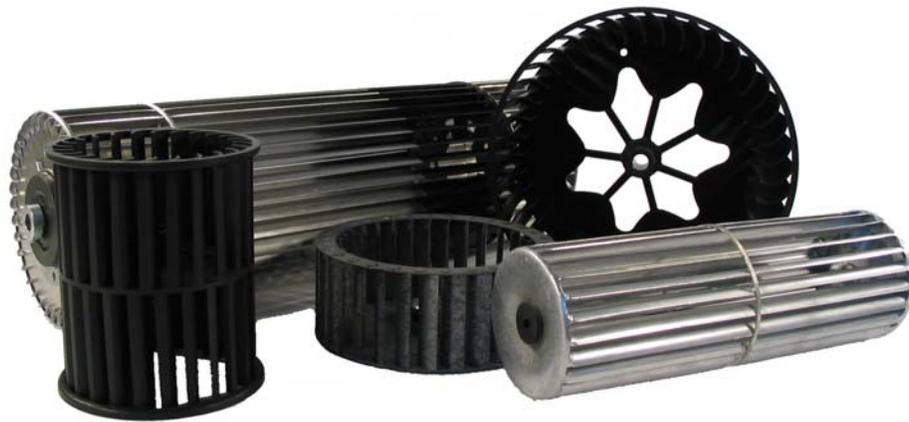


Numerische und experimentelle Untersuchungen an Ventilatoren mit hoher Leistungsdichte

von
Toni Klemm



Karlsruhe 2005

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	III
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	3
2 Arbeitsweise von Strömungsmaschinen	5
2.1 Laufradströmung	5
2.2 Energieumsetzung in einer Strömungsmaschine	6
2.2.1 Allgemeine Grundlagen	6
2.2.2 Hauptgleichungen hydraulischer Arbeitsmaschinen	7
2.3 Ähnlichkeitsbeziehungen und Kennziffern	10
3 Strömungsmaschinen mit hoher Leistungsdichte	15
3.1 Allgemeines	15
3.2 Querstromventilator	16
3.3 Trommelläuferventilator	20
3.4 Durchströmturbine	24
3.5 Alternative Anwendungskonzepte	25
4 Experimentelle Untersuchungen - Prüfstandstechnik	27
4.1 Kammerprüfstand	27
4.2 Bestimmung integraler Betriebsgrößen	29
4.3 Bestimmung lokaler Geschwindigkeitsverteilungen	30
4.4 Fehlerbetrachtungen	33
5 Numerische Strömungsberechnung	35
5.1 Prinzip	35
5.2 Mathematische Modellbildung	35
5.3 Diskretisierung und Lösungsverfahren	39
5.4 Randbedingungen	42
5.5 Netzgenerierung	43
5.6 Fehlerarten - Eigenschaften numerischer Verfahren	44

6	Querstromventilatoren	47
6.1	Voruntersuchungen - Frei rotierende Schaufelwalze	47
6.1.1	Einleitung	47
6.1.2	Experimentelle Untersuchungen	47
6.1.3	Numerische Modellbildung	51
6.1.4	Untersuchungsergebnisse	53
6.2	Spaltungengehäuse (Sz1)	58
6.2.1	Einleitung	58
6.2.2	Experimentelle Untersuchungen	58
6.2.3	Numerische Modellbildung	60
6.2.4	Untersuchungsergebnisse	62
6.3	Keilzungengehäuse (Kz1)	73
6.3.1	Einleitung	73
6.3.2	Experimentelle Untersuchungen	74
6.3.3	Numerische Modellbildung	76
6.3.4	Untersuchungsergebnisse	77
6.4	Keilzungengehäuse (Kz2)	84
7	Trommelläuferventilatoren	89
7.1	Variante 1 (Var1)	89
7.1.1	Einleitung	89
7.1.2	Entwurf eines Spiralgehäuses	90
7.1.3	Experimentelle Untersuchungen	92
7.1.4	Numerische Modellbildung	94
7.1.5	Untersuchungsergebnisse	96
7.2	Variante 2 (Var2)	101
7.2.1	Einleitung	101
7.2.2	Numerische Modellbildung	102
7.2.3	Experimentelle Untersuchungen	105
7.2.4	Untersuchungsergebnisse	105
8	Durchströmturbine	111
8.1	Einleitung	111
8.2	Numerische und experimentelle Untersuchungen	112
8.3	Untersuchungsergebnisse	113
9	Zusammenfassung	115
	Literaturverzeichnis	119

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Der Zwang zu niedrigen Produktionskosten und eingeschränktem Bauvolumen führt im Strömungsmaschinenbau zu Maschinen hoher Leistungsdichte, die durch kompakte Abmessungen und hohen Energieumsatz bei niedrigen spezifischen Drehzahlen charakterisiert werden. Daraus resultieren Laufradkonstruktionen, die eine im Verhältnis zum Durchmesser große Breite und Schaufelgitter mit großen Radienverhältnissen besitzen, wodurch sich eine charakteristische Trommel- oder Walzenform ergibt.

Im Ventilatorenbau führte dies zur Entwicklung von Trommelläufer- und Querstromventilatoren, welche sich im Vergleich zu konventionellen Radial- und Axialmaschinen durch hohe erreichbare Druckziffern und niedrige Geräuschpegel auszeichnen. Diese Konstruktionsweise bedingt jedoch einen relativ niedrigen Wirkungsgrad, sodass Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen den Einsatz im Normalfall auf eine maximale Antriebsleistung bis etwa 10kW beschränken. Die Durchströmung dieser Ventilatoren ist sehr komplex und durch stark asymmetrische sowie gekoppelte Stromfelder in Laufrad und Gehäuse gekennzeichnet. Ein Vergleich der Betriebseigenschaften der unterschiedlichen Ventilatorarten zeigt Abbildung 1.1.

Aufgrund der besonderen aerodynamischen Eigenschaften dieser Ventilatoren sind konventionelle Auslegungsmethoden nur unter sehr starken Einschränkungen anwendbar. Daher wurde in einer Vielzahl von experimentellen Parameterstudien für verschiedene Gehäuse und Laufradformen die Einzelmaschine optimiert und einfache Regeln zur Gestaltung hergeleitet. Problematisch hierbei ist jedoch, wenn aufgrund von Bauraum- oder fertigungstechnischen Beschränkungen keine optimale Gehäuseform gewählt werden kann. Ein weiterer Problembereich ist die Wechselwirkung der Strömung zwischen Ventilator und Kanalsystem, die bisher nur unzureichend abgeschätzt werden konnte.

Auch im Bereich der hydraulischen Kraftmaschinen ist das Erzielen einer hohen Leistungsdichte eine notwendige Anforderung an Auslegung und Konstruktion. Der wirtschaftliche Betrieb von Wasserturbinen im Bereich niedriger Fallhöhen und/oder Durchflussmengen erfordert einen besonders effizienten Energieumsatz in der Strömungsmaschine. Diese Eigenschaft erfüllt die Durchströmturbine, welche vorwiegend im Leistungsbereich von $1\text{...}1500\text{kW}$ Anwendung findet. Das Energie übertragende Medium durchströmt im Gegensatz zu Ventilatoren dabei nur einen definierten Teilbereich des Rotors, wodurch Plansch-

1 Einleitung

verluste vermieden und die Auslegung erheblich vereinfacht wird. Für die Nutzung von Windkraft sind im Bereich der Durchströmturbine noch keine Anwendungsfälle bekannt, die jedoch im Hinblick auf eine Schonung der nicht regenerativen Energieressourcen sinnvoll sind. Die Nutzung als Windturbine bedingt die volle Beaufschlagung des Laufrades mit dem energieübertragenden Medium, wodurch sich in Analogie zu den Querstromventilatoren komplexe Anforderungen an die aerodynamische Auslegung ergeben.

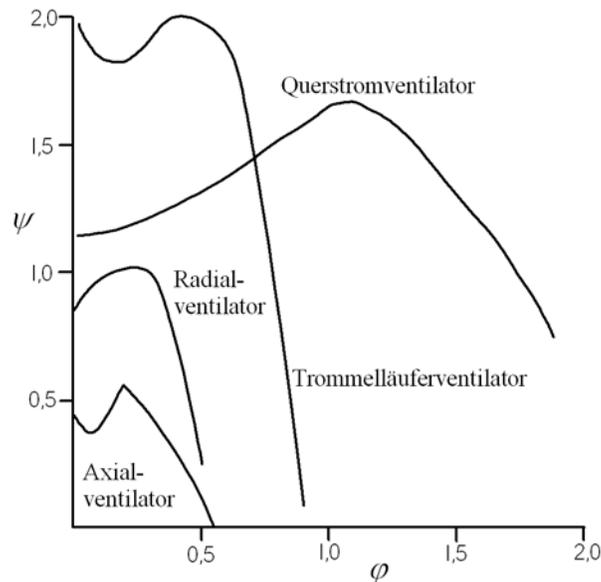


Abbildung 1.1: Betriebseigenschaften von Ventilatoren nach Osborne [48]

Zur Lösung der Auslegungsproblematik wird seit einigen Jahren der Ansatz der numerischen Strömungssimulation verfolgt. Aufgrund der Strömungseigenschaften und der Auslegung der Laufräder als Gleichdruckrad umfasst die Simulation das gesamte Laufrad und einen Großteil des Gehäuses, da die Umwandlung der kinetischen Energie der Strömung in Druckenergie erst in einem dem Laufrad nachgeschalteten Gehäuse bzw. Diffusor erfolgen kann. Die erforderliche instationäre Simulation der Laufraddrehung und eine erhebliche Anzahl an Rechenpunkten stellen dabei hohe Anforderungen an das Simulationsprogramm und die Rechnerkapazität.

In der Literatur finden sich zahlreiche Veröffentlichungen zur Simulation dieser Strömungsmaschinen. Eine praktische Anwendung dieser Simulationsergebnisse ist jedoch noch nicht möglich. Ursachen sind häufig geringe Mengen an Validierungsdaten, die Berechnung eines begrenzten Betriebsbereiches sowie teilweise zu hohe Abweichungen zwischen Experiment und Simulation bei komplexen und praxisnahen Geometrien.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel dieser Arbeit ist es, einen Beitrag zur Reduzierung des Auslegungsaufwandes von Trommelläufer- und Querstromventilatoren zu leisten sowie die Möglichkeit der Anwendung einer Durchströmturbine als Windkraftanlage zu überprüfen. Zur Berechnung des Betriebsverhaltens wurde dazu das in der Industrie weit verbreitete Strömungssimulationsprogramm Star-CD eingesetzt. Anhand von Berechnungen unterschiedlicher Anwendungsfälle soll durch Herausstellen der Stärken und Schwächen der Simulation die numerische Strömungsberechnung als Werkzeug zur Auslegung und Entwicklung von Strömungsmaschinen dieser Bauweise nutzbar gemacht werden. Dies erfolgt in erster Linie durch die Simulation von Einzelmaschinen, mit dem späteren Ziel, die Auslegung eines Kanalsystems im Verbund mit der Strömungsmaschine durchführen zu können. Weiterhin stellt sich die Frage, inwieweit anhand numerisch durchgeführter geometrischer Parametervariationen eine Maschine optimiert werden kann.

Ausgangspunkt dieser Arbeit ist die Dissertation von S. Dornstetter [18]. Diese Untersuchungen zeigen insgesamt, dass es mit Hilfe eines kommerziellen numerischen Verfahrens möglich ist, die sehr komplexen Strömungseigenschaften und das Betriebsverhalten von Querstromventilatoren qualitativ und quantitativ richtig zu beschreiben. Es zeigt allerdings auch, dass insbesondere bei komplexen Geometrien derzeit noch erhebliche Abweichungen von den experimentell ermittelten Werten auftreten. Zur Weiterentwicklung dieses Verfahrens erfolgt als erster Schritt eine Überprüfung der Modellannahmen. Dazu wird das Modellgebiet auf eine frei rotierende Schaufelwalze reduziert und durch systematische Variation numerischer Parameter, wie Turbulenzmodell und Diskretisierung, der Einfluss auf die Strömungseigenschaften untersucht. Diese Ergebnisse werden mit parallel durchgeführten experimentellen Studien verglichen und auf entsprechende Eignung überprüft. Der dazu konzipierte Versuchsstand erlaubt die Erfassung integraler Betriebsgrößen zur Kennlinienbestimmung, Beurteilung der akustischen Eigenschaften sowie die Visualisierung der Strömung durch die PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY. Anhand der erzielten Ergebnisse erfolgt die Auswahl der Parameter zur numerischen Berechnung von Laufrad- und Gehäuseströmung. Als Untersuchungsobjekte dienen zwei Keilzungengehäuse und ein Spaltzungengehäuse, die ebenso wie das verwendete Laufrad handelsüblichen Produkten entsprechen. Von besonderem Interesse in der Entwicklung von Querstromventilatoren ist der Einfluss der Gehäusegeometrie auf das Betriebsverhalten. Deshalb wird dieser Einfluss durch systematische Variation einzelner Gehäuseparameter an einer ausgewählten Geometrie untersucht. Zur Beurteilung der Ergebnisse dienen wiederum eigene experimentelle Ergebnisse und an der FH Heilbronn durchgeführte Untersuchungen [63].

In der Entwicklung von Komponenten zur Belüftung eines Fahrzeuginnenraums ist zur Beschleunigung des Entwicklungsprozesses insbesondere die Simulation von Trommelläuferventilatoren notwendig. Im frühen Entwicklungsprozess eines Lüftungssystems ist dabei die Vorhersage der Verluste und der genauen Verteilung der Strömung in die verschiedenen Austrittskanäle von besonderer Bedeutung. Deshalb ist es wichtig, die Geschwindigkeits-

1 Einleitung

und Druckverteilung im Kanalsystem zu kennen. Dies ist jedoch nur möglich, wenn der Ventilator im Verbund mit dem Kanalsystem simuliert wird. Für erste numerische Untersuchungen an Trommelläuferventilatoren wird deshalb für ein handelsübliches Laufrad ein einfaches Spiralgehäuse entworfen. Der entstandene Ventilator dient als Vergleichsbasis von experimentellen und numerischen Ergebnissen. Die Validierung der Strömungssimulationen erfolgt durch Vergleiche von integralen Betriebsgrößen und Messungen der Geschwindigkeitsverteilung im Gehäuse mittels der PIV-Messtechnik. Anhand dieser Untersuchungen soll die prinzipielle Möglichkeit der Simulation der Strömung in einem Trommelläuferventilator aufgezeigt werden, um anschließend einen Ventilator mit einem komplexen Gehäuse, wie er z. B. in einer Fahrzeugklimaanlage eingesetzt wird, zu berechnen.

Ziel der Anwendung einer Durchströmturbine als Windturbine ist die Nutzung von flachen aber breiten Luftströmungen, wie sie z. B. bei Auftriebsströmungen an Berghängen oder Gebäudewänden auftreten. Zur Abschätzung des Einsatzpotentials werden vergleichende experimentelle und numerische Untersuchungen an einem als Turbine eingesetzten Querstromventilator durchgeführt.

9 Zusammenfassung

Die besonderen aerodynamischen Eigenschaften von Strömungsmaschinen mit hoher Leistungsdichte sind der Grund für die bedingte Fähigkeit von konventionellen Auslegungsmethoden das Betriebsverhalten zu bestimmen. Dies sind insbesondere die komplexen, asymmetrischen und stark gekoppelten Stromfelder in Laufrad und Gehäuse. Aus diesem Grund erfolgte die Optimierung der Einzelmaschine anhand von kostenintensiven experimentellen Parameterstudien für verschiedene Gehäuse und Laufradformen, weshalb die in dieser Arbeit durchgeführten numerischen Untersuchungen dazu dienten, den Auslegungsaufwand dieser Maschinen zu reduzieren. Unter Anwendung eines kommerziellen Programmpaketes wurde dabei der gesamte Strömungsverlauf für unterschiedliche Betriebszustände in Laufrad und Gehäuse simuliert und das Betriebsverhalten bestimmt. Als Untersuchungsobjekte wurden im Bereich der Strömungsarbeitsmaschinen typische Vertreter von Querstrom- und Trommelläuferventilatoren ausgewählt sowie im Bereich der Kraftmaschinen die erste Versuchsvariante einer Durchströmturbine für ein gasförmiges Medium untersucht. Zur Beurteilung des berechneten Betriebsverhaltens und der Strömungseigenschaften dienten in der Literatur dokumentierte experimentelle Parameterstudien [8] sowie eigene experimentelle Untersuchungen. Der konzipierte Versuchsstand ermöglichte neben der Bestimmung integraler Betriebsgrößen auch die Visualisierung der Strömung im Gehäuse durch Anwendung der Particle-Image-Velocimetry (PIV).

Die komplexe Durchströmung eines Querstromventilators, und deren maßgebliche Beeinflussung durch die Gehäuseform, erforderte als Voruntersuchung die Simulation einer frei rotierenden Schaufelwalze. Angestrebtes Ziel war dabei, eine geeignete numerische Behandlung des rotierenden Schaufelgitters herauszuarbeiten. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigten, dass für die korrekte Simulation des Betriebsverhaltens eines Querstromventilators die Anwendung eines kubischen Low-Reynolds $k - \epsilon$ -Turbulenzmodells zielführend ist. Weiterhin war feststellbar, dass eine extrem feine Auflösung der Schaufelkanäle nur sehr geringe Einflüsse auf das Strömungsfeld ausübt.

Die numerische Berechnung des Betriebsverhaltens von Querstromventilatoren erfolgte an drei verschiedenen Gehäusetypen. In den Untersuchungen zeigte sich, dass unter Anwendung eines kubischen Low-Reynolds $k - \epsilon$ -Turbulenzmodells, eine zum Teil sehr gute Übereinstimmung des numerisch und experimentell ermittelten Kennlinienverlaufes erzielt wird. Dies gilt insbesondere für das untersuchte Spaltungengehäuse (Sz1), welches durch besonders stabile Betriebseigenschaften charakterisiert ist. Die Berechnung des Betriebsverhaltens von Keilzungengehäusen (Kz1_1, Kz2) weisen jedoch für niedrige und mittlere Volumenzahlen Abweichungen zum experimentell ermittelten Kennlinienverlauf auf. Der

Verlauf der Drosselkurven ist dabei für Volumenzahlen im Bereich $\varphi < 0,6$ durch ein Abfallen gekennzeichnet. Die Ursache ist ein in der Realität ungleichmäßig schwankendes Strömungsverhalten im Bereich der Zunge, welches die numerische Simulation nicht korrekt erfasst. Bei Querstromventilatoren erfolgt in diesem Bereich die Trennung zwischen Saug- und Druckseite durch zwei sich vermischende Luftstrahlen, was tendenziell eine Rückströmung in den Saugraum begünstigt. Bei Gehäusevarianten mit Keilzunge bildet sich in der numerischen Simulation, im Gegensatz zu dem realen Strömungsverlauf, eine konstante Rückströmung aus. Diese vermindert den Energieeintrag in die Strömung und verursacht so ein Abfallen der Kennlinie für Volumenzahlen $\varphi < 0,6$. Die Tendenz zur Ausbildung dieser Rückströmung ist bei Variante Sz1 deutlich vermindert, da durch den Rezirkulationskanal die Strömung in Richtung entgegen der Saugseite geführt wird. Weiterhin ist durch diese Führung der Strömung und die definierte Abtrennung zwischen Saug- und Druckseite des Ventilators das gegenüber Keilzungengehäusen stabilere Kennlinienverhalten erklärbar. Variante Kz1_1 diene als Ausgangspunkt zur Überprüfung der Fähigkeit numerischer Strömungssimulationsprogramme den Einfluss der Gehäusegeometrie auf das Betriebsverhalten zu bestimmen. Die Parameterstudien zum Einfluss der Gehäusegeometrie auf das Betriebsverhalten werden durch die vorteilhafte Gehäuseform begünstigt, da diese durch einfache geometrische Zusammenhänge gekennzeichnet ist. Deshalb wurden von der Ausgangsvariante drei weitere Gehäusevarianten abgeleitet (Kz1_2, Kz1_3, Kz1_4), die anschließend numerisch und experimentell untersucht wurden. In den Untersuchungen zum Einfluss der rückwandseitigen Gehäusekontur (Kz1_2, Kz1_3) ist erkennbar, dass die simulierten Kennlinienverläufe nur teilweise das reale Betriebsverhalten wiedergeben. Besonders hohe Abweichungen sind im Volumenzahlbereich $\varphi > 0,9$ vorhanden. Die experimentell ermittelten Drosselkurven sind in diesem Bereich durch einen sehr steilen Bereich charakterisiert, welcher in den numerischen Simulationen nicht auftritt. Das plötzliche Abfallen des Kennlinienverlaufes wird durch instabile Strömungszustände im Bereich $\varphi \approx 0,9$ hervorgerufen, wodurch sich bei weiterer Erhöhung des Volumenstroms das Strömungsverhalten verschlechtert. Veränderungen im Strömungsverhalten durch eine Änderung der zungenseitigen Gehäusekontur (Kz1_4) werden in der Simulation nicht korrekt wiedergegeben. Das Betriebsverhalten ist hier sehr instabil, sodass die Kennlinie durch Mittelung der Druckschwankungen erhalten wurde, und so in ihrer Aussagefähigkeit eingeschränkt ist. Die unterschiedlich erfolgreichen Simulationsergebnisse sind auf das stark von Umgebungs- und Randbedingungen beeinflussbare Strömungsverhalten von Querstromventilatoren zurückzuführen. Diese Einflussfaktoren werden in der Modellbildung nur unzureichend erfasst. Anhand der durchgeführten PIV-Messungen konnte gezeigt werden, dass Instabilitäten im Strömungsverhalten durch eine nicht eindeutig definierte Lage des Steuerwirbels hervorgerufen werden. Diese Ergebnisse zeigen, dass gute Simulationsergebnisse über einen weiten Betriebsbereich nur mit dem experimentell optimierten Gehäuse (Kz1_1) möglich sind, indem das Auftreten von Ablösungen und Instabilitäten während der Durchströmung minimiert ist. In der beispielhaften Anwendung der numerischen Simulation zur Optimierung eines Querstromventilators (Kz1_2, Kz1_3, Kz1_4) kann dies zu numerischen Simulationsergebnissen führen, die nur in Teilbereichen die realen Ergebnisse liefern. Dabei können insbesondere an den Rändern des Betriebsbereiches Abweichungen auftreten.

Diese Untersuchungen belegen, dass in der Entwicklung von Querstromventilatoren experimentelle Untersuchungen weiterhin notwendig sind. Es ist jedoch möglich, anhand der durch die numerische Simulation erhaltenen Tendenzen im Betriebsverhalten, eine geeignete Vorauswahl der Gehäuseform zu ermitteln. Diese muss jedoch durch experimentelle Untersuchungen bestätigt und gegebenenfalls das Gehäuse zur Erzielung stabiler Betriebsbedingungen weiter optimiert werden. In nachfolgenden Untersuchungen muss überprüft werden, wie genau Simulationen das Betriebsverhalten eines Querstromventilators wiedergeben, welche in Wechselwirkung mit den spezifischen Einbauverhältnissen in einem Kanalsystem stehen.

Die numerische Berechnung des Betriebsverhaltens eines seriennahen Trommelläuferventilators einer Fahrzeugklimaanlage (Var2) erforderte zunächst die Durchführung einer Studie an einem einfachen Trommelläufergebläse (Var1), welche zur Erschaffung einer grundlegenden Wissensbasis über Verfahren zur Modellerstellung und numerischer Einflussfaktoren diente. Dazu wurde für ein vorhandenes Laufrad ein Spiralgehäuse konstruiert, welches den Bedingungen guter optischer Zugänglichkeit und einfacher Adaption der PIV-Messtechnik genügen musste. Zur industriellen Anwendung des Simulationsverfahrens stand zum Erzielen zeitnaher Simulationsergebnisse die Beschränkung des Rechenaufwandes im Vordergrund. Aufgrund der daraus resultierenden Zellgrößen an der Wand wird zur Turbulenzmodellierung ein lineares High-Reynolds $k - \epsilon$ -Turbulenzmodell eingesetzt.

Die Simulationsergebnisse von Var1 weisen für Volumenzahlen zwischen $\varphi_r = 0,35 - 0,5$ eine sehr gute Übereinstimmung der Strömungsverhältnisse im Spiralgehäuse und der Drosselkurve mit den gemessenen Werten auf. Abweichungen von etwa 10% im Verlauf der Drosselkurve treten im sich für kleinere Volumenzahlen anschließenden instabilen Betriebsbereich auf. Diese Abweichungen zeigen sich auch im Vergleich der Strömungsverhältnisse wobei diese insbesondere im Auslasskanal und im oberen Bereich des Spiralgehäuses auftreten. In der Simulation des seriennahen Trommelläuferventilators einer Fahrzeugklimaanlage konnten im Bereich des maximalen Volumenstroms eine quantitative Übereinstimmung im Kennlinienverlauf erzielt werden. Mit Reduzierung des Volumenstroms weisen die Ergebnisse jedoch nur noch eine qualitative Übereinstimmung auf. Die Ursachen sind in einer unzureichenden Wiedergabe der Strömungsverluste zu finden, die z. B. durch eine unzureichende Auflösung von Geometriedetails, einer groben räumlichen Diskretisierung sowie der Anwendung des einfachen linearen High-Reynolds $k - \epsilon$ -Turbulenzmodells verursacht werden.

Die hier durchgeführten Untersuchungen zeigen somit die Möglichkeit mit einem kommerziellen Programmpaket die Verteilung von Strömungsgrößen im Spiralgehäuse und im Laufrad eines Trommelläuferventilators zu bestimmen. Damit wird es möglich, den Strömungsverlauf besser zu verstehen. Zur Verkürzung der Entwicklungszeit zukünftiger Gebläse muss jedoch in weiteren Untersuchungen erforscht werden, inwieweit die für industrielle Anwendungen notwendige Vorhersage von Tendenzen im Betriebsverhalten, welche durch

9 Zusammenfassung

Änderung einzelner Geometrieparameter des Ventilators entstehen, mit den hier getroffenen vereinfachten Modellannahmen korrekt wiedergegeben werden.

Die Untersuchung eines umgekehrt durchströmten Querstromventilators hat gezeigt, dass das Konzept der Anwendung einer Durchströmturbine als Windrad prinzipiell möglich ist. Für einen optimalen Energieumsatz im Laufrad ist es jedoch notwendig das Gehäuse zu optimieren. Aufgrund der qualitativen Übereinstimmung des berechneten und gemessenen Strömungsbildes im umgekehrt durchströmten Querstromventilator, ist es möglich durch Anwendung der numerischen Simulation ein geeignetes Gehäuse zu entwerfen, und dieses anschließend auf seine Einsatzfähigkeit als Windturbine zu überprüfen.