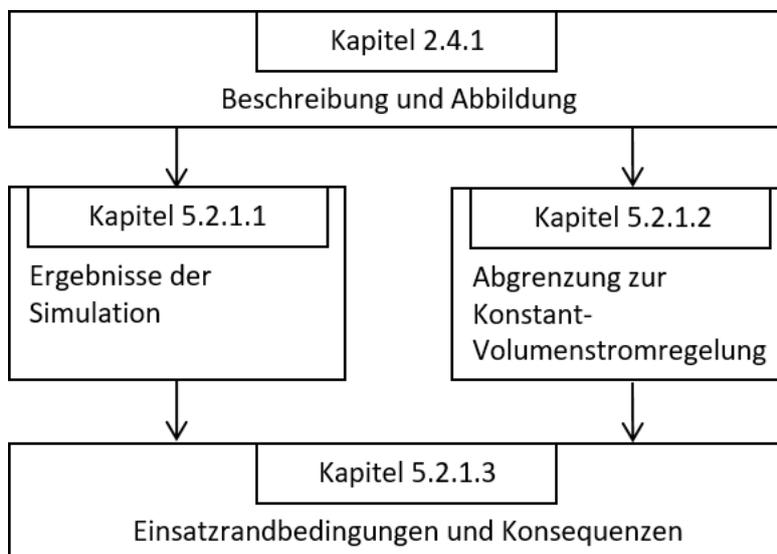


Abbildung 5.18: Aufbau der Untersuchungen zur Raumgruppenversorgung mit Schlechtraumregelung (Variante 2a)

Es werden wie bei allen anderen anlagentechnischen Umsetzungen Simulationsrechnungen durchgeführt (Kapitel 5.2.1.1 S.96). Außerdem findet über eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung eine Abgrenzung zur Konstant-Volumenstromregelung (Kapitel 5.2.1.2 S.97) statt. Aus den Ergebnissen dieser beiden Untersuchungen werden die Einsatzrandbedingungen und Konsequenzen (Kapitel 5.2.1.3 S.104) abgeleitet.

5.2.1.1 Ergebnisse Simulation

Besonderheiten der Parametrierungen der Simulationsrechnungen sind die abgeglichenen Druckverluste im Netz, d.h. die Druckverluste je Luftseite von „Raum klein“ und „Raum mittel“ sind identisch und entsprechen dem Druckverlust von „Raum groß“. Der Abgleich des Kanalnetzes erfolgt wie üblich über die Einstellung der Zu- und Abluftdurchlässe.

Ein Überblick der Ergebnisse der Simulationsrechnungen für die Raumgruppenversorgung mit Schlechtraumregelung wird in Tabelle 5.4 gegeben. Die Ergebnisse werden ebenfalls nach Kapitel 3.1.3 (S.24) bewertet.

Tabelle 5.4: Überblick der Ergebnisse der Raumgruppenversorgung mit Schlechtraumregelung (Erläuterung der Tabelle siehe Tabelle 3.4 S.26)

Parameter-variation	CO ₂ -Konzentration [ppm]			Grundlüftung [%]			Luftbilanz [%]			Regelaufgabe Zentral [Pa]	
	Rk	Rm	Rg	Rk	Rm	Rg	Rk	Rm	Rg	Zuluft	Abluft
Grenz-/Sollwert	770	850	1050	18	4,8	2,4	0			0	
Zul. Abweichung	+ 50			± 5			+ 5			± 3	
Netz-mittel	775	857	1060	100	100	100	1,8	3,8	0,1	3	-3
Netz-lang	773	855	1056	100	100	100	1,2	3	0,1	3	-3
Netz-kurz	774	856	1059	100	100	100	1,8	3,8	0,1	3	-3
Symmetrie-0,5	775	857	1060	100	100	100	1	1,1	1,1	3	-3
Symmetrie-1,5	774	857	1062	100	100	100	3,6	2,7	1,4	3	-3
Fenster offen	520	658	1056	88	88	87	2,8	4,1	0,5	3	-3
n₅₀-0	775	857	1060	100	100	100	0,2	0,2	0,2	3	-3

Die Grenzwerte der CO₂-Konzentrationen werden in allen Parametervariationen eingehalten.

Bei dem Kriterium der Grundlüftung sind deutliche Überschreitungen in allen drei Räumen vorhanden. Die Räume werden im Zustand der Grundlüftung teilweise mit ihrem Auslegungsvolumenstrom versorgt. Grund ist der bereits angesprochene gemeinsame Zuluftventilator und die Schlechtraumregelung. Die Überlüftungen sind damit systembedingt. Es muss nur ein Raum im Auslegungszustand sein und alle Räume werden mit dem Auslegungsvolumenstrom beaufschlagt. Die aktuellen Zustände der anderen Räume haben dabei keine Auswirkungen. Die Räume sind aufgrund ihrer relativen Personenbelegungsprofile (Abbildung 3.2 S.25) nicht für eine Raumgruppenversorgung geeignet. Es handelt sich dabei aber um fiktive Profile, welche genutzt werden, um alle Zustände abzubilden. Bei Räumen mit gleichen Belegungszuständen werden diese deutlichen Überlüftungen nicht auftreten. Die Räume befinden sich dann zu jedem Zeitpunkt im selben Teillastzustand. Auch wenn kein Raum belegt ist, wird der Grundlüftungsvolumenstrom bei „Raum mittel“ und „Raum groß“ überschritten, dies ist wie bei

den Einzelraumregelungen auf den Regelbereich des Ventilators zurückzuführen. Bei der Parametervariation „Fenster offen“ sind die maximalen Überschreitungen der Grundlüftung geringer als in den anderen Parametervariationen. Grund dafür ist, dass durch das geöffnete Fenster ein konstanter Luftwechsel stattfindet, welcher die CO₂-Konzentration im Raum senkt. „Raum klein“ und „Raum mittel“ überschreiten deshalb zu keinem Zeitpunkt ihren vorgegebenen CO₂-Grenzwert und könnten über die komplette Simulationszeit mit Grundlüftung versorgt werden. Bei „Raum groß“ reicht der Luftwechsel über das Fenster nicht aus und es muss bei Belegung zusätzlich belüftet werden, um den CO₂-Grenzwert einzuhalten. Hier genügt ein Zuluftvolumenstrom von ca. 87 % des Auslegungsvolumenstromes. „Raum klein“ und „Raum mittel“ werden dann ebenfalls mit 87 % ihres Auslegungsvolumenstromes versorgt.

Die Gesamtluftbilanz der Raumgruppe ist in allen Parametervariationen ausgeglichen. Bei den Einzelräumen sind geringe Disbalancen vorhanden, welche sich im akzeptablen Bereich befinden. Diese geringen Disbalancen von Zu- und Abluftvolumenstrom eines Raumes werden durch Disbalancen eines anderen Raumes ausgeglichen und sind in den Gesamtvolumenströmen der Räume nicht feststellbar.

Die Regelaufgabe der Zentralventilatoren wird in jeder Parametervariation erfüllt.

5.2.1.2 Abgrenzung der Schlechtraumregelung zur Konstant-Volumenstromregelung

Im Folgenden wird versucht abzuschätzen, ab welcher Anzahl von Räumen eine Schlechtraumregelung (SRR) einen wirtschaftlichen Vorteil gegenüber einer Konstant-Volumenstromregelung (KVR) aufweist. In Anlehnung an [Alsen 2017] wird dafür der Kapitalwert bestimmt.

$$KW_T = \frac{E_T - A_T}{(1 + i)^T} - I \quad 5.21$$

KW_T	[€]	Kapitalwert für kalkulatorischen Nutzungszeitraum
E_T	[€]	Einsparungen über kalkulatorischen Nutzungszeitraum von SRR gegenüber KVR
A_T	[€]	Zusätzliche Ausgaben über kalkulatorischen Nutzungszeitraum von SRR gegenüber KVR
i	[%]	Kalkulationszinsfuß (2,5 % nach [Alsen 2017])
T	[a]	Kalkulatorischer Nutzungszeitraum (15 a nach [Alsen 2017])
I	[€]	Mehrinvestitionskosten von SRR gegenüber KVR

Für die Kapitalwertbestimmung werden beide Regelungen über ein dVt-System umgesetzt. Es wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die gesamte Lüftungsanlage aus zwei zentralen und zwei dezentralen Ventilatoren besteht, d.h. im Zentralgerät wird derselbe Volumenstrom gefördert wie von den dezentralen Ventilatoren.

Mehrinvestitionskosten

Die Mehrinvestitionskosten beziehen sich auf die zusätzlichen notwendigen Komponenten, um eine Schlechtraumregelung umzusetzen. Diese sind ein CO₂-Sensor und ein Datenpunkt. Laut [Alsen 2017] werden Mehrinvestitionen von 526 € pro Raum notwendig.

Ausgaben

Zusätzliche Ausgaben über den kalkulatorischen Nutzungszeitraum sind aufgrund des höheren Komponentenaufwandes anfallende Inspektions- und Wartungskosten. Zur Berechnung wird ebenfalls der Ansatz von [Alsen 2017] verwendet. Dieser besagt, dass für den CO₂-Sensor und den Datenpunkt ein jährlicher Inspektions- und Wartungsaufwand von 2 % der Investition entsteht. Des Weiteren unterliegen diese Ausgaben laut [Alsen 2017] einer jährlichen nominellen Preissteigerung von 2,3 %.

Einsparungen

Einsparungen über den kalkulatorischen Nutzungszeitraum werden von der Schlechtraumregelung über den geringeren Energiebedarf erzielt. Zur Berechnung dieser Energieeinsparungen wird ebenfalls der Ansatz von [Alsen 2017] verfolgt.

$$\Delta E_a = E_{KVR,a} - E_{SRR,a} \quad 5.22$$

ΔE_a	[kWh/a]	Differenz des Jahresenergiebedarfes von KVR und SRR
$E_{KVR,a}$	[kWh/a]	Jahresenergiebedarf KVR für N Räume
$E_{SRR,a}$	[kWh/a]	Jahresenergiebedarf SRR für N Räume

Die benötigten Energien der beiden Regelungen werden prinzipiell über die Ventilatorleistungen (Gl. 4.8 S.61) und die entsprechende Nutzungszeit aus der [DIN V 18599-10] berechnet. Es werden nur Stromkosten betrachtet. Der Strompreis liegt laut [Alsen 2017] bei 18,9 ct/kWh und bildet einen Mittelwert aus Industrie- und Verbraucherstrompreis. Der Strompreis ist laut [Alsen 2017] einer jährlichen nominellen Preissteigerung von 3,8 % ausgesetzt.

Die Auslegungsdruckverluste sind für die Untersuchung für beide Regelungen identisch und betragen nach [DIN EN 13779] 960 Pa auf der Zuluftseite und 750 Pa auf der Abluftseite. Die Druckverhältniszahl beträgt 0,4 und die Raumgruppe befindet sich im Schlechtstrang. Für das Teillastverhalten der Druckverluste wird das quadratische Verhalten aus Gl.5.15 (S.82) angesetzt.

Auch die Bestimmung des Wirkungsgrades ist für beide Regelungen identisch. Der maximale Wirkungsgrad wird in Abhängigkeit des Auslegungsvolumenstromes nach [Alsen 2017] berechnet. Der Teillastwirkungsgrad wird in Abhängigkeit des Volumenstromteillastanteils nach [Alsen 2017] bestimmt. Dabei wird ein Überdimensionierungsfaktor von 0,8 verwendet.

Die Berechnungen der Ventilatorleistungen der beiden Regelungen unterscheiden sich im geförderten Volumenstrom. Bei der Konstant-Volumenstromregelung wird während der Nutzungszeit konstant der Auslegungsvolumenstrom gefördert.

$$\dot{V}_{Ges}^* = \dot{V}_{R,Pers}^* \cdot N_{Ges,Pers}^* \quad 5.23$$

\dot{V}_{Ges}^*	[m ³ /h]	Auslegungsvolumenstrom der Raumgruppe
$\dot{V}_{R,Pers}^*$	[m ³ /(h P)]	Personenbezogener Auslegungsvolumenstrom (Gl. 3.1 S.21)
$N_{Ges,Pers}^*$	[-]	Maximale Personenanzahl der Raumgruppe

Bei der Schlechtraumregelung wird vom Auslegungsvolumenstrom abgewichen, sobald kein Raum der Raumgruppe voll belegt ist. Der dann geförderte Volumenstrom ist in Annäherung der mittlere Außenluftvolumenstrom und wird in Anlehnung an die [DIN V 18599-7] mit Gl. 5.24 berechnet:

$$\dot{V}_{dc} = \left([\dot{V}_{A,Geb} \cdot f_{A/p} + (\dot{V}_A - \dot{V}_{A,Geb}) \cdot F_{RLT} \cdot f_{A/p}] \cdot (1 - c_{RLT}) + \dot{V}_{A,Geb} \cdot f_{A/p} \cdot c_{RLT} \right) \cdot N_{Ges,Pers}^* \quad 5.24$$

\dot{V}_{dc}	[m ³ /h]	Mittlerer Außenluftvolumenstrom der Raumgruppe
\dot{V}_A	[m ³ /(h m ²)]	Flächenbezogener Mindestaußenluftvolumenstrom nach [DIN V 18599-10]
$\dot{V}_{A,Geb}$	[m ³ /(h m ²)]	Mindestaußenluftvolumenstrom Gebäude nach [DIN V 18599-10]
$f_{A/p}$	[m ² /P]	Maximale Personenbelegungsdichte nach [DIN V 18599-10] (mittel)
F_{RLT}	[-]	Teillastbetriebsfaktor der Gebäudebetriebszeit nach [DIN V 18599-10]
c_{RLT}	[-]	Relative Abwesenheit der RLT-Anlage nach [DIN V 18599-10]

Auch der mittlere Außenluftvolumenstrom ist damit von der maximalen Personenanzahl abhängig.

Zur Bestimmung des Jahresenergiebedarfes wird die Jahresnutzungszeit des jeweiligen Zustandes benötigt. Diese ist in der [DIN V 18599-10] nur getrennt für Tag- und Nachtzeit angegeben.

$$t_{Nutz,a} = t_{Tag} + t_{Nacht} \quad 5.25$$

$t_{Nutz,a}$	[h/a]	Jahresnutzungszeit
t_{Tag}	[h/a]	Jährliche Nutzungsstunden zur Tagzeit nach [DIN V 18599-10]
t_{Nacht}	[h/a]	Jährliche Nutzungsstunde zur Nachtzeit nach [DIN V 18599-10]

Bei der Konstant-Volumenstromregelung wird der Auslegungsvolumenstrom über die komplette Jahresnutzungszeit gefördert. Die Dauer der Förderung von Auslegungsvolumenstrom und mittlerem Außenluftvolumenstrom bei Schlechtraumregelung wird anhand der Wahrscheinlichkeit einer Vollbelegung der entsprechenden Nutzung bestimmt.

Die Wahrscheinlichkeit einer Vollbelegung eines Raumes ist von dessen Nutzung abhängig, aber in der Realität nicht für jeden Raum einer Nutzung gleich. Im folgenden Abschnitt wird versucht, eine Annäherung zu treffen. Dazu werden der Teillastbetriebsfaktor der Gebäudebetriebszeit F_{RLT} und die relative Abwesenheit der RLT-Anlage c_{RLT} der Nutzungen ([DIN V 18599-10]) verwendet. Es wird von einer Dreiecksverteilung der Personenbelegung bei Personenanwesenheit ausgegangen. Die Dreiecksverteilung ist eine stetige Verteilung, hat einen minimalen Wert a, einen maximalen Wert b und einen wahrscheinlichsten Wert c. Die Dichtefunktion der Dreiecksverteilung wird beispielhaft in Abbildung 5.19 gezeigt. Dazu wird die Dichte der Wahrscheinlichkeit über die relative Personenbelegung (Gl. 3.14 S.32) aufgetragen.

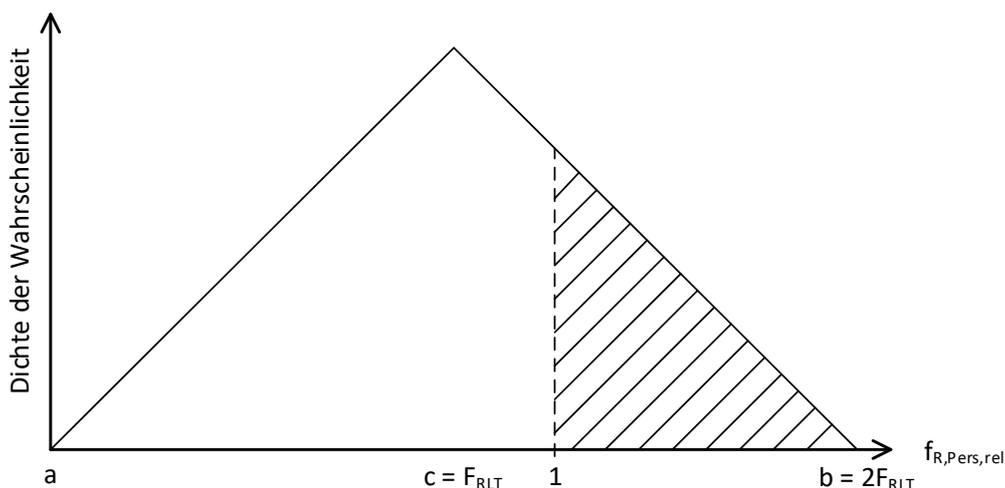


Abbildung 5.19: Dreiecksverteilung der Personenbelegung

Da die Dreiecksverteilung nur für Zustände genutzt wird, in denen Personen anwesend sind, ist die Dichte der Wahrscheinlichkeit, dass keine Person anwesend ist, gleich 0. Die maximale Belegung wird durch den Wert b definiert. Es wird angenommen, dass die maximale Belegung dem doppelten der

durchschnittlichen Belegung entspricht. Diese Annahme erzeugt eine gleichschenklige Dreiecksverteilung. Die größte Dichte der Wahrscheinlichkeit hat der Zustand der durchschnittlichen Belegung des Raumes (F_{RLT}).

Die Wahrscheinlichkeit, dass die relative Personenbelegung ≥ 1 ist und damit Auslegungsvolumenstrom gefördert wird, berechnet sich über die gestrichelte Fläche mit Gl. 5.26 für $f_{R,Pers,rel}$ zwischen dem wahrscheinlichsten Wert und dem maximalen Wert der Dreiecksverteilung.

$$P(f_{R,Pers,rel} \geq 1) = 1 - \left(1 - \frac{(b - f_{R,Pers,rel})^2}{(b - a) \cdot (b - c)}\right) \quad 5.26$$

$P(f_{R,Pers,rel} \geq 1)$	[-]	Wahrscheinlichkeit der Vollbelegung eines Raumes
b	[-]	Maximaler Wert der Dreiecksverteilung
$f_{R,Pers,rel}$	[-]	Relative Personenbelegung des Raumes
a	[-]	Minimaler Wert der Dreiecksverteilung
c	[-]	Wahrscheinlichster Wert der Dreiecksverteilung

Unter den getroffenen Annahmen, dass $a = 0$, $c = F_{RLT}$ und $b = 2F_{RLT}$ berechnet sich die Wahrscheinlichkeit einer Vollbelegung einer bestimmten Nutzung bei Personenanwesenheit mit Gl. 5.27.

$$P(f_{R,Pers,rel} \geq 1) = \frac{(2F_{RLT} - 1)^2}{2F_{RLT}^2} \quad 5.27$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass während der Nutzungszeit keine Person anwesend ist, muss ebenfalls berücksichtigt werden (c_{RLT}). Die finale Wahrscheinlichkeit, dass während der Nutzungszeit der Raum voll belegt ist, wird mit Gl. 5.28 berechnet.

$$P(f_{R,Pers,rel} \geq 1) = \frac{(2F_{RLT} - 1)^2}{2F_{RLT}^2} \cdot (1 - c_{RLT}) \quad 5.28$$

Mit Gl. 5.28 kann für jede Nutzung die Wahrscheinlichkeit für eine Vollbelegung bestimmt werden. Diese Berechnung wird im Folgenden für geeignete Nutzungen nach [DIN V 18599-10] (Kapitel 2.4 S.15) durchgeführt. Diese sind aufgrund des zu erwartenden Auslegungsvolumenstromes für eine Raumgruppenversorgung geeignet. Tabelle 5.5 gibt diese Wahrscheinlichkeit für diese Nutzungen an.

Tabelle 5.5: Wahrscheinlichkeiten einer Vollbelegung für geeignete Nutzungen nach [DIN V 18599-10]

Nutzungen	F_{RLT}	c_{RLT}	$P(f_{R,Pers,rel} \geq 1)$
Einzelbüro; Gruppenbüro; Untersuchungs- und Behandlungsräume	0,7	0,3	11,4 %
Hotelzimmer	0,5	0,5	0 %
Bettzimmer	0,8	0	28,1 %
Sonstige Aufenthaltsräume	0,8	0,5	14,1 %

Prinzipiell kann gesagt werden, je höher der Teillastbetriebsfaktor F_{RLT} und je geringer die relative Abwesenheit c_{RLT} einer Nutzung, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit einer Vollbelegung. Unter

den getroffenen Annahmen sind Hotelzimmer nie voll belegt. Dies wird in der Praxis nicht zwingend zutreffen, ist aber aufgrund einer durchschnittlichen Belegung bei Personenanwesenheit von 0,5 (F_{RLT}) begründet.

Die Wahrscheinlichkeit, dass kein Raum einer Raumgruppe voll belegt ist und bei Schlechtraumregelung der mittlere Außenluftvolumenstrom gefördert wird, kann mit einem Bernoulli-Experiment bestimmt werden. Es wird ein Raum „gezogen“ und dieser kann entweder voll belegt („Erfolg“) oder nicht voll belegt („Misserfolg“) sein. [Kohn 2005] besagt, dass mehrere nacheinander durchgeführte und voneinander unabhängige Bernoulli-Experimente binomial verteilt sind. Die Wahrscheinlichkeit einer bestimmten Anzahl Erfolge bei vorgegebener Anzahl Ziehungen wird mit Gl. 5.29 berechnet.

$$P(x = k) = \binom{n}{k} \cdot p^k \cdot (1 - p)^{n-k} \quad 5.29$$

$P(x = k)$	[-]	Wahrscheinlichkeit der Zufallsvariable X für k Erfolge
n	[-]	Anzahl Ziehungen (Anzahl der Räume)
k	[-]	Anzahl Erfolge (keiner voll belegt $\rightarrow 0$)
p	[-]	Wahrscheinlichkeit eines Erfolgs (Tabelle 5.5 $P(f_{R,Pers,rel} \geq 1)$)

Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass kein Raum einer Raumgruppe mit N_R Räumen voll belegt ist beträgt:

$$P(x = 0) = (1 - P(f_{R,Pers,rel} \geq 1))^{N_R} \quad 5.30$$

N_R	[-]	Anzahl der Räume der Raumgruppe
-------	-----	---------------------------------

Mithilfe dieser Berechnung kann die Zeit des Jahres bestimmt werden in der die Schlechtraumregelung Energieeinsparungen gegenüber der Konstant-Volumenstromregelung erzielt. Der Jahresenergiebedarfe der beiden Regelungen werden anhand von Gl. 5.31 und Gl. 5.32 berechnet.

$$E_{KVR,a} = \sum P_{Vent}^* \cdot t_{Nutz,a} \quad 5.31$$

$$E_{SRR,a} = \sum P_{Vent}^* \cdot t_{Nutz,a} \cdot \left(1 - (1 - P(f_{R,Pers,rel} \geq 1))^{N_R}\right) + \sum \overline{P_{Vent}} \cdot t_{Nutz,a} \cdot (1 - P(f_{R,Pers,rel} \geq 1))^{N_R} \quad 5.32$$

$\sum P_{Vent}^*$	[W]	Summierte Leistung der 4 betrachteten Ventilatoren im Auslegungszustand
$\sum \overline{P_{Vent}}$	[W]	Summierte Leistung der 4 betrachteten Ventilatoren bei mittlerem Außenluftvolumenstrom

Die Untersuchungen bestätigen, dass die Schlechtraumregelung unabhängig von der Größe der Raumgruppe immer energetische Vorteile gegenüber der Konstant-Volumenstromregelung hat. Werden die jährlichen Energieeinsparungen über die Anzahl der Räume aufgetragen, wird deutlich, dass die Energieeinsparung ein Maximum aufweist. Die beispielhafte Darstellung der Energieeinsparung für die Nutzung Einzelbüro zeigt Abbildung 5.20.

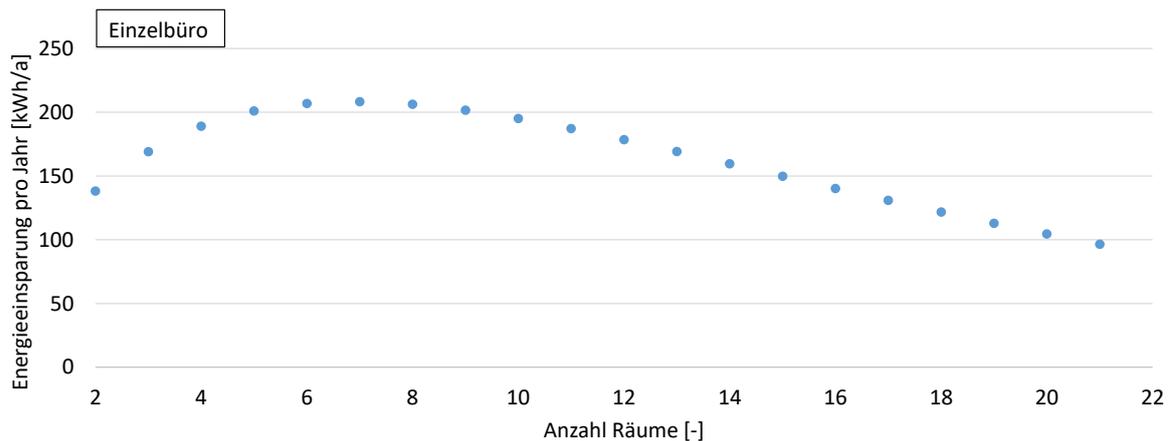


Abbildung 5.20: Jährliche Energieeinsparung der Schlechtraumregelung gegenüber der Konstant-Volumenstromregelung der Nutzung Einzelbüro

Dieses Maximum entsteht durch die absolute Differenz zwischen Auslegungsvolumenstrom (Konstant-Volumenstromregelung) und mittlerem Außenluftvolumenstrom (Schlechtraumregelung) und der Wahrscheinlichkeit, dass kein Raum der Raumgruppe voll belegt ist. Zwar steigt die absolute Differenz zwischen Auslegungsvolumenstrom und mittlerem Außenluftvolumenstrom mit der Anzahl der Räume, jedoch wird es immer unwahrscheinlicher, dass kein Raum voll belegt ist und die Schlechtraumregelung gegenüber der Konstant-Volumenstromregelung Einsparungen erzielen kann. Tabelle 5.6 gibt an bei welcher Raumanzahl das Maximum der Energieeinsparung der entsprechenden Nutzung vorliegt.

Tabelle 5.6: Anzahl der Räume für maximale Energieeinsparung der Schlechtraum- gegenüber der Konstant-Volumenstromregelung

Nutzungen	Anzahl der Räume
Einzelbüro; Gruppenbüro; Untersuchungs- und Behandlungsräume	7-8
Bettzimmer	2-3
Sonstige Aufenthaltsräume	5

Wird die Raumanzahl über das Maximum hinaus weiter erhöht, sinkt die Energieeinsparung wieder. Die Nutzung Hotelzimmer wird in dieser Tabelle nicht angegeben, da die Wahrscheinlichkeit einer Vollbelegung 0 % entspricht (Tabelle 5.6) und somit die Energieeinsparung mit der Anzahl der Räume kontinuierlich steigt.

Unter Berücksichtigung der angegebenen Investitions-, Wartungs- und Inspektionskosten (inkl. Preissteigerungen), der berechneten Energiekosten (inkl. Preissteigerung) und des Kalkulationszinsfußes (2,5 % nach [Alsen 2017]) wird der Kapitalwert für verschieden große Raumgruppen (Anzahl Räume) der aufgeführten Nutzungen bestimmt. Die maximale Personenanzahl der Einzelräume hat Einfluss auf die absolute Differenz zwischen Auslegungsvolumenstrom (Konstant-Volumenstromregelung) und mittlerem Außenluftvolumenstrom (Schlechtraumregelung). Diese Größe wird im Folgenden für die Nutzungen in realistischem Rahmen variiert. Die maximale Anzahl der Räume hat Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit, dass kein Raum der Raumgruppe voll belegt ist. Um die Anzahl der durchgeführten Berechnungen zu begrenzen, wird die maximale Anzahl der Räume auf 20 festgelegt. Tabelle 5.7 gibt

die Personenanzahl pro Raum und die Anzahl der Räume der Nutzungen an, für die eine Wirtschaftlichkeit der Schlechtraumregelung gegenüber der Konstant-Volumenstromregelung vorliegt. Sowohl die Ergebnisse aus der gezeigten Tabelle als auch alle nachfolgenden Aussagen gelten für die Kostenrandbedingungen aus [Alsen 2017] und unter der Annahme, dass das Teillastverhalten der Räume unabhängig von der Personenanzahl des Raumes ist (F_{RLT} und c_{RLT} sind konstant).

Prinzipiell kann festgehalten werden, dass eine Wirtschaftlichkeit der Schlechtraumregelung bei kleinen Raumgruppen bei größeren Personenanzahlen pro Raum gegeben ist. Die Investitions-, Wartungs- und Inspektionskosten sind beispielsweise zur Versorgung von vier Personen mittels Schlechtraumregelung geringer, wenn sich die Personen auf zwei anstatt auf vier Räume verteilen. Unter den getroffenen Vereinfachungen und Annahmen erhöht sich für eine geringere Raumanzahl die Wahrscheinlichkeit, dass kein Raum voll belegt ist und damit die Energieeinsparung.

Tabelle 5.7: Personenanzahl pro Raum und Anzahl der Räume für Wirtschaftlichkeit der Schlechtraum- gegenüber der Konstant-Volumenstromregelung

Nutzungen	Personenanzahl pro Raum	Anzahl Räume
Einzelbüro	nicht wirtschaftlich	
Gruppenbüro	5	2
	6	bis 3
Untersuchungs- und Behandlungsräume	5	bis 3
Hotelzimmer	4	bis 4
	5	bis 20
Bettenzimmer	3 und 4	2
	5	bis 3
Sonstige Aufenthaltsräume	nicht wirtschaftlich	

Für die Nutzungen Einzelbüro und sonstige Aufenthaltsräume ist die Schlechtraumregelung nie wirtschaftlich. Die zusätzlichen Kosten der Schlechtraumregelung werden durch ihre Energieeinsparungen nicht refinanziert. Die Schlechtraumregelung ist bei Gruppenbüros nur wirtschaftlich, wenn die Raumgruppe aus zwei Räumen mit je mindestens fünf Personen pro Raum besteht oder aus drei Räumen mit je sechs Personen pro Raum. Für Untersuchungs- und Behandlungsräume sind Raumgruppen bis zu drei Räumen wirtschaftlich, wenn mit mindestens fünf Personen pro Raum gerechnet wird. Es ist fraglich, ob Untersuchungs- und Behandlungsräume für fünf oder mehr Personen ausgelegt werden. Bei Hotelzimmern wird eine Wirtschaftlichkeit ab vier Personen pro Raum erzielt. Es wird davon ausgegangen, das Hotelzimmer in den meisten Fällen maximal für drei Personen ausgelegt werden. Damit ist bei Hotelzimmern eine Konstant-Volumenstromregelung einer Schlechtraumregelung aus wirtschaftlichen Gründen vorzuziehen. Eine Personenanzahl von maximal drei Personen wird für Bettenzimmer als realistisch betrachtet. Eine Wirtschaftlichkeit der Schlechtraumregelung gegenüber der

Konstant-Volumenstromregelung kann dann bei einer Raumgruppe mit maximal zwei Räumen erzielt werden.

5.2.1.3 Einsatzrandbedingungen und Konsequenzen

Haben Räume kleine Auslegungsvolumenströme ($\dot{V}_R^* < 250 \text{ m}^3/\text{h}$), so sollten diese zu einer Raumgruppe zusammengefasst und entweder über eine Konstant-Volumenstromregelung oder die hier untersuchte Schlechtraumregelung versorgt werden.

Die mittels Simulationsrechnungen untersuchte Raumgruppe ist für eine Schlechtraumregelung aufgrund der fiktiven Personenbelegungsprofile nur begrenzt geeignet. Zwar werden die CO_2 -Grenzwerte und die Luftbilanz in jedem Raum eingehalten, auch haben geöffnete Fenster keine nachteiligen Auswirkungen. Jedoch treten starke Überlüftungen einzelner Räume im Vergleich zum realen Luftbedarf (Einzelraumregelung) auf, welche systembedingt sind, energetische Nachteile haben und sich negativ auf die Raumlufffeuchte auswirken können. Diese Überlüftungen sind immer dann vorhanden, wenn ein Raum höher belegt ist als ein anderer. Bezogen auf die Konstant-Volumenstromregelung, werden Überlüftungen reduziert, da nicht während der gesamten Nutzungszeit der Auslegungsvolumenstrom gefördert wird. Es sind auch Teillastvolumenströme möglich, wenn kein Raum der Raumgruppe voll belegt ist. In diesen Zuständen sind Energieeinsparungen gegenüber der Konstant-Volumenstromregelung vorhanden, welche für bestimmte Nutzungen und Raumgruppen eine Wirtschaftlichkeit trotz zusätzlicher Investitionskosten sowie Inspektions- und Wartungskosten ermöglicht.

Die Schlechtraumregelung wird für gleiche Nutzungen empfohlen. Gleiche Nutzungen bedeuten dabei gleiche Nutzungszeiten und gleiche relative Personenbelegungen ($f_{R,Pers,rel}$). Die Gleichheit der Nutzungen kann in der Praxis jedoch nicht garantiert werden, auch wenn es sich um Räume derselben Nutzung handelt. Je ähnlicher die Nutzungszeiten und die relativen Personenbelegungen ($f_{R,Pers,rel}$) der Räume, desto energieeffizienter ist die Schlechtraumregelung.

5.2.2 Mischkonzentrationsregelung (Regelung 2b)

Die Mischkonzentrationsregelung ist vergleichbar mit der Schlechtraumregelung (Kapitel 5.2.1 S.94) und die benötigten Komponenten sind in Abbildung 2.11 (S.18) zu sehen. Abbildung 5.21 zeigt die Regelung der dezentralen Ventilatoren.

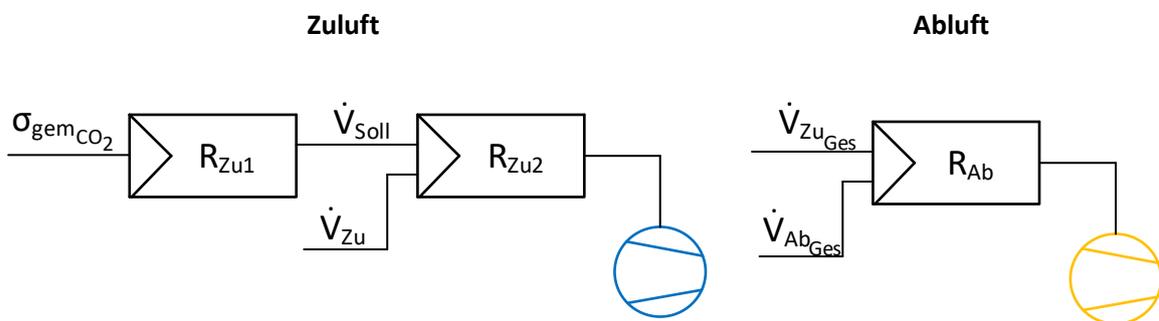


Abbildung 5.21: Regelung von dezentralem Zu- und Abluftventilator bei der Mischkonzentrationsregelung

Im Gegensatz zur raumweisen Anordnung bei der Schlechtraumregelung ist ein Messorgan im Abluftkanal verbaut. Somit ist die Regelgröße für den Regler R_{Zu1} die gemischte CO_2 -Konzentration der Einzelräume $\sigma_{gem_{CO_2}}$ der Raumgruppe. Die CO_2 -Mischkonzentration ergibt sich aus den CO_2 -Konzentrationen und Volumenströmen der Räume wie aus Gl. 5.33 hervorgeht.

$$\sigma_{gem_{CO_2}} = \frac{\dot{V}_{R1} \cdot \sigma_{R1_{CO_2}} + \dot{V}_{R2} \cdot \sigma_{R2_{CO_2}} + \dot{V}_{R3} \cdot \sigma_{R3_{CO_2}}}{\dot{V}_{R1} + \dot{V}_{R2} + \dot{V}_{R3}} \quad 5.33$$

$\sigma_{gem_{CO_2}}$	[ppm]	CO_2 -Konzentration gemeinsam durchströmter Kanal
\dot{V}_{R1}	[m ³ /h]	Volumenstrom „Raum klein“
$\sigma_{R1_{CO_2}}$	[ppm]	CO_2 -Konzentration „Raum klein“
\dot{V}_{R2}	[m ³ /h]	Volumenstrom „Raum mittel“
$\sigma_{R2_{CO_2}}$	[ppm]	CO_2 -Konzentration „Raum mittel“
\dot{V}_{R3}	[m ³ /h]	Volumenstrom „Raum groß“
$\sigma_{R3_{CO_2}}$	[ppm]	CO_2 -Konzentration „Raum groß“

Besteht die Raumgruppe aus mehr als drei Räumen muss Gl. 5.33 entsprechend erweitert werden. Übersteigt diese gemessene CO_2 -Konzentration den vorgegebenen CO_2 -Mischkonzentrationsgrenzwert, bestimmt Regler R_{Zu1} den benötigten Sollvolumenstrom \dot{V}_{Soll} , welcher über Regler R_{Zu2} am dezentralen Zuluftventilator eingestellt wird. Der Grenzwert der CO_2 -Mischkonzentration muss gewährleisten, dass in jedem Zustand die CO_2 -Grenzwerte in den Räumen eingehalten werden. Der Regler R_{Ab} gleicht den Zuluftvolumenstrom \dot{V}_{ZuGes} und den Abluftvolumenstrom \dot{V}_{AbGes} ab und stellt den dezentralen Abluftventilator entsprechend ein.

An der Mischkonzentrationsregelung werden die Auswirkungen der reduzierten Anzahl der CO_2 -Sensoren im Vergleich zur Schlechtraumregelung untersucht. Es wird folgender Aufbau genutzt:

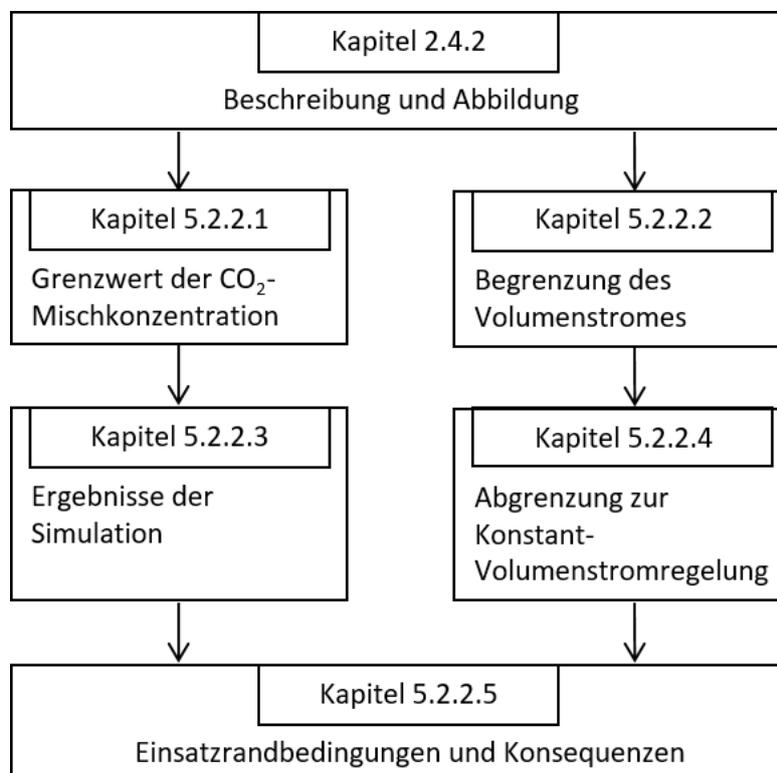


Abbildung 5.22: Aufbau der Untersuchungen zur Raumgruppenversorgung mit Mischkonzentrationsregelung (Variante 2b)

Der zur Regelung notwendige Grenzwert der CO₂-Mischkonzentration wird in Kapitel 5.2.2.1 vorgestellt. Der Grenzwert der CO₂-Mischkonzentration bedingt die Begrenzung des Volumenstromes für diese analgentechnische Umsetzung. Dies wird in Kapitel 5.2.2.2 (S.107) begründet. Des Weiteren werden Simulationsrechnungen (Kapitel 5.2.2.3 S.109) durchgeführt. Wie auch bei der Schlechtraumregelung wird eine Abgrenzung zur Konstant-Volumenstromregelung (Kapitel 5.2.2.4 S.110) vorgenommen. Aus allen Untersuchungen werden abschließend die Einsatzrandbedingungen und Konsequenzen (Kapitel 5.2.2.5 S.111) für die Mischkonzentrationsregelung erläutert.

5.2.2.1 Grenzwert der CO₂-Mischkonzentration

Für den Grenzwert der CO₂-Mischkonzentration wird ein Zusammenhang mit den Auslegungsvolumenströmen der Räume hergestellt. Dieser muss gewährleisten, dass in allen möglichen Belegungszuständen der Raumgruppe die CO₂-Konzentrationen in den Räumen ihre vorgegebenen Grenzwerte nicht überschreiten.

Durchgeführte Simulationen zeigen: Der kritischste Belegungszustand tritt auf, wenn der Raum mit dem geringsten Auslegungsvolumenstrom voll belegt und die restlichen Räume der Raumgruppe nicht belegt sind. In diesem Zustand muss der Grenzwert der CO₂-Mischkonzentration gewährleisten, dass der vorgegebene CO₂-Grenzwert im Raum mit dem geringsten Auslegungsvolumenstrom eingehalten wird. Die Skizze in Abbildung 5.23 zeigt eine prinzipielle Raumgruppe mit Mischkonzentrationsregelung und die für diese Betrachtung benötigten Volumenströme.

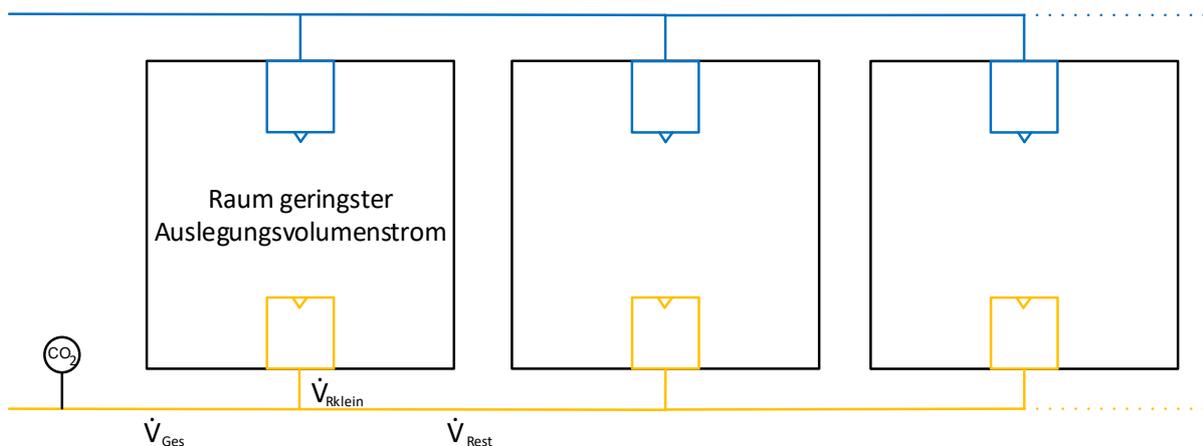


Abbildung 5.23: Prinzipielle Raumgruppe zur Bestimmung des Grenzwertes der CO₂-Mischkonzentration

Zur Bestimmung des Grenzwertes der CO₂-Mischkonzentration wird zunächst der benötigte Volumenstrom für den Raum mit dem geringsten Auslegungsvolumenstrom bestimmt, sodass bei voller Belegung der CO₂-Grenzwert im Raum nicht überschritten wird. Dafür werden die Gl. 4.5 (S.60) und Gl. 4.6 (S.60) verwendet. Dabei entspricht die CO₂-Konzentration der Raumluft dem zulässigen CO₂-Grenzwert im Raum. Dieser Volumenstrom ist der konventionelle Auslegungsvolumenstrom des entsprechenden Raumes. Sind die Druckverluste im Netz zwischen den Räumen abgeglichen, so erhalten die restlichen Räume in diesem Zustand ihren Auslegungsvolumenstrom. Anhand dieser Volumenströme wird die vom CO₂-Kanalfühler gemessene Mischkonzentration bestimmt. Der CO₂-Kanalfühler muss sich im Abluftkanal im Gesamtvolumenstrom aller Räume der Raumgruppe befinden. Die Bestimmung erfolgt im stationären Zustand, wenn die restlichen Räume nicht belegt und die CO₂-Konzentration der Außenluft als CO₂-Konzentration der Raumluft angesetzt wird.

$$\sigma_{Misch} = \frac{\dot{V}_{R_{klein}}^* \cdot \sigma_{Grenz} + \dot{V}_{Rest}^* \cdot \sigma_{Au}}{\dot{V}_{R_{klein}}^* + \dot{V}_{Rest}^*} \quad 5.34$$

$\dot{V}_{R_{klein}}^*$	[m ³ /h]	Auslegungsvolumenstrom (kleinster Auslegungsvolumenstrom der Raumgruppe)
\dot{V}_{Rest}^*	[m ³ /h]	Auslegungsvolumenstrom restliche Räume der Raumgruppe
σ_{Misch}	[ppm]	Grenzwert der CO ₂ -Mischkonzentration
σ_{Grenz}	[ppm]	CO ₂ -Grenzwert der Raumluft im Raum mit dem geringsten Auslegungsvolumenstrom
σ_{Au}	[ppm]	CO ₂ -Konzentration der Außenluft

Die sich einstellende CO₂-Mischkonzentration für eine Raumgruppe mit beliebig vielen Räumen kann mit Gl.5.34 in Abhängigkeit von den Auslegungsvolumenströmen der Räume und dem CO₂-Grenzwert im Raum mit dem geringsten Auslegungsvolumenstrom berechnet werden.

Der Grenzwert der CO₂-Mischkonzentration kann nicht unter der CO₂-Konzentration der Außenluft liegen. Je niedriger der Grenzwert der CO₂-Mischkonzentration, desto höher die geförderten Volumenströme bei Belegung der Raumgruppe. Daraus resultieren deutliche Überlüftungen bei voller Belegung der Raumgruppe. Diese Überlüftungen sind größer als bei einer Konstant-Volumenstromregelung.

5.2.2.2 Begrenzung des Volumenstromes bei Mischkonzentrationsregelung

Um die Überlüftung bei voller Belegung der Raumgruppe zu begrenzen, muss für die Mischkonzentrationsregelung ein maximaler Volumenstrom festgelegt werden. Wie stark die Überlüftung bei maximaler Belegung der Raumgruppe ist, wird anhand folgender Untersuchung gezeigt. Es werden zwei Auslegungszustände miteinander verglichen.

- Konventionelle Auslegung bei voller Belegung der Raumgruppe (maximale Personenanzahl)
- Auslegung Mischkonzentrationsregelung, d.h. benötigter Volumenstrom zur Einhaltung des Grenzwertes der CO₂-Mischkonzentration (Kapitel 5.2.2.1) bei voller Belegung der Raumgruppe

Diese Auslegungszustände unterscheiden sich in der Bestimmung des Auslegungsvolumenstromes. Für die Bestimmung des Auslegungsvolumenstromes nach konventioneller Auslegung wird von folgenden Annahmen ausgegangen:

- der CO₂-Grenzwert der Räume beträgt 850 ppm,
- der personenbezogene Volumenstrom für jeden Raum beträgt 45 m³/(h P) und
- die CO₂-Emission einer Person beträgt 18 l/h.

Somit kann der benötigte Auslegungsvolumenstrom für die voll belegte Raumgruppe anhand der gesamten Personenanzahl der Raumgruppe bestimmt werden.

$$\dot{V}_{Ges}^* = N_{Ges,Pers}^* \cdot 45 \frac{m^3}{h \cdot P} \quad 5.35$$

\dot{V}_{Ges}^*	[m ³ /h]	Auslegungsvolumenstrom der Raumgruppe bei konventioneller Auslegung
$N_{Ges,Pers}^*$	[-]	Personenanzahl gesamte Raumgruppe im Auslegungszustand

Dieser würde einer Auslegung für eine Konstant-Volumenstromregelung gleichkommen.

Der Auslegungszustand für die Mischkonzentrationsregelung ist bei Vollbelegung des Raumes mit der geringsten maximalen Personenanzahl und gleichzeitiger Nichtnutzung der restlichen Räume vorhanden (Kapitel 5.2.2.1). Der in diesem Zustand bestimmte Grenzwert der CO₂-Mischkonzentration wird aufgrund der Regelung auch bei voller Belegung aller Räume der Raumgruppe eingehalten. Der dann geförderte Volumenstrom kann mithilfe von Gl.5.36 berechnet werden. Für die Auslegung bei Mischkonzentrationsregelung wird davon ausgegangen, dass die CO₂-Messung in einer ideal durchmischten Abluft aller Räume der Raumgruppe vorgenommen wird.

$$\dot{V}_{Misch}^* = \frac{N_{Ges,Pers}^* \cdot \dot{V}_{PersCO_2} \cdot \sigma_{PersCO_2}}{\sigma_{Misch} - \sigma_{Au}} \quad 5.36$$

\dot{V}_{Misch}^*	[m ³ /h]	Auslegungsvolumenstrom für Mischkonzentrationsregelung
\dot{V}_{PersCO_2}	[m ³ /h]	Von Person emittierter CO ₂ -Volumenstrom (0,018 m ³ /h)
σ_{PersCO_2}	[ppm]	CO ₂ -Konzentration des Volumenstromes durch Personen zugeführt (1000000 ppm)
σ_{Misch}	[ppm]	Grenzwert der CO ₂ -Mischkonzentration
σ_{Au}	[ppm]	CO ₂ -Konzentration der Außenluft

Da die Luft ideal durchmischt ist, kann von einem Raum in dem sich alle Personen der Raumgruppe befinden ausgegangen werden. Somit wird für den stationären Zustand die Knotengleichung aus Gl. 4.5 (S.60) genutzt. Diese Gleichung gilt unter der Voraussetzung, dass die Beträge von Zu- und Abluftvolumenstrom identisch sind.

Über den Quotienten $\frac{\dot{V}_{Misch}^*}{\dot{V}_{Ges}^*}$ werden die Auslegungsvolumenströme der beiden Auslegungszustände miteinander verglichen. Ein Quotient von 1 bedeutet dabei, dass die Volumenströme identisch sind. Quotienten größer 1 kennzeichnen einen größeren Auslegungsvolumenstrom bei der Mischkonzentrationsregelung und damit einen Mehraufwand im Vergleich zur konventionellen Auslegung (Konstantvolumenstrom-Regelung). Abbildung 5.24 zeigt den Mehraufwand, der durch die Auslegung nach Mischkonzentrationsregelung gegenüber der konventionellen Auslegung entsteht. Dabei werden verschiedene Raumgruppen gezeigt. Die Raumgruppen unterscheiden sich durch den Quotienten der Personenanzahl vom kleinsten Raum zur Personenanzahl der restlichen Räume ($\frac{N_{Rklein,Pers}^*}{N_{Rest,Pers}^*}$). Für beide Auslegungen wird von einem zulässigen CO₂-Grenzwert in den Räumen von beispielhaften 850 ppm ausgegangen.

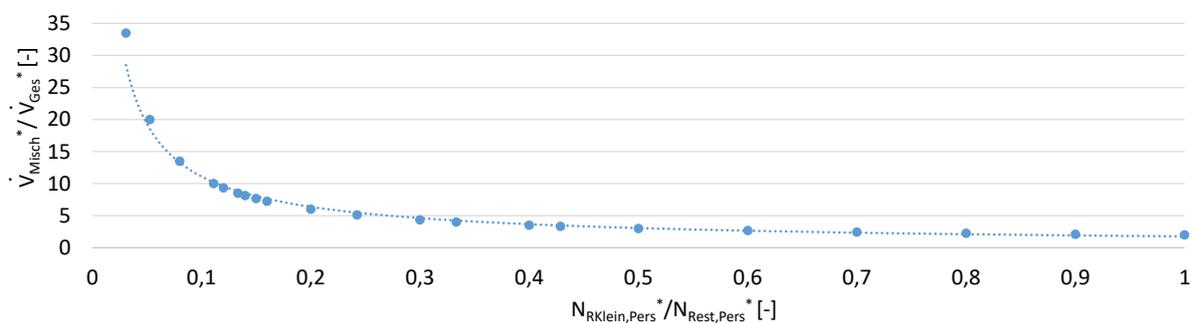


Abbildung 5.24: Überlüftung im Auslegungszustand der 21 Varianten

Es wird deutlich, dass vor allem bei kleinen Quotienten $\frac{N_{Rklein,Pers}^*}{N_{Rest,Pers}^*}$ der Auslegungsvolumenstrom nach Mischkonzentrationsregelung deutlich größer ist als bei konventioneller Auslegung. Im dargestellten Extremfall wird der Auslegungsvolumenstrom bei konventioneller Auslegung um ca. das 34-fache

überschritten. Selbst bei einer Raumgruppe mit zwei identischen Räumen ($\frac{N_{Rklein,Pers}^*}{N_{Rest,Pers}^*} = 1$) ist der Auslegungsvolumenstrom nach Mischkonzentrationsregelung größer als bei konventioneller Auslegung. Daraus wird deutlich, dass für die Raumgruppenversorgung mit Mischkonzentrationsregelung der maximale Volumenstrom auf Auslegungsvolumenstrom nach konventioneller Auslegung begrenzt werden muss, um einen erheblichen Mehraufwand zu vermeiden.

5.2.2.3 Ergebnisse der Simulation

Bei den nachfolgenden Simulationsrechnungen sind die Druckverluste im Netz abgeglichen, d.h. die Druckverluste je Luftseite von „Raum klein“ und „Raum mittel“ sind identisch und entsprechen dem Druckverlust von „Raum groß“. Sie werden über die Zu- und Abluftdurchlässe eingestellt. Der Grenzwert der CO₂-Mischkonzentration nach Gl. 5.34 (S.107) beträgt für die betrachtete Raumgruppe 460 ppm, da im „Raum klein“ eine CO₂-Konzentration von 770 ppm zulässig ist. Der Grenzwert der CO₂-Mischkonzentration entspricht damit annähernd der angenommenen CO₂-Konzentration der Außenluft von 450 ppm. Tabelle 5.8 zeigt die Ergebnisse der Mischkonzentrationsregelung bei begrenztem maximalem Volumenstrom auf Auslegungsvolumenstrom nach konventioneller Auslegung. Es wird dieselbe Auswertung wie für alle anderen anlagentechnischen Umsetzungen angewandt (Kapitel 3.1.3 S.24).

Tabelle 5.8: Überblick der Ergebnisse der Raumgruppenversorgung mit Mischkonzentrationsregelung (Erläuterung der Tabelle siehe Tabelle 3.4 S.26)

Parameter-variation	CO ₂ -Konzentration [ppm]			Grundlüftung [%]			Luftbilanz [%]			Regelaufgabe Zentral [Pa]	
	Rk	Rm	Rg	Rk	Rm	Rg	Rk	Rm	Rg	Zuluft	Abluft
Grenz-/Sollwert	770	850	1050	18	4,8	2,4	0			0	
Zul. Abweichung	+ 50			± 5			+ 5			± 3	
Netz-mittel	774	851	1054	100	100	17	1,2	2,9	0,1	3	-3
Netz-lang	776	851	1054	100	100	16	1,2	3	0,2	3	-3
Netz-kurz	774	851	1055	100	100	14	1,8	3,7	0,2	3	-3
Symmetrie-0,5	776	851	1054	100	100	18	2,1	3,9	4,3	3	-3
Symmetrie-1,5	775	851	1054	100	100	17	3,2	1,6	1,4	3	-3
Fenster offen	521	598	984	100	100	17	4,7	4,5	0,6	3	-3
n₅₀-0	775	852	1054	100	100	17	2,1	0,2	0,2	3	-3

Bei dem angewandten Grenzwert der CO₂-Mischkonzentration wird in jedem Raum und jeder Parametervariation der entsprechende CO₂-Grenzwert eingehalten.

Allerdings werden die Räume sowohl im Grundlüftungszustand als auch im Zustand der Personenbelegung überlüftet. Bei voller oder halber Belegung von „Raum groß“ wird in alle Räume der Auslegungsvolumenstrom gefördert, auch wenn „Raum klein“ und „Raum mittel“ nicht belegt oder halb belegt sind. Auch „Raum groß“ wird überlüftet und mit dem Auslegungsvolumenstrom beaufschlagt, wenn der Raum halb belegt und einer der anderen Räume voll belegt ist. Grund dafür ist die Regelaufgabe des dezentralen Zuluftventilators, den geringen Grenzwert der CO₂-Mischkonzentration einzuhalten. Dieser Grenzwert der CO₂-Mischkonzentration wird bei Belegung von „Raum groß“ überschritten, wie am beispielhaften Verlauf der CO₂-Mischkonzentration der Parametervariation „Netz mittel“ in Abbildung 5.25 gezeigt wird.

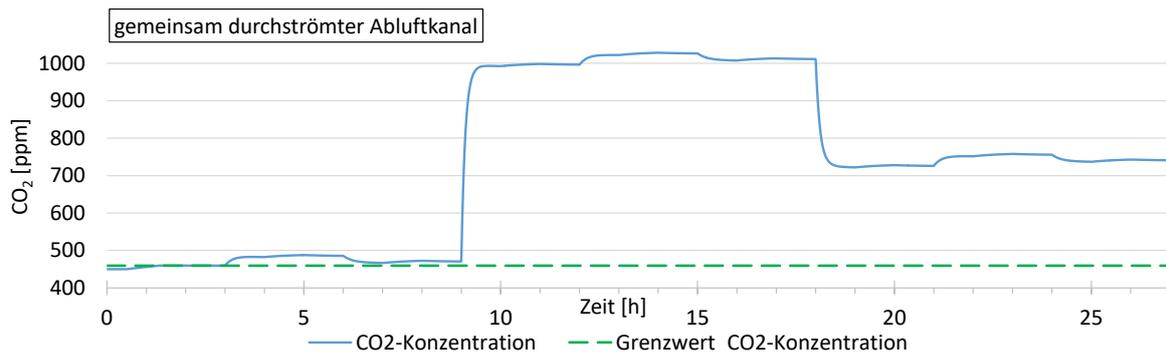


Abbildung 5.25: Verlauf der CO₂-Konzentration gemeinsam durchströmter Kanal: Raumgruppenversorgung mit Mischkonzentrationsregelung; „Netz mittel“

Ab Stunde 9 (Belegung „Raum groß“) wird der Grenzwert der CO₂-Mischkonzentration deutlich überschritten. Die Überschreitung resultiert aus der Begrenzung des geförderten Volumenstromes auf konventionellen Auslegungsvolumenstrom der Raumgruppe. Um den Grenzwert einzuhalten, müsste den Räumen (vor allem „Raum groß“) ein größerer Zuluftvolumenstrom bereitgestellt werden. Da aber die CO₂-Konzentrationen in den einzelnen Räumen ihren entsprechenden Grenzwert nicht überschreiten, wird die gezeigte Überschreitung des Grenzwertes der CO₂-Mischkonzentration nicht negativ bewertet. Ein zusätzlicher Volumenstrom würde eine Überlüftung, selbst bei Vollbelegung der Räume, bedeuten. Im Vergleich Schlechtraumregelung ist die Überlüftung bei der Raumgruppenversorgung mit Mischkonzentrationsregelung stärker ausgeprägt, sie ist aber geringer als bei einer Konstantvolumenstrom-Regelung.

Die Ergebnisse der Luftbilanz decken sich mit denen der Schlechtraumregelung. Auch hier werden die geringen Disbalancen von Zu- und Abluft eines Raumes durch Disbalancen eines anderen Raumes ausgeglichen und sind im Gesamtvolumenstrom der Räume nicht feststellbar.

Die Regelaufgabe der Zentralventilatoren wird in allen Parametervariationen im gleichen Maß erfüllt.

5.2.2.4 Abgrenzung der Mischkonzentrationsregelung zur Konstant-Volumenstromregelung

Zur Abgrenzung der Mischkonzentrationsregelung wird dasselbe Verfahren wie in Kapitel 5.2.1.2 (S.97) verwendet. Jedoch fallen die Investitions-, Wartungs- und Inspektionskosten für den CO₂-Sensor nur einmal je Raumgruppe an. Die Mehrinvestitionskosten und Ausgaben sind damit geringer als bei der Schlechtraumregelung.

Ein weiterer Unterschied liegt in der Bestimmung des geförderten Volumenstromes bei mittlerer Personenbelegung. Hierzu wird zunächst der Grenzwert der CO₂-Mischkonzentration σ_{Misch} nach Gl. 5.34 (S.107) für die Raumgruppe bestimmt. Über den mittleren Außenluftvolumenstrom (Gl. 5.24 S.98) und

den Auslegungsvolumenstrom kann die mittlere Personenbelegung der Raumgruppe ermittelt werden.

$$\overline{N_{Pers}} = \frac{\dot{V}_{dc}}{\dot{V}_{Ges}^*} \cdot N_{Ges,Pers}^* \quad 5.37$$

$\overline{N_{Pers}}$	[m ³ /h]	Mittlere Personenbelegung
\dot{V}_{dc}	[m ³ /h]	Mittlerer Außenluftvolumenstrom
\dot{V}_{Ges}^*	[m ³ /h]	Auslegungsvolumenstrom der Raumgruppe bei konventioneller Auslegung
$N_{Ges,Pers}^*$	[-]	Personenanzahl gesamte Raumgruppe im Auslegungszustand

Mit der mittleren Personenbelegung der Raumgruppe wird mit Gl.4.6 (S.60) der benötigte Volumenstrom bestimmt, um den am Regler eingestellten Grenzwert der CO₂-Mischkonzentration σ_{Misch} einzuhalten. Ist dieser Volumenstrom größer als der Auslegungsvolumenstrom, wird aufgrund der Regelung der Auslegungsvolumenstrom gefördert und es sind keine energetischen Einsparungen gegenüber der Konstant-Volumenstromregelung möglich. Aufgrund der Mehrinvestitionskosten und den zusätzlichen Ausgaben für die Mischkonzentrationsregelung ist in diesem Fall keine Wirtschaftlichkeit darstellbar. Diese Untersuchung wird an denselben Raumgruppen wie bei der Schlechtraumregelung (Kapitel 5.2.1.2 (S.97)) durchgeführt. Für keine der Raumgruppen ist der benötigte Volumenstrom bei mittlerer Personenbelegung, um den Grenzwert der CO₂-Mischkonzentration σ_{Misch} einzuhalten, kleiner als der Auslegungsvolumenstrom. Damit ist unter den getroffenen Vereinfachungen die Mischkonzentrationsregelung keine wirtschaftliche Alternative zur Konstant-Volumenstromregelung.

5.2.2.5 Einsatzrandbedingungen und Konsequenzen

Zwar zeigen die Simulationsergebnisse, dass bei geeigneter Wahl des Grenzwertes der CO₂-Mischkonzentration der CO₂-Grenzwert in allen Räumen eingehalten und damit dieselben Komfortbedingungen wie bei einer Einzelraumregelung bereitgestellt werden können. Jedoch hat die Einhaltung des Grenzwertes der CO₂-Mischkonzentration erhebliche Überlüftungen zur Folge. Diese Überlüftungen können begrenzt werden, indem der maximale Volumenstrom vom Regler auf den konventionell bestimmten Auslegungsvolumenstrom begrenzt wird. Damit sind die Einsatzrandbedingungen für die praktische Anwendung dieser Regelung bekannt. Unter wirtschaftlichen Aspekten zeigen die Untersuchungen aber, dass es gegenüber einer Konstant-Volumenstromregelung keine Einsparungen gibt, welche eine zusätzliche Investition rechtfertigen. Es ist wirtschaftlicher, bei entsprechenden Nutzungen eine Schlechtraumregelung oder eine Konstant-Volumenstromregelung umzusetzen. Deshalb hat die Mischkonzentrationsregelung keine praktische Relevanz.

6 Strömungstechnische Besonderheiten

Mit der Untersuchung der Raumgruppenversorgung mit Mischkonzentrationsregelung ist die zweite Forschungsfrage dieser Arbeit beantwortet. Es sind anlagentechnische Umsetzungen für das dVt-System vorhanden und deren Einsatzrandbedingungen sind bekannt. Diese anlagentechnischen Umsetzungen unterscheiden sich im Komponentenaufwand, können auf verschiedene Nutzungen angewandt werden und ganze Gebäude abbilden. Durch Kombination und Abwandlung einzelner Eigenschaften der anlagentechnischen Umsetzungen sind weitere Umsetzungen denkbar. Alle untersuchten anlagentechnischen Umsetzungen nutzen mehrere Ventilatoren im Kanalnetz, welche sich gegenseitig beeinflussen. Diese gegenseitigen Beeinflussungen erzeugen strömungstechnische Besonderheiten. Sie haben sowohl Auswirkungen auf die Betriebspunkte der Ventilatoren und damit die benötigten elektrischen Leistungen, als auch können sie ungewollte Strömungssituationen wie Fehlströmungen (Abbildung 1.2 S.5) hervorrufen.

Die gegenseitige Beeinflussung der Ventilatoren wird durch deren Parallelschaltung hervorgerufen. Der qualitative Druckverlauf zweier parallel geschalteter Ventilatoren ist in Abbildung 6.1 zu sehen. Es werden verschiedene Punkte im Kanalnetz eingeführt, welche im weiteren Verlauf genutzt werden.

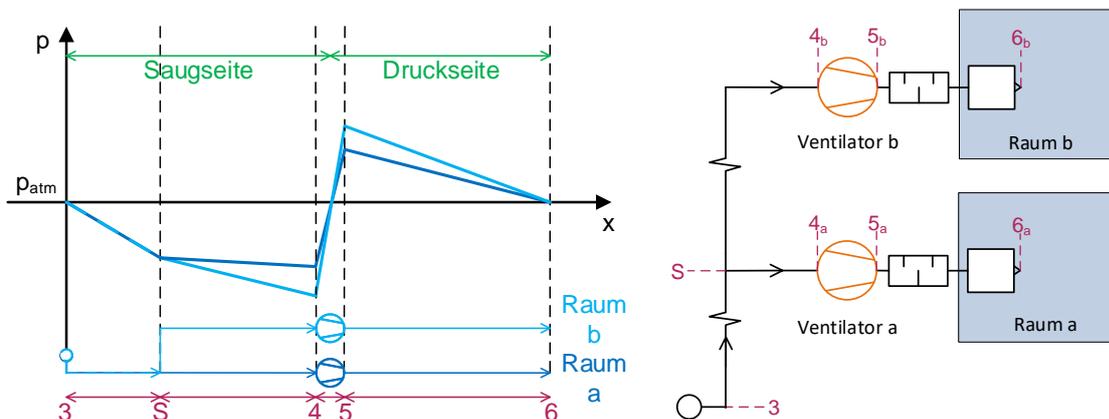


Abbildung 6.1: Druckverlauf Parallelschaltung im dVt-System (Zuluft) mit zugehöriger Skizze des Kanalnetzes

Der Punkt 3 wird durch die Position des Vordrucksensors zur Regelung des Zentralventilators definiert, hier herrscht der eingestellte Vordruck von 0 Pa. Da sich das Kanalnetz nicht direkt am Drucksensor aufteilt, wird der Punkt S eingeführt. Dieser stellt den Punkt der Aufteilung des Volumenstromes auf die beiden betrachteten Einzelstränge dar. Der Kanalabschnitt von 3 nach S bildet den gemeinsam durchströmten Kanal. Den Druckverlust dieses Kanalabschnittes müssen beide Ventilatoren überwinden (identischer Druckverlauf). Der Punkt 4 stellt den Punkt im gezeigten Kanalnetz mit dem größten Unterdruck dar. Punkt 5 ist der Punkt mit dem größten Überdruck. Die Differenz der Drücke zwischen Punkt 4 und 5 stellt die Druckerhöhung des Ventilators dar. Punkt 6 befindet sich im jeweiligen Raum, hier herrscht atmosphärischer Druck.

Im Folgenden wird beschrieben, wie die aktuelle Druckerhöhung zweier parallelgeschalteter Ventilatoren bestimmt wird. Anschließend wird die gegenseitige Beeinflussung an einem Beispiel analysiert. Alle nachfolgenden Gleichungen sind sowohl für Ventilator a als auch für Ventilator b gültig, deshalb werden beide Indizes aufgeführt. Für die Berechnung der Druckerhöhungen der Ventilatoren a oder b wird ein Ansatz aus [Giesen 2017] aufgegriffen.

$$\Delta p_{a;b}^* = \Delta p_{gem}^* + \Delta p_{Einzel a;b}^* \quad 6.1$$

$\Delta p_{a;b}^*$	[Pa]	Druckerhöhung Ventilator a oder b im Auslegungszustand
Δp_{gem}^*	[Pa]	Druckverlust gemeinsam durchströmter Kanal der Ventilatoren a und b im Auslegungszustand
$\Delta p_{Einzel a;b}^*$	[Pa]	Gesamter Druckverlust einzeln durchströmter Kanal des Ventilators im Auslegungszustand

Der Druckverlust des Kanalabschnittes 3→S entspricht dem des gemeinsam durchströmten Kanals. Der Druckverlust, welcher von jedem Ventilator einzeln überwunden werden muss, setzt sich aus einem saugseitigen und einem druckseitigen Anteil zusammen.

$$\Delta p_{gem}^* = \Delta p_{3S}^* \quad 6.2 \quad \Delta p_{Einzel a;b}^* = \Delta p_{S4a;b}^* + \Delta p_{5a;b6a;b}^* \quad 6.3$$

Δp_{3S}^*	[Pa]	Druckverlust Kanalabschnitt 3→S (gemeinsam durchströmter Kanal)
$\Delta p_{S4a;b}^*$	[Pa]	Druckverlust saugseitig einzeln durchströmter Kanal des Ventilators im Auslegungszustand
$\Delta p_{5a;b6a;b}^*$	[Pa]	Druckverlust druckseitig einzeln durchströmter Kanal des Ventilators im Auslegungszustand

Somit wird der zu überwindende Druckverlust auf zwei Bereiche des Kanalnetzes aufgeteilt (Gl.6.1). Jeder der Bereiche folgt dem Proportionalitätsgesetz aus Gl.5.15 (S.82). Es ergibt sich Gl. 6.4.

$$\Delta p_{a;b} = \Delta p_{gem}^* \cdot \left(\frac{\dot{V}_a + \dot{V}_b}{\dot{V}_a^* + \dot{V}_b^*} \right)^2 + \Delta p_{Einzel a;b}^* \cdot \left(\frac{\dot{V}_{a;b}}{\dot{V}_{a;b}^*} \right)^2 \quad 6.4$$

$\Delta p_{a;b}$	[Pa]	Druckerhöhung Ventilator a oder b
\dot{V}_a	[m³/s]	Volumenstrom von Ventilator a
\dot{V}_b	[m³/s]	Volumenstrom von Ventilator b
\dot{V}_a^*	[m³/s]	Auslegungsvolumenstrom Ventilator a
\dot{V}_b^*	[m³/s]	Auslegungsvolumenstrom Ventilator b

Aus dieser Gleichung wird die Abhängigkeit der Druckerhöhung von den geförderten Volumenströmen der Ventilatoren a und b deutlich und damit die gegenseitige Beeinflussung. Es kann für jeden Teillastzustand die Druckerhöhung des entsprechenden Ventilators berechnet werden. Nutzen mehr als zwei Ventilatoren einen gemeinsam durchströmten Kanal, muss diese Gleichung entsprechend erweitert werden.

Um die gegenseitige Beeinflussung zweier parallelgeschalteter Ventilatoren durch den gemeinsam durchströmten Kanal zu analysieren, werden zwei Faktoren genutzt. Diese sind der Teillastfaktor f_{teil} und der Anteil des Druckverlustes des gemeinsamen durchströmten Kanals am Auslegungsdruckverlust f_{gem} .

$$f_{teil a;b} = \frac{\dot{V}_{a;b}}{\dot{V}_{a;b}^*} \quad 6.5 \quad f_{gem} = \frac{\Delta p_{gem}^*}{\Delta p_a^*} \quad 6.6$$

$f_{teil a;b}$	[-]	Teillastfaktor der Volumenströme von Ventilator a oder b
f_{gem}	[-]	Anteil des gemeinsam durchströmten Kanals an der Druckerhöhung Ventilator a im Auslegungszustand

Der Faktor f_{gem} beschreibt den Anteil des gemeinsam durchströmten Kanals an der Druckerhöhung des Ventilators a im Auslegungszustand. Der Teillastfaktor f_{teil} gibt an, wieviel Prozent des Auslegungsvolumenstromes ein Ventilator aktuell fördert. Auch für den gemeinsam durchströmten Kanal kann ein solcher Faktor bestimmt werden, dieser ist von den Teillastfaktoren der einzelnen Ventilatoren abhängig.

$$f_{teilgem} = \frac{\dot{V}_{gem}}{\dot{V}_{gem}^*} = \frac{\dot{V}_a + \dot{V}_b}{\dot{V}_a^* + \dot{V}_b^*} = \frac{f_{teil_a} \cdot \dot{V}_a^* + f_{teil_b} \cdot \dot{V}_b^*}{\dot{V}_a^* + \dot{V}_b^*} \quad 6.7$$

\dot{V}_{gem}	[m ³ /s]	Aktueller Volumenstrom im gemeinsam durchströmten Kanal
\dot{V}_{gem}^*	[m ³ /s]	Auslegungsvolumenstrom im gemeinsam durchströmten Kanal

Ist der Teillastfaktor von Ventilator a kleiner als der von Ventilator b, ist auch der Teillastfaktor des gemeinsam durchströmten Kanals kleiner als der von Ventilator b. Ist der Teillastfaktor von Ventilator a größer als der von Ventilator b, ist auch der Teillastfaktor des gemeinsam durchströmten Kanals größer als der von Ventilator b.

Durch Einsetzen der Gl.6.5, Gl.6.6 und Gl.6.7 in Gl.6.4 entstehen Gl. 6.8 und Gl. 6.9.

$$\Delta p_a = f_{gem} \cdot \Delta p_a^* \cdot \left(\frac{f_{teil_a} \cdot \dot{V}_a^* + f_{teil_b} \cdot \dot{V}_b^*}{\dot{V}_a^* + \dot{V}_b^*} \right)^2 + (\Delta p_a^* - f_{gem} \cdot \Delta p_a^*) \cdot f_{teil_a}^2 \quad 6.8$$

$$\Delta p_b = f_{gem} \cdot \Delta p_a^* \cdot \left(\frac{f_{teil_a} \cdot \dot{V}_a^* + f_{teil_b} \cdot \dot{V}_b^*}{\dot{V}_a^* + \dot{V}_b^*} \right)^2 + (\Delta p_b^* - f_{gem} \cdot \Delta p_a^*) \cdot f_{teil_b}^2 \quad 6.9$$

Mit diesen beiden Gleichungen wird ein konkretes Beispiel erstellt. Hier haben beide Ventilatoren einen Auslegungsvolumenstrom von 500 m³/h und einen Auslegungsdruckverlust von 250 Pa. Abbildung 6.2 zeigt die Anlagenkennlinien von Ventilator a bei verschiedenen Faktoren f_{gem} . Der Teillastzustand des Ventilators b (f_{teil_b}) beträgt im oberen Diagramm konstant 1 und im unteren Diagramm konstant 0,1. Dabei zeigt jeweils die blaue Kennlinie die typische quadratische Anlagenkennlinie nach Gl.5.15 (S.82) ohne gegenseitige Beeinflussung durch den gemeinsam durchströmten Kanal ($f_{gem} = 0$).

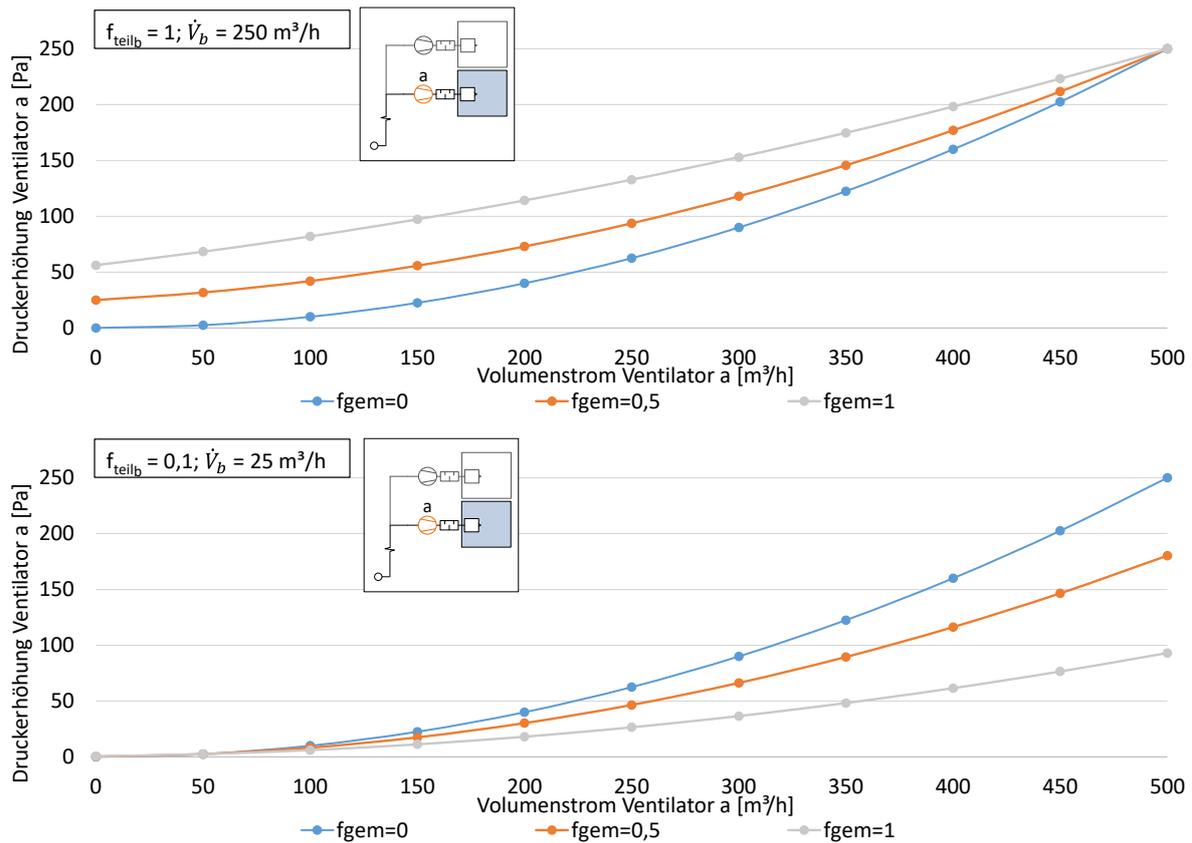


Abbildung 6.2: Anlagenkennlinien von Ventilator a bei variierenden Teillastzuständen von Ventilator b in Abhängigkeit der Ausprägung des gemeinsam durchströmten Kanals

Sobald ein gemeinsam durchströmter Kanal vorhanden ist ($f_{gem} > 0$), wird die gegenseitige Beeinflussung der Ventilatoren in den Anlagenkennlinien deutlich. Die Anlagenkennlinie von Ventilator a ist dann vom Teillastzustand von Ventilator b abhängig. Je größer der Anteil des gemeinsam durchströmten Kanals an der Druckerhöhung der Ventilatoren, desto größer wird der lineare Anteil in den Anlagenkennlinien. In diesen Fällen liegt kein rein quadratischer Zusammenhang zwischen Druckerhöhung bzw. Druckverlust und Volumenstrom mehr vor. Ist ein gemeinsam durchströmter Kanal vorhanden, entstehen rein quadratische Anlagenkennlinien nur, wenn die Teillastzustände der beiden Ventilatoren zu jedem Zeitpunkt identisch sind ($f_{teil_a} = f_{teil_b}$).

Auch auf die Druckerhöhung von Ventilator b hat der gemeinsam durchströmte Kanal Einfluss. Abbildung 6.3 zeigt die notwendige Druckerhöhung von Ventilator b, aufgetragen über den geförderten Volumenstrom von Ventilator a. Im oberen Diagramm fördert Ventilator b konstant den Auslegungsvolumenstrom. Im unteren Diagramm beträgt der Teillastzustand von Ventilator b = 0,1.

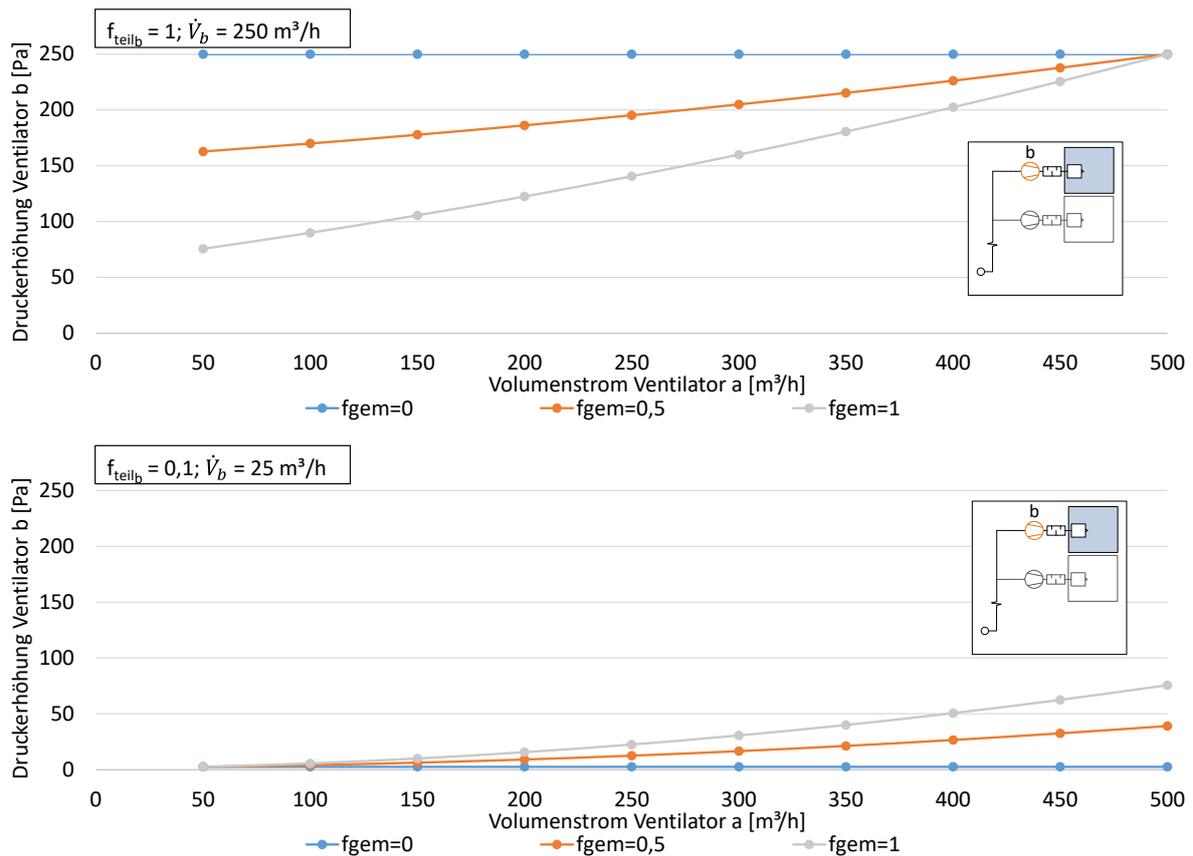


Abbildung 6.3: Druckerhöhung von Ventilator b in verschiedenen Teillastzuständen in Abhängigkeit des geförderten Volumenstromes von Ventilator a und der Ausprägung des gemeinsam durchströmten Kanals

Ist kein gemeinsam durchströmter Kanal vorhanden ($f_{gem} = 0$), ist die notwendige Druckerhöhung des Ventilators b unabhängig vom geförderten Volumenstrom des Ventilators a und für konstante Teillastzustände konstant. Auch hier wird die gegenseitige Beeinflussung bei $f_{gem} > 0$ sichtbar. Prinzipiell ist ein gegenläufiges Verhalten zur Abbildung 6.2 zu erkennen. Je größer die Ausprägung des gemeinsam durchströmten Kanals und je unterschiedlicher die Teillastzustände der betrachteten Ventilatoren, desto mehr wird von der konstanten Druckerhöhung bei $f_{gem} = 0$ abgewichen.

6.1 Betriebspunkte

Für die Ventilatoren können Betriebspunkte entstehen, welche bei einer rein quadratischen Kennlinie nicht erreicht werden. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich bei unterschiedlichen Teillastzuständen der Ventilatoren die benötigte Druckerhöhung des Ventilators, gegenüber einer Betrachtung ohne gemeinsam durchströmten Kanal, mit dem geringeren Teillastzustand erhöht, während sich die des Ventilators mit dem höheren Teillastzustand verringert.

Ventilatoren können Kennlinien mit instabilem Bereich aufweisen, d.h. in einem bestimmten Bereich der Ventilator Kennlinie kann einer Druckerhöhung nicht eindeutig ein Volumenstrom zugeordnet werden. Häufig weisen Axialventilatoren instabile Kennlinienbereiche auf. Der instabile Bereich wird durch die Grenzkennlinie begrenzt. Alle Punkte links von der Grenzkennlinie sind kritisch. Hier kommt es aufgrund von Strömungsablösungen am Laufrad zu Wirkungsgradabfall, starken Geräuschemissionen und Ventilatorschwingen. Abbildung 6.4 zeigt die Anlagenkennlinien aus Abbildung 6.2 (oberes Diagramm),

zusätzlich sind Ventilator Kennlinien eines Axialventilators und die zugehörige Grenzkennlinie aufgetragen.

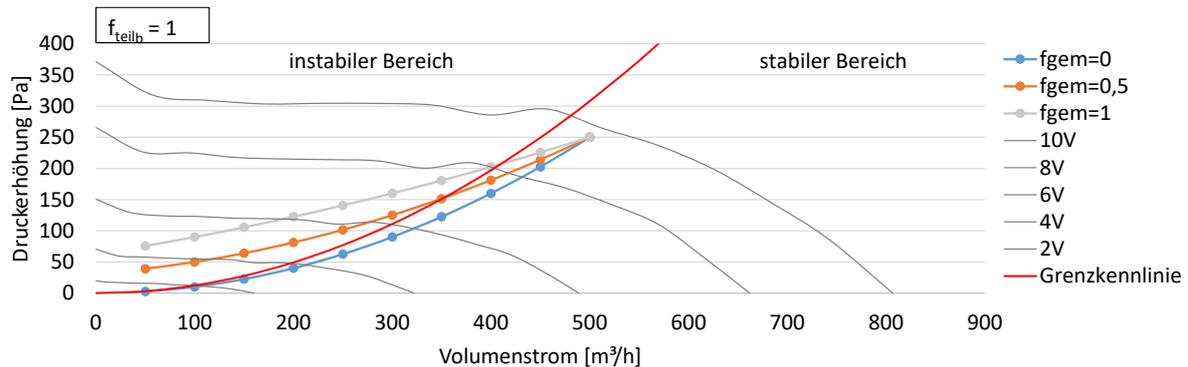


Abbildung 6.4: Ventilator Kennlinien mit instabilem Bereich und Anlagen Kennlinien mit und ohne gegenseitiger Beeinflussung

Bei der Anlagenkennlinie ohne gemeinsam durchströmten Kanal ($f_{gem} = 0$) liegen alle Betriebspunkte rechts von der Grenzkennlinie im stabilen Bereich. Ist ein gemeinsam durchströmter Kanal vorhanden, sorgt die Verschiebung der Betriebspunkte bei konstanten Volumenströmen hin zu höheren Druckerhöhungen dafür, dass Betriebspunkte links der Grenzkennlinie liegen, selbst wenn sich der Auslegungspunkt des Ventilators rechts davon befindet.

Axialventilatoren sind damit für das dVt-System geeignet, wenn sich alle einstellenden Betriebspunkte rechts von der Grenzkennlinie befinden. Unter bestimmten Randbedingungen ist dies gewährleistet.

- Konstant-Volumenstromregelung: Der Axialventilator weist immer einen gleichen oder höheren Teillastzustand auf als die Ventilatoren, welche ihn durch einen gemeinsam durchströmten Kanal beeinflussen.
- Lüftungszentrale: Der Axialventilator wird nicht über einen gemeinsam durchströmten Kanal durch parallele Ventilatoren beeinflusst.
- Kanalnetz mit sternförmiger Luftverteilung ab dem Vordrucksensor: Der Axialventilator wird nicht über einen gemeinsam durchströmten Kanal durch parallele Ventilatoren beeinflusst.
- Außerdem sind bei Axialventilatoren (Ventilator a), welche einen gewissen Anteil f_{Ges} am Gesamtvolumenstrom der Lüftungsanlage fördern und den ersten Raum nach dem Vordrucksensor beliefern, gemeinsam durchströmte Kanäle mit begrenzten Ausprägungen f_{gem} zulässig.

Wie stark der gemeinsam durchströmte Kanal ausgeprägt sein darf, so dass sich in bestimmten Teillastzuständen ($f_{teil_a}, f_{teil_b} = f_{teil_{Rest}}$) keine Betriebspunkte im instabilen Bereich (links der Grenzkennlinie) einstellen, wird im Folgenden untersucht.

Damit die Betriebspunkte im stabilen Bereich liegen, muss für jeden Teillastzustand von Ventilator a f_{teil_a} Gl. 6.10 gelten.

$$\Delta p_{Grenz} \geq \Delta p_a \tag{6.10}$$

Δp_{Grenz} [Pa] Druckerhöhung auf der Grenzkennlinie
 Δp_a [Pa] Druckerhöhung des Ventilators

Dabei folgt die Druckerhöhung der Grenzkennlinie dem quadratischen Zusammenhang des Proportionalitätsgesetzes aus Gl. 5.15 (S.82).

$$\Delta p_{Grenz} = f_{teil_a}^2 \cdot \Delta p_{Grenz}^* \quad 6.11$$

f_{teil_a}	[-]	Teillastfaktor des Volumenstroms von Ventilator a nach Gl. 6.5 (S.113)
Δp_{Grenz}^*	[Pa]	Druckerhöhung der Grenzkennlinie bei Auslegungsvolumenstrom von Ventilator a

Zur Untersuchung wird ein neuer Faktor eingeführt, welcher den Anteil der Druckerhöhung des Ventilators im Auslegungspunkt an der Druckerhöhung der Grenzkennlinie des Ventilators bei Auslegungsvolumenstrom angibt.

$$f_{Grenz} = \frac{\Delta p_a^*}{\Delta p_{Grenz}^*} \quad 6.12 \quad \Delta p_a^* = f_{Grenz} \cdot \Delta p_{Grenz}^* \quad 6.13$$

f_{Grenz}	[-]	Anteil der Druckerhöhung des Ventilators im Auslegungspunkt an der Druckerhöhung der Grenzkennlinie des Ventilators bei Auslegungsvolumenstrom
Δp_a^*	[Pa]	Druckerhöhung des Ventilators a im Auslegungszustand
Δp_{Grenz}^*	[Pa]	Druckerhöhung der Grenzkennlinie des Ventilators a bei Auslegungsvolumenstrom

Der Anteil des Auslegungsvolumenstroms von Raum a am Gesamtauslegungsvolumenstrom berechnet sich mit Gl. 6.15.

$$\dot{V}_{Ges} = \dot{V}_a + \dot{V}_{Rest} \quad 6.14 \quad f_{Ges} = \frac{\dot{V}_a^*}{\dot{V}_{Ges}^*} \quad 6.15$$

f_{Ges}	[-]	Anteil des Auslegungsvolumenstroms von Raum a am Gesamtauslegungsvolumenstrom der Lüftungsanlage
\dot{V}_{Ges}^*	[-]	Gesamtauslegungsvolumenstrom der Lüftungsanlage
\dot{V}_a^*	[m³/s]	Auslegungsvolumenstrom Raum a (Axialventilator)
\dot{V}_{Rest}^*	[m³/s]	Auslegungsvolumenstrom restlichen Räume

Durch Einsetzen von Gl. 6.8 (S.114), Gl. 6.11, Gl. 6.13 und Gl. 6.15 in Gl. 6.10 und umstellen nach f_{gem} entsteht Gl. 6.16.

$$f_{gem} \leq \frac{f_{teil_a}^2}{\left(f_{teil_a} \cdot f_{Ges} + f_{teil_{Rest}} \cdot (1 - f_{Ges})\right)^2 - f_{teil_a}^2} \cdot \left(\frac{1}{f_{Grenz}} - 1\right) \quad 6.16$$

Mit dieser Gleichung kann der zulässige Anteil des Druckverlustes des gemeinsam durchströmten Kanals an der Auslegungsdruckerhöhung von Ventilator a für verschiedene Teillastzustände in Abhängigkeit von den Faktoren f_{Grenz} und f_{Ges} bestimmt werden.

Der extremste Teillastzustand ist, wenn Ventilator a auf der untersten Grenze seines Regelbereichs arbeitet ($f_{teil_a} = 0,1$) und die restlichen Ventilatoren sich im Auslegungszustand ($f_{teil_{Rest}} = 1$) befinden. Abbildung 6.5 zeigt für diesen Zustand den zulässigen Anteil des gemeinsam durchströmten Kanals f_{gem} in Abhängigkeit vom Anteil des Auslegungsvolumenstroms von Raum a am Gesamtauslegungsvolumenstrom der Lüftungsanlage f_{Ges} und vom Anteil der Druckerhöhung des Ventilators im Auslegungspunkt an der Druckerhöhung der Grenzkennlinie des Ventilators bei Auslegungsvolumenstrom f_{Grenz} .

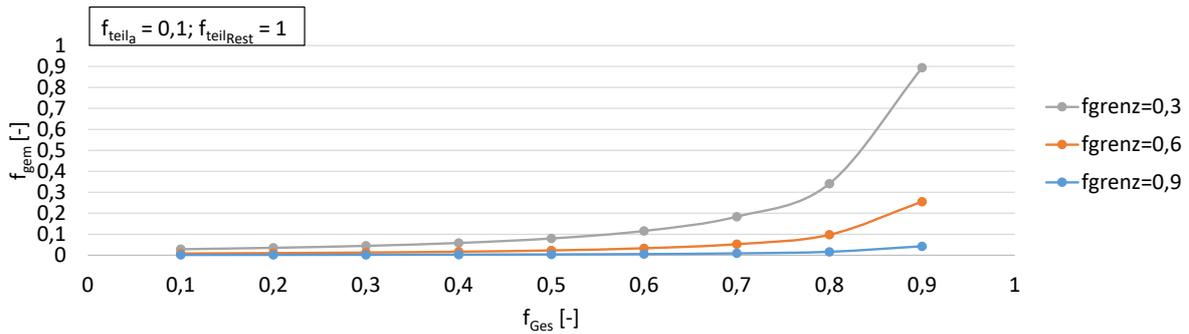


Abbildung 6.5: Zulässiger Anteil des gemeinsam durchströmten Kanals an der Gesamtdruckerhöhung von Ventilator a in Abhängigkeit von den Faktoren f_{Grenz} und f_{Ges}

Prinzipiell wird festgestellt, dass je größer der Anteil des Auslegungsvolumenstroms von Raum a am Gesamtauslegungsvolumenstrom der Lüftungsanlage f_{Ges} und je kleiner der Anteil der Druckerhöhung des Ventilators im Auslegungspunkt an der Druckerhöhung der Grenzkennlinie des Ventilators bei Auslegungsvolumenstrom f_{Grenz} ist, desto größer ist der zulässige Anteil des gemeinsam durchströmten Kanals f_{gem} . Wobei kleine f_{Grenz} in der Praxis auch einen schlechteren Wirkungsgrad bedeuten und sich somit nachteilig auf die Energieeffizienz des dVt-Systems auswirken. Ob ein Axialventilator mit instabilem Kennlinienbereich im dVt-System genutzt werden kann, muss im Einzelfall entschieden werden.

Unabhängig von den Einsatzrandbedingungen für Axialventilatoren haben von der quadratischen Anlagenkennlinie abweichende Betriebspunkte auch Auswirkungen auf die elektrische Leistung der Ventilatoren. Die elektrische Leistung von Ventilatoren kann nach Gl. 4.8 (S.61) bestimmt werden. Die elektrische Gesamtleistung des dVt-Systems ist die Summe der elektrischen Leistungen aller Ventilatoren.

Wird zunächst nur ein einzelner Ventilator betrachtet, steigt die Druckerhöhung bei konstantem Volumenstrom und damit die benötigte elektrische Leistung des Ventilators. Bei sinkender Druckerhöhung und konstantem Volumenstrom fällt die elektrische Ventilatorleistung. Außerdem hat der Wirkungsgrad Einfluss auf die Berechnung der elektrischen Leistung des Ventilators. Ein steigender Wirkungsgrad führt zu geringeren und ein sinkender Wirkungsgrad führt zu höheren elektrischen Ventilatorleistungen. Durch die neuen Betriebspunkte können zwei Fälle eintreten.

- Fall 1: $\dot{V}_{Vent} = \text{konstant}$ und Δp_{Vent} steigt $\rightarrow \eta_{GesVent}$ steigt
- Fall 2: $\dot{V}_{Vent} = \text{konstant}$ und Δp_{Vent} sinkt $\rightarrow \eta_{GesVent}$ sinkt

In beiden Fällen haben die Druckerhöhung und der Wirkungsgrad des Ventilators gegenläufige Auswirkungen auf die elektrische Ventilatorleistung.

Da im dVt-System mehrere Ventilatoren vorhanden sind, müssen zusätzlich die parallel geschalteten Ventilatoren berücksichtigt werden. Wie aus vorangegangenen Betrachtungen hervorgeht, hat der Ventilator im niedrigeren Teillastzustand eine steigende Druckerhöhung bei konstantem Volumenstrom (Fall 1). Gleichzeitig gibt es aber einen parallelen Ventilator im höheren Teillastzustand mit sinkender Druckerhöhung bei konstantem Volumenstrom (Fall 2). Somit verhalten sich auch die Leistungen der einzelnen Ventilatoren für die Gesamtleistung aller Ventilatoren gegenläufig.

Durchgeführte beispielhafte Berechnungen zeigen, dass der Ansatz der Leistungsberechnung mit einer quadratischen Anlagenkennlinie ($f_{gem} = 0$), wie ihn zum Beispiel [Alsen 2017] verwendet, zu guten Ergebnissen der elektrischen Ventilatorleistungen für das Gesamtsystem führt.

6.2 Fehlströmung

Die gegenseitige Beeinflussung der Ventilatoren über den gemeinsam durchströmten Kanal ermöglicht außerdem ungewollte Strömungssituationen wie Fehlströmungen. Die Fehlströmung ist die ungewollte Umkehrung des Luftvolumenstromes (Abbildung 1.2 S.5). Eine solche Umkehrung wird bereits in [Detzer 2009] erwähnt und bedeutet, dass die Abluft eines Raumes einem anderen Raum als Zuluft aufgeprägt wird. Dadurch kann es zu Geruchs- und Schadstoffübertragungen kommen. Diese Problematik ist auf beiden Luftseiten gegeben und muss verhindert werden.

6.2.1 Entstehung

Zum besseren Verständnis wird untersucht, unter welchen Voraussetzungen eine Fehlströmung entsteht. Die Entstehung einer Fehlströmung hängt von herrschenden Druckverhältnissen im Kanalnetz ab. Dieser Aspekt wird im Folgenden untersucht.

Die Druckverhältnisse sind anzuführen, da die Luft den Weg des geringsten Widerstandes nimmt. Ist ein Ventilator nicht in der Lage, die Druckverluste im Kanalnetz zu überwinden, kann keine Luft in den bzw. aus dem Raum gefördert werden und eine Fehlströmung ist möglich. Die Druckverluste sind abhängig von den geförderten Volumenströmen der dezentralen Ventilatoren. Im Folgenden werden die Zustände Auslegungszustand, Teillastzustand und Nichtbetrieb untersucht.

Auslegungszustand

Befinden sich alle Ventilatoren im Auslegungszustand, ist eine Fehlströmung auszuschließen. Die Ventilatoren sollten, aufgrund einer vernünftigen Auswahl, im Auslegungszustand in der Lage sein, den kompletten Druckverlust ihres Stranges (inkl. gemeinsam durchströmter Kanal) zu überwinden und Luft in den bzw. aus dem Raum zu fördern.

Teillastzustand

Die Fehlströmung ist eine Problematik der Teillastzustände, d.h. die aktuell eingestellte Drehzahl ist kleiner als die Auslegungsdrehzahl. Es ist denkbar, dass ein Ventilator auf seiner aktuell eingestellten Teillastdrehzahl den Gesamtdruckverlust (inkl. gemeinsam durchströmten Kanals) nicht mehr überwinden kann und der Volumenstrom null oder negativ wird. Die Druckverläufe der Kanalnetze der Räume a und b stellen sich dann für die Zuluftseite qualitativ wie folgt dar. Die Abbildung 6.6 zeigt die Druckerhöhung von zwei dezentralen Ventilatoren mit einem gemeinsam durchströmten Kanal (3→S).

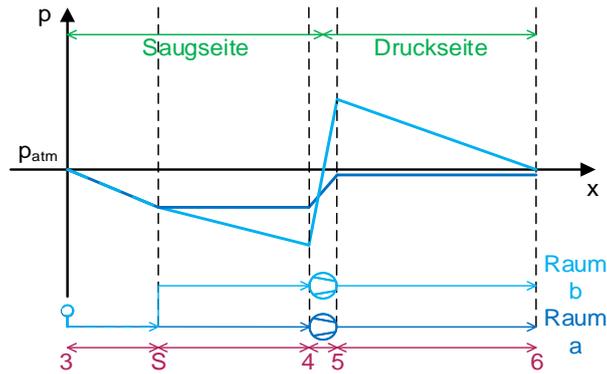


Abbildung 6.6: Qualitativer Druckverlauf von Drucksensor bis Zone a und b bei vorliegender Fehlstromung

Die maximale Druckerhöhung des Ventilators, welcher den Raum a versorgt, ist kleiner als der Druckverlust des gemeinsam durchströmten Kanals (3→5), somit ist auf der Druckseite des Ventilators kein Überdruck vorhanden, um Luft in den Raum zu fördern. Der geförderte Luftvolumenstrom des Ventilators ist negativ. Der Druckverlust des gemeinsam durchströmten Kanals ist abhängig vom geförderten Volumenstrom zu Raum b, wie bereits in Gl.6.4 (S.113) gezeigt wird.

Die Gefahr einer Fehlstromung im Teillastzustand kann mit diesen Kenntnissen bereits baulich minimiert werden, in dem der Auslegungsdruckverlust des gemeinsam durchströmten Kanals möglichst gering gehalten wird. Am besten wäre eine sternförmige Verteilung der Luft auf die einzelnen Zonen. Wird diese Verteilung nahe dem Drucksensor zur Regelung des Zentralventilators platziert, ist quasi kein gemeinsam durchströmter Kanal vorhanden. Dies ist in der Praxis in der Regel nur mit einem erhöhten Platzbedarf für die Kanäle und erhöhten Druckverlusten mittels Verteiler und Sammler (ähnlich wie in der Heizungstechnik) umsetzbar.

Nichtbetrieb

Auch beim Nichtbetrieb von Ventilatoren können Fehlstromungen auftreten. Befindet sich ein Ventilator im Nichtbetrieb, d.h. seine Drehzahl beträgt 0 min^{-1} und ein paralleler Ventilator ist im Auslegungs- oder Teillastzustand, kommt es zu einer Fehlstromung. In diesem Fall stellt der Ventilator im Nichtbetrieb keine Druckerhöhung zur Verfügung und Luft wird aus dessen Raum angesaugt. Dies kann bei unterschiedlichen Nutzungszeiten der Räume eintreten.

Diese Kenntnisse werden genutzt, um Detektions- und Vermeidungsstrategien zu erarbeiten.

6.2.2 Detektion und Vermeidung

Eine Fehlstromung kann durch Absperren des entsprechenden Kanalabschnittes oder durch Anpassen des Betriebspunktes des Ventilators aktiv vermieden werden, wobei ein Absperren nur sinnvoll ist, wenn der Ventilator im Nichtbetrieb ist. Unter der Berücksichtigung der Erfahrungen aus [Leitzinger 2011] mit Geruchsübertragung bei Verwendung von mehreren Ventilatoren im Kanalnetz ist auf die Verwendung von dichtschießenden Klappen zur Abspernung von Strängen zu achten.

Volumenstrommessung

Bei allen anlagentechnischen Umsetzungen außer der Regelung 1b entstehen die Stellsignale der dezentralen Ventilatoren aus dem Vergleich eines Sollvolumenstromes mit einem Istvolumenstrom. Hier ist eine Fehlstromung in den Teillastzuständen auszuschließen. Die vorhandene Volumenstrommes-

sung wird eine Fehlströmung automatisch detektieren. Verändert Ventilator b im Netz seinen geförderten Volumenstrom, verändert sich auch der Druckverlust im gemeinsam durchströmten Kanal. Da diese Veränderung aber eine Abweichung vom geforderten Sollvolumenstrom des Ventilators a bedeutet, reagiert die Regelung von Ventilator a mit einer Anpassung des Stellsignales, bis der geforderte Sollvolumenstrom wieder erreicht ist. Werden entsprechende Sollvolumenströme vorgegeben, kann es bei dieser Art der Regelung in den Teillastzuständen also nicht zu einer Fehlströmung kommen, da diese automatisch detektiert und durch einen Reglereingriff verhindert wird.

Verzicht auf Volumenstrommessung (Regelung 1b)

Bei Verzicht auf Volumenstrommessung zur Regelung (Regelung 1b) ist dies nicht der Fall und es kann zu Fehlströmungen kommen. Es ist zwingend notwendig eine Fehlströmungsdetektion mit entsprechender Regelung zur Vermeidung zu verwenden. Die vorhandene Regelung ist nicht zwingend in der Lage eine vorhandene Fehlströmung zu detektieren und auszuregeln. Der Zuluftventilator hat die Aufgabe der CO₂-Begrenzung und wird direkt nach der CO₂-Konzentration im Raum geregelt (Abbildung 5.7 S.77). Ob eine Fehlströmung ohne weitere Maßnahmen erkannt wird, hängt von der Auswirkung der Fehlströmung auf die CO₂-Konzentration der Raumluft ab. Eine Fehlströmung auf der Zuluftseite führt Raumluft mit aktueller CO₂-Konzentration ab. Hat die in den Raum nachströmende Luft (Abluftnetz, Undichtigkeiten in der Gebäudehülle oder im Inneren des Gebäudes) eine geringere CO₂-Konzentration als der CO₂-Grenzwert der Raumluft, so wird sich die CO₂-Konzentration der Raumluft verringern und die Fehlströmung von der Regelung nicht bemerkt. Ist die CO₂-Konzentration der nachströmenden Luft jedoch größer als die CO₂-Konzentration der Raumluft, wird die Regelung eine Überschreitung des CO₂-Grenzwertes feststellen und die Drehzahl anpassen. Dieser Vorgang kann je nach Position des CO₂-Messfühlers im Raum und der Durchmischung der Raumluft einige Zeit in Anspruch nehmen, es können dann problematische Geruchsbelastungen auftreten.

Der Abluftventilator wird bei Verzicht auf Volumenstrommessung (Regelung 1b) über den Abgleich seiner Druckerhöhung mit der des Zuluftventilators unter Verwendung des Symmetriefaktors geregelt (Abbildung 5.7 S.77). Liegt eine Fehlströmung auf der Abluftseite vor, so kann diese nicht direkt von der Regelung des Abluftventilators festgestellt werden. Ist die CO₂-Konzentration der durch das Abluftkanalnetz zugeführten Fehlluft größer als die des Raumes, so wird der Zuluftventilator bei Überschreitung des CO₂-Grenzwertes seine Drehzahl und damit seinen Volumenstrom und seine Druckerhöhung erhöhen, bis keine Grenzwertüberschreitung mehr vorhanden ist. Auch hier ist mit entsprechenden Zeitverzögerungen zu rechnen. Die Betriebspunktanpassung des Zuluftventilators bewirkt, dass auch der Abluftventilator seinen Betriebspunkt verändert und damit einer Fehlströmung entgegenwirkt oder sie verhindert. Die CO₂-Konzentration der nachströmenden Luft hängt in diesem Fall von der CO₂-Konzentration der über dasselbe Abluftnetz angebotenen benachbarten Räume ab. Wie bereits beschrieben, wird eine Fehlströmung bei geringen CO₂-Konzentrationen der Fehlluft nicht automatisch ausgeregelt.

Die Entstehung einer Fehlströmung auf der Abluftseite hängt allerdings auch von den im Symmetriefaktor nicht berücksichtigten Druckverhältnissen im Raum ab. Herrscht dort ein Unterdruck, so könnte dieser so groß sein, dass die eingestellte Druckerhöhung des Abluftventilators nicht ausreicht, um Luft aus dem Raum zu fördern. Luft strömt über das Abluftkanalnetz ein. Ein Überdruck unterstützt den Abluftventilator und verringert somit die Gefahr einer Fehlströmung auf der Abluftseite.

Es wird deutlich, dass die Entstehung einer Fehlströmung im Teillastzustand bei Verzicht auf Volumenstrommessung (Regelung 1b) von mehreren Faktoren abhängt. Diese sind:

- der CO₂-Grenzwert der Raumluft,
- die aktuelle CO₂-Konzentration der Raumluft,
- die CO₂-Konzentration der Fehlluft (benachbarte Räume),
- die Undichtigkeit der Gebäudehülle,
- der Druck auf der Fassade,
- die aktuelle Druckerhöhung des Zuluftventilators und
- der Druckverlust des gemeinsam durchströmten Kanals.

Zur Detektion einer Fehlströmung in den Teillastzuständen eignen sich mehrere Varianten. So könnte über eine Prandtl-Sonde die aktuelle Strömungsrichtung im Kanal festgestellt werden. Außerdem ist es möglich, über eine Volumenstrommessung das Auftreten einer Fehlströmung zu erkennen, dann könnte die Volumenstrommessung aber auch zur Regelung der Ventilatoren herangezogen werden.

Am RLT-Versuchsstand (Kapitel 3.2 S.43) des Fachgebietes TGA der Universität Kassel wird eine weitere Fehlströmungsdetektion entwickelt und untersucht. Es werden die Druckverhältnisse am Ventilator überprüft. Fördert der Zuluftventilator Luft in die vorgesehene Richtung, ist ein Überdruck gegen den Raum auf der Druckseite gegeben. Beim Abluftventilator ist im Normalzustand ein Unterdruck gegen den Raum auf der Saugseite vorhanden. Kehren sich diese Druckverhältnisse um, so strömt Luft in die entsprechende Gegenrichtung und eine Fehlströmung ist vorhanden.

Zur Überprüfung dieses Ansatzes wird der RLT-Versuchsstand entsprechend eingestellt. Die Untersuchung findet auf der Zuluftseite statt. Hier wird einer der drei Stränge abgesperrt, sodass Luft nur über die zwei verbleibenden Stränge gefördert wird. In Abbildung 6.7 ist das Strangschema zu erkennen.

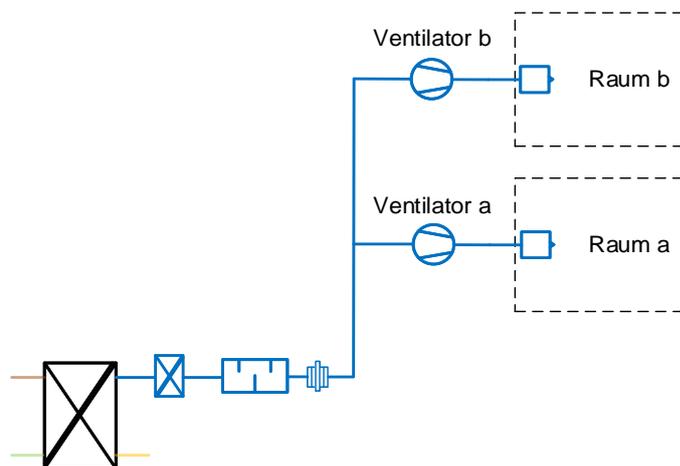


Abbildung 6.7: Strangschema zur Untersuchung der Fehlströmungsdetektion

In dem Strang zu Raum a soll die Fehlströmung erzeugt werden. Der erzeugende Ventilator ist der des Raumes b. Der Ventilator a wird in einem Teillastzustand mit einem konstanten Stellsignal versorgt und somit auf einer konstanten Drehzahl gehalten, je nach Druckverlusten im Netz variiert somit der geförderte Volumenstrom des Ventilators. Die Druckverluste im Netz werden maßgeblich vom Druckverlust des gemeinsam durchströmten Kanals geprägt. Deshalb wird der geförderte Volumenstrom von Ventilator b wie in Abbildung 6.8 kontinuierlich variiert.

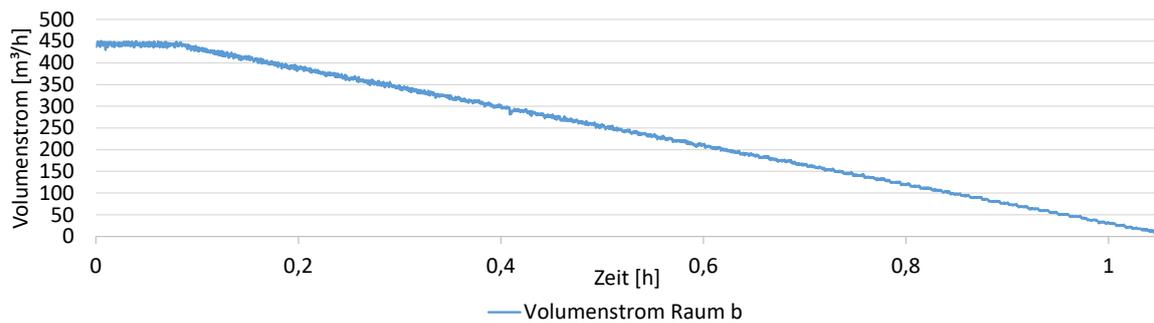


Abbildung 6.8: Geförderter Volumenstrom des Ventilators b zur Fehlströmungserzeugung

Wie in der Abbildung zu sehen, wird der geförderte Volumenstrom nach einer kurzen Einschwingphase von ca. 450 m³/h innerhalb ca. 1 h auf 0 m³/h verringert. Außerdem erfolgt die Entkopplung des Zentralventilators von der Anlage, indem der Wärmeübertrager zur Umgebung geöffnet wird (Abbildung 6.9).



Abbildung 6.9: Gegen Umgebung geöffnete WRG des RLT-Versuchstandes

Dies verlängert den gemeinsam durchströmten Kanal und erhöht dessen Druckverlust. Der Druckverlust des gemeinsam durchströmten Kanals erhöht sich so für das Experiment um die Druckverluste des kombinierten Heiz- und Kühlregisters und des Schalldämpfers (Abbildung 6.7.). Über die vorhandene Irisblende wird der Druckverlust zusätzlich erhöht. Mit diesen Maßnahmen reicht der Druckverlust im gemeinsam durchströmten Kanal aus, um eine Fehlströmung zu erzeugen.

Während dieses Messablaufes werden die beiden Vergleichskriterien, Staudruck an der Prandtl-Sonde und der Volumenstrom des Raumes a, aufgezeichnet. Anhand dieser beiden Messreihen soll festgestellt werden, wann eine Fehlströmung auftritt. Dieser Punkt wird dann mit dem ebenfalls erfassten, beschriebenen Kriterium des Drucks auf der Druckseite des Ventilators a verglichen. In Abbildung 6.10 wird dieser Vergleich gezeigt. Dabei wird im oberen Diagramm ein Überblick über die Messdaten Druck an der Druckseite von Ventilator a, Staudruck an der Prandtl-Sonde und Volumenstrom des Raumes a gegeben. Das untere Diagramm zeigt die Trendlinien derselben Messgrößen im Umschlaggebiet. Die gemessenen Drücke bzw. Volumenströme sind in dieser Abbildung über den geförderten Volumenstrom des fehlströmungserzeugenden Ventilators b aufgetragen.

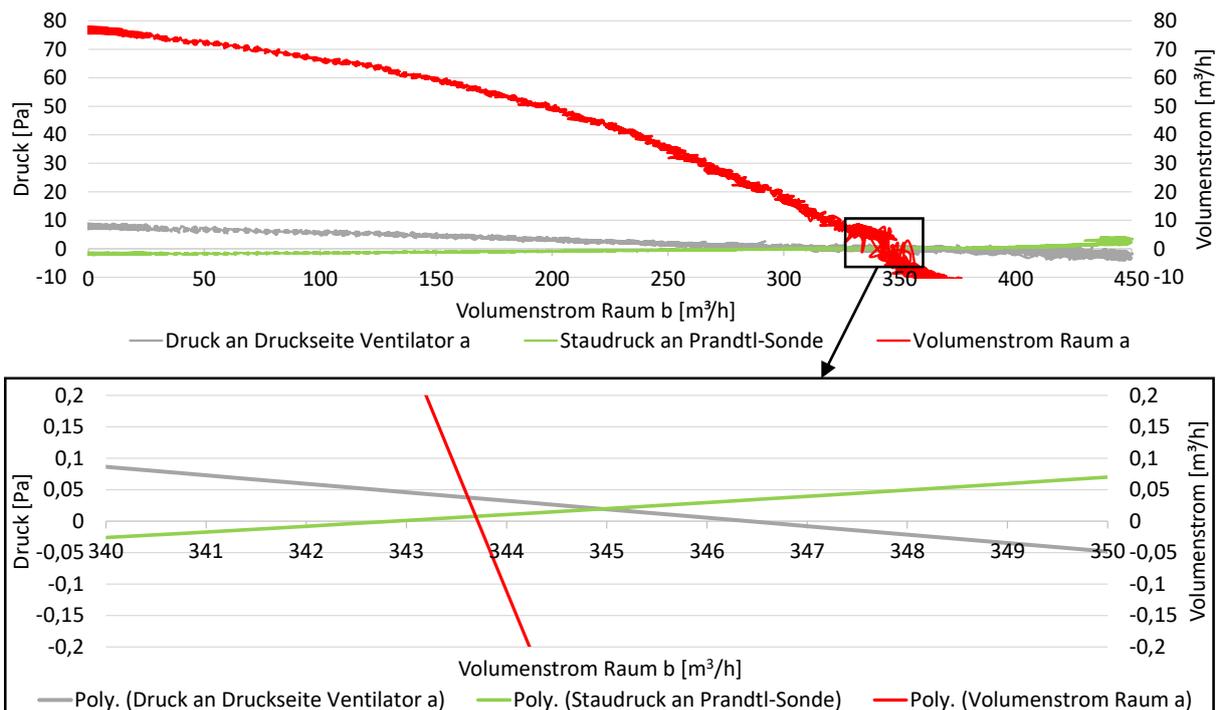


Abbildung 6.10: Gemessene Kriterien einer Fehlströmung

Die rote Kurve zeigt den geförderten Volumenstrom des Ventilators a. Dieser fällt mit zunehmendem Volumenstrom von Ventilator b aufgrund der steigenden Druckverluste im gemeinsam durchströmten Kanal. Ab einem Volumenstrom des Ventilators b von 344 m³/h stellen sich auch negative Volumenströme ein. Ein negativer Volumenstrom bedeutet, dass eine Fehlströmung vorhanden ist. Der Staudruck der Prandtl-Sonde ist in Grün dargestellt. Die Prandtl-Sonde ist während des Versuchs entgegen der konventionellen Strömungsrichtung in die Strömung eingebracht, d.h. wird ein positiver Druck gemessen, ist eine Fehlströmung vorhanden. Die Prandtl-Sonde zeigt die Fehlströmung ab einem ähnlichen Punkt wie auch die Volumenstrommessung (rote Kurve) an. Auch der Druck gegen den Raum auf der Druckseite des Ventilators zeigt ab einem Volumenstrom des Ventilators b von 346 m³/h das Entstehen einer Fehlströmung. Die Abweichungen zwischen den Punkten der Entstehung einer Fehlströmung der verschiedenen Methoden zur Detektion können mit den Messfehlern des RLT-Versuchsstandes (Kapitel 3.2.2 S.45) erklärt werden. Des Weiteren ist der Verlauf der Kurve des Druckes an der Druckseite des Ventilators relativ flach. Somit ergibt sich ein größeres Umschlaggebiet zwischen Überdruck und Unterdruck. Dies ist auf die relativ nahe Positionierung des Ventilators zum Auslass zurückzuführen. Sind die Strömungswiderstände nach dem Ventilator groß, lässt sich die Fehlströmungsdetektion durch das Messen des Druckes auf der Druckseite des Ventilators gegen den Raum umsetzen. Der minimale Druckverlust zwischen Ventilator und Raum bestimmt den einzusetzenden Drucksensor. Je höher aufgelöst und genauer die Messung, desto geringer sind die notwendigen Druckverluste, um eine Fehlströmung eindeutig zu identifizieren.

Es konnte gezeigt werden, dass die Detektion einer Fehlströmung durch Überprüfung der Druckverhältnisse auf Saug- bzw. Druckseite des Ventilators unter Laborbedingungen möglich ist. Auch die Anwendung dieser Detektion in den Simulationen zeigt ein zufriedenstellendes Ergebnis (Kapitel 5.1.2.1 S.81).

7 Zusammenfassung, Fazit und Ausblick

Aus der Neuartigkeit des dVt-Systems und den bisher nur begrenzt vergleichbaren Umsetzungen ergibt sich die Hauptzielsetzung dieser Arbeit: Die Überprüfung, ob mit dem dVt-System eine bedarfsgerechte Belüftung für Nichtwohngebäude realisiert werden kann.

Dieses Ziel wird durch die Beantwortung von drei Forschungsfragen erfüllt. Diese sind:

- Wie ist das dVt-System im Vergleich zum konventionellen VSR-System zu bewerten?
- Wie kann das dVt-System anlagentechnisch umgesetzt werden?
- Welche strömungstechnischen Besonderheiten können beim Einsatz von mehreren Ventilatoren im Kanalnetz auftreten?

Diese drei Forschungsfragen werden in jeweils einem Kapitel getrennt voneinander beantwortet. Davor werden die anlagentechnischen Umsetzungen des dVt-Systems und die drei zur Untersuchung genutzten Werkzeuge vorgestellt. Als Werkzeuge werden Simulationsrechnungen, der RLT-Versuchsstand und der Anwendungstest verwendet, um theoretische und empirische Analysen durchzuführen.

Die übergeordnete vergleichende Betrachtung von dVt-System und konventionellen VSR-System hinsichtlich Aufbau und Funktionsweise ergibt, dass beide Systeme der bedarfsgerechten Belüftung von Gebäuden dienen und aus einem Zentralgerät, dem Kanalnetz und den dezentralen Stellgliedern bestehen. Der Hauptunterschied liegt in der Bereitstellung des bedarfsgerechten Volumenstroms. Die Volumenstromregler im VSR-System drosseln eine durch den Zentralventilator bereitgestellte Druckerhöhung gezielt ab. Im dVt-System wird diese Drosselung vermieden, die dezentralen Ventilatoren erzeugen die erforderliche Druckerhöhung zur bedarfsgerechten Luftförderung. Auch im Detail sind zwischen den Systemen prinzipielle Unterschiede vorhanden. So können im dVt-System gegebenenfalls kleinere Zentralventilatoren eingesetzt werden und die Regelung des Vordruckes ist eindeutig. Ein weiterer Unterschied entsteht durch die neuen Drucksituationen im Kanalnetz des dVt-Systems für die Bewertung von Leckagevolumenströmen. Das dVt-System hat größere Anforderungen an die Dichtheit des Kanalnetzes unter hygienischen Gesichtspunkten. In Bezug auf den energetischen Aspekt weist das dVt-System aufgrund geringerer Kanaldrücke Vorteile auf. Die Stellglieder dezentraler Ventilator und Volumenstromregler unterscheiden sich in den Schallemissionen. Beim VSR-System sind Volumenströme im unteren Regelbereich und beim dVt-System im oberen Regelbereich schallkritisch. In weiteren Punkten verhalten sich die dezentralen Stellglieder ähnlich.

Zur Erstellung der anlagentechnischen Umsetzungen des dVt-Systems werden aufbauend auf einer Basisvariante Komponentenreduzierungen vorgenommen. Dadurch entstehen insgesamt sechs anlagentechnische Umsetzungen mit unterschiedlichem Komponentenaufwand und unterschiedlichen Regelungen. Es handelt sich dabei um vier Einzelraumversorgungen und zwei Raumgruppenversorgungen. Diese anlagentechnischen Umsetzungen sind ausreichend, um Lüftungsanlagen verschiedener Gebäude zusammensetzen und werden mithilfe von analytischen Betrachtungen und Simulationsrechnungen untersucht. Für die Simulationsrechnungen werden Simulationsmodelle verwendet und entwickelt, welche auf der objektorientierten Modelliersprache Modelica basieren und mit der Simulationsumgebung Dymola simuliert werden. Über die Simulationen werden die Regelaufgaben der Ventilatoren in den anlagentechnischen Umsetzungen für verschiedene Kanalnetze, Gebäudehüllen und Belegungszustände überprüft. Aus den analytischen Betrachtungen und den Simulationsergebnissen werden die Einsatzrandbedingungen für die anlagentechnischen Umsetzungen abgeleitet. Mit vier der

sechs anlagentechnischen Umsetzungen ist ein dVt-System darstellbar. Bei der vollständigen Einzelraumregelung verfügt jeder Raum über einen dezentralen Zu- und einen dezentralen Abluftventilator sowie einen CO₂-Sensor. Die dezentralen Ventilatoren werden mithilfe von Volumenstrommessungen geregelt. Mit dieser Anlagentechnik ist ein robustes Betriebsverhalten erzielbar. Die Einzelraumregelung mit Überströmung entspricht zuluftseitig der vollständigen Einzelraumregelung und reduziert die Anzahl der dezentralen Abluftventilatoren und Volumenstrommessungen, sodass der einzelne Abluftventilator den Gesamtvolumenstrom aller Zuluftventilatoren abführen muss. Diese anlagentechnische Umsetzung wird für Räume gleicher Nutzung empfohlen, um Disbalancen zwischen Zu- und Abluftvolumenstrom der einzelnen Räume zu vermeiden. Die restlichen beiden Einzelraumversorgungen sind in dieser Form nicht für die Umsetzung eines dVt-Systems geeignet. Die beiden erstellten Regelungen für die Raumgruppenversorgungen sind die Schlechtraumregelung und die Mischkonzentrationsregelung, mit ihnen werden Überlüftungen im Vergleich zu einer Konstant-Volumenstromregelung reduziert. Beide verfügen über einen dezentralen Zu- und einen dezentralen Abluftventilator je Raumgruppe, welche über Volumenstrommessungen geregelt werden. Sie unterscheiden sich in Anzahl und Position der CO₂-Sensoren. Die Schlechtraumregelung erfasst die CO₂-Konzentration in jedem Raum und stellt den Gesamtvolumenstrom nach dem größten Bedarf eines Raumes ein. Je ähnlicher die Belegungszustände der einzelnen Räume, desto größer sind die Energieeinsparungen der Schlechtraumregelung gegenüber einer Konstant-Volumenstromregelung. Bei der Mischkonzentrationsregelung wird die gemischte CO₂-Konzentration im gemeinsamen Abluftkanal der Raumgruppe gemessen. Der Grenzwert dieser CO₂-Mischkonzentration muss gewährleisten, dass bei jeder Belegung der Raumgruppe die CO₂-Grenzwerte in den Einzelräumen nicht überschritten werden. Dies führt dazu, dass im Mittel keine Energieeinsparungen gegenüber der Konstant-Volumenstromregelung vorhanden sind. Damit stellt die Mischkonzentrationsregelung für die Praxis keine wirtschaftliche Alternative zur Konstant-Volumenstromregelung dar.

Die Analyse der strömungstechnischen Besonderheiten im dVt-System erfolgt theoretisch und mittels Messungen am RLT-Versuchsstand. Die Ergebnisse zeigen, dass durch den Einsatz von mehreren Ventilatoren im Kanalnetz und deren gegenseitiger Beeinflussung über den gemeinsam durchströmten Kanal strömungstechnische Besonderheiten entstehen. Zum einen ergeben sich von einer rein quadratischen Anlagenkennlinie abweichende Betriebspunkte. Daraus resultieren Einsatzrandbedingungen für Axialventilatoren mit instabilen Kennlinienbereichen. Zum anderen können Fehlströmungen entstehen. Eine Fehlströmung ist eine ungewollte Umkehrung der Luftströmung. Die Entstehung ist abhängig von den Druckverlusten des gemeinsam durchströmten Kanals. Bei allen Regelungen der dezentralen Ventilatoren, welche einen Abgleich von Ist- mit Sollvolumenströmen durchführen, werden Fehlströmung automatisch verhindert. Wird auf eine Volumenstrommessung zur Regelung der dezentralen Ventilatoren verzichtet, muss eine andere Fehlströmungsvermeidungsstrategie vorgesehen werden. Diese kann zum Beispiel die Überprüfung der Druckverhältnisse auf Druck- bzw. Saugseite der dezentralen Ventilatoren und die Anpassung des Betriebspunktes in kritischen Situationen sein. Bei Nichtbetrieb von Ventilatoren sollten Klappen vorhanden sein, welche den entsprechenden Kanalabschnitt absperren.

Fazit

Das dVt-System ist für die bedarfsgerechte Belüftung von Nichtwohngebäuden geeignet. Es bildet eine praxistaugliche Alternative zum VSR-System und trägt zur Effizienzsteigerung von mechanischen Lüftungsanlagen bei. Die unterschiedlichen anlagentechnischen Umsetzungen ermöglichen die Anwendung des dVt-Systems auf verschiedene Gebäudekategorien. Das dVt-System kann in eine bestehende Lüftungsanlage integriert werden. Prinzipiell zu beachten ist, dass aufgrund der Anzahl und Position der dezentralen Ventilatoren im Kanalnetz die Anlagenkennlinien vom rein quadratischen Verlauf abweichen und sich neue Druckbereiche (Vergleich VSR-System) im Kanalnetz ausprägen. Unter Beachtung dieser Punkte sind keine Probleme beim Einsatz des dVt-Systems zu erwarten.

Ausblick

Das dVt-System ist bereits mit heutigen Standardkomponenten umsetzbar. Zukünftig ist es wünschenswert, dass das dVt-System eine breite Anwendung in der Lüftungstechnik findet. Grund dafür sind die energetischen Vorteile des dVt-Systems gegenüber dem VSR-System. Da sich diese Arbeit ausschließlich mit der Regelung der Luftqualität beschäftigt, sollten zukünftig auch die Regelung von Raumlufttemperatur oder Raumluftfeuchte mittels dVt-System untersucht werden. Für die zukünftigen Forschungstätigkeiten sollten an Demonstrationsgebäuden weitere Planungs- und Betriebserfahrungen gesammelt werden. Auch am Markt erhältliche, auf das dVt-System abgestimmte Komponenten sind für die Umsetzung des dVt-Konzeptes vorteilhaft. Vor allem die Entwicklung von Ventilatoren mit Betriebspunkten bei kleinen Druckerhöhungen, großen Volumenströmen und entsprechend guten Wirkungsgraden ist wünschenswert.

8 Literaturverzeichnis

Alsen 2017

ALSEN, Niklas: *Energetische und wirtschaftliche Bewertung von dezentralen Ventilatoren in zentralen raumluftechnischen Anlagen: Dissertation*: Universität Kassel, Fachgebiet Technische Gebäudeausrüstung, 2017

Alsen, Klimmt, Knissel 2016

ALSEN, Niklas ; KLIMMT, Tobias ; KNISSEL, Jens: *Dezentrale Ventilatoren in zentralen raumluftechnischen Anlagen - Messtechnische Validierung berechneter Ventilatorleistung*: UNIVERSITÄT KASSEL, FACHGEBIET TECHNISCHE GEBÄUDEAUSRÜSTUNG: cci Dialog, 2016. URL https://cci-dialog.de/wissensportal/technikwissen/raumluftechnik/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

Baumgartner u. a. 1989

BAUMGARTNER, Thomas ; BLEY, Herbert ; BRÜHWILER, Daniel ; HARTMANN, Peter ; MOOR, Hans ; RAAT-SCHEN, Willigert ; STEINEMANN, Urs ; TREPTE, Lutz: *Luftaustausch in Gebäuden: Handbuch für praktische Anwendung von Berechnungsmethoden*, 1989

BMUB 2015

BMUB: *Klimaschutz in Zahlen: Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik*. 1. Aufl. Berlin, 2015

BMWi 2014

BMWi: *Sanierungsbedarf im Gebäudebestand: Ein Beitrag zur Energieeffizienzstrategie Gebäude*. Berlin, 2014

Bommes 2003

BOMMES, Leonhard (Hrsg.): *Ventilatoren*. 2. Aufl. Essen: Vulkan-Verl, 2003. – ISBN 3802732006

Bundesgesetzblatt 2007

BUNDESGESETZBLATT: *Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden* (in Kraft getr. am 2007) 2007 (2007)

Detzer 2009

DETZER, Rüdiger: *Klimaanlage, insbesondere für Schiffe*. Imtech Deutschland GmbH & Co. KG. Anmelde-nr. DE200710049333, Deutschland. 23.04.2009. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE102007049333 A1

Dr.-Ing. Felgner, Liu, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frey, G. Juni 2011

DR.-ING. FELGNER, F. ; LIU, L. M.Sc. ; Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frey, G.: *Vergleich numerischer Löser zur Simulation steifer und hybrider Systeme*. Saarbrücken, Juni 2011

drexel und weiss energieeffiziente haustechniksysteme gmbh 2010

drexel und weiss energieeffiziente haustechniksysteme gmbh: *900.5010_02 EA aerosilent micro* (2010)

drexel und weiss energieeffiziente haustechniksysteme gmbh 2011

drexel und weiss energieeffiziente haustechniksysteme gmbh: *900.82670_00 v-box* (2011)

Eck 2003

ECK, Bruno: *Ventilatoren: Entwurf und Betrieb der Radial-, Axial- und Querstromventilatoren*. 6. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer, 2003 (Klassiker der Technik). – 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 18599-10

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 18599-2

VORNORM, DIN V 18599-2: *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen*. 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

Europäische Union 2011

EUROPÄISCHE UNION: *VERORDNUNG (EU) Nr. 327/2011 DER KOMMISSION vom 30. März 2011 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Ventilatoren, die durch Motoren mit einer elektrischen Eingangsleistung zwischen 125 W und 500 kW angetrieben werden* (in Kraft getr. am 2011) 2011 (2011)

Feist 2000

FEIST, Wolfgang (Hrsg.): *4. Passivhaus-Tagung: [mit Fachausstellung Kassel, 10./11. März 2000]*. 1. Aufl.: [s.n.], 2000

Feist 2007

FEIST, Wolfgang (Hrsg.): *Protokollband Nr. 17: Dimensionierung von Lüftungsanlagen in Passivhäusern*. Arbeitskreis Kostengünstige Passivhäuser - Phase II. 6. Auflage. Darmstadt, 2007

Giesen 2017

GIESEN, Max: *Energetische Bewertung von dezentralen Ventilatoren in Raumlufttechnischen Anlagen am Beispiel des ZUB Gebäudes*. Kassel: Masterarbeit an der Universität Kassel, 2017

Harbusch 2016

HARBUSCH, Tim: *Untersuchung des Verhaltens von Komponenten raumlufttechnischer Anlagen im Teillastbetrieb*. Kassel: Masterarbeit an der Universität Kassel, 2016

Hauser 2014

HAUSER, Gerd: *System zur Belüftung eines Gebäudes*. Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung. Anmeldenr. DE201210220391, Deutschland. 08.05.2014. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE102012220391 A1

Hörner, Schmidt 2011

HÖRNER, Berndt (Hrsg.); SCHMIDT, Manfred (Hrsg.): *Handbuch der Klimatechnik: Band 2: Anwendungen*. 5. Aufl. Berlin: VDE Verlag GmbH, 2011. – ISBN 9783800732418

Ihle, Bader, Golla c 2008

IHLE, Claus ; BADER, Rolf ; GOLLA, Manfred: *Tabellenbuch Sanitär, Heizung, Klima, Lüftung Anlagentechnik SHK ; Ausbildung und Praxis ; Netzmeister*. 7. Aufl. Troisdorf: Bildungsverl. EINS, c 2008. – ISBN 9783441921622

Kah u. a. 2010

KAH, Oliver ; SCHULZ, Tanja ; WINKEL, Susanne ; SCHNEIDERS, Jürgen ; BASTIAN, Zeno ; KAUFMANN, Berthold: *Leitfaden für energieeffiziente Bildungsgebäude*. Darmstadt, 2010

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

Kaufmann u. a. 2004

KAUFMANN, Berthold ; FEIST, Wolfgang ; PFLUGER, Rainer ; JOHN, Markus ; NAGEL, Matthias: *Passivhäuser erfolgreich planen und bauen: Ein Leitfaden zur Qualitätssicherung*. Aachen, 2004

Klimmt, Alsen, Knissel 2017

KLIMMT, Tobias ; ALSEN, Niklas ; KNISSEL, Jens: *Einsatz von dezentralen Ventilatoren zur Luftförderung in zentralen RLT-Anlagen: Anlagentechnische Umsetzung und Energieeinsparung*. In: *BTGA-Almanach* (2017), S. 62–66

Kober, Müller 2013

KOBER, Raymond (Hrsg.); MÜLLER, Harald (Hrsg.): *Luft- und Raumklimotechnik ganzheitlich geplant: Behaglichkeit und höchste Energieeffizienz*. 1. Aufl. Karlsruhe: cci Dialog, 2013 (CCI-Buch). – ISBN 9783922420293

Kohn 2005

KOHN, Wolfgang: *Statistik Datenanalyse und Wahrscheinlichkeitsrechnung*. Berlin [u.a.]: Springer, 2005 (Statistik und ihre Anwendungen). – ISBN 3540216774

Krimmling 2014

KRIMMLING, Jörn (Hrsg.): *Atlas Gebäudetechnik Grundlagen, Konstruktionen, Details ; mit 174 Tabellen*. 2. Aufl. Köln: Müller, 2014. – ISBN 978-3-481-02970-8

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

LTG Aktiengesellschaft 2015

LTG Aktiengesellschaft: *Planungsleitfaden LTG Luftverteilung: Volumenstromregelung in Luftleitungen*. Stuttgart: LTG Aktiengesellschaft, 2015. URL https://www.ltg.de/app/uploads/2016/03/11_Volumenstromregelung_PlanLeit_deu_LTG.pdf

DIN EN 15242

NORM, DIN EN 15242: *Lüftung von Gebäuden - Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Luftvolumenströme in Gebäuden einschließlich Infiltration*. Berlin: Beuth Verlag, September 2007

DIN EN 12237

NORM, DIN EN 12237: *Lüftung von Gebäuden - Luftleitungen - Festigkeit und Dichtheit von Luftleitungen mit rundem Querschnitt aus Blech*. Berlin: Beuth Verlag, Juli 2003

DIN EN 16211

NORM, DIN EN 16211: *Lüftung von Gebäuden - Luftvolumenstrommessung in Lüftungssystemen - Verfahren*. Berlin: Beuth Verlag, September 2015

DIN 12599

NORM, DIN 12599: *Lüftung von Gebäuden – Prüf- und Messverfahren für die Übergabe raumlufttechnischer Anlagen*. Berlin: Beuth Verlag, Januar 2011

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

Martin Otter 2016

Martin Otter: *Modelica.Blocks*: MODELICA ASSOCIATION AND DLR, 2016. URL http://doc.modelica.org/help/Modelica_Blocks.html#Modelica.Blocks – Überprüfungsdatum 2017-09-21

VDI 4300-7

VDI-RICHTLINIE, VDI 4300-7: *Messen von Innenraumlufiverunreinigungen Bestimmung der Luftwechselzahl in Innenräumen*. Düsseldorf: VDI-Verlag, März 2007

Modelica Association 2005

Modelica Association: *Modelica.Media.UsersGuide*: MODELICA ASSOCIATION, 2005. URL http://doc.modelica.org/help/Modelica_Media_UsersGuide.html#Modelica.Media.UsersGuide – Überprüfungsdatum 2017-09-21

Modelica Association 2009

Modelica Association: *Modelica.Fluid.UsersGuide*, 2009. URL http://doc.modelica.org/help/Modelica_Fluid_UsersGuide.html#Modelica.Fluid.UsersGuide.ReleaseNotes – Überprüfungsdatum 2017-09-21

Modelica Association 2016a

Modelica Association: *Modelica.Fluid.Fittings.GenericResistances.VolumeFlowRate*, 2016. URL <http://doc.modelica.org/om/Modelica.Fluid.Fittings.GenericResistances.VolumeFlowRate.html> – Überprüfungsdatum 2017-09-21

Modelica Association 2016b

Modelica Association: *Modelica.Media.Air.SimpleAir*: MODELICA ASSOCIATION, 2016. URL http://doc.modelica.org/help/Modelica_Media_Air_SimpleAir.html#Modelica.Media.Air.SimpleAir – Überprüfungsdatum 2017-09-21

Pfluger u. a. 2013

PFLUGER, Rainer ; SIBILLE, Elisabeth ; ROJAS-KOPEINIG, Gabriel ; ROTHBACHER, Mattias ; MALZER, Harald Konrad: *Komfort- und kostenoptimierte Luftführungskonzepte für energieeffiziente Wohnbauten "Doppelnutzen": Vorteile und Grenzen der erweiterten Kaskadenlüftung*. Innsbruck, 2013

Pistohl 2009

PISTOHL, Wolfram: *Heizung, Lüftung, Beleuchtung, Energiesparen*. 7. Aufl. Düsseldorf: Werner, 2009. – ISBN 978-3-8041-4685-3

VDI 3804

RICHTLINIE, VDI 3804: *Raumlufttechnik Bürogebäude (VDI-Lüftungsregeln)*. Düsseldorf: VDI-Verlag, März 2009

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

Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe 2016

Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe: *Mak- und BAT-Werte-Liste 2016: Maximale Arbeitsplatzkonzentrationen und Biologische Arbeitsstofftoleranzwerte*. Weinheim: Wiley Vch Verlag GmbH & Co. KGaA, 2016. – ISBN 9783527342181

DIN 4108-7, DIN 4108-7: *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden -Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden - Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie -beispiele*. Berlin: Beuth Verlag, Januar 2011

9 Anhang

9.1 Ergebnisse der Validierung des Druckverlustmodells

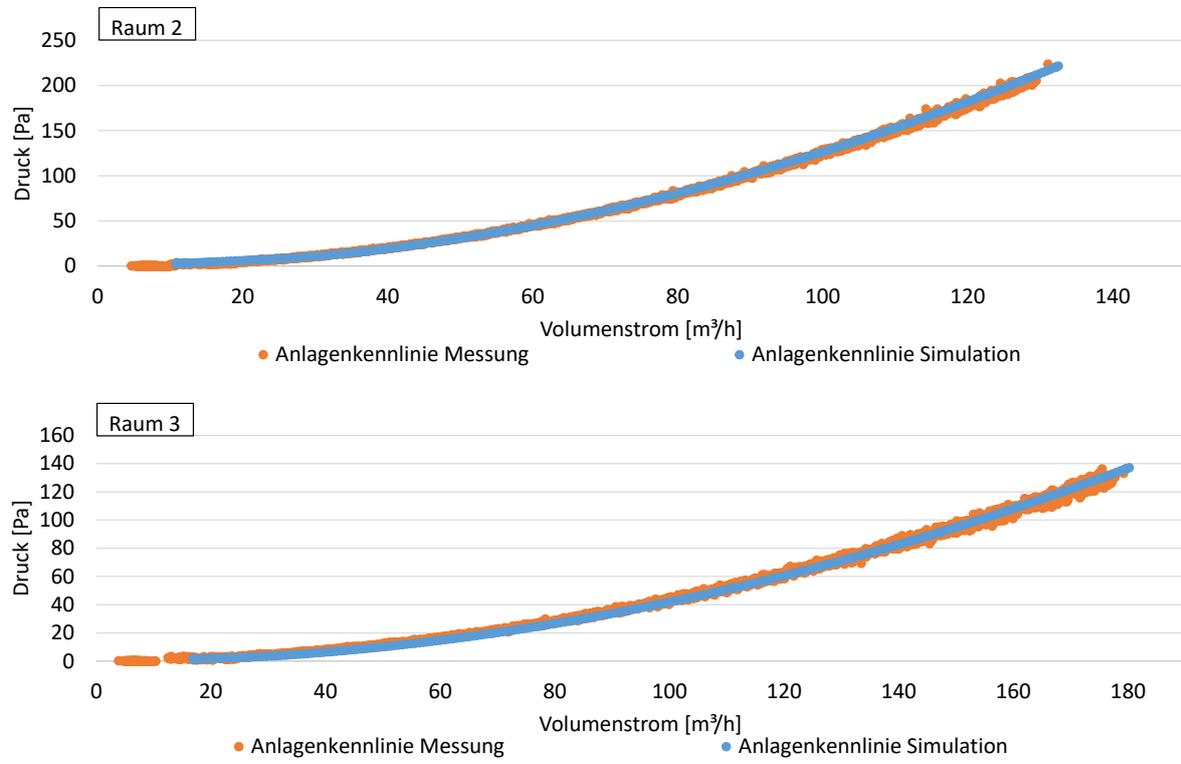


Abbildung 9.1: Anlagenkennlinien von Simulation und Messung der Räume 2 und 3

9.2 Standardmessunsicherheit Volumenstrommessung des Anwendungstestes

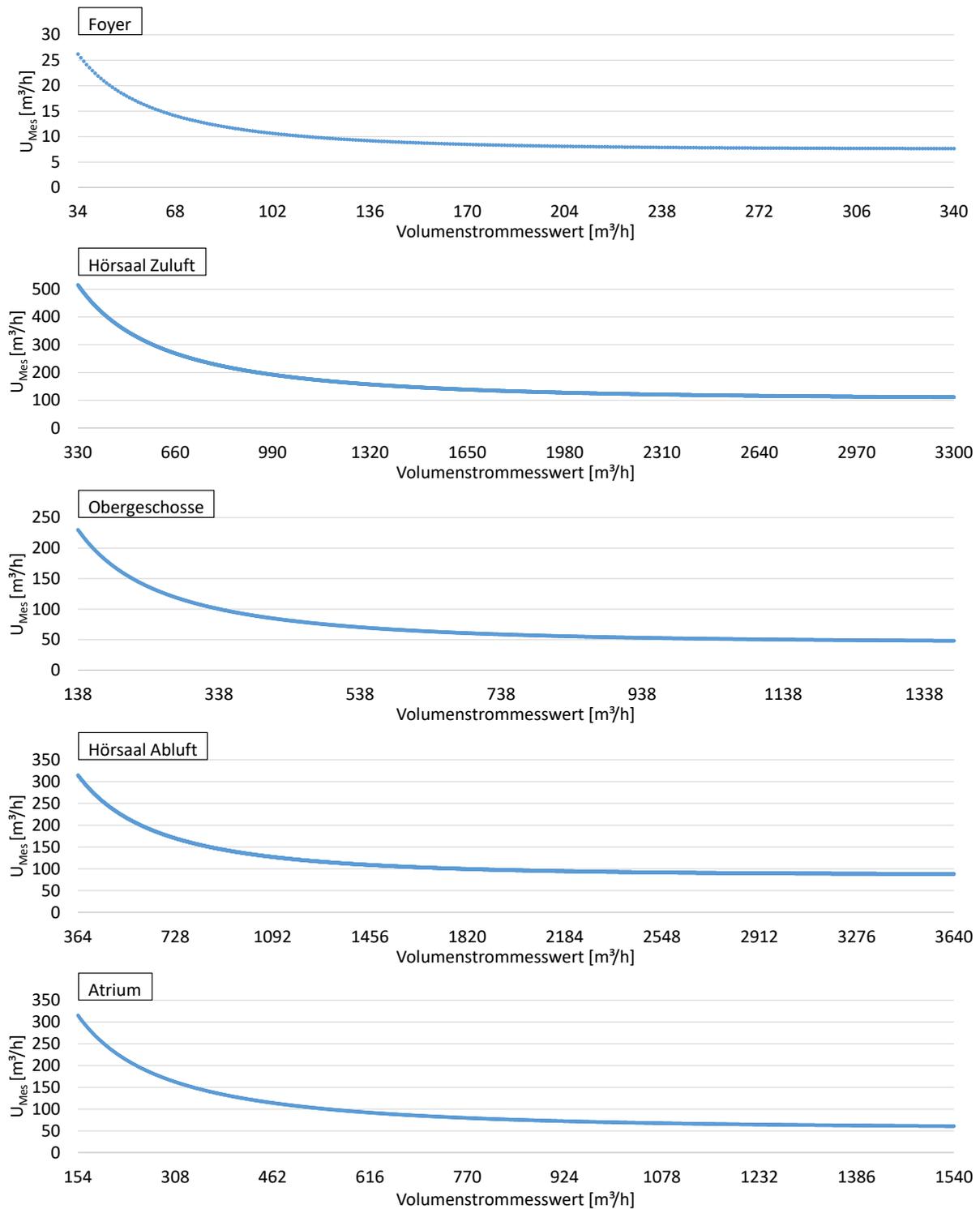


Abbildung 9.2: Erweiterte Standardmessunsicherheit Volumenstrommessung in Abhängigkeit vom Volumenstrommesswert des Anwendungstestes

9.3 Volumenstromdifferenzen der Raumgruppen

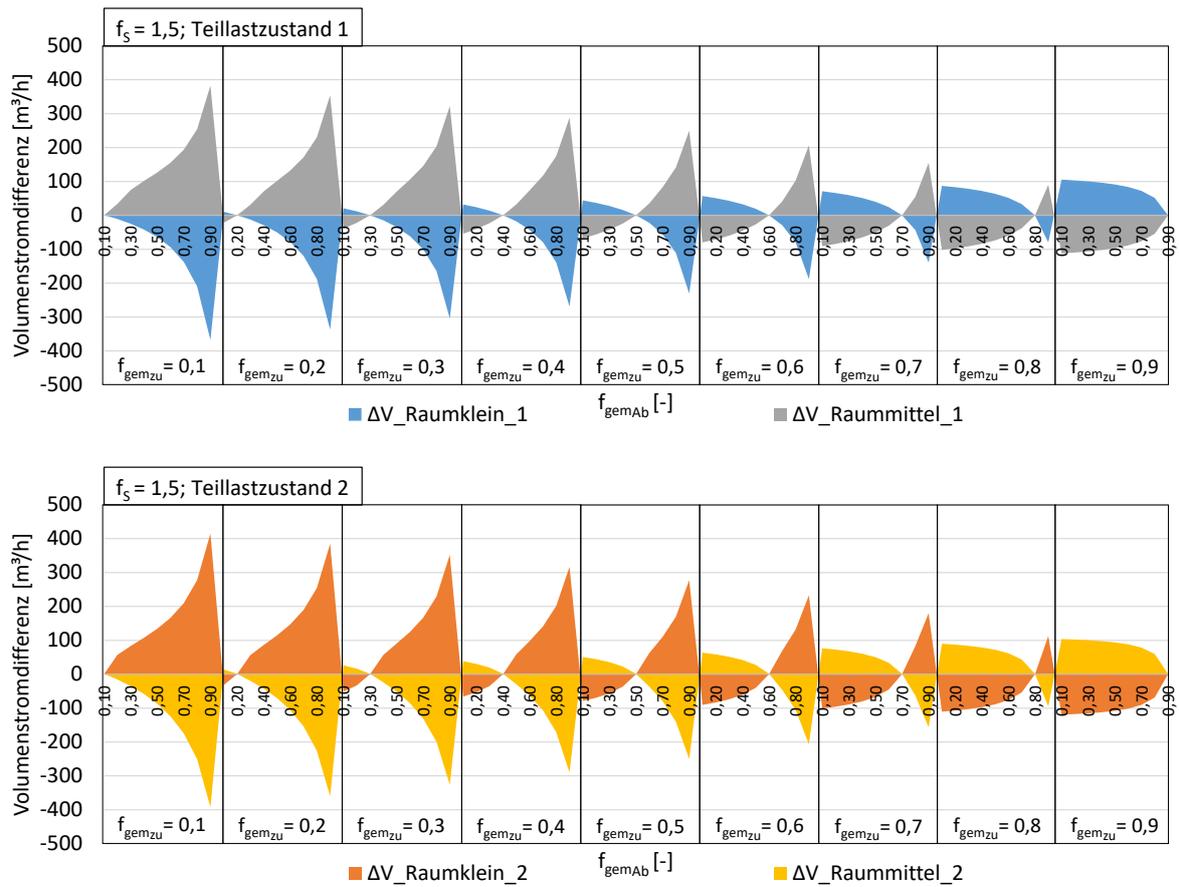


Abbildung 9.3: Volumenstromdifferenzen der Raumgruppe 1 für die beiden Teillastzustände in Abhängigkeit von den Anteilen der gemeinsam durchströmten Kanäle der Zu- und Abluftseite bei Symmetriefaktor 1,5

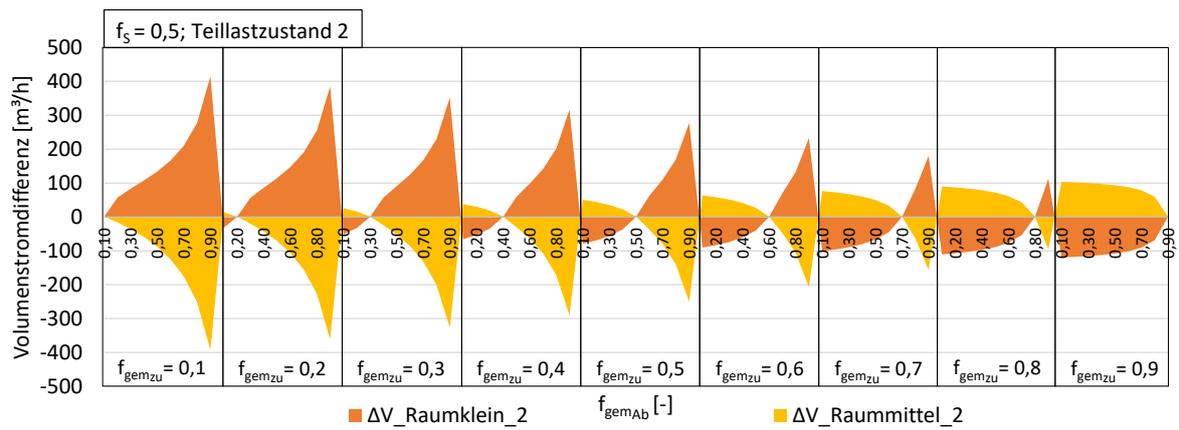
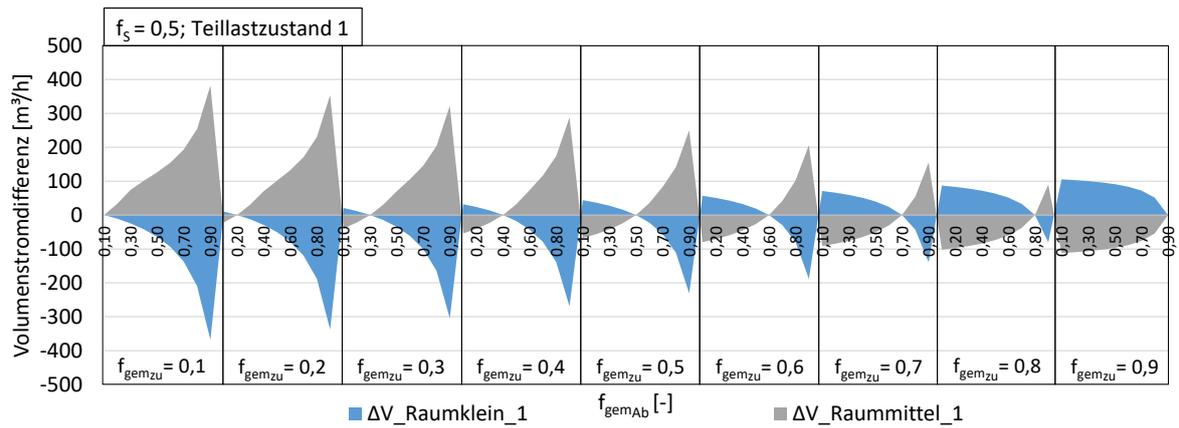


Abbildung 9.4: Volumenstromdifferenzen der Raumgruppe 1 für die beiden Teillastzustände in Abhängigkeit von den Anteilen der gemeinsam durchströmten Kanäle der Zu- und Abluftseite bei Symmetriefaktor 0,5

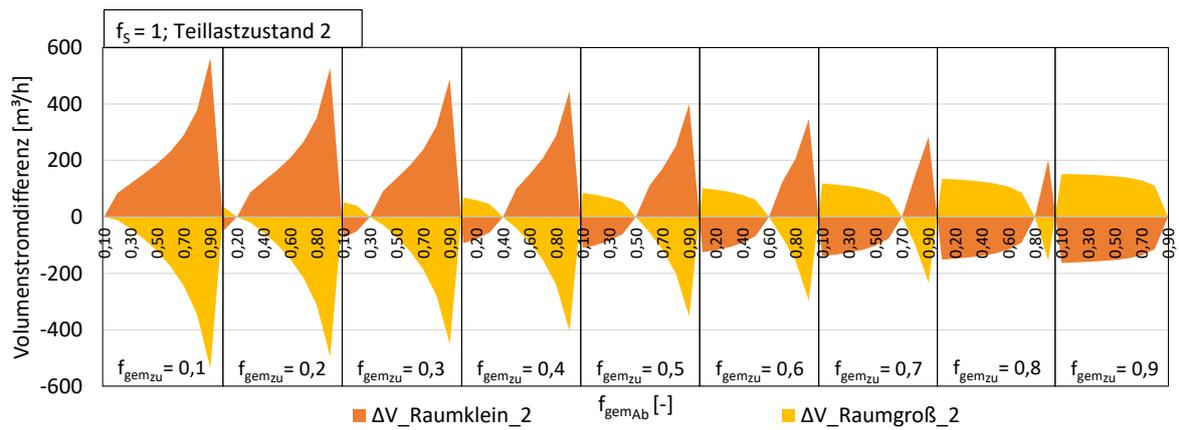
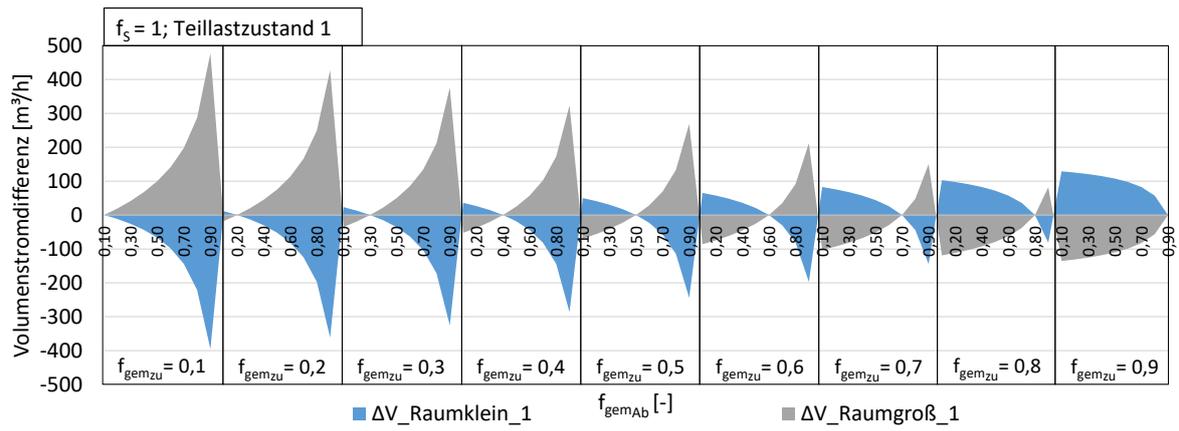


Abbildung 9.5: Volumenstromdifferenzen der Raumgruppe 2 für die beiden Teillastzustände in Abhängigkeit von den Anteilen der gemeinsam durchströmten Kanäle der Zu- und Abluftseite bei Symmetriefaktor 1

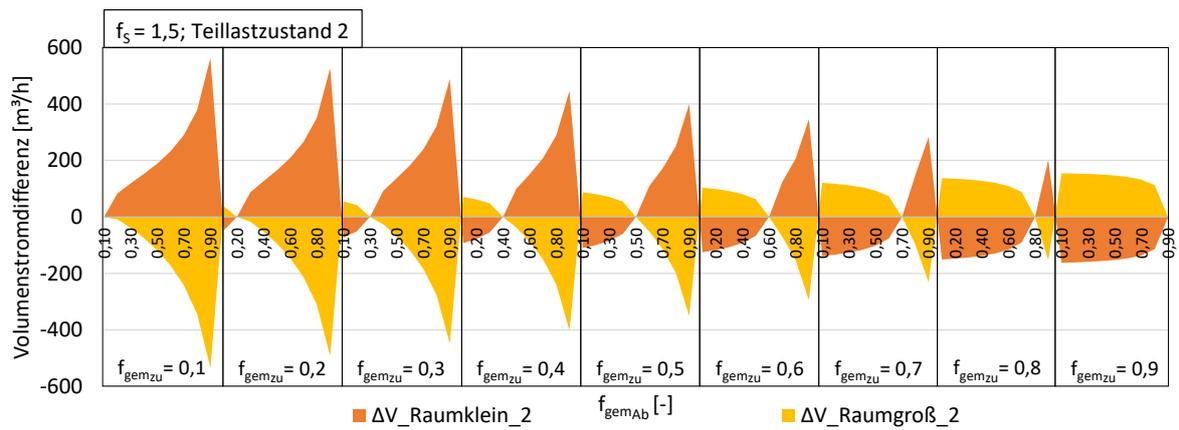
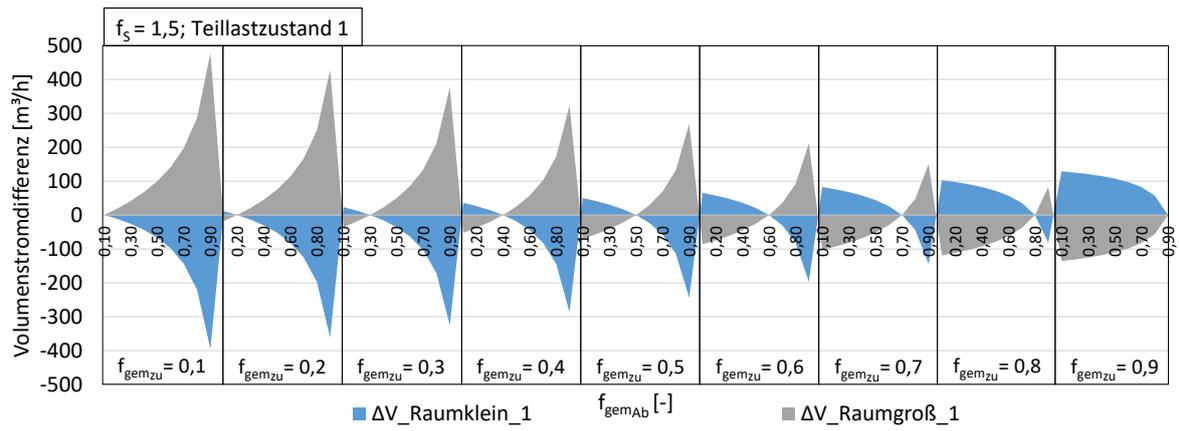


Abbildung 9.6: Volumenstromdifferenzen der Raumgruppe 2 für die beiden Teillastzustände in Abhängigkeit von den Anteilen der gemeinsam durchströmten Kanäle der Zu- und Abluftseite bei Symmetriefaktor 1,5

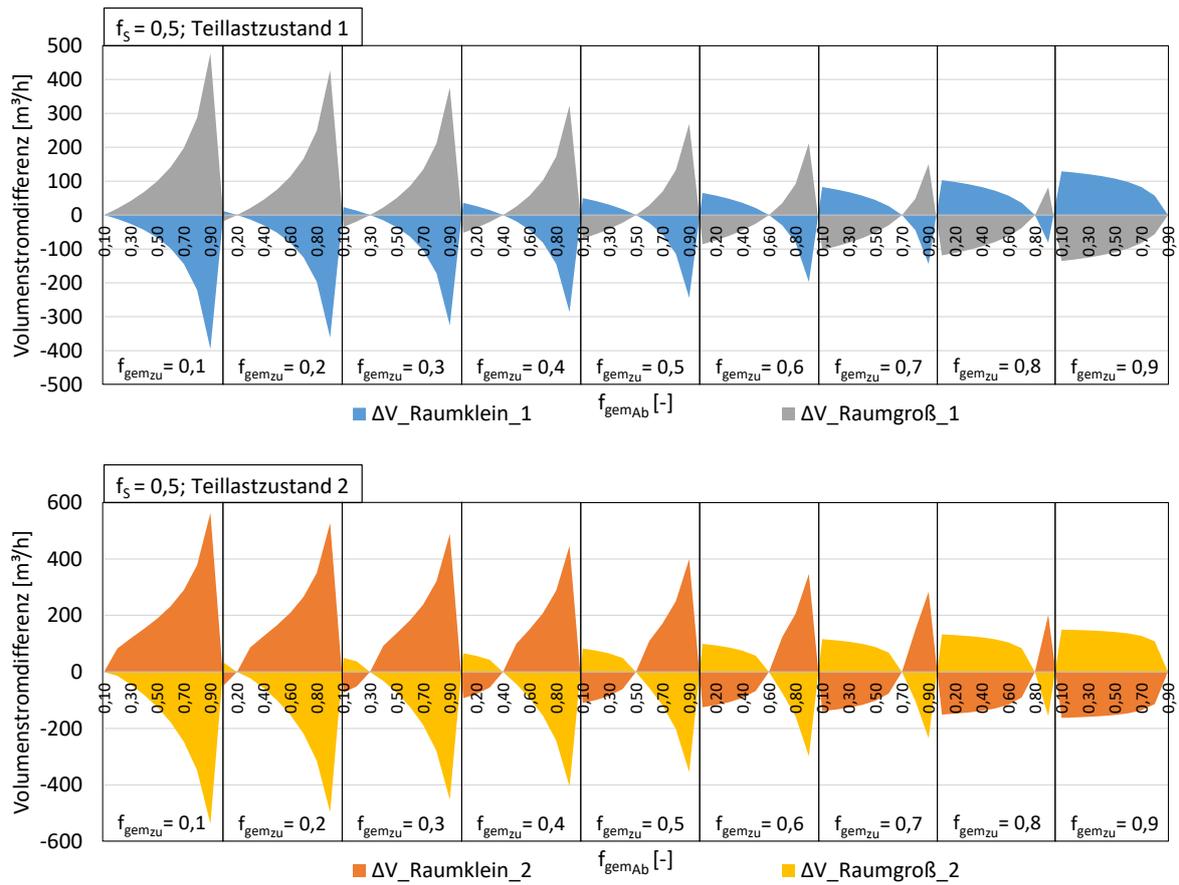


Abbildung 9.7: Volumenstromdifferenzen der Raumgruppe 2 für die beiden Teillastzustände in Abhängigkeit von den Anteilen der gemeinsam durchströmten Kanäle der Zu- und Ablftseite bei Symmetriefaktor 0,5