

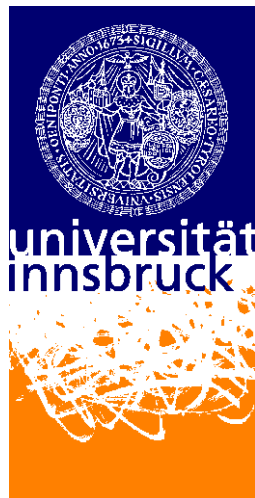
Christoph SPEER

SIMULATION UND ENTWICKLUNG EINES HOCH- EFFIZIENTEN WÄRMERÜCKGEWINNUNGSVENTILATORS

DISSERTATION

eingereicht an der

LEOPOLD-FRANZENS-UNIVERSITÄT INNSBRUCK
FAKULTÄT FÜR TECHNISCHE WISSENSCHAFTEN



Zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR DER TECHNISCHE WISSENSCHAFTEN

Innsbruck, Oktober 2015

Erster Beurteiler:

Univ. Prof. Dr. Wolfgang Feist

Universität Innsbruck

Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften

Arbeitsbereich Energieeffizientes Bauen

Zweiter Beurteiler:

Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer

Technische Universität München

Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen

Hauptbetreuer:

Univ. Prof. Dr. Wolfgang Feist

Universität Innsbruck

Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften

Arbeitsbereich Energieeffizientes Bauen

Danksagung

Für die Unterstützung bei meiner Dissertation bedanke ich mich herzlich, bei Univ. Prof. Dr. Wolfgang Feist, der mir die Dissertation und das ideale und angenehme Arbeitsumfeld ermöglicht hat, bei Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer, der sich dankenswerterweise kurzfristig als Gutachter für die Arbeit zur Verfügung gestellt hat, und bei Assoz. Prof. Dr.-Ing. Rainer Pfluger, der mich während der gesamten Zeit begleitet und mich mit unermüdlichem Einsatz immer unterstützt hat. Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Kollegen des Arbeitsbereichs, allen voran bei den Lüftungsfreaks Gabriel Rojas-Kopeinig und Elisabeth Sibille.

Besonders danke ich auch meinen Eltern Gerhard und Christine, meinem Bruder Andreas, meiner Freundin Ines und meinen Freunden, die in jeglicher Hinsicht die Grundsteine für meinen Weg gelegt haben.

Teilbereiche der hier vorgestellten Arbeit wurden als Teil des Forschungsprojekts VENT4RENO im Rahmen des Förderprogrammes Interreg IV des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung sowie als Teil des Forschungsprojekts HeatXFan aus Mitteln des Klima- und Energiefonds im Rahmen des Energieforschungsprogramms 2015 gefördert und erarbeitet.

Kurzfassung

Lüftungssysteme werden sowohl im Neubau als auch in der Gebäudesanierung eingesetzt um die Raumluftqualität sicherzustellen. Dezentrale Geräte sollten neben hoher strömungsmechanischer und thermischer Effizienz auch eine möglichst kostengünstige Fertigungsmöglichkeit in Kombination mit hohem Funktionsumfang und geringen Betriebskosten aufweisen. Bei einer sehr kompakter Ausführung des Systems bietet sich darüber hinaus die Möglichkeit der Wandintegration, wodurch Aufstellfläche im Wohnraum eingespart werden kann. Mit dem Ziel diese Anforderungen zu erfüllen wurde das Konzept des CHRF (Counterflow Heat Recovery Fan) entwickelt. Hierbei erzeugt ein Querstromventilator beide Luftströme (Ab-/Fortluft und Außen-/Zuluft) und fungiert simultan als regenerativer Gegenstromwärmeübertrager. Auftretendes Kondensat in der Abluft kann durch die Blätter des Ventilators in die Zuluft übergeführt werden. Diese Eigenschaften ermöglichen es, alle Aufgaben in einer einzigen Komponente zu konzentrieren und auf Vorrichtungen für Kondensatablauf und Frostschutz verzichten zu können. Systemspezifische Lösungen zur Balancierung der beiden Luftströme und zur Implementierung eines Sommerbypass-Modus werden zusammen mit dem Ventilator und einer optimierten Strömungsführung in einem sehr kompakten und flachen Gehäuse vereint. Spülkammern im Innenraum des Ventilators sorgen dabei für eine Reduktion von systembedingter Leckage. Auf Basis von analytischen sowie numerischen strömungsmechanischen und thermischen Berechnungen wurde das Konzept des CHRF entwickelt sowie ein Funktionsmuster gefertigt und messtechnisch untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchung haben gezeigt, dass das Konzept des CHRF erfolgreich umgesetzt werden konnte. Die Vor- und Nachteile des Systems, mögliche Einsatzbereiche und noch offene Fragestellungen werden erörtert.

Abstract

Ventilation systems are used in new buildings as well as in the modernization of existing buildings to ensure indoor air quality. For decentralized ventilation units a high aerodynamic and thermal efficiency, a low priced production combined with high functionality and low operating costs should be achieved. A very compact system design provides the possibility to integrate the system into the building envelope and thus save space in the residential area. With the aim to meet these requirements the concept of the CHRF (Counterflow Heat Recovery Fan) was developed. In this concept, one crossflow fan generates both air flows (extract/exhaust air and outdoor/supply air) and acts simultaneously as regenerative counterflow heat exchanger. Condensate that occurs within the extract air can be transferred to the supply air by the blades of the fan. These characteristics make it possible to concentrate all tasks in a single component and to design the system without devices for condensate drain and frost protection. System-related solutions for balancing both air flows and for implementing a summerbypass mode are combined together with the fan and an optimized flow conduction in a compact and slim housing. Flushing chambers in the interior of the fan ensure reduction of systemic leakage. On the basis of analytical and numerical fluid mechanical and thermal calculations, the concept of the CHRF was developed as well as a laboratory prototype produced and tested by measurement. The results of the examination have shown that the concept of the CHRF has been successfully implemented. The advantages and disadvantages of the system, possible areas of application and open-ended questions are discussed.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	iii
Abstract	v
1 Einführung in die Wohnraumlüftung	1
2 Einsatz von dezentralen Lüftungssystemen	5
3 Zusammenfassung	7
4 Ergebnisse und Methodik	13
5 Diskussion und Ausblick	35
6 Überblick zu den Publikationen	37
Literaturverzeichnis	39
P1 Vorstellung des Konzepts und analytische Auslegung	43
1 Einleitung.....	44
2 Vom Gleichstrom- zum Gegenstromprinzip.....	45
3 Das Ventilatorblatt.....	46
3.1 Konstruktion der Ventilatorblätter aus strömungsmechanischer Sicht.....	46
3.1.1 Analytische Optimierung.....	46
3.1.2 Experimentelle Untersuchungen.....	46
3.2 Konstruktion der Ventilatorblätter aus thermischer Sicht.....	47
4 Berechnung und Parameterstudien eines Referenzfalls.....	48
5 Das Gehäuse.....	50
6 Steuerung und mechatronische Komponenten.....	50
7 Einsatz in der Gebäudemodernisierung.....	50
8 Fazit und Ausblick.....	50
P2 Messung, Simulation und Evaluierung eines bestehenden Systems	53
1 Introduction.....	55
2 Measurement and Simulation of the Heat Recovery Centrifugal Fan (HRCF).....	57
3 Design and Simulation of the Counterflow heat Recovery Fan (CHRF).....	58

4	Conclusion.....	59
P3	Simulationstechnische und analytische Entwicklung.....	61
1	Einleitung.....	62
2	Systemdesign.....	63
3	Simulation und Parameterstudien.....	64
4	Balanceabgleich und Sommer-Bypass.....	64
4.1	Balanceabgleich.....	64
4.2	Sommer-Bypass.....	65
5	Mechatronische Ausführung.....	65
5.1	Komponenten.....	65
5.2	Regelung.....	67
6	Einsatzbereich in der minimalinvasiven Gebäudesanierung.....	67
7	Fazit und Ausblick.....	68
P4	Mechatronische Umsetzung.....	69
1	Introduction.....	72
2	Overall design concept and feature description.....	72
3	Mechatronic components and ventilation control.....	74
3.1	Sensors, actuators and ventilation strategy approaches.....	74
3.2	Airflow balancing mechanism.....	75
4	Scenario-based ventilation strategy and device usability.....	76
4.1	Ventilation in combination with a fireplace.....	76
4.2	Summer bypass.....	76
4.3	Indoor air quality (IAQ) control strategy.....	76
5	Conclusion.....	77
P5	Entwicklung, Messung, Simulation und Evaluierung des Funktionsmusters.....	79
1	Einleitung.....	80
2	Entwicklung des CHRf.....	80
2.1	Entwicklung und Fertigung der Komponenten des CHRf.....	80
2.2	Mechatronische Umsetzung des Systems.....	81
3	Strömungsmechanische Untersuchung bei axialem Einlass.....	83
4	Thermische Untersuchung mit externer Ventilation.....	84
5	Strömungsmechanische Untersuchung und Evaluierung der Simulationsergebnisse des CHRf.....	84
6	Integrationsmöglichkeit des CHRf in der Außenwanddämmung.....	85
7	Diskussion und Ausblick.....	86

1 Einführung in die Wohnraumlüftung

Ein sehr großer Anteil des weltweiten Energiebedarfs wird derzeit für Gebäude und deren Heizung benötigt. Laut der Richtlinie *EPBP (2010)* des europäischen Parlaments entfällt 40% des Gesamtenergieverbrauchs der europäischen Union auf Gebäude. Die Senkung des Energiebedarfs im Gebäudesektor ist deshalb eine wesentliche Möglichkeit zur Reduktion des Gesamtprimärenergiebedarfs. Neben der Errichtung von energieeffizienten Gebäuden (beispielsweise im Passivhaus-Standard (*Feist, 2014*)) kann die Sanierung von Bestandsgebäuden (*Passive House Institute, 2013*) erheblich zur Reduktion des Energiebedarfs beitragen. Durch die erforderliche Luftdichtheit von Neubauten und bei der Bestandssanierung muss ein ausreichender Luftwechsel gewährleistet werden, um negative gesundheitliche Auswirkungen sowie Bauschäden zu vermeiden und die Behaglichkeit sicherzustellen. Neben dem Abtransport von Geruchsstoffen spielt die relative Luftfeuchtigkeit dabei eine wichtige Rolle. Wie *Koch et al. (1960)* in den 1960er Jahren und *Andersen et al. (1974)* in den 1970er Jahren bereits mittels Probanden in Klimakammern untersuchten, konnte eine Fähigkeit zur Einschätzung der relativen Luftfeuchtigkeit nicht nachgewiesen werden. Die Auswirkungen der relativen Luftfeuchtigkeit auf den Schleimfluss des Menschen wurde beispielsweise von *Andersen et al. (1972)* und *Andersen et al. (1974)* untersucht und in *Hahn (2007)* gesammelt dargestellt. Dabei wurde zwar festgestellt, dass die menschliche Nase dazu in der Lage ist, die niedrige relative Feuchtigkeit durch erhöhte körpereigene Befeuchtung zu kompensieren, jedoch verfügen Asthmatiker nach *Strauss et al. (1978)* vermutlich über einen Defekt, der diese Kompensation nicht ermöglicht. Darüber hinaus führt eine zu geringe relative Luftfeuchtigkeit zu einem Austrocknen der Schleimhäute der Atemwege und schwächt somit die Abwehr gegen Krankheitserreger (*Fiedler und Hoyer, 1996*) (*Lubart, 1979*). Eine niedrige relative Luftfeuchtigkeit im Bereich von 15 bis 40% erhöht darüber hinaus die Überlebensfähigkeit von Influenzaviren in der Raumluft (*Hemmes et al. 1960*) und begünstigt die Entwicklung und Schwebefähigkeit von Staub und den darin befindlichen Mikroorganismen (*Sale, 1972*), (*Lubart, 1979*). Des Weiteren erhöht eine zu geringer Luftfeuchtigkeit die Gefahr für Augenbeschwerden auf Grund von einer Verringerung des Tränenfilms (*Sommer et al., 1994*) und führt zu vermehrten Hautbeschwerden (*Spiegel, 1998*). Eine Zusammenfassung wissenschaftlicher Erkenntnisse zum gesundheitlichen Einfluss der Raumluftfeuchte wird in *Pfluger et al. (2013c)* beschrieben. Eine zu hohe

relative Raumlufffeuchtigkeit führt wiederum zu Kondensat an kälteren Oberflächen, verursacht Bauschäden und ermöglicht Schimmelpilzbildung (*Sedlbauer, 2001*).

Um Schad- und Geruchsstoffe bei dichten Gebäudehüllen abzutransportieren und gleichzeitig eine zu hohe oder zu niedrige relative Luftfeuchtigkeit zu verhindern sollte ein kontrollierter Luftwechsel ermöglicht werden. Eine natürliche Belüftung, beispielsweise über Fensterlüftung, hat den Vorteil, dass sie in der Regel keine zusätzlichen Investitionskosten verursacht und bei größeren Öffnungen meist einen hohen Luftaustausch für Intensivlüftung oder Nachtlüftung ermöglicht (*Huber, 2006*). Im Winter kann sich die natürliche Lüftung nachteilig auf den thermischen Komfort auswirken, da kalte Luft ohne Vorerwärmung eintritt und es zur Bildung von Kaltluftseen kommen kann. Darüber hinaus ist die Raumluffqualität unmittelbar vom Nutzerverhalten abhängig. Seltenes oder zu kurzes Lüften beeinträchtigt die Luftqualität, zu langes Lüften führt in der Regel zu erhöhten Wärmeverlusten und geringer relativer Raumlufffeuchtigkeit im Winter. Des Weiteren kann die Wärme der belasteten abgeführten Luft nicht an die in den Raum geführte ungefilterte Außenluft übertragen werden. Als erster Schritt zur Komfortlüftung können Abluftanlagen angesehen werden. Dabei wird ausschließlich die Abluft mechanisch durch Ventilatoren abgeführt. Außenluft wird bei luftdichten Gebäuden meist über dafür vorgesehene Durchlässe eingebracht. Sie benötigt im Vergleich zu einer Komfortlüftung weniger Platz und weist geringere Investitionskosten auf. Wärmerückgewinnung der abgeführten Raumluff ist jedoch nur eingeschränkt, beispielsweise mittels Nutzung der Abluft als Wärmequelle für eine Wärmepumpe, möglich und eine ausreichende Lüftung aller Räume ist bei geöffneten Fenstern nicht gewährleistet, da der Großteil der unbelasteten Außenluft durch das geöffnete Fenster und nicht durch die dafür vorgesehenen Durchlässe eingebracht wird. (*Huber, 2006*). Durch den Einsatz eines Komfortlüftungssystems können diese Nachteile beseitigt werden. Dabei wird unbelastete gefilterte Außenluft in den Wohnraum mechanisch eingebracht und ähnlich einer Abluftanlage wieder abgeführt. Der Luftwechsel erfolgt unabhängig von äußeren Wetterbedingungen und die Funktionsweise wird durch das Nutzerverhalten in der Regel nicht beeinträchtigt. Die Wärme der Abluft kann an die eingebrachte Zuluft übertragen und der Schallschutz gegenüber außen gewährleistet werden.

Die Luftführung von Komfortlüftungssystemen mit Wärmerückgewinnung im Wohnraum kann unterschiedlich konzipiert werden. Raumweise Konzepte versorgen alle Räume mit Zu- und Abluft. Die Nachteile dieser Ausführung liegen in höheren Investitionskosten durch den erhöhten Bedarf an Leitungswegen und Auslässen. Durch Umsetzung des Kaskadenprinzips (*Rojas und Pfluger, 2015*) werden nur die Schlaf-, Wohn- und Arbeitsräume mit Zuluft versorgt. Mit Hilfe von Überströmöffnungen wird die Luft zu den Ablufträumen (Bad, WC, Küche, usw.) geführt. Die detaillierte Funktionsweise und Hinweise zur Planung werden in *Sibille et al. (2013b)* beschrieben. Die Vorteile der Kaskadenlüftung liegen in der Reduktion der Leitungswege und der Anzahl der Ein-/Auslassventile. Zusätzlich werden Investitions- und Betriebskosten eingespart, da der benötigte Außenluftstrom um etwa 50% (*Sibille et al., 2013a*) reduziert werden kann. Neben dem Ventilatorstromverbrauch können somit auch die Lüftungswärmeverluste verringert werden. Das weiterentwickelte Prinzip, die „erweiterte Kaskadenlüftung“ (*Sibille et al., 2013a*), geht noch einen Schritt weiter und führt Außenluft nur in den Schlafräumen zu. Mit Hilfe von Überstromöffnungen werden alle weiteren Räume versorgt und in den Ablufträumen abgeführt. Dieses Konzept ermöglicht eine weitere Reduktion des Außenluftstroms da sich die BewohnerInnen entweder im Wohnbereich oder im Schlafzimmer aufhalten. Durch diese Eigenschaft können Investitions- und Betriebskosten, bei praktisch gleichbleibender Raumluftqualität, eingespart werden. Da dieses Konzept in dieser Form nicht bei allen Wohnungsgrundrissen umsetzbar ist werden in *Sibille et al. (2014)* Planungshinweise und ein Tool zur Überprüfung der Eignung von Grundrissen vorgestellt. Detailliertere Informationen zur Projektierung von Wohnraumlüftungsanlagen werden in *Huber (2008)* beschrieben.

2 Einsatz von dezentralen Lüftungssystemen

Komfortlüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung können in zwei Kategorien (zentrale und dezentrale Systeme) eingeteilt werden. Zentrale Systeme werden zur Versorgung von mehreren Wohnungen durch nur ein Lüftungsgerät eingesetzt. Die einzelnen Wohnungen und deren Räume werden mittels Verteilsystem mit Zu- und Abluft versorgt, Außenlufteinlass und Fortluftauslass erfolgen zentral vom Lüftungssystem aus. Dezentrale Anlagen versorgen hingegen in der Regel nur eine Wohnungseinheit oder einen Raum. Außenlufteinlass und Fortluftauslass erfolgen meist direkt durch die Fassade, weitere Zu- und Ablufträume werden bei Bedarf durch ein Kanalnetz versorgt. Bei allen Geräten sollte eine Filterung der Außen- und Abluft ermöglicht und eine Balancierung der Luftströme sichergestellt werden, um Über- oder Unterdruck in der Wohnung und somit einen erhöhten Lüftungswärmeverlust durch Infiltration zu vermeiden. Das im Gerät und im Leitungsnetz entstehende Kondensat durch Abkühlung feuchter Abluft muss entweder an die Zuluft übertragen oder gesammelt und abgeleitet werden. Darüber hinaus ist das Einfrieren des Lüftungssystems bei kalten Außenlufttemperaturen zu verhindern, um die Funktionsfähigkeit sicherzustellen. Besonders in der warmen Jahreszeit ist die Vorrichtung eines optionalen Sommer-Bypass von Vorteil. Dabei kann bei Bedarf die Wärmeübertragung des Systems bewusst verhindert werden, ohne den Luftwechsel im Wohnraum zu beeinflussen. Mit Hilfe dieser Funktion kann die Gefahr der Überhitzung durch Nachtkühlung verringert werden. Eine Sammlung weiterer Lösungen für die Umsetzung von kostengünstigen und kompakten Lüftungssystemen werden in *Rojas et al. (2015)* vorgestellt.

Die Vorteile von dezentralen Systemen liegen in den kurzen Leitungswegen und dem dadurch geringeren Druckverlust des Kanalnetzes. Brandschutztechnische Maßnahmen, wie beispielsweise Brandschutzklappen, werden in der Regel nicht benötigt. Dies führt einerseits wiederum zur Verringerung des Druckverlusts im Kanalnetz und andererseits zu geringeren Investitions- und Wartungskosten. Die Luftströme können je nach aktuellem Bedarf individuell geregelt werden, und auch die Gefahr der Geruchs- und Schallübertragung durch andere Wohnungen wird vermieden. Die Nachteile beim Einsatz mehrerer dezentraler Geräte gegenüber dem Einsatz eines zentralen Systems, liegen unter Umständen in erhöhten Installationskosten, falls beispielsweise die Abführung von Kondensat an allen Geräten sichergestellt werden muss. Darüber hinaus können die Wartungsarbeiten auch nicht zentral ausge-

führt, sondern müssen bei jedem Lüftungssystem separat durchgeführt werden (*Schöberl und Hofer, 2012*). Bei der Installation des dezentralen Systems muss eine mögliche akustische Belastung beachtet und verhindert werden. Wenn das Gerät im Gebäudeinneren installiert wird, kann es zur Reduktion der nutzbaren Wohnfläche kommen. Durch eine kompakte Bauweise können diese Systeme aber auch platzsparend in der Fassade integriert werden. In *Mahler et al. (2008)* werden die Vor- und Nachteile von fassadenintegrierten dezentralen Lüftungssystemen beschrieben.

Um die Abmessungen von dezentralen Lüftungssystemen zu reduzieren besteht die Möglichkeit mehrere Funktionen von üblicherweise unterschiedlichen Bauteilen zu vereinen. So kann die Luftförderung von zwei Luftströmen (Ab-/Fortluft und Außen-/Zuluft) beispielsweise durch nur einen Ventilator und/oder die Wärmeübertragung an den Oberflächen des Ventilators erfolgen. Der Heat Recovery Centrifugal Fan (HRCF) (*de Fries, 1969*) vereint diese Funktionen in einer einzigen Komponente. Durch die Zentrifugalkräfte eines porösen ringförmigen Schaums werden die Luftströme von Außen- und Abluft axial ins Zentrum geführt und radial durch das poröse Material hindurch entlang einem spiralförmigen Gehäuse ausgeblasen. Dieses Konzept ist bei derzeit am Markt verfügbaren Systemen (*Frivent, 2011*) umgesetzt. Entstehendes Kondensat beim Abkühlen feuchter Abluft kann innerhalb einer Umdrehung an die Zuluft übergeführt werden. Diese Eigenschaft ermöglicht es bei der Installation dieses Systems, in vielen Einsatzbereichen, auf Vorrichtungen für Kondensatablauf und Frostschutz verzichten zu können. Darüber hinaus wird durch die systembedingte Feuchterückgewinnung in der kalten und trockenen Jahreszeit der Gefahr einer zu geringen relativen Raumluftfeuchtigkeit entgegengewirkt. Der physikalisch limitierte Temperaturbereitstellungsgrad derartiger Systeme verhindert jedoch den breiten Einsatz im Neubau und in der Gebäudesanierung. Die Nachteile des HRCF-Prinzips sowie Möglichkeiten zur Lösung dieser Problemstellungen werden in *Pfluger et al. (2013)* detailliert beschrieben.

Die Einsatzmöglichkeiten von dezentralen Systemen reichen vom Neubau von Bürogebäuden (*Voss, 2010*), beispielsweise mittels vorgefertigter Fassadenmodule, über Schulgebäude (*Greml et al., 2008*) bis hin zu Mehr-/Einfamilienhäuser und Wohnungen. Besonders in der Sanierung von Bestandsgebäuden kann die kontrollierte Wohnraumlüftung durch den Einsatz von dezentralen Systemen meist mit minimalinvasiven Methoden nachgerüstet und der bauliche Eingriff in bewohnten Wohnungen reduziert werden (*Domenig-Meisinger et al., 2007*).

3 Zusammenfassung

Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung werden sowohl im Altbau als auch in der Gebäudesanierung eingesetzt um die Qualität der Raumluft sicher zu stellen und gleichzeitig den Wärmeverlust zu reduzieren. Üblicherweise werden dabei zwei Luftströme (Außen-/Zuluft und Ab-/Fortluft) durch jeweils einen Ventilator erzeugt und die Wärme der Abluft mit Hilfe eines Wärmeübertragers an die Zuluft übertragen. Auftretendes Kondensat bei Abkühlung feuchter Abluft kann entweder durch Feuchterückgewinnung ebenfalls an die Zuluft übertragen oder aber extern abgeleitet werden. Darüber hinaus muss die Außenluft bei kalten Temperaturen vorgeheizt werden um ein mögliches Gefrieren von Kondensat zu verhindern. Die Balance zwischen den beiden Luftströmen kann bei diesen Systemen durch unterschiedliche Ansteuerung der beiden Ventilatoren erreicht werden. Bei dem Lüftungssystem HRCF (Heat Recovery Centrifugal Fan) werden beide Luftströme durch einen rotierenden porösen Ring erzeugt. Dabei wird Außen- und Abluft getrennt voneinander axial angesaugt und nach dem Passieren des rotierenden Rings spiralförmig ausgeblasen. Der poröse Ring fungiert hierbei simultan als Ventilator und Wärmeübertrager. Da der poröse Ring innerhalb einer Umdrehung von beiden Luftströmen durchsetzt wird, kann auftretendes Kondensat in den zweiten Luftstrom übergeführt werden. Diese Eigenschaft ermöglicht es in vielen Einsatzbereichen auf Vorrichtungen für Kondensatablauf und Frostschutz verzichten zu können. Darüber hinaus kann durch dieses Prinzip die elektrische Effizienz gesteigert und die erforderlichen mechatronischen Komponenten verringert werden, da zur Erzeugung beider Luftströme nur ein Motor mit höherer Leistung benötigt wird. Die Nachteile des Systems liegen in der eingeschränkten strömungsmechanischen und thermischen Effizienz, da der poröse Ring einerseits nicht geeignet ist um Luftströme hydraulisch effizient zu erzeugen und andererseits von beiden Luftströmen in gleicher Richtung durchsetzt wird und es sich somit schematisch um einen in seiner Effizienz limitierten einseitig isothermen Wärmeübertrager handelt. Die Balance der Luftströme muss beim HRCF über einen separaten Mechanismus sichergestellt werden, da nur ein Ventilator für die Erzeugung beider Luftströme verantwortlich ist.

Mit dem Ziel die Vorteile des HRCF mit der strömungsmechanischen und thermischen Effizienz handelsüblicher Systeme zu verbinden wird in *Pfluger et al. (2013)* das neuartige Konzept des Counterflow Heat Recovery Fan (CHRF) vorgestellt. Dabei werden beide

Luftströme anstelle eines porösen Rings durch einen strömungsmechanisch effizienteren Querstromventilator erzeugt. Die Ansaugung erfolgt aber nicht wie beim HRCF axial sondern radial ähnlich dem Strömungsbild eines einfachen Querstromventilators, hier jedoch in axial versetzten Ebenen. Durch die stationäre Konstruktion im Inneren des Querstromventilators wechseln beide Luftströme wechselseitig die Ebene und werden wiederum ähnlich dem einfachen Querstromventilator radial ausgeblasen. Der radiale Einlass eines Luftstroms erfolgt somit in derselben Ebene wie der radiale Auslass des zweiten Luftstroms. Durch die Strömungsführung werden die Schaufelblätter des Ventilators während einer Umdrehung von beiden Luftströmen in beiden Ebenen in entgegengesetzter Richtung umströmt und fungieren daher als regenerativer Gegenstromwärmeübertrager. Zur Erreichung einer hohen thermischen Effizienz ist im Vergleich zu üblichen Querstromventilatoren eine wesentlich größere Anzahl an Rotorblättern notwendig. Das Konzept des CHRF, erste Auslegungskriterien und analytische Berechnungen zum thermischen Verhalten werden in *Pfluger et al. (2013)* vorgestellt.

Pfluger et al. (2013)

Rainer Pfluger, Christoph Speer, Wolfgang Feist, Johannes Weger, Janez Zgaga

Entwicklung eines hocheffizienten Ventilators mit integrierter Gegenstromwärmerückgewinnung für den Einsatz in der Gebäudemodernisierung

Bauphysik 35 (2013), H. 4, S. 242-249

Im Zuge der Entwicklung und Optimierung des CHRF Konzepts mit Hilfe von numerischen Strömungssimulationen wurden mit dem Ziel des Vergleichs und der Modellvalidierung Teile des Simulationsmodells an einem am Markt verfügbaren und im Labor messtechnisch untersuchten HRCF evaluiert. Die messtechnische Untersuchung und die Ergebnisse der numerischen Strömungssimulation des HRCF sowie erste Funktionsmuster des CHRF werden in *Speer (2014)* vorgestellt.

Speer (2014)

Christoph Speer

Development of a highly efficient counterflow heat recovery fan

Proceedings Roomvent Conference, 2014

Um mögliche Probleme mit strömungsbedingter und drehzahlabhängiger Disbalance auf Grund von asymmetrischer Führung der Luftströme (*Pfluger et al. 2013*) zu vermeiden

wurde ein Konzept für eine symmetrische Strömungsführung *Speer et al. (2014)* entwickelt. Des Weiteren wurden systemspezifische effiziente Vorrichtungen zur Regelung der Volumenstrombalance und ein Sommerbypass-Modus zur optionalen Abschaltung der Wärmerückgewinnung entwickelt. Das symmetrische Konzept, die numerische strömungsmechanische Optimierung des Querstromventilators, die Vorrichtungen für Volumenstrombalance und Sommerbypass sowie die Möglichkeiten für den Einsatz des kompakten CHRf in der minimalinvasiven Gebäudesanierung werden in *Speer et al. (2014)* vorgestellt und wurden im Rahmen des INTERREG-Projekts Vent4Reno erarbeitet.

Speer et al., (2014)

Christoph Speer, Rainer Pfluger, Wolfgang Feist, Janez Zgaga, David Lanthaler

Entwicklung eines dezentralen kompakten Lüftungssystems für den Einsatz in der minimalinvasiven Gebäudesanierung

Bauphysik 36 (2014), H. 5, S. 236-242

Parallel zur strömungsmechanischen und thermischen Optimierung des CHRf Konzepts wurde die mechatronische Umsetzung geplant um ein gesamtenergetisch möglichst effizientes System zu entwickeln. Die mechatronischen Komponenten, die Systemtopologie und mögliche Ansätze für systemspezifische Lüftungsstrategien werden in *Zgaga et al. (2014)* vorgestellt.

Zgaga et al. (2014)

Janez Zgaga, David Lanthaler, Christoph Speer, Rainer Pfluger

Development of a decentralized and compact comfort ventilation system with highly efficient heat recovery for minimal invasive refurbishment of buildings

Proceedings 35th AIVC Conference, 2014

Um interne Leckage durch zwischen den Schaufelblättern mittransportierte Luft während des Wechsels der Luftströme zu reduzieren, werden Spülkammern in der Innenkonstruktion implementiert. Die Leckageströmung kann somit in den ursprünglichen Luftstrom zurückgeführt werden. Auf Basis der Erkenntnisse in *Pfluger et al. (2013)*, *Speer (2014)* und *Speer et al. (2014)* wurde ein Funktionsmuster mit Hilfe des Rapid-Prototyping-Verfahrens Stereolithographie gefertigt und entsprechend der Darstellung in *Zgaga et al. (2014)* mechatronisch umgesetzt. Die messtechnische Untersuchung des entwickelten Funktionsmusters, die

Ergebnisse der numerischen Strömungssimulation, Problemstellungen bei der Fertigung und Vorschläge für die Integration des CHRf in der Außenwanddämmung werden in *Speer et al. (2015)* vorgestellt.

Speer et al. (2015)

Christoph Speer, Rainer Pfluger, Janez Zgaga, David Lanthaler, Florian Recla, Wolfgang Feist

Entwicklung und messtechnische Untersuchung eines dezentralen kompakten Wärmerückgewinnungsventilators

Bauphysik 37 (2015), H. 3, S. 179-185

Die Nachteile eines Ventilators mit hoher Blattzahl nach *Speer et al. (2015)* liegen im verjüngenden Strömungsquerschnitt des Schaufelzwischenraums entlang der Schaufelblätter und dem dadurch entstehenden höheren Strömungswiderstand. Die Blattdicke des gefertigten 300-Blatt Ventilators in *Speer et al. (2015)* wurde im Labor vermessen und beträgt 0.85 mm. Die labortechnische Untersuchung des Druckverlusts eines Ausschnitts von 25 Blättern bei axialem Einlass wurde in *Speer et al. (2015)* mit dem numerischen Simulationsmodell verglichen. Die messtechnischen Ergebnisse können bei Implementierung des k-epsilon Turbulenzmodells im Modell mit einer Blattdicke von 1.05 mm angenähert werden. Bei Implementierung des SST-Modells werden die messtechnischen Ergebnisse bei gleicher Blattdicke von 0.85 mm, wie in Abbildung 1 dargestellt, angenähert.

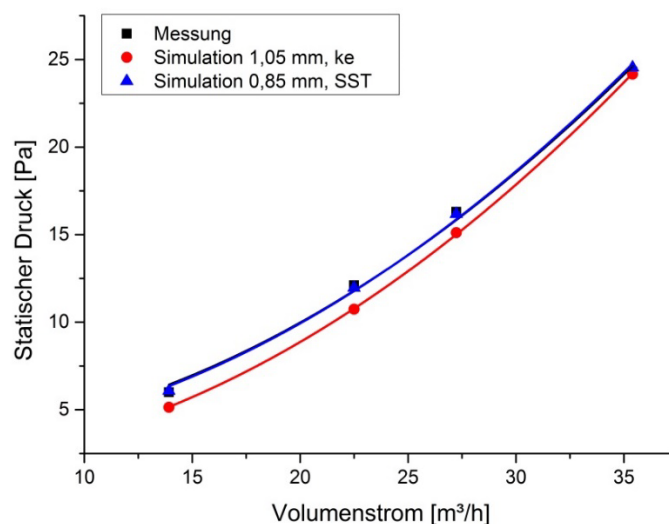


Abbildung 1: Messtechnische Untersuchung des Druckverlusts eines 25-Blatt Ausschnitts des 300-Blatt Ventilators bei axialem Einlass mit einer Blattdicke von 0.85 mm und Vergleich mit Simulationsmodellen.

Um die strömungsmechanische Funktionsfähigkeit des in *Speer et al. (2015)* vorgestellten Funktionsmusters auch für hohe Temperaturbereitstellungsgrade zu erreichen, muss der Druckverlust des Ventilators reduziert werden. Eine Möglichkeit besteht darin, den Ventilator strömungsmechanisch optimiert mit nur ca. 30 Blättern umzusetzen und zusätzlich horizontale Lagen in den Schaufelzwischenräumen anzuordnen. Dieses Konzept bietet den Vorteil, dass der Strömungsquerschnitt zwischen den Lagen in Strömungsrichtung konstant bleibt und somit eine Reduktion des Druckverlusts ermöglicht wird. Alternativ zu den horizontalen Lagen könnte auch die Implementierung eines porösen Materials in den Schaufelzwischenräumen angedacht werden. Die detaillierten strömungsmechanischen Auswirkungen dieser Konzepte wurden hier noch nicht untersucht.

4 Ergebnisse und Methodik

Dezentrale Lüftungssysteme sollten so energieeffizient und kompakt wie möglich realisiert werden. Durch die Kombination von Ventilatoren und Wärmeübertrager in einer einzigen Komponente besteht die Möglichkeit ein platzsparendes System zu konstruieren. Der Frivent-Wärmerückgewinner, dargestellt in Abbildung 2, fördert zwei Luftströme (Außen-/Zuluft und Ab-/Fortluft) mit nur einem rotierenden porösen Medium. Außen- und Abluft werden axial angesaugt und vom Zentrum aus radial durch das poröse Medium hindurch entlang der spiralförmigen Auslässe ausgeblasen. Innerhalb einer Umdrehung wird Wärme eines Luftstroms an das poröse Medium abgegeben und an den zweiten Luftstrom wieder abgegeben. Die Funktionsweise des ersten Patents wird von *de Fries (1969)* beschrieben.

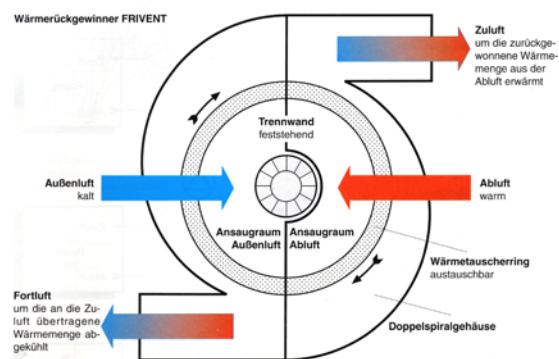


Abbildung 2: Frivent-Wärmerückgewinner der Firma *Frivent GmbH (2015)*.

Durch die limitierte thermische Effizienz dieses Systems, da beide Luftströme vom Zentrum aus radial durch das poröse Medium hindurch ausgeblasen werden und es sich somit schematisch um einen Gleichstromwärmeübertrager handelt, ist es nach den gestiegenen heutigen Effizienzanforderungen im Neubau und in der Sanierung nicht mehr geeignet. Mit dem Ziel die Vorteile dieses Systems zu nutzen und gleichzeitig die thermische Effizienz zu steigern wurde ein Ventilator gesucht, der diese Funktionalität ermöglicht. Dabei ist es notwendig, dass zwei entgegengesetzte Strömungsrichtungen vorliegen. Diese Anforderungen werden vom Querstromventilator erfüllt. Die Luft wird radial durch die Schaufelblätter hindurch angesaugt und vom Zentrum aus wiederum radial entlang einem spiralförmigen Gehäuse ausgeblasen. Das typische Strömungsbild eines Querstromventilators ist in Abbildung 3 dargestellt.

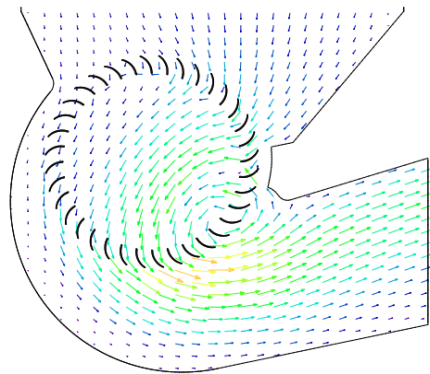


Abbildung 3: Strömungsverlauf eines Querstromventilators. (Dornstetter, 2002)

Mit Hilfe dieses Strömungsverhaltens wurde versucht ein Konzept zu entwickeln, das die Vorteile des Frivent-Wärmerückgewinners mit einer hohen thermischen Effizienz verbindet. Der erste Konstruktionsentwurf, dargestellt in Abbildung 4, basiert auf einem Querstromventilator, der zwei Luftströme simultan fördert. Warme Abluft wird in der unteren Ebene durch die Schaufelblätter hindurch angesaugt, wechselt innerhalb des Ventilators die Ebene und wird in der oberen Ebene wiederum durch die Schaufelblätter hindurch ausgeblasen. Die Außenluft durchläuft den Querstromventilator gegengleich. Sie wird in der oberen Ebene angesaugt, wechselt im Zentrum ebenfalls die Ebene, und wird auf der unteren Ebene wieder ausgeblasen.

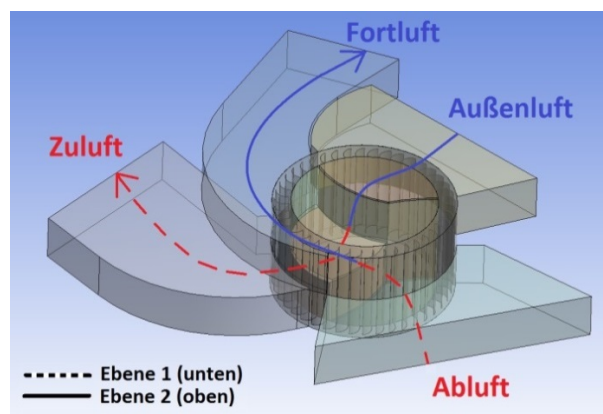


Abbildung 4: Erster Konstruktionsentwurf des CHRF. (Pfluger et al. 2013a)

Die Schaufelblätter des Querstromventilators fungieren hierbei ähnlich wie beim Frivent-Wärmerückgewinner als Wärmeübertrager. Jeweils die Hälfte der Temperaturänderung wird in der unteren (Ab-/Zuluft) und in der oberen Ebene (Außen-/Fortluft) im wesentlich effizienteren Gegenstromprinzip vollzogen. Zur Optimierung von geometrischen Parametern

wurden in erster Näherung Auslegungskriterien von Radialventilatoren verwendet. Durch die Berechnung von Ein- und Austrittsgeschwindigkeitsvektoren (*Klemm, 2005*), dargestellt in Abbildung 5, kann die idealisierte logarithmische Ausströmspirale angenähert werden. Die Geometrie des spiralförmigen Auslasses kann mit Hilfe von Gleichung 1 beschrieben werden (*Carolus, 2012*).

$$r(\varphi) = r_2 e^{\varphi \tan(\alpha_1)} \quad (1)$$

Der Radius des spiralförmigen Auslasses r wird als Funktion des Außenradius des Ventilators r_2 und dem Winkel zwischen Umlaufgeschwindigkeit des Ventilators und Absolutgeschwindigkeit der Luft beim Schaufelaustritt α_1 dargestellt.

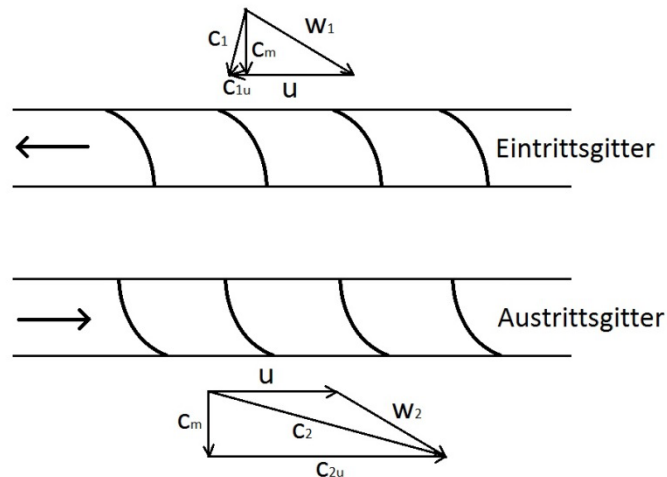


Abbildung 5: Idealisierte Darstellung der Geschwindigkeitsdreiecke bei Ein- und Ausströmung durch die Ventilatorblätter. (*Klemm, 2005*)

Darüber hinaus müssen für einen strömungsmechanisch effizienten Betrieb die Ein- und Austrittswinkel der Ventilatorblätter optimiert werden. Nach *Roth (1981)* zeigen experimentelle Untersuchungen, dass Austrittswinkel im Bereich von 170° in Kombination mit Eintrittswinkel von 80° optimale Betriebsdaten liefern. In Abbildung 6 und 7 sind experimentelle Untersuchungen von Radialventilatoren bei unterschiedlichen Ein- und Austrittswinkeln dargestellt.

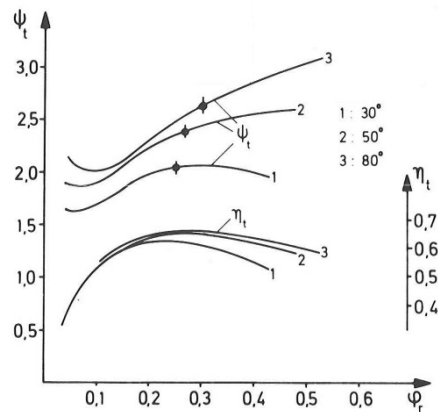


Abbildung 6: Verlauf von Druckzahl und Wirkungsgrad bei Variation des Eintrittswinkels in Abhängigkeit des Volumenstroms. (Roth, 1981)

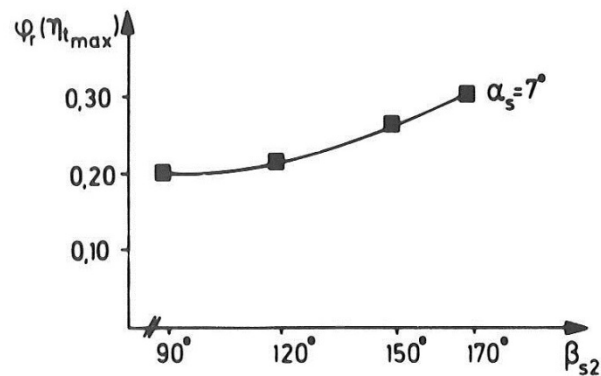


Abbildung 7: Verlauf des Wirkungsgrades bei Variation des Austrittswinkels. (Roth, 1981)

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Anzahl der erforderlichen Schaufelblätter. Aus strömungsmechanischer Sicht liegt das Optimum für Radialventilatoren im Bereich von 20-40 Blättern (Roth, 1981). Eine weitere Verringerung der Blattzahl führt zu einem rapiden Abfall des Wirkungsgrades, dargestellt in Abbildung 8. Bei Erhöhung der Blattzahl sinkt der Wirkungsgrad nur gering und bleibt annähernd konstant. Der strömungsmechanische Vorteil der erhöhten Blattzahl wird durch die größere Versperrung des freien Strömungsquerschnitts wieder aufgehoben.

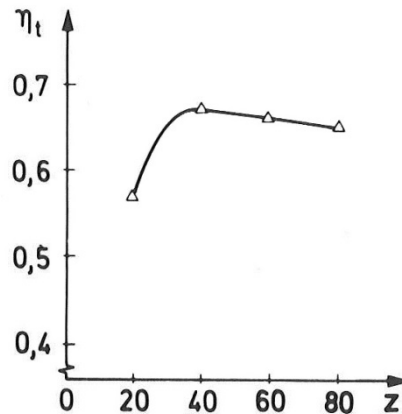


Abbildung 8: Verlauf des Wirkungsgrades eines exemplarischen Radialventilators bei Variation der Schaufelzahl. (Roth, 1981)

Da der Konstruktionsentwurf des CHRf für das Erreichen hoher Temperaturbereitstellungsgrade eine hohe Anzahl an Schaufelblätter erfordert, müssen die Blätter sehr dünn ausgeführt werden, um einen möglichst hohen strömungsmechanischen Wirkungsgrad zu erzielen. Darüber hinaus müssen die Ein- und Austrittswinkel gegenüber den Auslegungskriterien (Roth, 1981) an die neuen Anforderungen angepasst werden, da der freie Strömungsquerschnitt bei hoher Blattzahl einen stärkeren Einfluss ausübt. Neben der strömungsmechanischen Optimierung des Konstruktionsentwurfs muss auch das thermische Verhalten berücksichtigt werden. Mit Hilfe der thermischen Betrachtung von Regeneratoren (VDI-Wärmeatlas, 2006) kann näherungsweise das Verhalten des Konstruktionsentwurfs abgeschätzt werden. Durch Parameterstudien eines Referenzfalls, dargestellt in Abbildung 9 und 10, kann der maximal erreichbare Temperaturbereitstellungsgrad in Abhängigkeit der Blattzahl und der Blattdicke abgeschätzt werden.

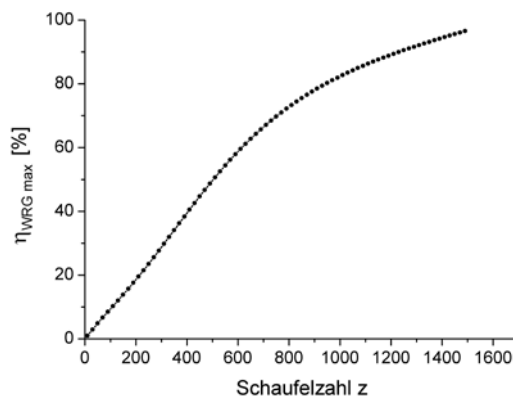


Abbildung 9: Maximal erreichbarer Temperaturbereitstellungsgrad in Abhängigkeit der Schaufelzahl bei einer Blattdicke von 0.1 mm. (Pfluger et al., 2013a)

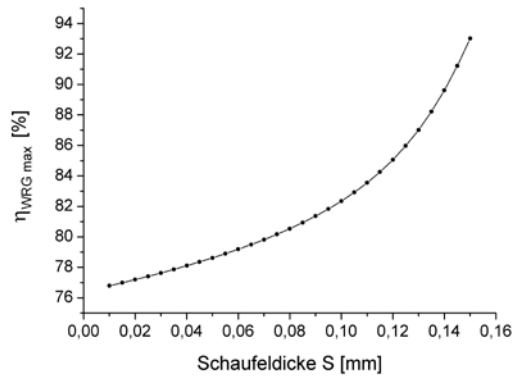


Abbildung 10: Maximal erreichbarer Temperaturbereitstellungsgrad in Abhängigkeit der Blattdicke bei einer Schaufelzahl von 1000. (Pfluger et al., 2013a)

Der höhere Temperaturbereitstellungsgrad bei Erhöhung der Blattdicke ist auf den geringeren freien Strömungsquerschnitt bei gleichbleibender Schaufelzahl zurückzuführen. Der geförderte Luftstrom wurde während der Variation als konstant angenommen. Um abzuschätzen welche Blattdicke und somit welche Wärmekapazität erforderlich ist wurde eine weitere Parameterstudie in Abhängigkeit der Blattdicke durchgeführt. Während der Variation wurde die Blattzahl geringfügig variiert um den Schaufelabstand konstant zu halten. Bei Verwendung von Kunststoff als Material für die Ventilatorblätter und einem konstanten Schaufelabstand von 0.7 mm liegt die erforderliche Blattdicke im Bereich von 1 μm , siehe Abbildung 11. Die Wärmeleitfähigkeit spielt dabei nur eine untergeordnete Rolle, da Wärme nicht durch die Schaufelblätter hindurch übertragen werden muss, sondern auf der gleichen Seite wieder abgegeben wird. Eine hohe Wärmeleitfähigkeit wäre außerdem nachteilig, da das Temperaturprofil entlang der Schaufelblätter abgebaut wird.

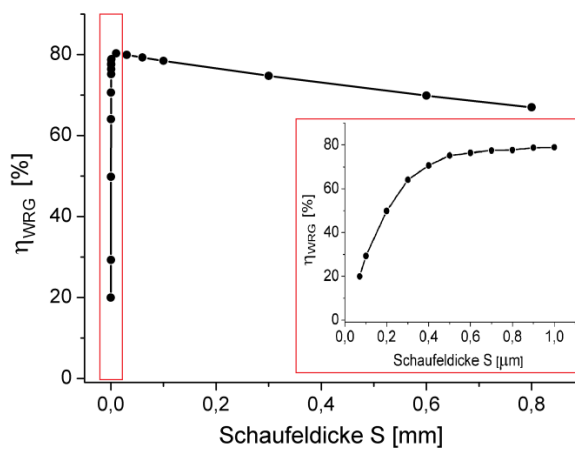


Abbildung 11: Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Schaufeldicke bei einem konstanten Schaufelabstand von 0.7 mm. (Pfluger et al., 2013a)

Um das Konzept des CHRF simulationstechnisch abzubilden und zu optimieren wird im ersten Schritt der bereits am Markt verfügbare Frivent-Wärmerückgewinner mittels CFD-Simulation untersucht und das Simulationsmodell mit labortechnischen Untersuchungen evaluiert. Um die Materialparameter des rotierenden porösen Mediums genauer zu ermitteln und anschließend im Gesamtmodell zu implementieren, wird der Widerstandskoeffizient messtechnisch untersucht. Dabei wird ein vorgegebener Volumenstrom durch das poröse Material geleitet und der entstehende statische Druck vor dem porösen Medium messtechnisch ermittelt. Durch ein separates Simulationsmodell wird der Versuchsaufbau abgebildet und der Widerstandskoeffizient des porösen Mediums variiert um den resultierenden statischen Druck an die labortechnischen Ergebnisse anzunähern. In Abbildung 12 ist der gemessene und simulationstechnisch ermittelte statische Druck in Abhängigkeit des Volumenstroms abgebildet.

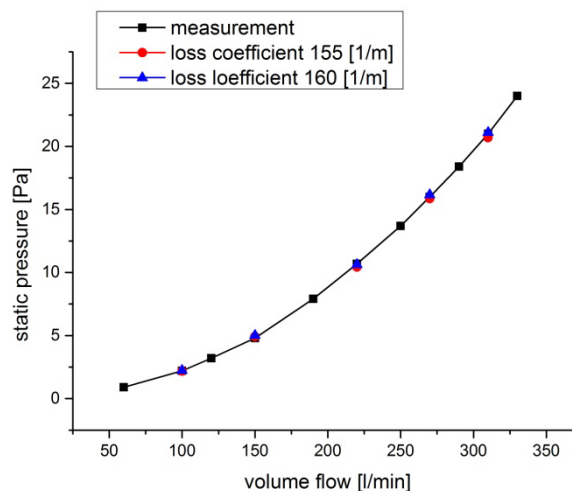


Abbildung 12: Parameterstudie und labortechnische Untersuchung des Widerstandskoeffizienten des porösen Mediums. (Speer, 2014)

Bei einem Widerstandskoeffizienten zwischen $155\text{-}160\text{ m}^{-1}$ werden die messtechnisch ermittelten Ergebnisse bestmöglich abgebildet. Das poröse Material wird mit den somit ermittelten Parametern in das Gesamtmodell implementiert. Abbildung 13 zeigt den Frivent-Wärmerückgewinner bei geöffneter Abdeckung und das Geschwindigkeitsvektorfeld der CFD-Simulation. Die drei Betriebspunkte des Frivent-Wärmerückgewinners liegen im Drehzahlbereich von 15-22 Hz und fördern frei blasend einen Volumenstrom von jeweils 100-150 m³/h. Im Bereich der Außenluftzufuhr entsteht ein relativer statischer Unterdruck von -15 bis -34 Pa. Die in Abhängigkeit des jeweiligen Betriebspunkts gemessene Drehzahl

dient als Eingangsparameter für das Simulationsmodell. Die gemessenen Volumenströme und der relative statische Unterdruck im Außen-/Abluftbereich werden mit den simulationstechnisch ermittelten Ergebnissen verglichen. In Abbildung 14 werden die Ergebnisse der messtechnischen Untersuchung und des Simulationsmodells gegenübergestellt. Die Abweichung der simulationstechnisch ermittelten Volumenströme liegt im Bereich von 1.5-2.7%, für den ermittelten relativen statischen Unterdruck beträgt die Abweichung 0.4-1.9%.

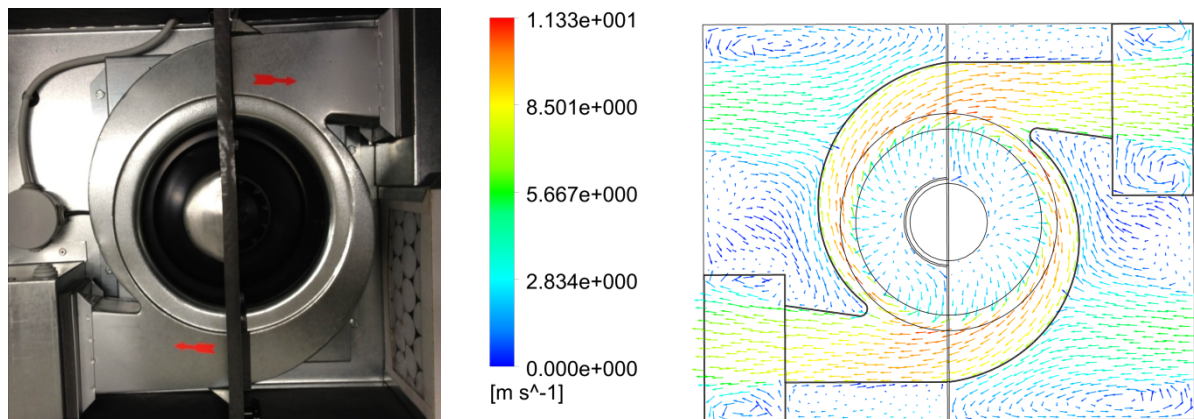


Abbildung 13: Foto des Frivent-Wärmerückgewinners (links) und projiziertes Geschwindigkeitsvektorfeld der CFD-Simulation (rechts). (Speer, 2014)

	measurement	simulation	measurement	simulation
operating point	rot. speed [Hz]	rot. speed [Hz]	flow rate exhaust air [m^3/h]	flow rate exhaust air [m^3/h]
level 1	15,2	15,2	103	104,5
level 2	19,7	19,7	136	137,8
level 3	22	22	150	154,1

	measurement	simulation	measurement	simulation
operating point	rot. speed [Hz]	rot. speed [Hz]	stat. pressure outdoor air [Pa]	stat. pressure outdoor air [Pa]
level 1	15,2	15,2	-15,9	-15,6
level 2	19,7	19,7	-27,2	-27,1
level 3	22	22	-34	-33,8

Abbildung 14: Vergleich der labortechnischen Untersuchung mit den Ergebnissen des Simulationsmodells des Frivent-Wärmerückgewinners für den Fortluftvolumenstrom und den relativen statischen Unterdruck im Bereich der Außenluftansaugung. (Speer, 2014)

Darüber hinaus wurde der Frivent-Wärmerückgewinner im Differenzklimastand installiert und der maximale Temperaturbereitstellungsgrad gemessen. Dieser liegt wie erwartet für

übliche Einsatzbedingungen im Bereich von 45% und stimmt in etwa mit den Angaben (Frivent GmbH, 2011) überein.

In weiterer Folge wird der Konstruktionsentwurf des CHRf im Simulationsmodell abgebildet und untersucht. In der in Abbildung 4 dargestellten Form kommt es zu Problemen beim Ausbilden beider Luftströme. Dem im Zentrum verlaufenden Luftstrom (Außen-/Zuluft) muss auf Kosten des Ab-/Fortluftstroms wesentlich mehr Platz eingeräumt werden. Ein Gleichgewicht beider Luftströme kann immer nur auf eine bestimmte Drehzahl hin ausgelegt werden. Um diese Problemstellung zu lösen wurde ein symmetrisches Strömungskonzept entworfen, dieses ist in Abbildung 15 dargestellt.

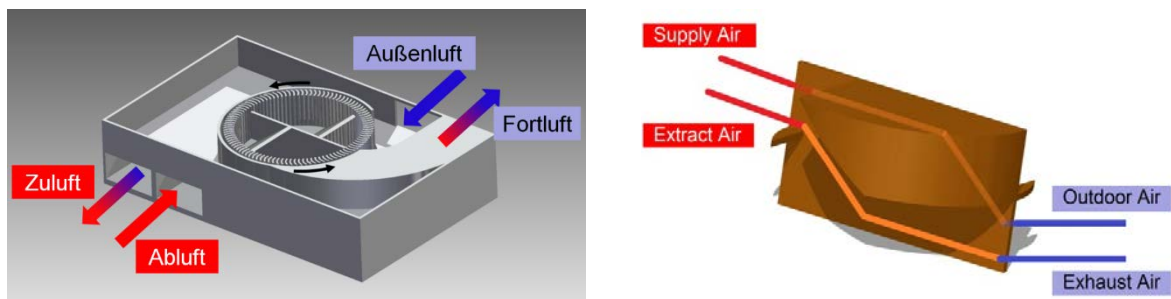


Abbildung 15: Modifiziertes Konzept mit symmetrischer Anordnung der beiden Luftströme (links, Speer et al., 2014) und Innenkonstruktion mit Luftleitsystem (rechts, Speer, 2014).

Erste Untersuchungen des symmetrischen Konzepts mittels CFD-Simulation mit implementiertem 300-Blatt-Ventilator zeigen, dass sich beide Luftströme gleichmäßig ausbilden. Der projizierte Strömungsverlauf ist in Abbildung 16 dargestellt. Die Simulationsergebnisse lassen somit auf ein funktionsfähiges Konzept schließen.

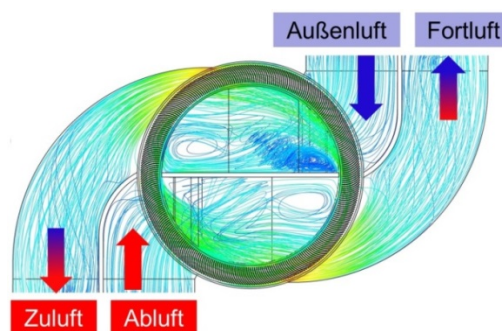


Abbildung 16: Numerische Strömungssimulation (CFD) des modifizierten symmetrischen Konzepts. (Zgaga et al., 2014)

Um in weiterer Folge das modifizierte Konzept simulationstechnisch optimieren zu können wird ein parametrisiertes Modell aufgebaut. Der resultierende Volumenstrom und der strömungsmechanische Leistungsbedarf des Ventilators können für unterschiedliche Ein- und Austrittswinkel der Ventilatorblätter bestimmt werden. Die Definition des Eintrittswinkels α und des Austrittswinkels β ist in Abbildung 17 dargestellt. Die Ergebnisse der Parameterstudie zeigen, dass bei einem Austrittswinkel von 150° der geförderte Volumenstrom sein Maximum erreicht. Da der strömungsmechanische Leistungsbedarf jedoch ebenfalls ansteigt wird als Kompromiss ein Austrittswinkel von 140° zur Auslegung des CHRF herangezogen. Während der Variation des Austrittswinkels wurde ein fixierter Eintrittswinkel von 70° festgelegt. Bei Variation des Eintrittswinkels zeigt der geförderte Volumenstrom sein Maximum im Bereich von 90° . Der strömungsmechanische Leistungsbedarf bleibt annähernd konstant. Die Parameterstudien für Ein- und Austrittswinkel sind in Abbildung 18 dargestellt. Die Konfiguration mit einem Eintrittswinkel von 90° und einem Austrittswinkel von 140° wird somit in weiterer Folge für die Optimierung des modifizierten CHRF-Konzepts herangezogen. Diese Einstellung weicht von den experimentellen Erkenntnissen für übliche Radialventilatoren (*Roth, 1981*) (Eintrittswinkel 80° , Austrittswinkel 170°) ab. Die Optimierung der Ein-/Austrittswinkel wurde mit einem 300-Blatt-Ventilator durchgeführt. Bei Erhöhung der Blattzahl kann sich die optimale Einstellung ändern, da einer erhöhten Verperrung des freien Strömungsquerschnitts am Austrittsbereich durch eine Reduktion des Austrittswinkels entgegengewirkt werden kann.

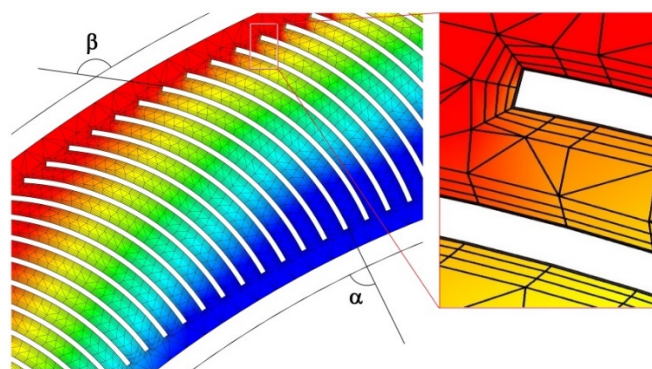


Abbildung 17: Ausschnitt des vernetzten CFD-Modells des Ventilators mit farblich dargestelltem statischen Druckverlauf. Die Definition des Eintrittswinkels α und des Austrittswinkels β ist dargestellt. (*Speer et al., 2014*)

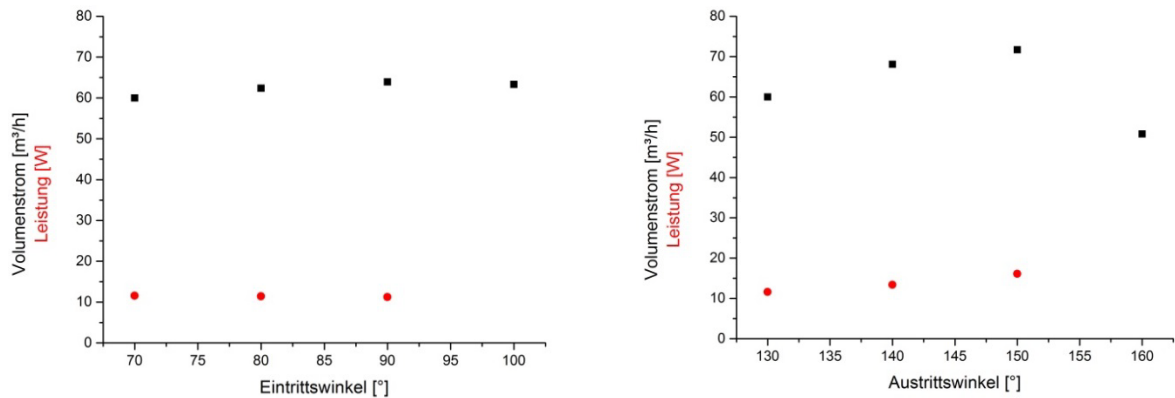


Abbildung 18: Volumenstrom und strömungsmechanischer Leistungsbedarf des Ventilators in Abhängigkeit von Ein- und Austrittswinkel. Die Variation des Eintrittswinkels (links) wurde mit einem festgelegten Austrittswinkel von 130°, die Variation des Austrittswinkels (rechts) bei einem festgelegten Eintrittswinkel von 70° durchgeführt. (Speer et al., 2014)

Durch die simulationstechnischen Ergebnisse und Optimierung des Konzepts wurde ein erstes Miniatur-Funktionsmuster entwickelt. Das komplette Gehäuse mit Innenkonstruktion sowie ein Miniatur-Ventilator mit 30 Blatt wurden mittels 3D-Druckverfahren im Maßstab 1:4 angefertigt und wie in Abbildung 19 dargestellt zusammengesetzt. Mittels Rauchgastests konnte die Funktionsfähigkeit bereits gezeigt werden, obwohl sich die strömungsmechanischen Eigenschaften durch die Maßstabsänderungen ebenfalls verändern.



Abbildung 19: Miniatur-Funktionsmuster mittels 3D-Druckverfahren (links) und Rauchgasversuch des zusammengesetzten Systems (rechts). (Speer, 2014)

Vor Anfertigung eines maßstäblichen Funktionsmusters müssen Vorrichtungen für einen automatisierten Volumenstrombalanceabgleich und ein Sommer-Bypass Modus ermöglicht werden. Da bei handelsüblichen dezentralen Lüftungssystemen beide Luftströme von einem separaten Ventilator erzeugt werden, kann die Volumenstrombalance durch unterschiedliche

Drehzahlen der beiden Ventilatoren erreicht werden. Da dieser Mechanismus beim CHRf nicht angewendet werden kann und eine externe Drossel mangels strömungsmechanischer Effizienz nicht die ideale Lösung ist, wird eine Klappe mit Irisblende im Bereich der Ab- und Außenluft verbaut. Bei geschlossener Irisblende folgt der gesamte Luftstrom der Hauptströmung, dargestellt in Abbildung 20. Bei geöffneter Blende wird ein Teil des Luftstroms nicht zur Hauptströmung umgelenkt, sondern folgt der grün gekennzeichneten Bypassströmung und durchläuft den Ventilator ohne die Ebene zu wechseln. Im Inneren des Ventilators trifft die Hauptströmung nach dem Ebenenwechsel wiederum auf die Bypassströmung und wird zusammen mit ihr ausgeblasen. Die Irisblende im benachteiligten Luftstrom wird nun so weit geöffnet bis die Balance wiederhergestellt ist. Um den Sommer-Bypass zu aktivieren, können die rot markierten Klappen mit implementierten Irisblenden im Ab- und Außenluftbereich umgeklappt werden. Die beiden Hauptströme (Außen-/Zuluft und Ab-/Fortluft) durchlaufen nun den Ventilator in unterschiedlichen Ebenen ohne Ebenenwechsel. Nur die für die Einstellung der Balance notwendige Bypassströmung durchläuft den Ventilator mit Ebenenwechsel und trägt zur Wärmerückgewinnung bei.

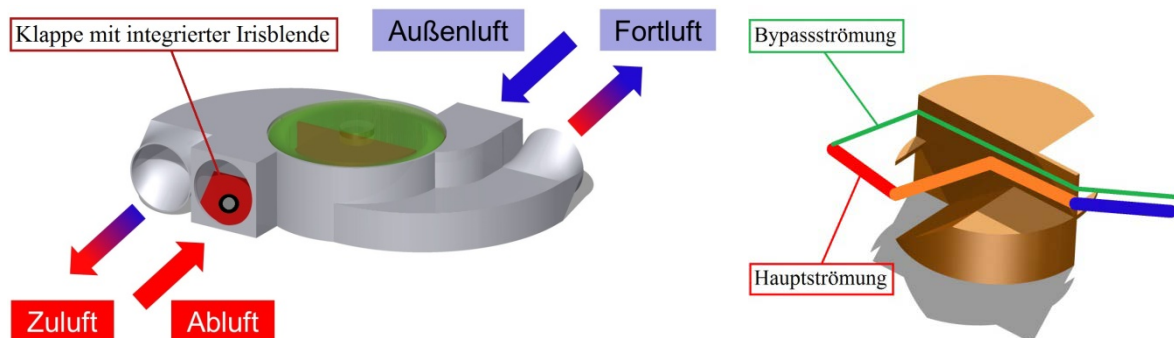


Abbildung 20: Umsetzung des Balanceabgleichs (links) und Strömungsführung im Inneren des Ventilators (rechts). (Speer et al., 2014)

Für den Antrieb des Ventilators wird ein bürstenloser Gleichstrommotor vorgesehen. In einer internen Regelschleife wird mittels motorintegrierter Hallsensoren die momentane Drehzahl bestimmt und bei Bedarf nachgeregelt. Durch im Fort- und Zuluftbereich montierte Staukreuze kann sowohl der Volumenstrom als auch die Balance geregelt werden. Um den Volumenstrom exakt bestimmen zu können müssen die aus dem Differenzdruck berechneten Volumenströme mit Hilfe einer einmalig bestimmten Kennlinie korrigiert werden, da auf Grund der kompakten Abmessung im Montagebereich noch keine gleichmäßige Strömung auftritt. Die gesamte Systemtopologie zum modifizierten symmetrischen Lüftungskonzept ist

in Abbildung 21 dargestellt. Mittels CO₂-Sensor im Abluftbereich wird die Raumluftqualität abgeschätzt und dient u.a. als Eingangsgröße für die Regelung. Die in der Stellklappe verbaute Irisblende wird mittels Schrittmotor angesteuert, welcher bei geregelter Volumenströmbalance durch das Haltemoment auch im stromlosen Zustand eingesetzt werden kann und somit Energie einspart. Unterschiedliche Betriebsmodi können vom Nutzer mittels MMI (Man-Machine-Interface) eingegeben, sowie Messdaten und Zustände visualisiert werden. Darüber hinaus können bei Bedarf einzelne Verbrauchermodule des Systems mit Hilfe eines integrierten Relaismoduls vom Netz genommen werden um Versorgungsenergie einzusparen (Zgaga et al., 2014). Der Energieverbrauch eines derartigen Lüftungssystems kann durch eine flexible Regelung wesentlich gesenkt werden (Mossooly et al., 2009). Die Ergebnisse in Nassif (2012) zeigen, dass in Abhängigkeit der Lage des Gebäudes, durch eine robuste CO₂-basierte Regelung, erhebliche Energieeinsparungen möglich sind. Wie in Zgaga (2014) beschrieben, wird beispielsweise in Komareji et al. (2009) ein anwendungsähnliches System erörtert. Mit Hilfe der in Komareji et al. (2007) entworfenen Regelstrategie wird der Betriebsfall getestet und evaluiert. In Abbildung 22 sind das Konzept des CHRF mit symmetrischer Strömungsführung sowie sämtliche mechatronische Komponenten dargestellt.

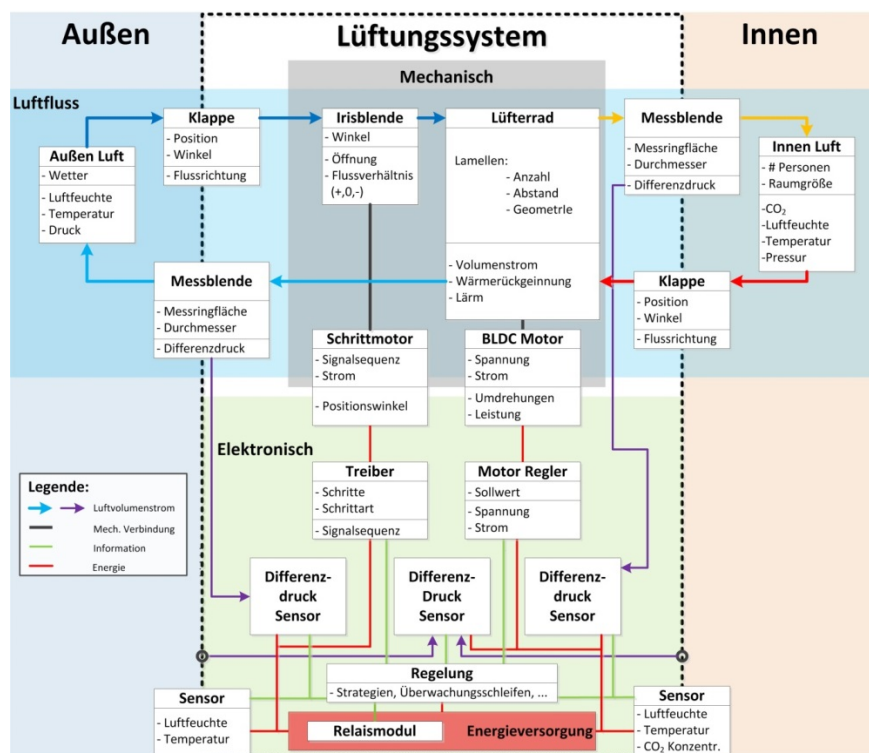


Abbildung 21: Systemtopologie des modifizierten symmetrischen Konzepts. (Zgaga et al., 2014)

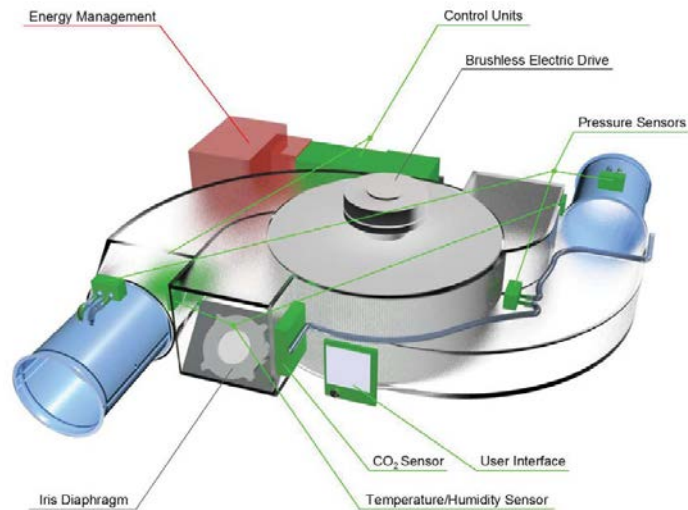


Abbildung 22: Konzeptzeichnung des CHRF mit symmetrischer Strömungsführung und Positionierung der mechatronischen Komponenten. (Zgaga *et al.*, 2014)

Vor der Fertigung des ersten maßstabsgetreuen Funktionsmodells wurde die Innenkonstruktion weiterentwickelt, um Leckageströmung durch zwischen den Schaufelblättern mittransportierte Luft zu verringern. Durch Spülkammern wird die mittransportierte Luft aufgefangen und in den Luftstrom zurückgeleitet. In Abbildung 23 ist das neuentwickelte modifizierte Konzept des CHRF, mit in der Innenkonstruktion implementierten Spülkammern, dargestellt. Der Verlauf des Hauptstroms ist in grün, die Rückführung des mittransportierten Luftstroms in rot dargestellt. (Speer *et al.*, 2015)

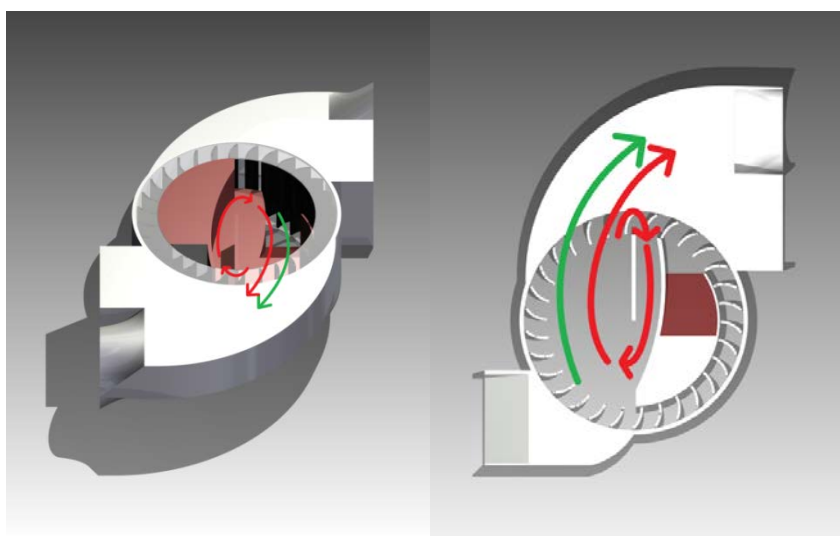


Abbildung 23: Neuentwickeltes Konzept des CHRF mit in der Innenkonstruktion implementierten Spülkammern (links) und Schnitt mit Darstellung der unteren Spülkammer (rechts).

Für die Fertigung des ersten maßstabsgetreuen Funktionsmusters wurde das Rapid-Manufacturing-Verfahren Stereolithographie gewählt. Das Gehäuse wurde 3-schichtig aufgebaut, um die mechatronischen Komponenten implementieren zu können. Darüber hinaus wurden Teilbereiche des Gehäuses mit Aussparungen versehen und zur besseren Einsicht mit transparenten Bauteilen ausgestattet. Die Innenkonstruktion mit implementierten Spülkammern und der Ventilator wurden separat mit Hilfe des Rapid-Manufacturing-Verfahrens gefertigt. Das CAD-Modell des Gesamtsystems mit implementierten mechatronischen Komponenten und die Konstruktion des CHRf-Funktionsmusters mittels Stereolithographie sind in Abbildung 24 dargestellt.

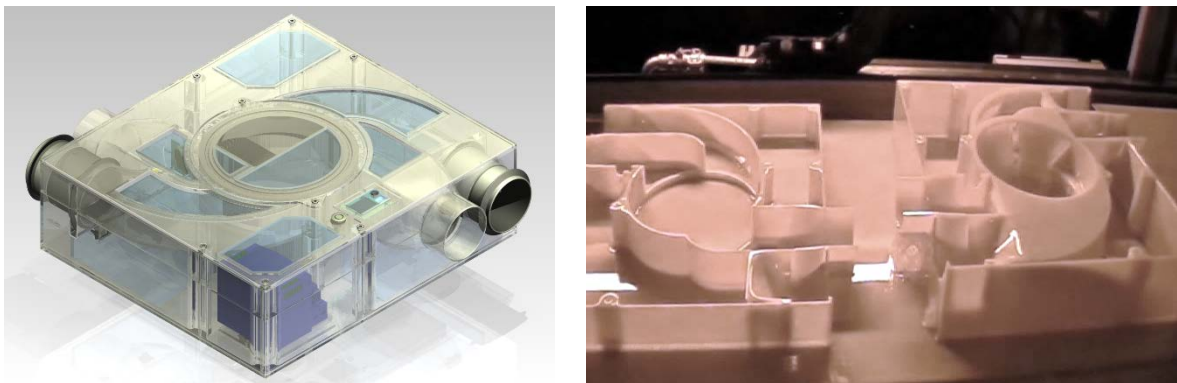


Abbildung 24: CAD-Modell des Gesamtsystems mit implementierten mechatronischen Komponenten (links) und Konstruktion des CHRf-Funktionsmusters mittels Stereolithographie (rechts). (Speer et al., 2015)

Bei der Fertigung des Ventilators sind dem Rapid-Manufacturing-Verfahren auflösungstechnische und stabilitätstechnische Grenzen gesetzt. Aus diesem Grund wurde der Ventilator mit einer reduzierten Blattzahl von 300 Blättern und einer Blattdicke von 0.85 mm gefertigt. Um den Strömungswiderstand des Ventilators zu bestimmen wurde ein vorgegebener Volumenstrom axial in den Ventilator geführt und radial durch einen Ausschnitt von 25 Schaufelblättern hindurch ausgeblasen. Dabei wird der sich einstellende statische Druck im Inneren des Ventilators messtechnisch ermittelt und mit den Ergebnissen des gleichen Versuchsaufbaus mittels CFD-Simulation verglichen. Die Parameterstudie wurde mit unterschiedlichen implementierten Turbulenzmodellen durchgeführt. Bei Verwendung des Shear-Stress Modells wird die Kennlinie der labortechnischen Untersuchung gut abgebildet. Bei Implementierung des k-epsilon Modells kommt es zu einem erheblich geringeren Strömungswiderstand. Durch Erhöhung der Blattdicke auf 1.05 mm wird die Kennlinie wiederum einigermaßen gut abgebildet. Die Kennlinien der labortechnischen Untersuchung und des

Simulationsmodells mit unterschiedlichen Turbulenzmodellen sind in Abbildung 25 dargestellt.

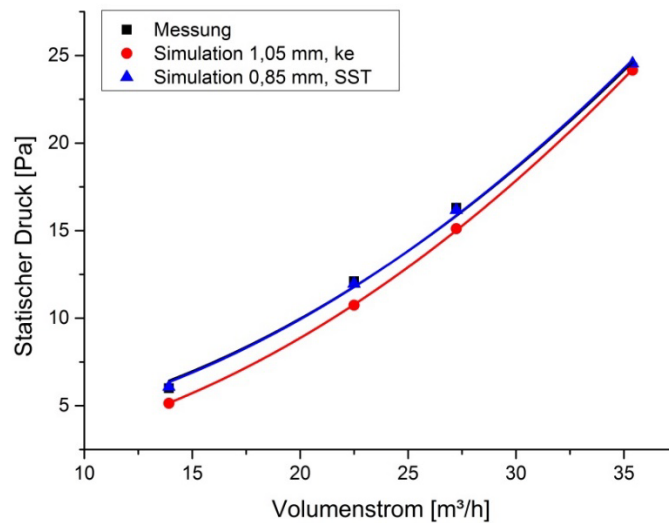


Abbildung 25: Maßstabsgetreues Funktionsmuster des CHRf mit symmetrischer Strömungsführung und implementierten mechatronischen Komponenten.

Nach dem Zusammensetzen der gefertigten Bauteile und der Implementierung von sämtlichen mechatronischen Komponenten (Motor, Sensorik, Stromversorgung, Regeleinheit, Bedienelement, Klappe mit Irisblende), dargestellt in Abbildung 26, wurde das Funktionsmuster messtechnisch untersucht.



Abbildung 26: Maßstabsgetreues Funktionsmuster des CHRf mit symmetrischer Strömungsführung und implementierten mechatronischen Komponenten. (Speer et al., 2015)

Im ersten Schritt erfolgte die Untersuchung des Funktionsmusters mit eingesetztem 300-Blatt-Ventilator ohne Innenkonstruktion und somit mit axialer Ansaugung ähnlich dem Funktionsprinzip des Frivent-Wärmerückgewinners. Dieser Betriebszustand wurde in glei-

cher Form im Simulationsmodell abgebildet. Da im Modell alle Wände idealisiert und der Strömungswiderstand von mechatronischen Bauteilen nicht implementiert ist, wird ein externer Strömungswiderstand an allen 4 Kanälen mit einer Pressung von jeweils 16.8 Pa (bei 50 m³/h) vorgegeben. Die Ergebnisse der labortechnischen Untersuchung werden in Abbildung 27 mit den Simulationsergebnissen verglichen.

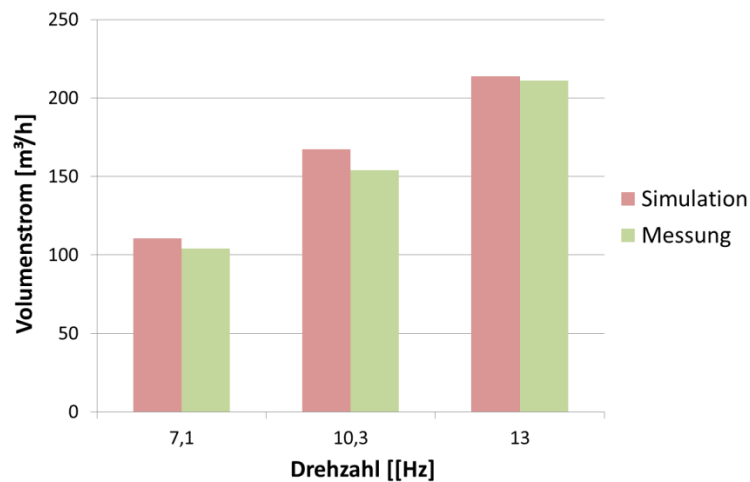


Abbildung 27: Vergleich des drehzahlabhängigen Volumenstroms von Simulation und Messung des CHRF mit axialem Einlass bei einer vorgegebenen externen Pressung von 16.8 Pa (bei 50 m³/h). (Speer et al., 2015)

Um in weiterer Folge die strömungsmechanischen Eigenschaften mit implementierter Innenkonstruktion und somit im CHRF-Betrieb untersuchen zu können, muss der 30-Blatt-Ventilator eingesetzt werden, da der Strömungswiderstand des 300-Blatt-Ventilators für diesen Betriebszustand zu hoch ist. Für die Auslegung wurde im CFD-Modell eine Schau-feldicke von 0.85 mm mit implementiertem k-epsilon Turbulenzmodell verwendet. Die Parameterstudie in Abbildung 25 hat jedoch gezeigt, dass das SST-Modell oder das k-epsilon Modell in Kombination mit einer erhöhten Blattdicke von 1.05 mm die Messergebnisse wesentlich besser abbilden, und somit der Druckabfall des 300-Blatt-Ventilators höher als erwartet ausfällt. Mit eingesetztem 30-Blatt-Ventilator wurde der CHRF strömungsmechanisch untersucht und die resultierenden Volumenströme aller Kanäle bei unterschiedlichen Drehzahlen gemessen. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Abbildung 28 dargestellt und zeigen in etwa 10% erhöhte Volumenströme von Zu- und Fortluft. Dies ist auf eine systemische Leckage zurückzuführen.

Drehzahl	Zuluft	Außenluft	Abluft	Fortluft
Hz	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h
13	70	66	65	73
10,25	59	58	53	65

Abbildung 28: Messtechnische Untersuchung des CHRf mit implementierter Innenkonstruktion und eingesetzten 30-Blatt-Ventilator. (Speer et al., 2015)

Der Vergleich mit den Resultaten des CFD-Modells wurde für eine modellierte systemische externe Pressung an allen 4 Kanälen von je 16.8 Pa (bei 50 m³/h) bzw. 5.0 Pa (bei 50 m³/h) durchgeführt. In Abbildung 29 sind die gemessenen und simulationstechnisch ermittelten gemittelten Volumenströme dargestellt.

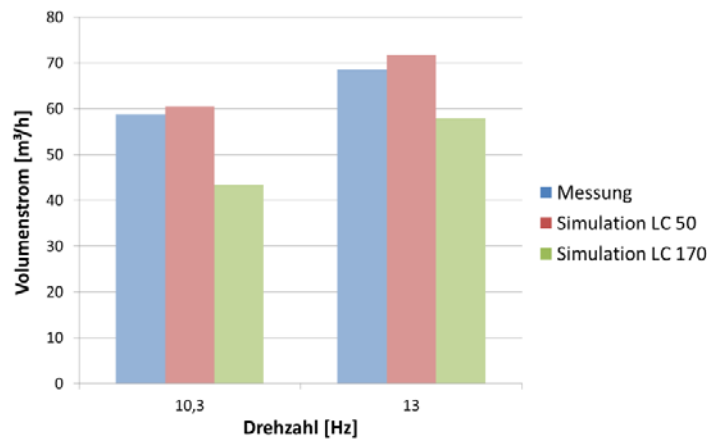


Abbildung 29: Vergleich von Simulation (rot/grün) und messtechnischer Untersuchung (blau) des CHRf mit 30-Blatt-Ventilator. Die Simulation wurde mit einer externen Pressung von 5.0 Pa (bei 50 m³/h) (rot) und 16.8 Pa (bei 50 m³/h) (grün) durchgeführt. (Speer et al., 2015)

Die Ergebnisse zeigen, dass bei einem externen Druckverlust von 16.8 Pa (bei 50 m³/h) die Volumenströme im Gegensatz zum Vergleich in Abbildung 27, um ca. 15 - 25% zu gering ausfallen. Bei Reduktion des externen Druckverlusts auf 5.0 Pa (bei 50 m³/h) stimmen die Ergebnisse von Simulation und Messung gut überein. Mögliche Ursachen für die Abweichung liegen in der systemischen Leckage von ca. 10%. Um das Funktionsmuster im CHRf-Betriebsmodus thermisch zu untersuchen wird der 300-Blatt-Ventilator eingesetzt. Zur strömungsmechanischen Unterstützung werden zusätzlich je ein Rohrventilator in die Kanäle implementiert. Das Funktionsmuster wurde im Differenzklimastand bei einer mittleren

Raumtemperatur von 5.5°C bzw. 25.8°C messtechnisch untersucht. Die Drehzahl des Ventilators beträgt 7 Hz, der geförderte Volumenstrom in etwa 25 m³/h. Der maximal mögliche Temperaturbereitstellungsgrad nach *Pfluger et al. (2013a)* beträgt in dieser Konfiguration 73%. Die Ergebnisse der messtechnischen Untersuchung sind in Abbildung 30 dargestellt.

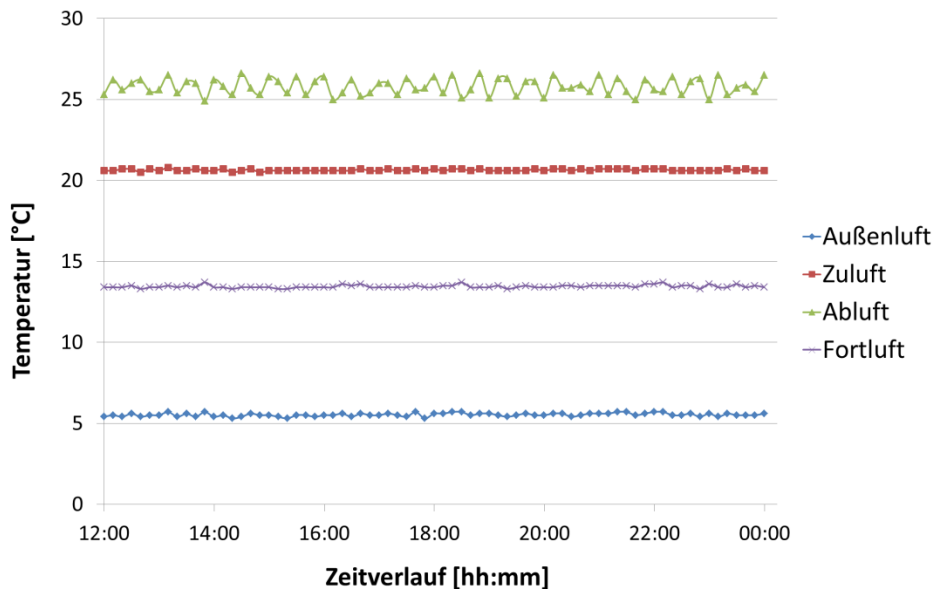


Abbildung 30: Untersuchung des Temperaturänderungsgrads des CHRF mit implementiertem 300-Blatt-Ventilator und externer Ventilation im Differenzklimastand. (*Speer et al., 2015*)

Die gemittelte Zulufttemperatur beträgt 20.6°C und die gemittelte Temperatur der Fortluft 13.5 °C. Der Mittelwert des fortluft- und zuluftseitigen Temperaturbereitstellungsgrads beträgt somit 67.7%. Bei der Angabe des Temperaturbereitstellungsgrads ist zu beachten, dass eine allfällige Leckage- und oder Kurzschlussströmung das Messergebnis beeinflussen kann. Zur Erreichung von höheren Temperaturbereitstellungsgraden müssen die Anzahl der Schaufelblätter und/oder die für die Wärmeübertragung wirksame Fläche weiter erhöht werden, ohne jedoch den Strömungswiderstand des Ventilators zu erhöhen. Ein möglicher Ansatz zur Erfüllung dieser Anforderungen könnte der Einsatz eines Querstromventilators mit geringerer Schaufelzahl in Kombination mit horizontalen Lagen oder in Kombination mit porösem Material sein. In Abbildung 31 sind die verschiedenen Varianten dargestellt.

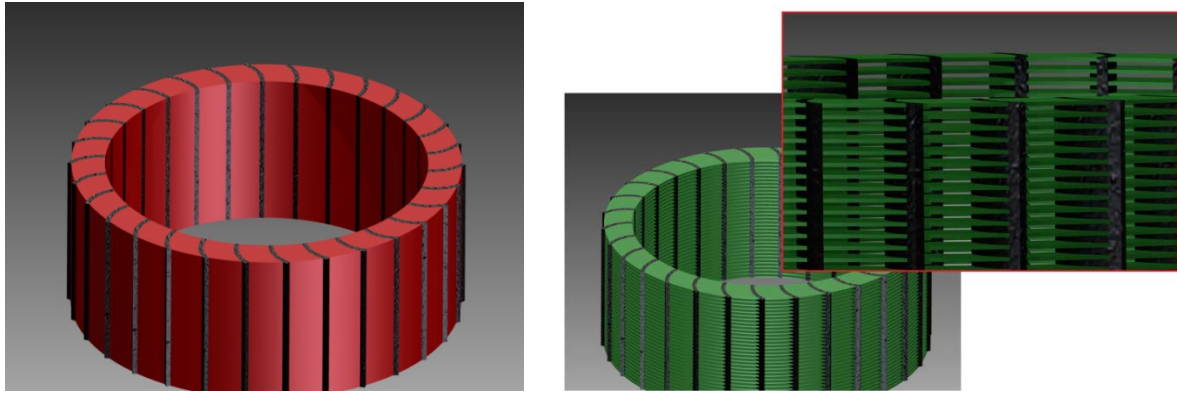


Abbildung 31: Querstromventilatoren mit geringer Blatzzahl und implementiertem porösen Material (links) und implementierten horizontalen Lagen (rechts). (Speer, 2015)

Durch die kompakten Abmessungen ist der CHRF besonders im Zuge der Gebäudesanierung für die Installation in der Fassade geeignet. In Abbildung 32 ist die Montage in der Fensterbrüstung raumseitig dargestellt. Zusätzliche Zu-/Ablufträume könnten mit Hilfe von Flachkanälen entlang der Bestandsinnenwand und in Kombination mit vorgesetzten Gipskartonwänden versorgt werden. Um optisch störende Einflüsse zu reduzieren, könnten die Außenluftansaugung versteckt unterhalb des Fensterbretts und der Fortluftauslass in der Laibung erfolgen.

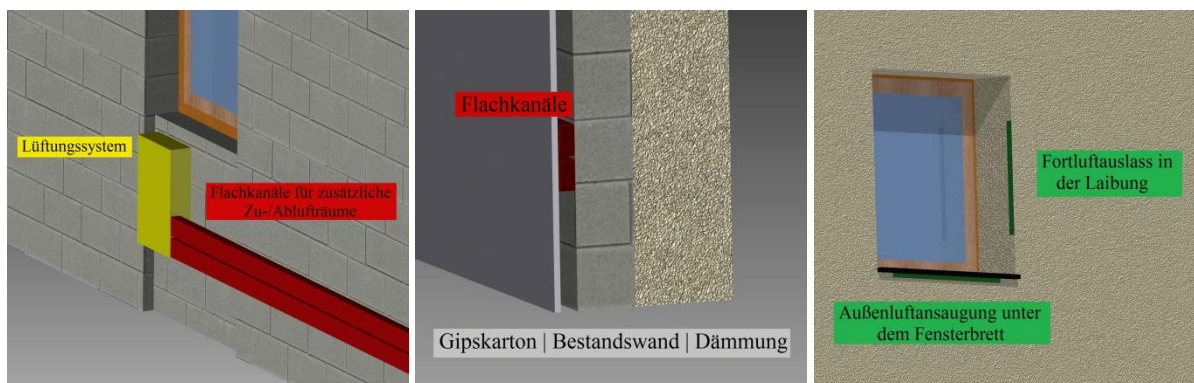


Abbildung 32: Einbausituation in der Fensterbrüstung (links), Versorgung von zusätzlichen Zu-/Ablufträumen mit Flachkanälen (Mitte) und Fortluftauslass/Außenlufteinlass (rechts). (Speer et al., 2014)

Des Weiteren besteht die Möglichkeit das Lüftungssystem in der Dämmebene zu montieren, Luftansaugung und Fortluftauslass unter dem Fensterbrett und in der Laibung zu platzieren und die Zu-/Abluftleitungen durch die Bestandswand zu führen. Diese Variante der Installa-

tion ist in Abbildung 33 dargestellt. In Kombination mit dem in *Pfluger et al. (2013b)* vorgestellten Ko-Axialrohr könnte die Durchführung durch die Bestandwand mit geringem Aufwand erfolgen.

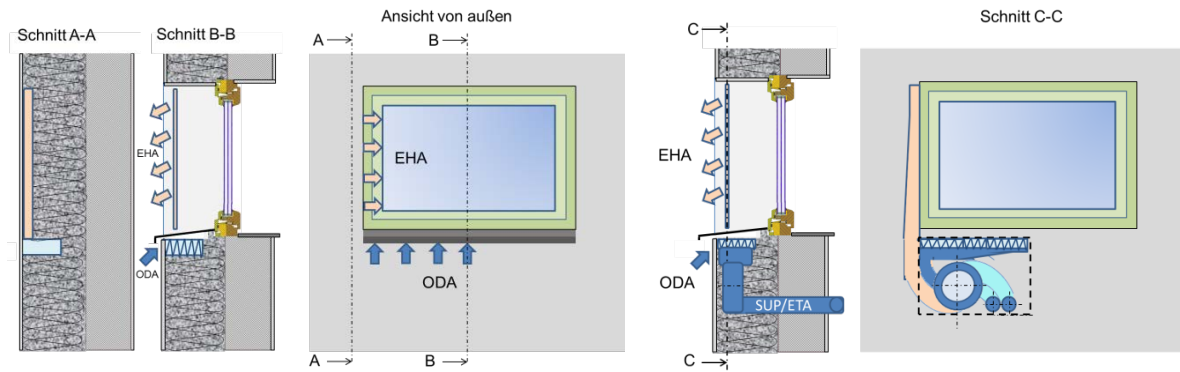


Abbildung 33: Querstromventilatoren mit geringer Blattzahl und implementiertem porösen Material (links) und implementierten horizontalen Lagen (rechts). (*Speer et al., 2015*)

5 Diskussion und Ausblick

Das Konzept, zwei Luftströme mit nur einem Querstromventilator anzutreiben welcher simultan als Gegenstromwärmeübertrager fungiert, konnte durch analytische thermische und strömungsmechanische Berechnungen in einen ersten Konstruktionsentwurf übergeführt werden. Mit Hilfe von numerischen Berechnungen (CFD), messtechnischen Untersuchungen und der Evaluierung von Simulationsmodellen wurde iterativ ein optimiertes Systemdesign entwickelt. Zeitgleich entwickelte Mechanismen zur Implementierung von Balanceabgleich und Sommerbypass sowie zur Reduktion von Leckage konnten im Zuge der Optimierung in das System eingebunden werden. Die Fertigung und anschließende messtechnische Untersuchung des CHRf-Funktionsmusters hat gezeigt, dass das neuentwickelte Konzept erfolgreich umgesetzt werden konnte. Zur Erreichung hoher Temperaturbereitstellungsgrade eignet sich das derzeitige Ventilatormodell jedoch nur begrenzt, da konzeptbedingt der verjüngende Strömungsquerschnitt entlang der Schaufelblätter zu einem höheren Strömungswiderstand führt. Möglichkeiten zur Lösung dieser Problemstellung könnten die Reduktion von Schaufelblättern in Verbindung mit der Implementierung von entweder zusätzlichen horizontalen Lagen oder alternativ mit porösem Material darstellen. Die Fertigung des Ventilators nimmt bei der Herstellung des CHRf auf Grund der hohen Anforderungen und der Komplexität der Geometrie eine Schlüsselrolle ein. Für eine kostengünstige Fertigung des Ventilators sind unterschiedliche Methoden, vom Spritzgussverfahren bis hin zur Bearbeitung von PET-Folien, denkbar. Die mögliche Einsparung von Kondensatablauf mit Leitung, Frostschutzregister mit Leistungselektronik, separatem Wärmeübertrager und eines zweiten Ventilators/Motors ermöglicht die Reduktion von Produktions- aber auch Betriebskosten. Weitere Vorteile werden durch Wandintegration und somit durch Entfall von Aufstellfläche sowie der Möglichkeit der Installation ohne Eingriff innerhalb einer bewohnten Wohnung ermöglicht. Durch die Skalierbarkeit des Konzepts erstreckt sich der Einsatzbereich vom Einzelraumgerät bis hin zu größeren Geräten für Klassenräume und Bürobauten aber auch Industrie- und Sporthallen. Der prinzipbedingte Nachteil des Systems, dass Leckage zwischen Ab- und Zuluft mit Hilfe von Spülkammern lediglich auf ein Minimum reduziert jedoch nicht vollständig unterbunden werden kann, schließt Anwendungsbereiche die eine vollständige Trennung der Luftströme erfordern aus. Fragestellungen in Bezug auf die akustische Optimierung des CHRf wurden bisher noch

nicht näher bearbeitet. Neben der Reduktion von Körperschall durch geeignete Lagerung beweglicher Bauteile und durch Optimierung von Abstrahlbereichen des Gehäuses sollte auch die Ausbreitung von Luftschall möglichst unterbunden werden. Dies könnte beispielsweise mit Hilfe von mikroperforierten Absorbern entlang der spiralförmigen Auslassbereiche umgesetzt werden. Des Weiteren müssen für die Skalierung der Baugröße des CHRf für unterschiedliche Einsatzbereiche/Volumenströme die geometrischen Parameter optimiert werden. Im Rahmen des FFG-Forschungsprojekts HeatXFan sollen die noch offenen Fragestellungen bearbeitet und somit das Ziel der Entwicklung eines gesamtenergetisch hocheffizienten, kompakten und kostengünstigen Lüftungssystems erreicht werden.

6 Überblick zu den Publikationen

Publikation 1 – Vorstellung des Konzepts und analytische Auslegung

Autoren:

Rainer Pfluger, Christoph Speer, Wolfgang Feist, Johannes Weger, Janez Zgaga

Titel:

Entwicklung eines hocheffizienten Ventilators mit integrierter Gegenstromwärmerückgewinnung für den Einsatz in der Gebäudemodernisierung

Veröffentlichte Publikation:

Bauphysik 35 (2013), H. 4, S. 242–249

Eigenanteil:

- Anfertigung des Konstruktionsentwurfs zur Umsetzung der Idee, das charakteristische Strömungsverhalten des Querstromventilators zu adaptieren, Ein- und Austritt der Luft durch die Schaufelblätter jedoch in zwei parallel versetzte Ebenen aufzuteilen.
- Darstellung von analytischen und experimentellen Erkenntnissen zur Konstruktion von Ventilatorblättern aus strömungsmechanischer Sicht.
- Darstellung des Berechnungsverfahrens zur Ermittlung der maximal möglichen thermischen Effizienz.
- Berechnung des Referenzfalls und Durchführung der Parameterstudien.
- Darstellung der Auslegung von spiralförmigen Gehäusen bei Radialventilatoren.
- Einsatzmöglichkeit in der Gebäudesanierung, Fazit und Ausblick.

Publikation 2 – Messung, Simulation und Evaluierung eines bestehenden Systems

Autor:

Christoph Speer

Titel:

Development of a highly efficient counterflow heat recovery fan

Veröffentlichte Publikation:

Proceedings Roomvent Conference, 2014

Publikation 3 – Simulationstechnische und analytische Entwicklung

Autoren:

Christoph Speer, Rainer Pfluger, Wolfgang Feist, Janez Zgaga, David Lanthaler

Titel:

Entwicklung eines dezentralen kompakten Lüftungssystems für den Einsatz in der minimal-invasiven Gebäudesanierung

Veröffentlichte Publikation:
Bauphysik 36 (2014), H. 5, S. 236–242

Eigenanteil:

Die Publikation besteht überwiegend aus Eigenleistung. Das Konzept zur Umsetzung von Balanceabgleich und Sommerbypass wurde in Zusammenarbeit mit den Koautoren der Universität Innsbruck erarbeitet, die mechatronische Ausführung/Regelung ist mehrheitlich den Koautoren zuzuordnen.

Publikation 4 – Mechatronische Umsetzung

Autoren:

Janez Zgaga, David Lanthaler, Christoph Speer, Rainer Pfluger

Titel:

Development of a decentralized and compact comfort ventilation system with highly efficient heat recovery for minimal invasive refurbishment of buildings

Veröffentlichte Publikation:

Proceedings 35th AIVC Conference, 2014

Eigenanteil:

Die Publikation befasst sich vorwiegend mit der mechatronischen Umsetzung/Regelung und möglichen Lüftungsstrategien und wurde mehrheitlich von den Koautoren des Fraunhofer Italia Research Instituts verfasst. Die Eigenleistung umfasst die Beschreibung des neuentwickelten Lüftungssystems und die Implementierung der Komponenten für Balanceabgleich und Sommerbypass.

Publikation 5 – Entwicklung, Messung, Simulation und Evaluierung des Funktionsmusters

Autoren:

Christoph Speer, Rainer Pfluger, Janez Zgaga, David Lanthaler, Florian Recla, Wolfgang Feist

Titel:

Entwicklung und messtechnische Untersuchung eines dezentralen kompakten Wärmerückgewinnungsventilators

Veröffentlichte Publikation:

Bauphysik 37 (2015), H. 3, S.179–185

Eigenanteil:

Die Publikation besteht überwiegend aus Eigenleistung. Die Anpassung der Simulationsmodelle zur Fertigung des Funktionsmusters und die mechatronische Umsetzung ist den Koautoren des Fraunhofer Italia Research Instituts zuzuordnen. Die Integration des Lüftungssystems in der Außenwand wurde in Zusammenarbeit mit den Koautoren der Universität Innsbruck erarbeitet.

Literaturverzeichnis

Andersen I. B., Lundqvist G. R., Proctor D. F.: „Human nasal mucosal function under four controlled humidities.“, Am. Rev. Respir. Dis. 106, pp. 438-449, 1972

Andersen I. B., Lundqvist G. R., Jensen P. L., Proctor D. F.: „Human response to 78-hour exposure to dry air“, Arch. Environm. Health 29, pp. 319-342, 1974

Carolus, T.: „Ventilatoren – Aerodynamischer Entwurf, Schallvorhersage, Konstruktion“, 3. Aufl., Wiesbaden: Springer-Vieweg, 2012

de Fries J. R.: „Heat Recovery Centrifugal Fan“, U.S. Patent No. 3,456,718, 1969

Domenig-Meisinger I., Willensdorfer A., Krauss B., Aschauer J., Lang G.: „Erstes Mehrfamilien-Passivhaus im Altbau, Passivhausstandard und –komfort in der Altbausanierung am Beispiel eines großvolumigen MFH in Linz“, Projektbericht, Haus der Zukunft, bmvit, 2007

Dornstetter S.: „Numerische und experimentelle Untersuchungen an Querstromventilatoren“, Univ. Karlsruhe (TH), Dissertation, 2002

Eck B.: „Ventilatoren“, 5. Aufl. Berlin Springer-Verlag, 1972

EPBD, European Parliament and the Council: „Directive 2010/31/EU of the European Parliament and Council of May 2010 on the energy performance of buildings“, Official journal of the European Union, 2010

Feist, W.: „Passivhäuser in der Praxis“, Bauphysik-Kalender 2007, D 4, pp. 675-741, Berlin: Ernst & Sohn, 2007

Feist W.: „Passivhaus-Definition“, Website, aufgerufen am 10/2015, 2014
URL: <http://passipedia.passiv.de/ppediade/grundlagen/passivhaus-definition>

Fiedler K., Hoyer H.: „Logistische Regressionsanalysen zum Einfluss von Wohnumwelt, Wohnhygiene und Lebensweise auf die Häufigkeit und Dauer akuter respiratorischer Erkrankungen bei Kleinkindern.“, Zbl. Hyg. 198, pp. 204-214, 1996

Frivent GmbH: „Frivent-Wärmerückgewinner- Technische Daten – Abmessungen“, Website: aufgerufen 10/2015, 2011
URL: <http://www.frivent.com/userdata/4034/uploads/Produkte/pdf/WRG-Katalog-DE-2011.pdf>

Greml A., Blümel E., Gössler A., Kapferer R., Leitzinger W., Suschek-Berger J., Tappler P.: „Evaluierung von mechanischen Klassenzimmerlüftungen in Österreich und Erstellung eines Planungsleitfadens“, Projektbericht, Haus der Zukunft, bmvit, 2008

Hahn N. V.: „Trockene Luft und ihre Auswirkungen auf die Gesundheit – Ergebnisse einer Literaturstudie“, Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 67, Nr 3, pp. 103-107, 2007

Hemmes J. H., Winkler K. C., Kool S. M.: „Virus survival as a seasonal factor in influenza and poliomyelitis.“, Nature 188, pp 430-431, 1960

Huber H.: „Wohnungslüftung.“, 1. Auflage, Faktor Verlag Zürich, 2006

Huber H.: „Komfortlüftung – Projektierung von einfachen Lüftungsanlagen in Wohnbauten“, Faktor Verlag AG Zürich, 2008

Klemm T.: „Numerische und experimentelle Untersuchungen an Ventilatoren mit hoher Leistungsdichte“, Universität Karlsruhe (TH), Dissertation, 2005

Koch W., Jennings B. H., Humphreys C. M.: „Environmental study II – Sensation responses to temperature and humidity under still air conditions in the comfort range“, ASHRAE Trans., Vol. 66, pp 264-287, 1960

Komareji M., Stoustrup J., Rasmussen H., Bidstrup N., Svendsen P., Nielsen F.: „Optimal Set-point Synthesis in HVAC Systems“, American Control Conference, pp. 5076-5081, 2007

Komareji M., Stoustrup J., Rasmussen H., Bidstrup N., Svendsen P., Nielsen F.: „Simplified Optimal Control in HVAC Systems“, 18th IEEE Multi-conference on Systems and Control, Saint Petersburg, 2009

Lubart J.: „Health care cost containment.“, Am. J. Otolaryngol. 1, pp. 81-83, 1979

Mahler B., Himmler R., Silberberger F., Matt C.: „Evaluierung dezentraler außenwandintegrierter Lüftungssysteme“, Abschlussbericht, Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, 2008

Mossoly M., Ghali K., Ghaddar N.: „Optimal control strategy for a multi-zone air conditioning system using a genetic algorithm“, Energy, Iss. 34, pp. 58-66, 2009

Nassif N.: „A robust CO₂-based demand-controlled ventilation control strategy for multi-zone HVAC systems“, Energy and Buildings, vol. 45, pp. 72-81, 2012

Passive House Institute: „EnerPHit and EnerPHit+i, Certification Criteria for Energy Retrofits with Passive House Components“, Website: aufgerufen 10/2015, 2013
Url: http://passiv.de/downloads/03_certification_criteria_enerphit_en.pdf

Pfluger R., Speer C., Feist W., Weger J., Zgaga J.: „Entwicklung eines hocheffizienten Ventilators mit integrierter Gegenstromwärmerückgewinnung für den Einsatz in der Gebäudemodernisierung“, BAUPHYSIK 35, Heft 4, pp. 242-249, 2013(a)

Pfluger R., Hasper W., Feist W., Rojas-Kopeinig G.: „Energy and Cost Efficient Ventilation Systems with Heat Recovery – State of the Art and Enhancement“, ASHRAE Transactions, Vol. 119, Issue 2, pp. 231-242, 2013(b)

Pfluger R., Feist W., Tietjen A., Neher A.: „Physiological impairments at low indoor air humidity.“, Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft, Ausgabe 3/2013, pp. 107-108, 2013(c)

Rojas G., Ochs F., Pfluger R., Sibille E., Speer C.: „Lüftungslösungen – kostengünstig und kompakt?“, erneuerbare energie, 2015-01: Gebäudelüftung, 2015

Rojas G., Pfluger R.: „Kaskadenlüftung – Luftaustauschwirkungsgrad in Wohnzimmern ohne eigene Zu- und Abluft“, Tagungsband, 18. Int. Passivhaustagung, 2014

Roth H. W.: „Optimierung von Trommelläufer-Ventilatoren“, Strömungsmechanik und Strömungsmaschinen – Mitteilung des Instituts für Strömungslehre und Strömungsmaschinen der Universität Karlsruhe (TH), Heft 29, Karlsruhe: Verlag G. Braun, 1981

Sale C. S.: „Humidification to reduce respiratory illnesses in nursery school children.“ South. Med. J. 65, pp. 882-885, 1972

Schöberl H., Hofer R.: „Reduktion der Wartungskosten von Lüftungsanlagen in Plus-Energiehäusern“, Projektbericht, Haus der Zukunft - bmvit, 2012

Sedlbauer K.: „Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen“, Dissertation Universität Stuttgart, 2001

Sibille E., Rojas G., Rothbacher M., Pfluger R., Malzer H. K.: „Doppelnutzen – Komfort- und kostenoptimierte Luftführungskonzepte für energieeffiziente Wohnbauten“, Endbericht bmvit, Schriftreihe 37/2013, 2013(a)

Sibille E., Pfluger R.: „Optimization of dwelling floor-plan configuration for cascade ventilation.“, Int. Passivhaus-Tagung, Tagungsband 17, 2013(b)

Sibille E., Rojas G., Pfluger R.: „Planungshinweise für komfort- und kostenoptimierte Luftführungskonzepte – Erweiterte Kaskadenlüftung“, Website mit Tool: aufgerufen 10/2015, 2014

URL: http://www.passipedia.de/passipedia_de/planung/tools

Sommer H., Johnen J., Schongen P., Stolze H.: „Adaptation of the tear film to work in air-conditioned rooms (office-eye syndrome).“, Ger. J. Ophthalmol. 3, pp. 406-408, 1994

Speer C., Pfluger R., Feist W., Zgaga J., Lanthaler D.: „Entwicklung eines dezentralen und kompakten Lüftungssystems für den Einsatz in der minimalinvasiven Gebäudesanierung“, BAUPHYSIK 36, Heft 5, pp. 236-242, 2014

Speer C., Pfluger R., Zgaga J., Lanthaler D., Recla F., Feist W.: „Entwicklung und messtechnische Untersuchung eines dezentralen und kompakten Wärmerückgewinnungsventilators“, BAUPHYSIK 37, Heft 3, pp. 179-185, 2015

Speer C.: „Rotor Concepts for the Counterflow Heat Recovery Fan“, Proceedings ICSB Conference, Barcelona, 2015 (in press)

Spiegel A.: „Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Hautrauhigkeit bei Patienten mit atopischem Ekzem“, Dissertation Universität München, 1998

Strauss R. H., McFadden E. R., Ingram R. H., Deal E. C., Jaeger J. J.: „Influence of heat and humidity on the airway obstruction induced by exercise in asthma.“, J. Clin. Invest. 61, Nr.2, pp 433-440, 1978

VDI-Wärmeatlas, 10. Aufl., Verein Deutscher Ingenieure VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC), Heidelberg: Springer-Verlag, 2006

Voss, K.: „Energieoptimiertes Bauen: Dezentrale Lüftung in Bürogebäuden - Mikroklimatische und baukonstruktive Einflüsse.“, Abschlussbericht, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, 2010

Zgaga J., Lanthaler D., Speer C., Pfluger R.: „Development of a decentralized and compact comfort ventilation system with highly efficient heat recovery for the minimal invasive refurbishment of buildings“, Proceedings 35th AIVC Conference, Poland, 2014