

Diplomarbeit

Untersuchungen zum Energieeinsparpotential von Radialventilatoren in Lüftungs- und Klimageräten

Vorgelegt am: 23. August 2010

Von: **Paul Tucholke**
Mittelstraße 27
15345 Petershagen / Eggersdorf

Studiengang: Technik

Studienrichtung: Versorgungs- und Umwelttechnik

Seminargruppe: VU07/2

Matrikelnummer: 4070783

Praxispartner:



BerlinerLuft.
Ventilatoren und Geräte GmbH

Herzbergstraße 87-99
10365 Berlin

Gutachter: Prof. Bernd Dölling, Studienakademie Glauchau

Dipl.-Ing. Heiko Scholz, BerlinerLuft

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VII
Formelverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	IX
1 Zielstellung der Diplomarbeit	1
2 Eigenschaften eines Radialventilators	3
2.1 Definition Ventilator	3
2.2 Die Bestandteile des Radialventilators.....	4
2.2.1 Die verschiedenen Laufradformen.....	6
2.3 Antriebsarten von Ventilatoren.....	8
2.3.1 Der Direktantrieb	8
2.3.2 Der Riemenantrieb	8
2.3.3 Antrieb über eine Zwischenwelle	9
2.3.4 Das Antriebsaggregat.....	9
3 Einsparung durch eine korrekte Ventilatorauswahl anhand von Kennlinien. 10	
3.1 Bedeutung der Kennlinie.....	10
3.2 Die Ventilator Kennlinie	10
3.2.1 Ermittlung der Ventilator Kennlinie	10
3.2.2 Erläuterung der Ventilator Kennlinie.....	12
3.2.2.1 Arten von Ventilator Kennlinien	12
3.2.2.2 Parallelschaltung von Ventilatoren.....	14
3.2.2.3 Reihenschaltung von Ventilatoren	15
3.2.2.4 Beispielauslegung.....	15
3.2.3 Folgen von Auslegungsfehlern	17
3.3 Die Anlagen Kennlinie	19
3.4 Der Betriebspunkt	20
4 Einsatz von Ventilatoren in RLT-Anlagen.....	22
4.1 Aufgaben von RLT-Anlagen.....	22
4.2 Energetische Anforderungen an RLT-Anlagen	23
4.2.1 EnEV 2009	23
4.2.2 Herstellerverbände	24
4.3 Umsetzung der energetischen Anforderungen.....	25
4.4 Freilaufende Radialventilatoren	26
4.4.1 Vorteile freilaufender Räder.....	27
5 Einsparungen durch Antrieb & Regelung der Ventilatoren	29
5.1 Anforderungen an Antrieb und Regelung.....	29

5.2 Einsatz von Drehstrommotoren.....	29
5.2.1 Varianten von Drehstrommotoren.....	29
5.2.2 Synchronmotoren	30
5.2.3 Asynchronmotor	30
5.2.4 Auswahl des Motors	33
5.2.5 Wirkungsgrad von Elektromotoren	34
5.2.6 Zukünftige Entwicklung der Motoreffizienz	35
5.3 Ventilatorenregelung.....	37
5.3.1 Bedarf einer Ventilatorenregelung.....	37
5.3.2 Die Drosselregelung	38
5.3.3 Die Bypassregelung	39
5.3.4 Die Drallregelung.....	40
5.3.5 Die Drehzahlregelung.....	41
5.3.5.1 Betrieb mit Frequenzumformer	42
5.3.5.2 Fallbeispiel Energieeinsparung im Zementwerk Volan	43
5.3.6 Vergleich verschiedener Regelungsvarianten	45
6 Entwicklung eines verbesserten freilaufenden Radiallaufrades	47
6.1 Erfordernis zur Verbesserung von Laufrädern	47
6.2 Anforderungen an freilaufende Räder.....	47
6.3 Umsetzung der Entwicklung eines neuen Laufrades	49
6.3.1 Ausgangssituation	49
6.3.2 Entwicklung des neuen Freiläuferlaufrades REU 737	50
6.3.2.1 Grundlagen der Entwicklung.....	50
6.3.2.2 Die FEM-Spannungsanalyse	51
6.3.2.3 Die CFD-Analyse	51
6.3.2.4 Aufgabe der CFD-Analyse des Laufrades REU 737/3.0.....	52
6.3.2.5 Ergebnisse der Analyse	53
6.3.2.6 Umrechnung der Ergebnisse auf eine komplette Baureihe.....	56
6.3.2.7 Entwicklungsvergleich.....	58
7 Bestimmung des Einsparpotentials an einer Referenzanlage.....	60
7.1 Beschreibung der Referenzanlage.....	60
7.2 Alternativer Einsatz der Neuentwicklung REU 737/3.0	63
7.3 Vergleich der Ventilatoren REU 729/3.0 und REU 737/3.0.....	65
7.3.1 Berechnung des Energieeinsparpotentials	66
7.3.2 Zusammenfassung des Energieeinsparpotentials.....	68
8 Fazit	72
Anhangsverzeichnis.....	74
Quellenverzeichnis.....	88
Ehrenwörtliche Erklärung.....	89

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Radialer Strömungsverlauf.....	3
Abb. 2: Verschiedene Schnitte eines direkt angetriebenen Radialventilators.....	4
Abb. 3: Strömungsverlauf im Ventilatorgehäuse	5
Abb. 4: Einzelteile eines direktgetriebenen Radialventilators	6
Abb. 5: Schaufeln eines Hochleistungsventilators (links) und eines Trommelläufers (rechts).....	7
Abb. 6: Strömungsverläufe in einem einseitig (links) & doppelseitig (rechts) saugendem Laufrad	7
Abb. 7: Darstellung der verschiedenen Antriebsarten	8
Abb. 8: Skizze des Ventilatorenprüfstandes der BerlinerLuft.....	11
Abb. 9: Darstellung des Kurvenverlaufs verschiedener Kennlinien	13
Abb. 10: Darstellung des Hochleistungsläufers RE 72 - 1250.....	17
Abb. 11: Vereinfachte Anlagenkennlinie.....	19
Abb. 12: Schnittpunkt der Ventilatoren- und Anlagenkennlinie.....	20
Abb. 13: Ventilator kennlinie mit 2 Geräte kennlinien und deren Schnittpunkten	21
Abb. 14: Zentralklimagerät mit Wärmerückgewinnung	23
Abb. 15: Skizzenhaftes Anlagenschema eines Zentralklimagerätes	25
Abb. 16: Freilaufender Radialventilator der BerlinerLuft.....	26
Abb. 17: Strömungsverlauf in einem freilaufenden Radialventilator	26
Abb. 18: Schnittdarstellung eines Asynchronmotors	31
Abb.19: Drehstrom-Asynchronmotor Fabrikat VEM mit Kühlrippen.....	32
Abb. 20: Darstellung der Auswirkungen einer Drosselregelung	39
Abb. 21: Darstellung eines Drallreglers	40
Abb. 22: Darstellung der Auswirkungen einer Drehzahlregelung	41
Abb. 23: Einsparpotential von Frequenzumrichtern.....	43
Abb. 24: Volan Zementwerk in Jining (China)	44

Abb. 25: Überblick über den Einsatzbereich der Regelungen	46
Abb. 26: Einsatzgrenzen zweier Radialräder.....	48
Abb. 27: Darstellung des Laufrades REU 729/3.0.....	50
Abb. 28: Geometriemodell des Laufrades mit Einströmdüse.....	53
Abb. 29: Statische Druckverteilung im Laufrad.....	54
Abb. 30: Stromlinien und Geschwindigkeitsverteilung im Laufrad	55
Abb. 31: Darstellung des neuen Laufrades REU 737/3.0-800.....	58
Abb. 32: Kennlinien verschiedener Laufräder.....	59
Abb. 33: Ventilatorgesamtkosten über 15 Jahre.....	71

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Toleranzen in Abhängigkeit von der Genauigkeitsklasse nach DIN 24166 ...	11
Tab. 2: Kategorien der spezifischen Ventilatorleistung.....	24
Tab. 3: Neue Wirkungsgradklassen bei Motoren.....	36
Tab. 4: Auswertung Volumenzahl φ , Druckzahl Ψ , Wellenleistung P_w , Wirkungsgrad η	56
Tab. 5: Parameter zur Ventilatorauswahl	61
Tab. 6: Technische Daten Zuluftventilator REU 729/3.0-1001	62
Tab. 7: Technische Daten Abluftventilator REU 729/3.0-1001	63
Tab. 8: Technische Daten Zuluftventilator REU 737/3.0-1001	64
Tab. 9: Technische Daten Abluftventilator REU 737/3.0-1001	65

Formelverzeichnis

Formel 1: Betriebsvolumenstrom.....	15
Formel 2: Gesamtdruckdifferenz	16
Formel 3: Energieumsatzs.....	18
Formel 4: Betriebskosten.....	19
Formel 5: spezifische Ventilatorleistung	24
Formel 6: CO ₂ -Emmisionseinsparung	35
Formel 7: Proportionalität Volumenstrom	38
Formel 8: Proportionalität Druckdifferenz	38
Formel 9: Proportionalität Wellenleistung	38
Formel 10: Lieferzahl φ	56
Formel 11: Druckzahl ψ	57
Formel 12: Wirkungsgrad Ventilator η	57
Formel 13: Wärmemenge.....	60
Formel 14: Massenstrom.....	60
Formel 15: Volumenstrom	60
Formel 16: Wirkungsgrad des Antriebes	66
Formel 17: Wirkungsgrad des Ventilatorsystems	67
Formel 18: Amortisationszeit	67
Formel 19: preisdynamischer Annuitätsfaktor b_a	69
Formel 20: Zinsfaktor q	69
Formel 21: Preisänderungsfaktor r	69
Formel 22: Annuität pro Jahr A	69
Formel 23: Gesamteinsparung E	69

Abkürzungsverzeichnis

CAD	Computer aided design (rechnergestützte Konstruktion)
CFD	Computational fluid dynamics (Computer simulierte Strömungen)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DIN	Deutsches Institut für Normung
EFF	Motoren-Effizienzklasse
EN	Euronorm
EnEV	Energieeinsparverordnung
EU	Europäische Union
FEM	Fenite-Elemente-Analyse
FU	Frequenzumrichter
IE	neue Motoreffizienzklasse
IEC	Internationale elektrotechnische Kommission
kWh	Kilowattstunde
RLT	Raumlufttechnik, raumluftechnisch
SFP	Specific fan power (spezifische Ventilatorleistung)
TÜV	Technischer Überwachungs-Verein
VDI	Verein deutscher Ingenieure

1 Zielstellung der Diplomarbeit

In nahezu allen Bereichen der Technik finden Ventilatoren zur Förderung von Luft und Gasen ein breites Anwendungsspektrum, das kaum von anderen Strömungsmaschinen in dieser Vielfalt übertroffen wird.

Im Juni 2010 hat die EU strengere Wirkungsgradgrenzwerte für Ventilatoren festgelegt. Im Rahmen der seit 2005 gültigen Ökodesign-Richtlinie, bei der Einsparpotentiale energierelevanter Produkte untersucht und Mindestanforderungen festgeschrieben werden, sollen in Europa jährlich rund 16 Millionen Tonnen CO₂-Emissionen vermieden und der Stromverbrauch um 34 Milliarden Kilowattstunden reduziert werden. Laut einer von der EU-Kommission beauftragten Studie von P. RADGEN (Fraunhofer Institut Karlsruhe) liegt der Energieverbrauch von Ventilatoren zurzeit in Europa bei jährlich rund 410 Milliarden Kilowattstunden und im Jahr 2020 bei etwa 660 Milliarden Kilowattstunden, aufgrund der steigenden Zahl der eingesetzten Ventilatoren. In zwei Stufen wird die Ventilatorindustrie gefordert, ihre Produkte für den europäischen Markt nach Energieeffizienz-Anforderungen zu gestalten und damit einen Beitrag zur Energieeinsparung zu liefern:

- Ab 2013 gilt die erste Stufe, nach der schätzungsweise rund 30 % aller Ventilatoren den europäischen Bestimmungen nicht mehr genügen werden.
- Ab 2015 werden weitere 20 % vom Markt verschwinden, die die festgelegten Wirkungsgradanforderungen nicht erreichen werden.

Diese Effizienzanforderungen bedingen die strömungsmechanische Aufgabe des Ventilators im engen Zusammenhang mit der Gesamtanlage, in die er eingebaut ist, zu betrachten. Es soll das Energieeinsparpotential von Radialventilatoren untersucht werden, um so über den Ventilator den Gesamtwirkungsgrad von Lüftungs- und Klimageräten zu erhöhen. Dies bedingt Lösungen, die vom Ventilatorenhersteller als auch vom Anwender einen umfassenden Überblick über die Auslegungsabläufe und regeltechnischen Möglichkeiten verlangen.

Es soll aufgezeigt werden, dass schon bei der Planung wichtige Regeln eingehalten werden müssen, um einen energieeffizienten Betrieb einer raumluftechnischen Anlage sicherzustellen. Werden bei der Planung Fehler gemacht und der Ventilator mit einem schlechten Wirkungsgrad betrieben, sind damit zusätzlich unnötig hohe Betriebskosten verbunden.

Das Ziel der Arbeit ist somit eine höchstmögliche Effizienz beim Betrieb von Radialventilatoren speziell in Lüftungs- und Klimageräten zu erreichen. Dazu werden in der Diplomarbeit verschiedene Referenzanlagen beschrieben, um ein mögliches Einsparpotential nachzuweisen. Dabei werden allgemeine Grundlagen der

Ventilator-technik durch Beschreibungen strömungstechnischer Zusammenhänge, der Antriebsmöglichkeiten, verschiedener Ventilatorbauarten und Laufradformen gegeben. Dies dient zum Verständnis der im weiteren Verlauf beschriebenen verschiedenen Kennlinien und deren Ermittlung. Zur Auswahl, der zu einer Anlage passenden Kennlinie, werden verschiedene Ventilator-kennlinien erläutert. Anhand von einer Beispielauslegung wird aufgezeigt, wie ein Ventilator optimal ausgewählt wird, um nicht schon durch die Auswahl energetische Verluste zu erzielen. Diese Konsequenzen werden an einer falschen Auslegung aufgezeigt.

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die Aufgaben des Ventilators in RLT-Anlagen und die damit verbundenen Anforderungen an diese beschrieben. Es werden praktische Umsetzungen der Anforderungen erläutert, wie zum Beispiel der Einsatz von freilaufenden Ventilatoren. Gleichzeitig sollen die eingesetzten Motoren und die neuen Motoren-Richtlinien, bezogen auf die Energieeffizienz, beschrieben werden. Auch die Regelungsmöglichkeiten von Ventilatoren sind erklärt, um eine energetisch optimale Anpassung der Ventilatoren an die sich ändernden Anlagenbedingungen zu gewährleisten. Des Weiteren wird auf die Entwicklung neuer freilaufender Laufräder eingegangen und die Vorgehensweise anhand einer Neuentwicklung der BerlinerLuft aufgezeigt. Die erzielte Wirkungsgradoptimierung durch das Laufrad soll durch eine Lebenszyklusanalyse der möglichen Einsparungen an Betriebskosten am Beispiel einer Referenzanlage geprüft werden.

2 Eigenschaften eines Radialventilators

2.1 Definition Ventilator

Meist wird bei dem Wort Ventilator an die bekannten Haushaltselektrogeräte gedacht, doch diese sind gar keine Ventilatoren im Sinne des aerodynamischen Fachbegriffs, da Ihre Gehäuse nur dem Berührungsschutz dienen, aber nicht aerodynamisch wirksam sind. Denn im aerodynamischen Sinne sind diese Propeller, denn ein Ventilator (vom Lateinischen „ventulus“, für „schwacher Wind“, „Lüftchen“) ist eine „fremd angetriebene Strömungsmaschine, die mittels eines in einem Gehäuse rotierenden Laufrads ein gasförmiges Medium fördert und verdichtet und dabei zwischen Ansaug- und Druckseite ein Druckunterschied bis zu 30.000 Pascal erzielt.“¹ Das bedeutet, die Aufgabe eines Ventilators ist einen Volumenstrom eines Gases durch ein System (RLT-Anlage) zu transportieren. Dieses System setzt der Bewegung des Volumenstroms einen Widerstand entgegen, den der Ventilator durch einen Druckaufbau (Druckdifferenz) überwinden muss. Somit stellt er gewissermaßen „das Herz“ einer Anlage dar.

Durch die Abbremsung bei der Umlenkung im Laufrad wird kinetische Energie in statischen Druck umgewandelt. Dadurch hat die Luft im Auslass sowohl einen dynamischen als auch einen statischen Druckanteil.

Ventilatoren werden nach der Abströmung der Luft vom Ventilator unterschieden. Ventilatoren, bei denen der Luftstrom axial angesaugt wird, die Rotation des Radiallaufrades für eine Umlenkung um 90° sorgt und die Luft radial ausgeblasen wird, nennt man Radialventilatoren. Diesen Strömungsverlauf kann man in Abbildung 1 erkennen. Beim Laufrad mit axialer Abströmung handelt es sich um Axialventilatoren. Im Bereich der Raumluftechnik werden Radial-, Axial-, Halbaxial- und Querstromventilatoren eingesetzt.

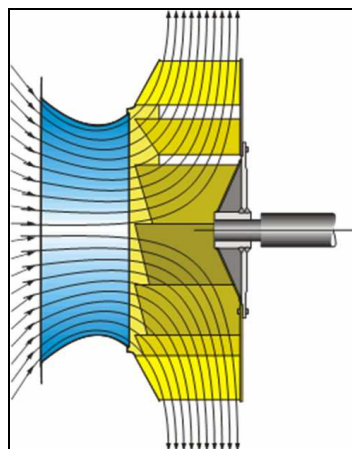


Abb. 1: Radialer Strömungsverlauf²

¹ Fitzner, 2008, S. 205

² Trogisch, 2009, S. 34

Im Bereich der Gebäudelüftung gehören Radialventilatoren, aufgrund ihres vielfältigen Anwendungsbereiches, zu den verbreitetsten Arbeitsmaschinen der Industrie, des Handels, der Dienstleistungen und des Gewerbes, sowie der im öffentlichen Bereich installierten Lüftungstechnischen Anlagen. So liegen die Kosten für die Luftförderung in der Größenordnung von bis zu 70% der gesamten Energiekosten der RLT-Anlagen.

2.2 Die Bestandteile des Radialventilators

Der Radialventilator besteht aus dem Spiralgehäuse mit Einströmdüse und Austrittstutzen, dem Laufrad und der Zunge wie die Abbildung 2 zeigt. Die zu fördernde Luft tritt durch die Einströmdüse in das Laufrad ein und wird dabei in radiale Richtung umgelenkt.

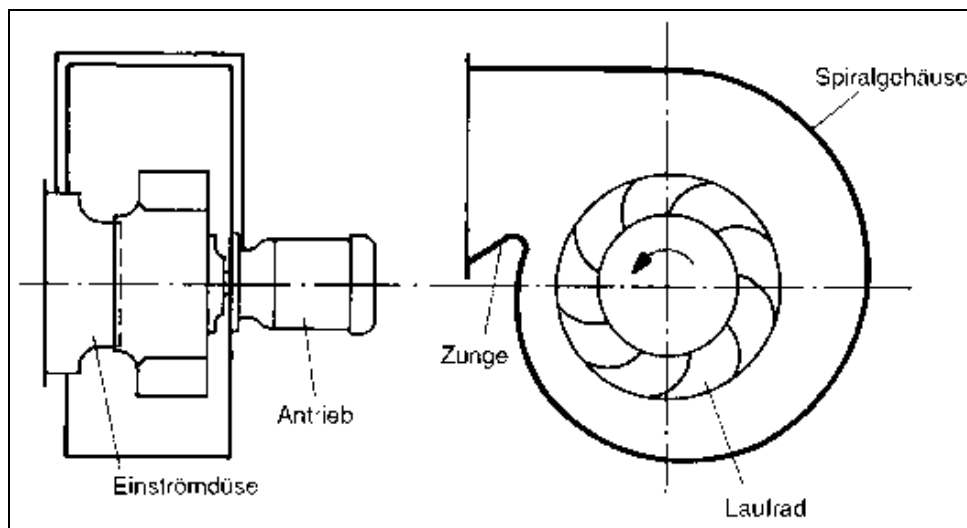


Abb. 2: Verschiedene Schnitte eines direkt angetriebenen Radialventilators³

Im Laufrad findet die Energieumsetzung statt. Die dem Laufrad über die Welle vom Antriebsmotor zugeführte mechanische Energie wird in Druck- und Geschwindigkeitsenergie umgesetzt.

Das Spiralgehäuse hat die Aufgabe ausströmende Luft, die am Außenumfang des Laufrads austritt, zu sammeln und diese zu einem gemeinsamen Auslass zu führen. Dies ist in der Abbildung 3 zu erkennen, welche den Strömungsverlauf im Gehäuse darstellt. Die engste Stelle zwischen Spiralgehäusewand und Laufrad wird von der so genannten Zunge gebildet.

³ Vgl. Fitzner, 2008, S. 207

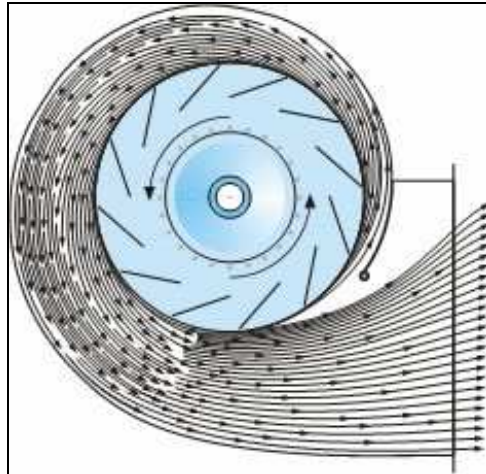


Abb. 3: Strömungsverlauf im Ventilatorgehäuse⁴

Die Luft bzw. das Gas kann durch die stetige Querschnittserweiterung in Strömungsrichtung im Gehäuse expandieren, so dass sich die Strömungsgeschwindigkeit verringert und kinetische Energie in nutzbaren statischen Druck umgewandelt wird (Diffusoreffekt).

Die Abbildung 4 zeigt alle Bestandteile eines direkt angetriebenen Radialventilators. Dabei hat die Kühleisbe die Funktion, eine Wärmeübertragung zwischen Motor und Laufrad zu verhindern. Sie besteht aus Aluminium und durch die große Oberfläche und Wärmeleitfähigkeit kann sie Wärme gut abführen.

⁴ Trogisch, 2009, S. 35

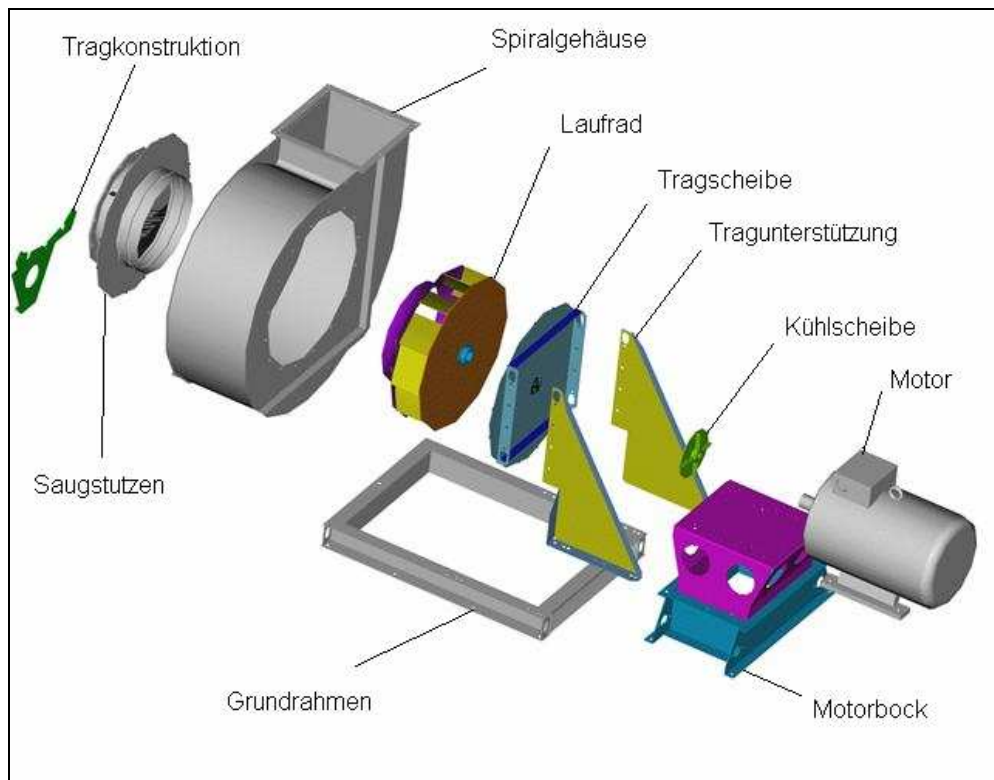


Abb. 4: Einzelteile eines direktgetriebenen Radialventilators

2.2.1 Die verschiedenen Laufradformen

Radialventilatoren werden nach dem Schaufelwinkel am Laufradaustritt in radial endende, vorwärts oder rückwärts Gekrümmte unterteilt. Abbildung 5 stellt vorwärts und rückwärts gekrümmte Laufradformen gegenüber.

Radialventilatoren mit vielen kurzen, vorwärts gekrümmten Schaufeln heißen auch Trommelläufer. Sie zeichnen sich vor allem durch einen geräuscharmen Lauf aus. Aufgrund ihres Betriebsverhaltens werden sie vor allem in Anlagen mit größeren Volumenstromschwankungen aber relativ konstantem Druckabfall eingesetzt.

Am häufigsten angewendet werden Radialventilatoren mit rückwärts gekrümmten Schaufeln. Diese nennt man wegen ihres sehr guten Wirkungsgrades auch Hochleistungsventilatoren. Sie arbeiten bei höheren Drehzahlen, wodurch sie zwar deutlich höhere Laufgeräusche, aber auch bessere Wirkungsgrade als Trommelläufer haben. Die Schaufelzahlen liegen zwischen 6 und 16. Der Name „Hochleistungsventilator“ ist etwas irre führend, da diese Ventilatoren nicht unbedingt höhere Luftleistungen als Trommelläufer erzielen. Der Name ist auf die höheren Wirkungsgrade bezogen, die umso wichtiger werden, je höher die zu erzeugende Leistung ist. Hochleistungsventilatoren werden bevorzugt bei Anlagen mit größeren Druckschwankungen eingesetzt und wenn mehrere Ventilatoren parallel geschaltet werden.

Ventilatoren mit radial endenden Schaufeln werden oft in der Span- und Staubfördertechnik genutzt. Sie sind besonders verkrustungssicher. In der Raumluftechnik finden sie so gut wie keine Anwendung.

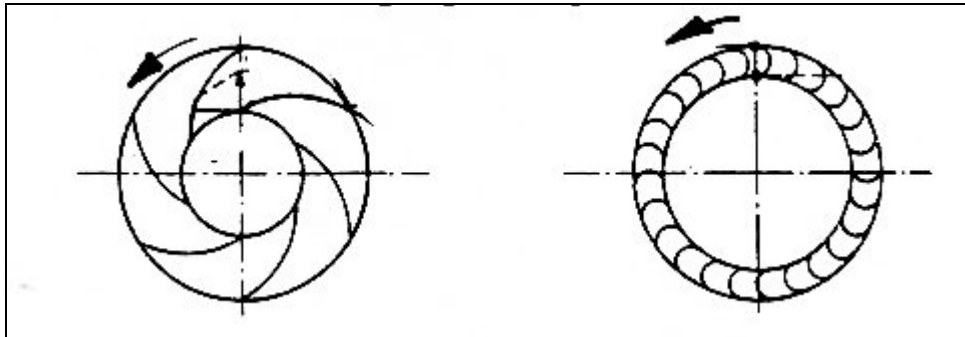


Abb. 5: Schaufeln eines Hochleistungsventilators (links) und eines Trommelläufers (rechts)⁵

Radiallaufräder können einseitig- oder doppelseitig ansaugend ausgeführt werden, wie die Abbildung 6 der Strömungsbilder beider Varianten zeigt. Im Fall des doppelseitig saugenden Radialventilators werden zwei spiegelverkehrt hergestellte Laufräder als eine Einheit hintereinander mit einer gemeinsamen Montageplatte auf einer Welle befestigt. Diese Variante kann fast den doppelten Volumenstrom eines Ventilators mit nur einem Eintrittsrad gewährleisten. Dabei kann aus räumlichen Gründen der Antriebmotor im Allgemeinen nicht auf der gleichen Welle angebracht werden und der Antrieb erfolgt dann mit einem Riemenantrieb. Die Riemenscheibe und der Riemenschutz dürfen die Eintrittsöffnung jedoch nicht zu stark versperren, aufgrund des größeren Strömungswiderstands.

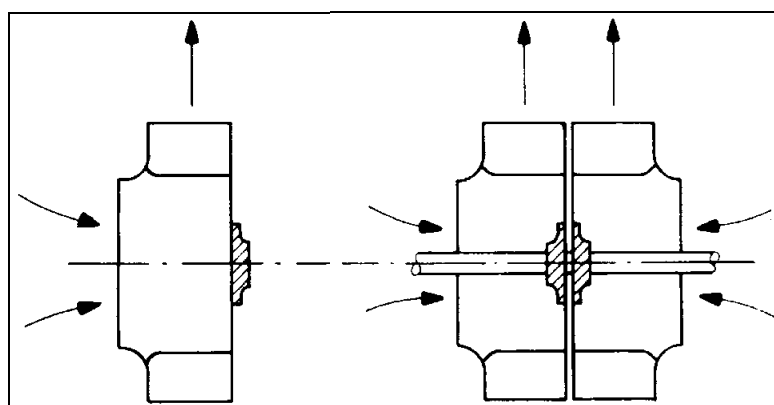


Abb. 6: Strömungsverläufe in einem einseitig (links) & doppelseitig (rechts) saugendem Laufrad⁶

⁵ Fitzner, 2008, S. 212

⁶ Recknagel, 2008, S. 1285

2.3 Antriebsarten von Ventilatoren

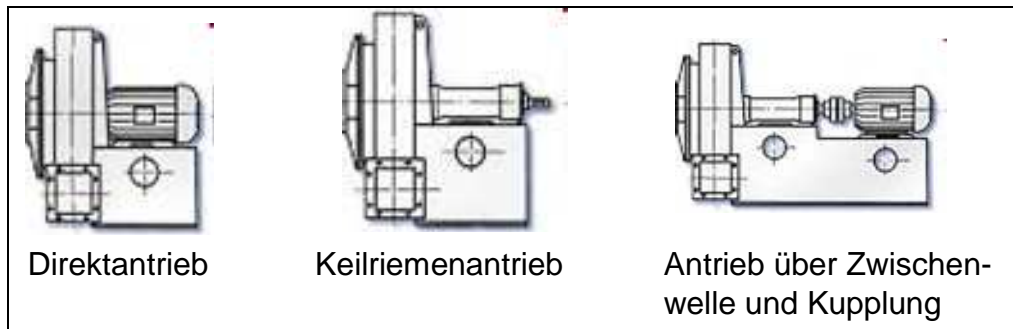


Abb. 7: Darstellung der verschiedenen Antriebsarten⁷

Die Abbildung 7 stellt die verschiedenen Antriebsmöglichkeiten von Radialventilatoren gegenüber. Im Folgenden werden die einzelnen Varianten beschrieben.

2.3.1 Der Direktantrieb

Der Antrieb des Ventilators erfolgt über den Elektromotoren, wobei das Laufrad direkt auf der Motorwelle montiert ist. Bei speziellen Anforderungen ist dieser Antrieb auch mit verlängerter Motorwelle möglich. Man muss jedoch beachten, dass die Medientemperaturen direkt auf die Motorwelle übertragen werden. Das führt dazu, dass der Einsatz einer Kühlscheibe zur Wärmeabführung zu prüfen ist.

2.3.2 Der Riemenantrieb

Hier erfolgt der Antrieb des Ventilators über Keilriemenscheiben und Riemen. Vorteil ist hierbei die Möglichkeit der Anpassung der erforderlichen Drehzahl an den Betriebspunkt der Anlage. Als Riemen können Flach- oder Keilriemen eingesetzt werden. In der Lüftungs- und Klimatechnik ist der Keilriemenantrieb sehr verbreitet. Keilriemen besitzen eine sehr gute Haftung durch die Keilwirkung zwischen Riemen und Scheibe. Bei der Auslegung des Motors muss man die jeweiligen Riemenreibungsverluste beachten, die zusätzlich mit auftreten.

⁷ Trogisch, 2010, S.43

2.3.3 Antrieb über eine Zwischenwelle

Bei dieser Variante erfolgt der Antrieb über eine elastische Bolzenkupplung und eine Zwischenwelle. Kupplungen dienen zur Verbindung drehender Maschinenteile, hier also von Motor und Ventilatorrad. Sie haben die Aufgabe, bei einer bestimmten Drehzahl ein Drehmoment zu übertragen. Einsatz findet diese Antriebsart bei großen und schweren Laufradausführungen mit großen Massenkräften oder bei Temperaturen des Fördermediums über 100 °C. Eine direkte Wärmeleitung des Mediums auf den Motor wird somit unterbunden. Zudem werden die Laufradschwingungen nicht direkt auf den Motor übertragen.

2.3.4 Das Antriebsaggregat

Als Antriebsaggregate nutzt man überwiegend Elektromotoren verschiedener Ausführungen (Niederspannungs-, Hochspannungs-, Gleich- und Drehstrommotoren). Bei Ventilatoren werden vor allem Drehstrom-Asynchronmotoren eingesetzt, auf die im Abschnitt 4.2 aus diesem Grund auch genauer eingegangen wird. Im Allgemeinen schlägt man dem Leistungsbedarf an der Welle noch eine gewisse Leistungsreserve zu. Diese beträgt bei direkt angetriebenen Ventilatoren etwa 5 bis 10 %, bei über Keilriemen angetriebenen Ventilatoren je nach Größe 10 bis 20 %. Beim Antrieb über elastische Kupplungen oder beim Direktantrieb ist die Ventilatorendrehzahl gleich der Motorendrehzahl. Dies bedeutet, dass nur Drehzahlen gewählt werden können, die den Drehzahlstufen, der am häufigsten verwendeten Drehstrommotoren entsprechen. In Sonderfällen werden auch Dampfturbinen oder hydraulische Motoren oder auch Kombinationen zusammen mit einem elektrischen Antrieb verwendet.

3 Einsparung durch eine korrekte Ventilatorauswahl anhand von Kennlinien

3.1 Bedeutung der Kennlinie

Der gegebene Volumenstrom und der Druck vom Ventilator sind keine festen Größen. Jeder Ventilator hat verschiedene mögliche Betriebspunkte, also jeweils zusammengehörige Paare aus Druck und Volumenstrom. Diese ergeben zusammen die Ventilator Kennlinie. Auch der Rest der lufttechnischen Anlage um das Gebläse herum hat eine eigene, so genannte Anlagenkennlinie. Für jede Anlagenkonfiguration (Filterzustand, Ventilstellungen, usw.) gibt es eine Kurve, die besagt, welche Druckdifferenz sich beim jeweiligen Volumenstrom einstellt.

Zur Auswahl eines Ventilators werden die vom Hersteller erstellten Diagramme verwendet. Diese enthalten neben Volumenstrom, Druck, Wirkungsgrad und Schallleistung alle erforderlichen Daten. Es ist unter den gegebenen Voraussetzungen der Ventilator mit dem günstigsten Preis-Leistungsverhältnis zu suchen. Doch hier besteht ein Konflikt, denn für das Preis-Leistungsverhältnis gibt es verschiedene Standpunkte. Ein Investor betrachtet im Wesentlichen nur die Investitionskosten. Ein Nutzer betrachtet auch die Betriebskosten. Daher ist eine Kalkulation zu empfehlen, bei der die Investition und die Kosten während des gesamten Lebenszyklus einer Anlage betrachtet werden. In der Laufzeit können die Betriebskosten eines Ventilators das Vielfache seines Anschaffungspreises erreichen, deshalb ist ein teurerer Ventilator mit einem höheren Wirkungsgrad in den meisten Fällen der Wirtschaftlichere.

3.2 Die Ventilator Kennlinie

3.2.1 Ermittlung der Ventilator Kennlinie

Die Ventilator Kennlinien werden durch Prototypmessungen unter Prüfstandsbedingungen im Labor ermittelt. Bei der BerlinerLuft werden die Werte an einem vom TÜV zertifizierten saugseitigen Rohrprüfstand nach DIN 24163/2 ("Ventilatoren; Leistungsmessung, Normprüfstände") ermittelt. Eine Skizze dieses Prüfstandes der Niederlassung der BerlinerLuft in Ottendorf-Okrilla ist in der Abbildung 12 dargestellt. Hier stehen für die unterschiedlichen Laufradgrößen zwei Messstrecken, mit einem Kanaldurchmesser von 1500 mm und 900 mm, zur Verfügung. Das Fördermedium wird über die Messleitung angesaugt und frei ausgeblasen. An der Einlauf-Messdüse erfolgt die Volumenstrombestimmung. Der Druckverlust kann an der stufenlos einstellbaren Regeleinrichtung variiert werden. Die Leistungsaufnahme und Drehzahl des Laufrades wird mit einer Drehmomenten-Messwelle erfasst. Die Geräuschmessung erfolgt nach DIN 13347-4.

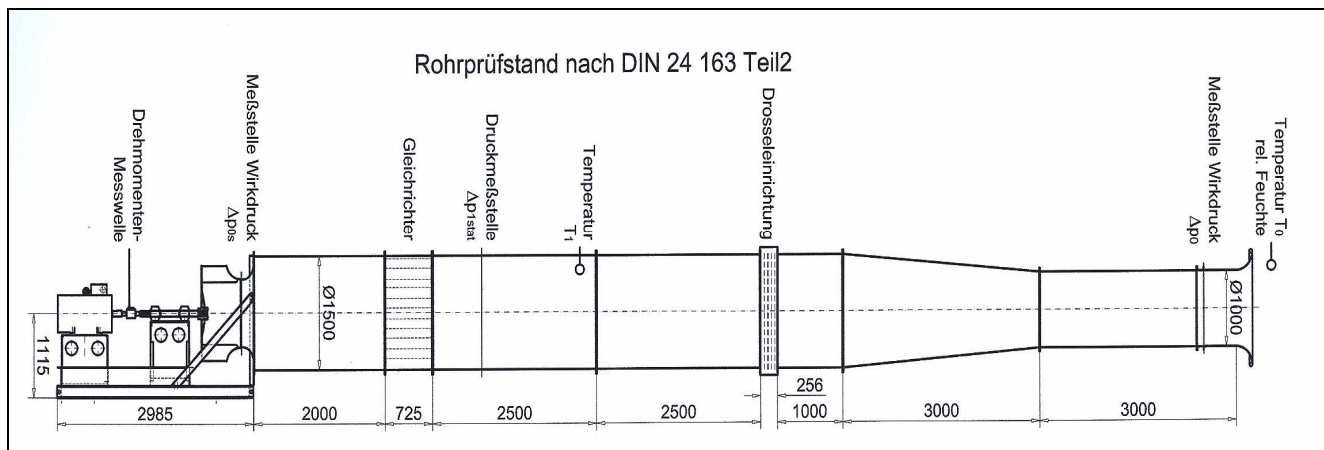


Abb. 8: Skizze des Ventilatorenprüfstandes der BerlinerLuft⁸

Wichtige Punkte sind dabei eine drallfreie Einströmung und ein gleichmäßiges Geschwindigkeitsprofil bei der Ansaugung. Die Prüfstandsmessergebnisse werden nach Ähnlichkeit auf eine Serie von Ventilatoren umgerechnet. Zwischen den Messergebnissen und den Daten des Serienproduktes sind Abweichungen zu erwarten, wenn der Ventilator nicht unter Betriebsbedingungen eingebaut wird, die den Prüfbedingungen entsprechen. Damit optimale Ansaugbedingungen für das Laufrad erreicht werden, sind eine freie Ansaugung aus geräumigen Saugkammern und eine drallfreie Anströmung nötig. Die Wirklichkeit weicht häufig davon ab. Die Leistungsdaten entsprechen der Genauigkeitsklasse 2 nach DIN 24166 „Ventilatoren, technische Lieferbedingungen“. Einen Überblick über diese Genauigkeitsklassen bietet die Tabelle 1:

Genauigkeitsklasse nach DIN 24 166	1	2	3
Volumenstrom \dot{V}	±2,5%	±5%	±10%
Totaldruckerhöhung Δp_t	±2,5%	±5%	±10%
Wellenleistung P_w	±3%	±8%	±16%
Wirkungsgrad	-2%	-5%	-
Schallwerte L_w	+3 dB	+4 dB	+6 dB
Maximale Abweichung $\dot{V} \cdot \Delta p_t / P_w$	8%	19%	40%

Tab. 1: Toleranzen in Abhängigkeit von der Genauigkeitsklasse nach DIN 24166⁹

Die dargestellten Toleranzangaben müssen bei der Auswahl des Ventilators berücksichtigt werden. Jedoch ist schon vorab, anhand des Anlagenplanes,

⁸ BerlinerLuft, firmenintern

⁹ Vgl. DIN 24166, 1989, S.11

abzusehen, ob mit starken Abweichungen zu rechnen ist. Denn die auf dem Prüfstand ermittelte Kennlinie ist nur bei der An- und Abströmungslänge eines geraden Anschlusskanals von mindestens dem 2,5-fachen des Ventilatordurchmessers zu erreichen. Auf der Anströmseite sollte der Anschlusskanal mit der gleichen Nennweite wie der Ventilator installiert werden. Bei kleineren Querschnitten ist ein Konus (Reduzierung als ein kegelförmiges Übergangsstück) in einem Abstand von dem 2,5-fachen des Ventilatordurchmessers vorzusehen. Die gleiche Länge der Anströmstrecke muss auch direkt nach einem Bogen eingehalten werden. Alternativ können Leitbleche in den Bogen eingebaut werden.

3.2.2 Erläuterung der Ventilator Kennlinie

3.2.2.1 Arten von Ventilator Kennlinien

Die Ventilator Kennlinie stellt die gegenseitige Abhängigkeit von Volumenstrom und Druckerhöhung dar. Der Verlauf der Ventilator Kennlinie hängt von der Bauart des Ventilators ab.

Die Steilheit einer Ventilator Kennlinie wird von dem Laufradtyp bestimmt. Das bedeutet, dass die Krümmung der Schaufeln eines Laufrades entscheidenden Einfluss besitzt. In Abbildung 9 ist der Unterschied zwischen einer flachen und einer steilen Kennlinie dargestellt. Daraus kann man verschiedene Einsatzgebiete ablesen. Flache Kennlinien treten bei vorwärts gekrümmten Schaufeln (Trommelläufern) auf und werden vor allem bei Anlagen mit großen Volumenstromänderungen bei konstant benötigten Drücken eingesetzt. Anhand der Kennlinie wird deutlich, dass zwischen den beiden Betriebspunkten der flachen Kennlinie die Volumenstromdifferenz groß ist, die Druckdifferenz sich jedoch nur geringfügig verändert. Im Gegensatz dazu eignen sich steile Kennlinien für Anlagen mit konstant benötigten Volumenströmen, bei gleichzeitig stark schwankenden Drücken im System. Dies tritt zum Beispiel bei Filteranlagen auf. Die steilen Kennlinien werden von rückwärts gekrümmten Schaufeln (Hochleistungsläufer) erreicht. Man kann anhand der Kennlinie gut erkennen, dass zwischen den beiden Betriebspunkten die Volumenstromdifferenz gering ist, durch die Steilheit jedoch eine große Druckdifferenz besteht.

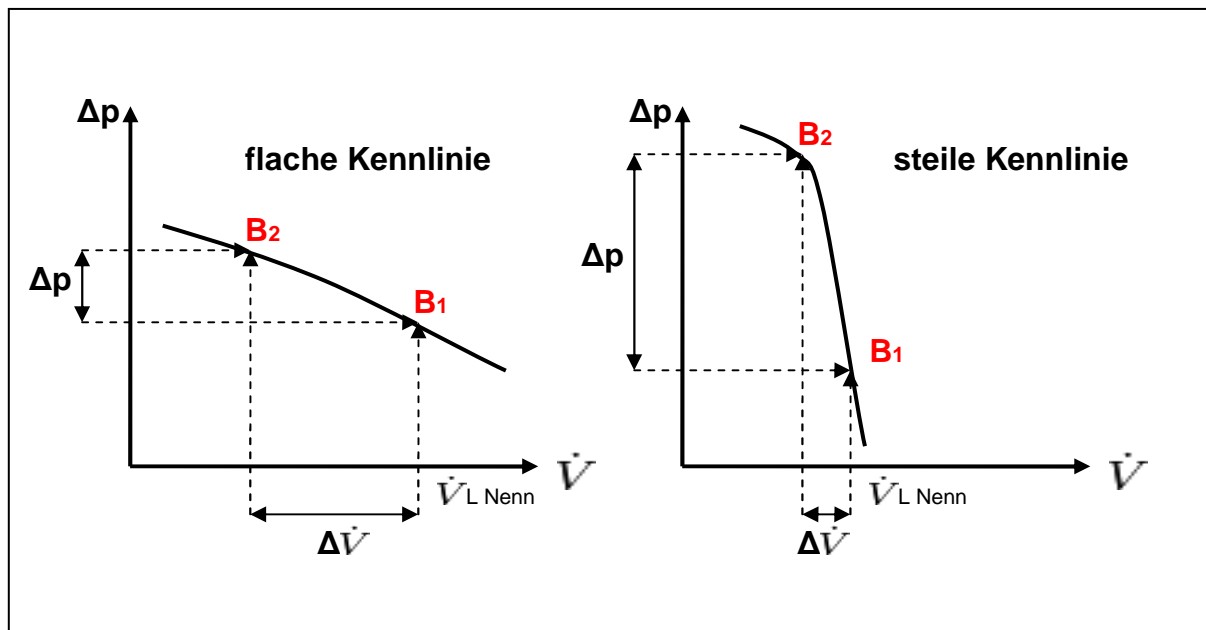


Abb. 9: Darstellung des Kurvenverlaufs verschiedener Kennlinien

Die Erläuterung der technischen Daten einer solchen Ventilator Kennlinie bezieht sich auf den Anhang 1 auf Seite 75. Dort ist die Kennlinie eines Radialventilators mit rückwärts gekrümmten Schaufeln, einen so genannter Hochleistungsventilator, der BerlinerLuft dargestellt. Markant für diese Art sind die steilen Kennlinien, die schon im vorangegangenen Abschnitt beschrieben wurden.

- Die mit der Nummer 1 gekennzeichnete Bezeichnung auf der Kennlinie im Anhang 1 beschreibt die Ventilatorbezeichnung mit Baugröße. Die firmeninterne Bezeichnung „RE“ sagt aus, dass es sich um einen einseitig ansaugenden Radialventilator handelt und die „72“ steht für die Laufradform. Die Baugröße bezieht sich auf den Laufraddurchmesser, in diesem Fall 1250 mm.
- Nummer 2 beschreibt die Arbeitskennlinien bei konstanter Drehzahl (schwarz dargestellt).
- Die roten quer verlaufenden Linien (Nummer 3) zeigen die Kurven mit konstanter Leistung in Kilowatt, wobei diese an die Motorenabstufung eines 50 Hz Betriebes angepasst sind.
- Die roten Kurven stellen die Kurven mit konstantem Wirkungsgrad (Abstufung alle 5%) dar und sind mit einer 4 gekennzeichnet. Die in der Mitte verlaufende Gerade stellt das Wirkungsgradoptimum dar, das der gegebene Ventilator erreichen kann.
- Graue Kurven (Nummer 5) zeigen die konstante Gesamtschalleistung in Dezibel (A) an (Abstufung alle 5 dB).
- Anhand der schwarzen Kurven und der Skala (Nummer 6) kann man die Ventilator Drehzahl in Umdrehungen pro Minute ablesen.

- Gleichzeitig ist es möglich auf der nebenstehenden Skala (Nummer 7) die Umfangsgeschwindigkeit des Laufrades in Meter pro Sekunde abzulesen.
- Die senkrechte Skala auf der linken Seite (Nummer 8) zeigt die dazugehörige Druckerhöhung in Pascal an. Hierbei ist zu beachten, dass die Gesamtdruckerhöhung angegeben ist. Das bedeutet, die Summe aus dem statischen und dem dynamischen Druckanteil.
- Der dynamische Anteil wird auf der Skala mit der Nummer 11 beschrieben.
- Auf den waagerechten Skalen (Nummer 9) wird der Volumenstrom in Kubikmeter pro Sekunde und Stunde angezeigt.
- Die Skala darunter stellt die Ausblasgeschwindigkeit aus dem Ventilator in Meter pro Sekunde dar (Nummer 10).

3.2.2.2 Parallelschaltung von Ventilatoren

In der Praxis kommt die Parallelschaltung von Ventilatoren sehr häufig vor. Das bekannteste Beispiel für den Parallelbetrieb von zwei Ventilatoren ist der schon in Abschnitt 2.2.1 beschriebene doppelseitig saugende Radialventilator. Weiterhin werden bei Lüftungs- und Klimageräten in Kastenbauweise Ventilatoren oft parallel geschaltet.

Die Kennlinie von parallel geschalteten Ventilatoren ermittelt man, indem die Volumenströme bei gleichen Gesamtdruckdifferenzen addiert werden. In vielen Fällen wird auch eine Parallelschaltung zur Erhöhung der Anlagensicherheit eingesetzt, denn obwohl ein Ventilator die benötigte Leistung erbringen würde, wird nicht dieser eingesetzt, sondern mehrere kleinere Ventilatoren. So kann beim Ausfall eines Ventilators eine Grundversorgung sichergestellt werden ohne das, wie beim Einsatz nur eines Ventilators, die komplette Anlage ausfallen würde. Des Weiteren ist eine Steuerung möglich, denn beim Einsatz mehrerer Ventilatoren können Einzelne zu- oder abgeschaltet werden, um so den jeweils benötigten Volumenstrom zu erreichen.

Das gleiche Prinzip kann auch zur Steuerung der benötigten Druckdifferenzen genutzt werden, jedoch müssen die Ventilatoren hierzu in Reihe geschaltet sein, wie der nächste Abschnitt beschreibt.

3.2.2.3 Reihenschaltung von Ventilatoren

Zur Überwindung höherer Druckdifferenzen in einer RLT-Anlage kann man zwei oder mehrere Ventilatoren hintereinander (in Reihe) schalten. Dabei addieren sich theoretisch die Gesamtdruckdifferenzen der einzelnen Ventilatoren, während der Volumenstrom konstant bleibt. In der Praxis ist jedoch zu beachten, dass bei der Reihenschaltung Verluste durch Verbindungsleitungen oder durch nicht optimale Anströmung der zweiten und weiter folgenden Stufen auftreten.

3.2.2.4 Beispielauslegung

In einem folgenden Beispiel wird nach einem passenden Ventilator gesucht. Dazu wird die Ventilator Kennlinie des Hochleistungsläufers RE 72 – 1250 der BerlinerLuft (Anhang 1- Seite 75) benutzt. Folgende Parameter sind wie folgt bekannt:

Es wird nach einem Ventilator gesucht, der einen Volumenstrom von 35.000 Normkubikmetern pro Stunde (Nm³/h) fördert und eine statische Druckerhöhung von 1.500 Pascal realisiert.

Wenn in Anfragen "Normkubikmeter" (Nm³) angegeben sind, muss zur Auslegung des Ventilators in "Betriebskubikmeter" umgerechnet werden. Das Normkubikmeter (Nm³) bezieht sich auf den physikalischen Normzustand 0°C und 1.013 mbar. Die Umrechnung erfolgt auf den technischen Normzustand 20°C und 1.013 mbar.

$$\overset{\circ}{V}_B = \overset{\circ}{V}_N \cdot \frac{T}{273 K}$$

Formel 1 Betriebsvolumenstrom

Legende

$\overset{\circ}{V}_N$ = Normvolumenstrom [Nm³/h]
T = Medientemperatur [K]

Im gegebenen Beispiel ergibt sich folgende Rechnung:

$$\overset{\circ}{V}_B = 35.000 \frac{Nm^3}{h} \cdot \frac{293 K}{273 K} = \underline{\underline{37.564,1 \frac{m^3}{h}}}$$

Man sucht nun den Schnittpunkt der beiden Geraden des gegebenen Volumenstroms und der Druckerhöhung (Skalen mit der Nummer 8 und 9). Zur Ermittlung des Gesamtdruckverlustes liest man erst den dynamischen Druckanteil (Skala mit der

Nummer 11) ab und addiert diesen Wert zum benötigten statischen Druck dazu. Bei dem zu fördernden Volumenstrom ergibt sich in diesem Beispiel ein dynamischer Druckanteil von 161 Pascal.

$$\Delta p_{ges} = \Delta p_{stat} + \Delta p_{dyn}$$

Formel 2

Gesamtdruckdifferenz

Legende

Δp_{stat} = statische Druckdifferenz [Pa]

Δp_{dyn} = dynamische Druckdifferenz [Pa]

$$\Delta p_{ges} = 1.500Pa + 161Pa = \underline{\underline{1.661Pa}}$$

Die beiden sich ergebenden Geraden aus Volumenstrom und Gesamtdruckerhöhung sind in die Ventilator Kennlinie eingezeichnet. Am Schnittpunkt hat man nun den Auslegungspunkt des Ventilators ermittelt und kann die gesuchten Werte ablesen:

Ventilator drehzahl: 905 [1/min]

Elektrische Leistungsaufnahme: 20,18 [kW]

dynamischer Druck: 161 [Pa]

Gesamtdruckerhöhung: 1.661 [Pa]

Wirkungsgrad: 87 [%]

Gesamtschalleistung: 94 [dB(A)]

Aus den nun vorliegenden Werten kann man einen Motor auswählen, in diesem Fall wäre es ein 6-poliger Motor mit Frequenzumformer-Steuerung (Drehzahlsteuerung) und einer Leistung von 22 Kilowatt und einer Nenndrehzahl von 970 1/min. Durch den Frequenzumformer ergibt sich die Betriebsdrehzahl von 905 1/min bei 46,6 Hz. Die folgende Abbildung 10 zeigt den ausgewählten Ventilator. Zusätzlich sind noch die Antriebsart und die Gehäusestellung, welche die Ausblasrichtung vorgibt, zu wählen. In diesem Fall ist es ein Ventilator mit Zwischenwellenantrieb in der Gehäusestellung LG90. Das bedeutet, der Ventilator bläst oben nach links horizontal aus und das Laufrad ist somit linksdrehend.



Abb. 10: Darstellung des Hochleistungsläufers RE 72 - 1250¹⁰

3.2.3 Folgen von Auslegungsfehlern

Zur Senkung der Investitionskosten und zur Platzeinsparung wird versucht, einen möglichst kleinen Ventilator zu wählen. Doch wenn der Ventilator versehentlich eine Baugröße zu klein gewählt wird, treten erhebliche Konsequenzen auf. Auf der einen Seite wird der Wirkungsgrad des Ventilators schlechter, wodurch die benötigte elektrische Leistungsaufnahme zunimmt. Die Folge ist ein höherer Energiebedarf. Auf der anderen Seite benötigt der kleinere Ventilator eine höhere Drehzahl um denselben Volumenstrom fördern zu können. Durch die höheren Drehzahlen wird der Ventilator lauter, das heißt die Schallabstrahlung erhöht sich.

Die Konsequenzen des höheren Energiebedarfs durch einen zu klein gewählten Ventilator soll anhand des folgenden Beispiels erläutert werden. Es gelten die gleichen Parameter, die schon im oberen Beispiel gegeben waren (statische Druckerhöhung von 1.500 Pa und Betriebsvolumenstrom von 37.564,1 m³/h), außerdem werden noch folgende Annahmen getroffen:

- Der Ventilator wird täglich 12 Stunden betrieben
- Der zu versorgende Raum muss an 300 Tagen im Jahr belüftet werden
- Der Ventilator wird ohne Frequenzumrichter direkt am Netz betrieben

¹⁰ BerlinerLuft, 2009, S. 1

Im oben genannten Auslegungsbeispiel lag die elektrische Leistungsaufnahme des richtig gewählten Ventilators bei 20,18 kW.

Die in Anhang 2 auf Seite 76 gezeigte Ventilator Kennlinie beschreibt einen kleineren Ventilator vom selben Typ wie der ausgewählte Ventilator. Der Laufraddurchmesser beträgt 1.000 mm, anstatt 1.250 mm des gewählten Ventilators. Anhand der Kennlinie kann man nun die Kenndaten des kleineren Ventilators ermitteln:

Ventilator drehzahl: 1.605 [1/min]

Elektrische Leistungsaufnahme: 27,71 [kW]

dynamischer Druck: 704 [Pa]

Gesamtdruckerhöhung: 2.204 [Pa]

Wirkungsgrad: 83 %

Gesamtschalleistung: 107 [dB(A)]

Aufgrund des kleineren Ventilators wird der dynamische Druckanteil deutlich höher, darum muss eine höhere Gesamtdruckerhöhung erreicht werden. Die Drehzahl ist höher und die elektrische Leistungsaufnahme steigt drastisch an. Anhand der getroffenen Annahmen kann man die höheren Anschaffungskosten des richtig gewählten Ventilators den höheren Betriebskosten des falsch gewählten Ventilators gegenüber stellen:

Stromaufnahme des richtig gewählten Ventilators:

Energieumsatz = Leistung · Zeit

Formel 3

Energieumsatz

$$Q = 12 \text{ h/d} \cdot 300 \text{ d/a} \cdot 20,18 \text{ kW} = \underline{72.648 \text{ kWh/a}}$$

Stromaufnahme des falsch gewählten Ventilators:

$$Q = 12 \text{ h/d} \cdot 300 \text{ d/a} \cdot 27,71 \text{ kW} = \underline{99.756 \text{ kWh/a}}$$

Bildet man die Differenz zwischen den beiden Energieaufnahmen (99.756 – 72.648 kWh/a = 27.108 kWh/a), so lässt sich daraus schließen, dass durch den Irrtum ca. 37,3 % mehr Energie pro Jahr verbraucht wird. Stellt man nun den Mehrpreis des richtig gewählten Ventilators (ca. 3.700 €) der Energieeinsparung gegenüber, so ergibt sich folgende Rechnung:

Durchschnittlicher Strompreis für ein Industrieunternehmen: 16,8 Cent/kWh

(laut einer Studie des BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. von 2009)

Betriebskosten = Energieumsatz · Stromkosten **Formel 4** Betriebskosten
 27.108 kWh/a · 16,8 Cent/kWh = 4.554,14 €/a

Bei einer Stromkosteneinsparung von 4.554,14 Euro pro Jahr ergibt sich eine Amortisationszeit von weniger als einem Jahr. Dies belegt noch einmal die Wichtigkeit einer gründlichen Ventilatorauslegung.

3.3 Die Anlagenkennlinie

Die Summe sämtlicher Druckverluste einer Anlage, saug- und druckseitig vom Ventilator, ergibt die für die Auslegung und Auswahl wichtige statische Druckdifferenz bei einem bestimmten vorgegebenen Volumenstrom. Jeder Anlage ist ihre eigene Kennlinie zugeordnet, diese wird auch Widerstandsparabel oder Systemkennlinie genannt. Sie lässt sich durch Vorausberechnungen bestimmen, so dass der Verlauf der Kennlinie mit genügender Genauigkeit gekennzeichnet werden kann. Da die Verluste proportional dem Quadrat der Geschwindigkeit w bzw. des Volumenstromes sind, ergibt sich eine quadratische Parabel, wie in der Abbildung 11 zu erkennen ist. Die Anlagenparabel muss nicht immer durch den Nullpunkt im Δp - \dot{V} -Diagramm laufen, sondern kann auch einen Anfangsdruckunterschied besitzen, der sich z. B. dann ergibt, wenn ein Ventilator in einem Überdruckraum oder Druckkessel fördert.

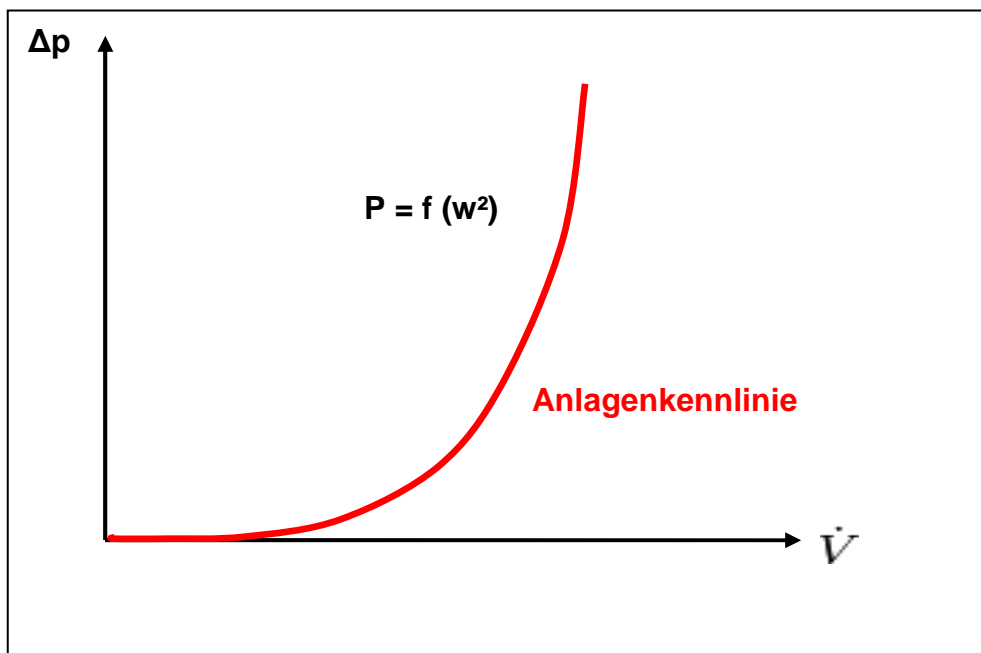


Abb. 11: Vereinfachte Anlagenkennlinie

3.4 Der Betriebspunkt

Der Betriebspunkt (Arbeitspunkt) eines Ventilators, der in ein Gerät eingebaut ist, ergibt sich als Schnittpunkt von Ventilator- und Anlagenkennlinie. Am Betriebspunkt erzeugt der Ventilator eine Druckerhöhung, die den Druckverlust im Gerät genau kompensiert. Dieser Betriebspunkt als Schnittpunkt der beiden Kennlinien ist in der Abbildung 12 dargestellt. Der tatsächliche Volumenstrom durch das Gerät ist daher durch den Betriebspunkt bestimmt.

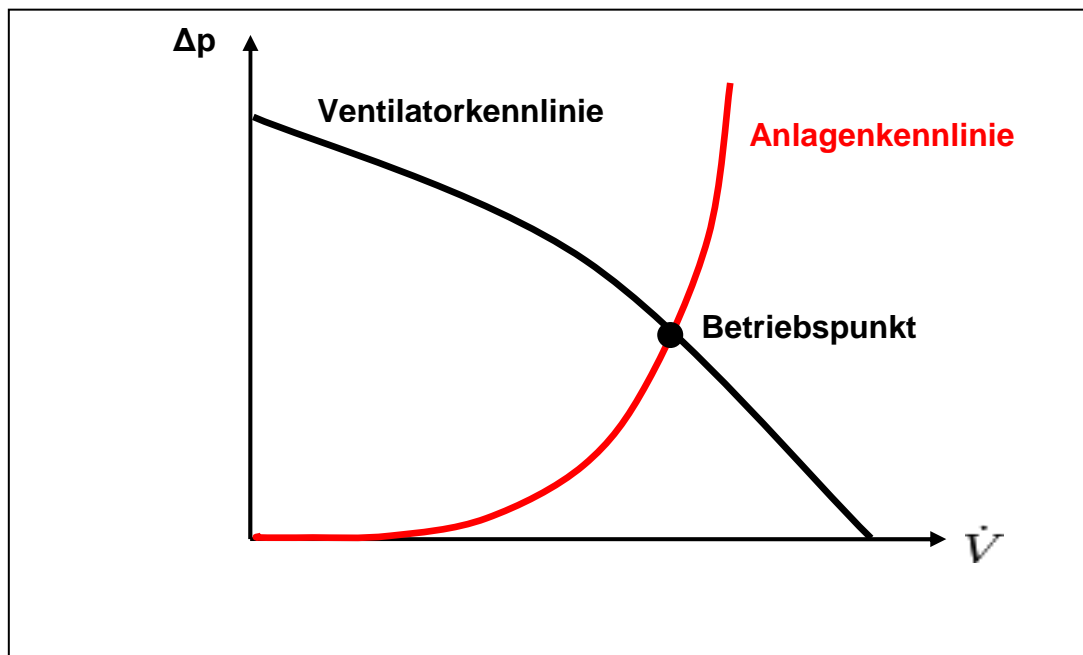


Abb. 12: Schnittpunkt der Ventilatoren- und Anlagenkennlinie

Bei den in Abbildung 13 dargestellten Kennlinien werden zwei verschiedene Anlagenkennlinien (rot dargestellt) mit der Ventilator-kennlinie (schwarz) geschnitten. Es ergeben sich zwei voneinander unabhängige Betriebspunkte. Die Kennlinie A repräsentiert das Verhalten eines Gerätes mit einem großen Strömungswiderstand (hoher Widerstandsbeiwert), bei dem der Druckverlust steil ansteigt. Die Kennlinie B hat einen flacheren Verlauf, da sie das Verhalten eines Gerätes mit einem kleinen Strömungswiderstand (kleiner Widerstandsbeiwert) aufzeigen soll. Mit dem gleichen Ventilator wird man also im Gerät B einen wesentlich größeren Volumenstrom erzeugen können als im Gerät A. Der Betriebspunkt C ergibt sich bei einer vollkommen ungehinderten Durchströmung des Ventilators. Der Betriebspunkt D würde sich bei einem vollkommen blockierten Ventilator oder Anlage ergeben.

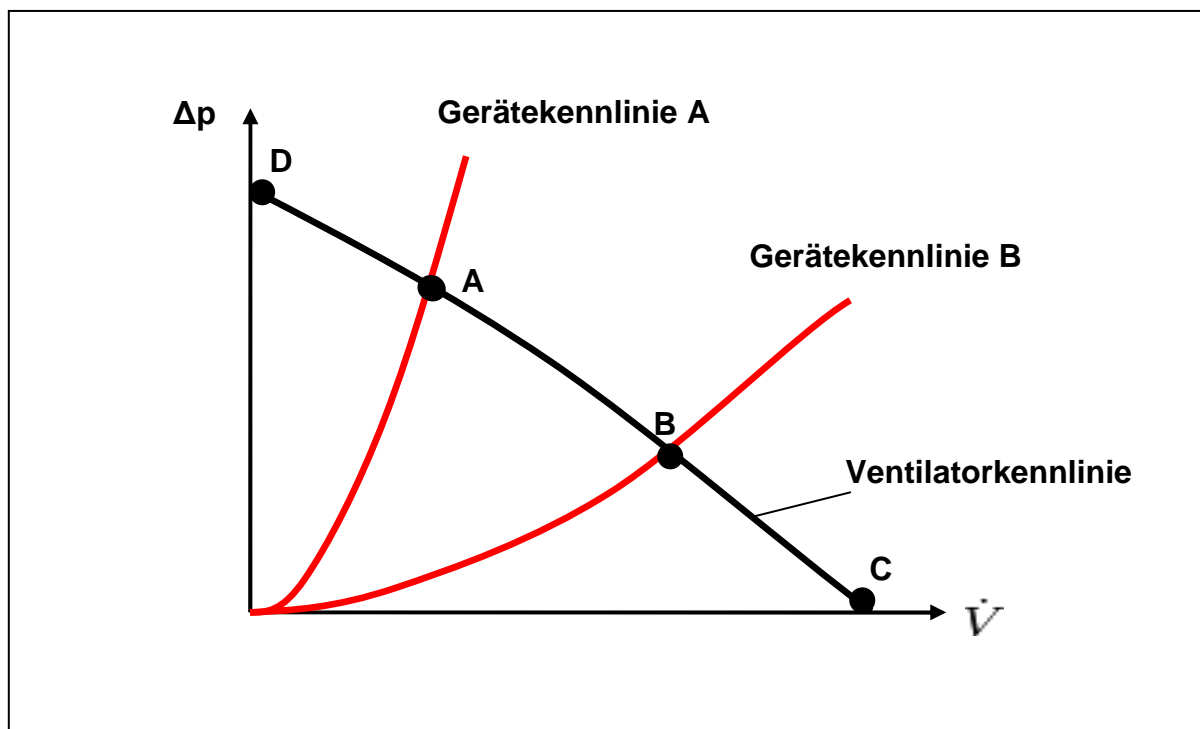


Abb. 13: Ventilator Kennlinie mit 2 Geräte Kennlinien und deren Schnittpunkten

4 Einsatz von Ventilatoren in RLT-Anlagen

4.1 Aufgaben von RLT-Anlagen

Raumluftechnische Anlagen sind in vielen Bereichen der Gebäudeausrüstung unverzichtbar geworden. Stark steigende Energiepreise und die politischen Ziele zur Senkung des CO₂-Ausstoßes erzwingen energiesparende Gebäudehüllen hoher thermischer Dichtheit. Um die Energieeinsparung dieser Bemühungen nicht durch unkontrollierte Fensterlüftung zu vergeuden und um dennoch gesundheitsbeeinträchtigende Raumlufzustände zu vermeiden, sind kontrollierte Lüftungssysteme, die für einen notwendigen Luftwechsel sorgen, unverzichtbar. Entsprechend wird in der Energieeinsparverordnung 2009 neben der Dichtheit auch ein "zum Zweck der Gesundheit [...] erforderliche[r] Mindestluftwechsel"¹¹ gefordert. In Wohngebäuden werden daher kontrollierte Wohnungslüftungssysteme eingesetzt, die den hygienisch notwendigen Mindestluftwechsel gewährleisten. In Nichtwohngebäuden treten, entsprechend der Nutzung der Gebäude und der Anforderungen an die Raumluf, zusätzliche Heiz-, Kühl-, Feuchte-, und Schadstofflasten auf. Zwar sind bei der Kompensation der thermischen Lasten, anstelle des Einsatzes der Raumluftechnik, auch Alternativen, wie Flächenheiz-, bzw. Flächenkühlsysteme denkbar, doch bei Stofflasten ist der Einsatz lüftungstechnischer Anlagen unvermeidbar. Die dabei notwendigen Luftvolumenströme können dann zugleich zur Kompensation der thermischen Lasten verwendet werden.

Deutschland ist seit vielen Jahren führend im Bereich der zentralen Raumluf- und Klimatechnik, bei der die angesaugte Außenluft in einem Klimazentralgerät zunächst gefiltert, dann bedarfsgerecht erwärmt, gekühlt, be- oder entfeuchtet wird und schließlich über ein Luftkanalsystem und Durchlässe als Zuluft in die Räume eingebracht wird. Ein solches Zentralklimagerät ist in der folgenden Abbildung 14 dargestellt. Zu erkennen ist das Wärmerückgewinnungssystem in der Mitte des Gerätes, die beiden Filter, sowie zwei freilaufende direkt angetriebene Radialventilatoren.

¹¹ EnEV 2009



Abb. 14: Zentralklimagerät mit Wärmerückgewinnung¹²

4.2 Energetische Anforderungen an RLT-Anlagen

Auf Basis der jährlich von der japanischen Fachzeitschrift Jarn durchgeführten Analysen zum Welt- und Europamarkt für Kälte- und Klimatechnik wurden in Deutschland im Jahr 2008 knapp 50.000 RLT-Geräte im Produktwert von etwa 400 Millionen Euro verkauft. Wesentliche Impulse, die den Markt für Lüftungs- und Klimasysteme derzeit stark beeinflussen, kommen von den beiden im Sommer 2007 erschienenen europäischen Normen DIN EN 13779 „Lüftung von Nichtwohngebäuden“ und DIN EN 15251 „Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden“. Diese liefern in Abhängigkeit vom gewünschten Raumklima, das der Bauherr aus mehreren Kategorien auswählen kann, Vorgaben für einzubringende Außenluftvolumenströme, einzuhaltende Raumtemperaturen und Raumfeuchten, sowie zum Aufbau des Klimasystems zur Minimierung des energetischen Aufwands. Diese Forderung nach energieeffizienten Klimageräten wird in verschiedenen Richtlinien festgeschrieben:

4.2.1 EnEV 2009

Die spezifische Ventilatorleistung definiert in der Klimatechnik das Verhältnis von verbrauchter elektrischer Ventilatorleistung zum geförderten Luftvolumenstrom und wird SFP-Wert (specific fan power) genannt. Nach der aktuellen Energieeinsparverordnung 2009 sind Neuanlagen mit mehr als 4000 m³/h nur noch

¹² Trogisch, 2008, S. 46

mit höchstens SFP-4 vorgesehen. Die spezifische Ventilatorleistung dient zur Kennzeichnung des elektrischen Energieverbrauchs und kennzeichnet den Leistungsgrad einer Ventilatorsystems, inkl. Riementrieb, Getriebe und Frequenzumrichter.

$$SFP = \frac{P}{\dot{V}}$$

Formel 5 spezifische Ventilatorleistung

Legende

SFP = spezifische Ventilatorleistung [Ws/m³]

P = verbrauchte Ventilatorleistung [W]

\dot{V} = geförderter Volumenstrom [m³/s]

Je kleiner der SFP-Wert, umso weniger elektrische Energie wird für die Förderung eines Kubikmeters Luft benötigt. Die spezifische Ventilatorleistung wird in Kategorien eingeteilt, die in der folgenden Tabelle 2 dargestellt sind:

Kategorie	spezifische Ventilatorleistung [Ws/m ³]
SFP-1	<500
SFP-2	500-700
SFP-3	750 - 1250
SFP-4	1250 -2000
SFP-5	2000 - 3000
SFP-6	3000 - 4500
SFP-7	>4500

Tab. 2: Kategorien der spezifischen Ventilatorleistung¹³

4.2.2 Herstellerverbände

Im Zusammenhang mit der Energieeffizienz von RLT-Geräten ist auch eine Ende 2007 eingeführte Initiative des "Herstellerverbands RLT-Geräte" zu nennen. Diese betrifft die Zertifizierung von RLT- und Klimazentralgeräten in Abhängigkeit von drei wesentlichen Größen: der Luftgeschwindigkeit im Gerät in Abhängigkeit von den eingesetzten thermodynamischen Funktionen (Heizen, Kühlen, Be- und Entfeuchten), der maximalen elektrischen Leistungsaufnahme des Ventilators (kW pro m³/s) und der Effizienz der Wärmerückgewinnung. Je nach der Qualität des Geräts und dessen Prüfung durch den TÜV im Hinblick auf die genannten Faktoren

¹³ Vgl. DIN EN 13779 „Lüftung von Nichtwohngebäuden“

erhält es eine Klassifizierung mit der Energieeffizienzklasse A+, A oder B. Die Anforderungen des Herstellerverbands RLT-Geräte unterscheiden sich nur unwesentlich von dem Klassifizierungssystem für RLT-Geräte, das vom Europaverband „Eurovent“ eingeführt wurde.

4.3 Umsetzung der energetischen Anforderungen

Die Entwicklung energiesparender Lüftungs- und Klimazentralen machte in den letzten Jahren große Fortschritte. Aus den gewöhnlichen Kastengeräten, deren Fabrikate sich nur in Details unterschieden, werden verschiedenste Anlagenvarianten. Ihre Merkmale sind regelbare Wärmerückgewinner, freilaufende Ventilatoren, digitale Regelungen und Frequenzumformer. Die Geräte werden komplett vormontiert oft als geschlossene Traglast eingebracht und ohne zeitintensive Einregulierung in Betrieb genommen. Äußerlich sind die konstruktiven Veränderungen kaum wahrnehmbar. Erst beim Betrachten der "inneren Organe" wird der Wandel sichtbar, bei den Ventilatoren und Wärmeübertragern, bei der Regelung und den Serviceeinrichtungen. So werden die bis bisher üblichen Gehäuseventilatoren immer häufiger durch freilaufende Räder ersetzt, bei denen das einseitig saugende Laufrad direkt auf der Welle des Motors gelagert ist, wie auf dem Anlagenschema auf Abbildung 15 zu erkennen ist. Das einengende Spiralgehäuse wird durch eine Einströmdüse ersetzt, und der ganze Ventilatorwürfel der Lüftungszentrale dient als Druckkammer. Somit strömt die Luft turbulenzarm ein und relativ langsam weiter zu den nachgeschalteten Komponenten. Allein durch diese Eigenschaft lassen sich bis zu 20% Antriebsenergie einsparen, wie im weiteren Verlauf aufgezeigt werden soll.

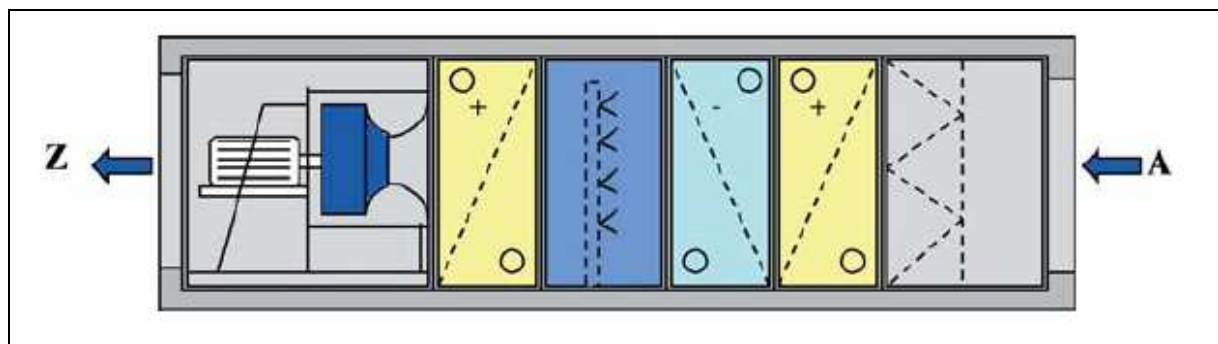


Abb. 15: Skizzenhaftes Anlagenschema eines Zentralklimagerätes¹⁴

¹⁴ Trogisch, 2008, S. 48

Die Einströmdüse hat Bohrungen für die Druckmessung und gibt über eine Ringmessleitung und Messdosen ihre Signale an eine Regelung bzw. den Frequenzumformer für die stufenlose Drehzahlregelung weiter. Durch den Direktantrieb entfallen auch der Keilriemen und dessen Antrieb. Die Vorteile dieser Variante werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

4.4 Freilaufende Radialventilatoren

Es werden immer häufiger Ventilatoren ohne Gehäuse, so genannte freilaufende Ventilatoren, eingesetzt (Darstellung in Abbildung 16). Die Wirkungsgradeinbuße beim Wegfall des Gehäuses kann bei beengten Platzverhältnissen durch geringeren Platzbedarf ausgeglichen werden. Dieser gestattet es, die Anschlussleitungen größer zu dimensionieren, so dass die Verluste dort geringer werden. Bei Geräten, bei denen die äußeren Abmessungen begrenzt sind, kann für das gesamte Gerät bei entsprechender Optimierung der Einbauten ein gleich hoher Wirkungsgrad erreicht werden. Die Abbildung 17 zeigt den Strömungsverlauf eines solchen Freiläufers. Ein weiterer Vorteil des freilaufenden Ventilators ist die bessere Zugänglichkeit des Laufrades zum Säubern.



Abb. 16: Freilaufender Radialventilator der BerlinerLuft¹⁵

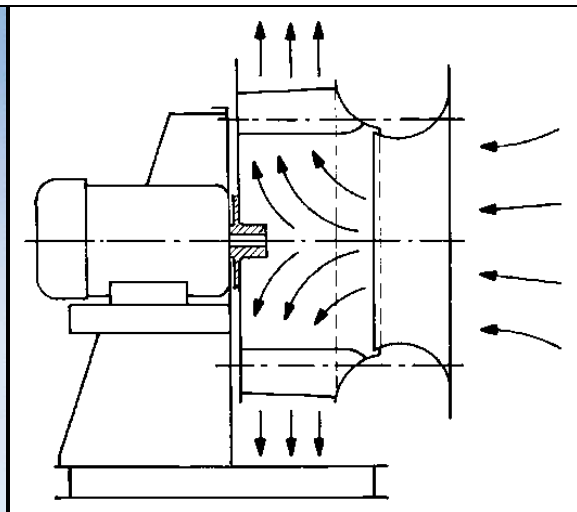


Abb. 17: Strömungsverlauf in einem freilaufenden Radialventilator¹⁶

¹⁵ BerlinerLuft Freiläufer, 2008, S. 1

¹⁶ Recknagel, 2008, S. 1285

4.4.1 Vorteile freilaufender Räder

Ventilatoren mit Spiralgehäuse werden oft über Keilriemen angetrieben und sind doppelseitig ansaugend in RLT-Anlagen ausgeführt. Dadurch ist eine feste Betriebsdrehzahl vorgegeben und eine spätere Betriebspunktanpassung durch Änderung der Drehzahl kann bei den meisten nicht mit Frequenzumrichtern geregelten Anlagen nur durch den Austausch der Riemenscheiben realisiert werden. Teilweise werden auch riemengetriebene Anlagen über einen FU geregelt, doch auch hier ist das freilaufende Rad im Vorteil, da der Riemenantrieb ein Verschleißteil darstellt, das häufig gewartet werden muss.

Im Gegensatz dazu kann das wartungsfreie freilaufende Radialrad beim Einsatz mit einem FU stufenlos drehzahl geregelt werden, worin ein hohes Einsparpotential liegt. Es werden ebenfalls durch das direkt angetriebene Laufrad die nicht unerheblichen Riemenverluste vermieden, die den Systemwirkungsgrad des Antriebes nachteilig beeinflussen (ca. 3-8 %). Die Störanfälligkeit wird gleichzeitig durch den Wegfall des Riemetriebes sowie der Ventilatorwelle einschließlich der Lagerung reduziert. Weitere negative Einflüsse wie die An- und Abströmbedingungen, Lagerstreben oder Keilriemenschutzvorrichtung, die die Zuströmung zum Laufrad behindern, entfallen bei der Verwendung eines freilaufenden Rades vollständig. Die energetischen Vorteile machen sich vor allem bei kleineren Druckerhöhungen, wie sie zumeist in RLT-Anlagen vorkommen, bemerkbar. Durch den Wegfall des Riemenantriebes kann gegebenenfalls auch auf eine zweite Filterstufe am Geräteaustritt verzichtet werden, da durch die nicht mehr auftretenden Abriebverschmutzungen meist nur noch ein Filter am Geräteeintritt benötigt wird.

Auch ein wichtiger Punkt ist die längere Lebensdauer des Antriebsmotors durch eine geringere Lagerbelastung gegenüber dem Riemenantrieb. Ein weiterer Vorteil ist die relativ niedrige Ausblasgeschwindigkeit auf der Druckseite des Ventilators. Die damit sehr gering ausfallenden dynamischen Anteile an der Gesamtdruckdifferenz machen den Einsatz von freilaufenden Rädern sinnvoll und gleichzeitig führt die niedrige Strömungsgeschwindigkeit zu einer gleichmäßigen und verlustarmen Anströmung der nachfolgenden Bauteile. Der nicht nutzbare dynamische Druckanteil macht sich besonders bei niedrigen Anlagendrücken bemerkbar, da hier der Anteil des dynamischen Drucks an der Gesamtdruckerhöhung hoch ist. Des Weiteren sind durch den Wegfall des Spiralgehäuses alle Ausblasrichtungen mit einer

Ventilatorausführung möglich und gleichzeitig wird durch den Wegfall eine gute Zugänglichkeit und einfache Reinigung des Ventilators garantiert. Durch den bereits oben beschriebenen Wegfall von Lagerstreben und Keilriemenscheiben besteht zusätzlich die Möglichkeit einer exakten Volumenstrommessung an der Ansaugdüse über eine Ringmessleitung. Dabei kann durch die Bestimmung der Druckdifferenz zwischen dem Saugraum des Ventilators und der engsten Stelle der Düse, unter Verwendung eines experimentell bestimmten Kennwertes (Düsenbeiwert), der Volumenstrom mit einer Toleranz von +/- 5 % bestimmt werden. Für den Einbau in RLT-Anlagen sind zusätzlich der leichtere Einbau, der geringere Platzbedarf, das geringere Gewicht und vor allem der günstigere Preis der freilaufenden Ventilatoren gegenüber Gehäuseventilatoren von entscheidender Bedeutung.

5 Einsparungen durch Antrieb & Regelung der Ventilatoren

5.1 Anforderungen an Antrieb und Regelung

Bei den wenigsten Anwendungen, bei denen ein Ventilator eingesetzt wird, ist die benötigte Leistung konstant. Meistens muss nur während weniger Betriebsstunden die Auslegungsleistung bereit gestellt werden. Durch eine Regelung der Anlagenleistung auf den tatsächlichen Bedarf können in erheblichem Maße Betriebskosten gespart werden. Entsprechend gibt es viele Anlagen, die mit variablem Volumenstrom arbeiten.

Die Einflussgrößen auf den Leistungsbedarf variieren mit den unterschiedlichen Einsatzgebieten. Es kann sich dabei um Raumtemperaturen, Schadstoffkonzentrationen, Kältebedarfe, Windlasten, Raum- und Anlagenauslastungen, Staubanfälle und vieles mehr handeln. Eine kostenoptimale Fahrweise und Anlagenauslastung ist nur mit einer Kombination aus einem energetisch optimierten Motor in Verbindung mit einer passenden Anlagenregelung zu erreichen.

5.2 Einsatz von Drehstrommotoren

5.2.1 Varianten von Drehstrommotoren

Drehstrommotoren sind als Standardantrieb in der Industrie und speziell in der Fördertechnik am stärksten verbreitet. Durch ihre robuste Konstruktion und einen geringen Wartungsaufwand sind sie für verschiedenste Einsatzfälle geeignet. Drehstrommotoren werden in ihrer Bauart nach Asynchron- und Synchronmotoren unterschieden.

Auf dem Markt sind weitere Motorenvarianten erhältlich, jedoch spezifiziert sich die folgende Beschreibung auf die Drehstrommotoren, da diese in der Antriebstechnik von Ventilatoren von wichtiger Bedeutung sind. Aufgrund eines deutlichen höheren Anschaffungspreises oder einem erhöhten Wartungsaufwand werden alternative Antriebskonzepte nur in Sonderfällen eingesetzt und werden aus diesem Grund in der folgenden Beschreibung nicht weiter erörtert.

5.2.2 Synchronmotoren

Ein Synchronmotor besteht aus einem drehbar gelagerten Permanentmagneten, dem „Rotor“ beziehungsweise „Läufer“. Dieser sitzt in einem Käfig mit drei Kupferwicklungen, dem „Stator“. An diese Wicklungen wird je eine Phase des Stromnetzes angeschlossen. Aufgrund des phasenverschobenen Spannungsverlaufs der drei Phasen beim Drehstrom wird in den Statorwicklungen ein Magnetfeld erzeugt, dessen Ausrichtung (Nord- und Südpol) sich mit der Netzfrequenz im Stator dreht. Der magnetische Rotor folgt diesem Magnetfeld. Synchronmotoren drehen sich also mit der Netzfrequenz. Tatsächlich können sie auch nur in diesem Zustand ein Moment (Drehkraft) erzeugen. Kommt ein Synchronmotor aus dem Takt, z.B. weil er zu stark belastet wird, bricht das Drehmoment schlagartig zusammen. Aus diesem Grund benötigt er zum Anfahren eine Anlaufhilfe, dies ist z. B. ein Frequenzumrichter. Die Trägheit des Rotors wäre zu hoch, um ihn aus dem Stillstand auf Netzfrequenz zu beschleunigen.

Synchronmotoren haben einige entscheidende Vorteile gegenüber anderen Motorbauarten. Sie haben einen sehr hohen elektrischen Wirkungsgrad, auch im Teillastbetrieb. Ihre Leistungsdichte, also das Verhältnis von Leistung zu Volumen, ist höher als bei anderen Motoren. In Verbindung mit Frequenzumrichtern ist eine präzise Regelung möglich. Die hohe Energieeffizienz hat jedoch ihren Preis: Synchronmotoren sind in der Anschaffung meist teurer als entsprechende Asynchronmotoren. In der Ausführung als Schleifringläufer sind sie auch weniger robust. Dennoch macht sich in vielen Fällen die Mehrinvestition durch die Energiekosteneinsparung bezahlt.

Zurzeit haben Synchronmotoren in der Fördertechnik nur eine sehr geringe Verbreitung. Es ist jedoch anzunehmen, dass sich dies mit steigenden Energiepreisen und zugleich sinkenden Preisen für Frequenzumrichter ändern wird.

5.2.3 Asynchronmotor

Auch der Asynchronmotor besteht aus einem Stator (auch Ständer genannt) und einem Rotor (auch Läufer genannt) mit Kupferwicklungen. Eine Schnittdarstellung eines solchen Motors ist in der folgenden Abbildung 18 dargestellt. Im Gegensatz zum Synchronmotor sind die Enden der Läuferwicklungen jedoch kurzgeschlossen und werden nicht auf Schleifringe geführt, daher auch die Bezeichnung

„Kurzschlussläufermotor“. Durch das Wechselfeld im Stator wird im Läufer berührungslos ein Strom „induziert“ und damit ein Magnetfeld aufgebaut.

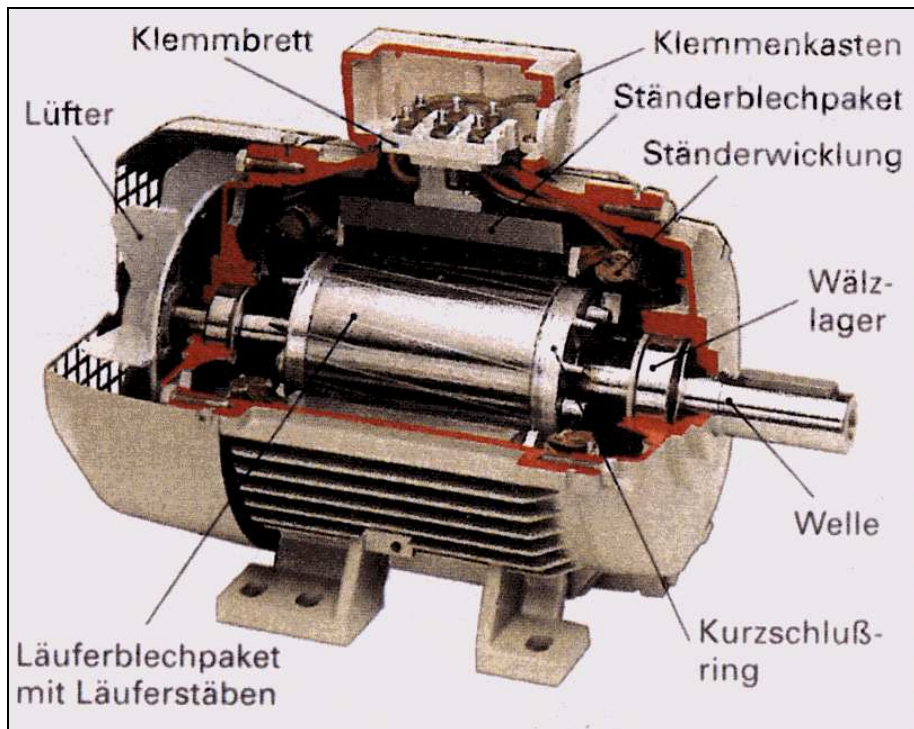


Abb. 18: Schnittdarstellung eines Asynchronmotors¹⁷

Die Bezeichnung Asynchronmotor rührt daher, dass sich der Rotor nicht synchron mit dem Statormagnetfeld dreht, sondern langsamer läuft. Man spricht von einem „Schlupf“. Dieser Schlupf hängt von der Last auf der Motorwelle ab. Je nachdem, wie die Statorwicklungen aufgebaut sind, spricht man von zwei-, vier-, sechs- oder mehrpoligen Motoren. Durch Veränderung der Größen Polpaarzahl, Frequenz und Schlupf wird die Nenndrehzahl bestimmt. Bei polumschaltbaren Motoren ergibt sich eine Halbierung der Drehzahl durch die Verdopplung der Polpaarzahl. Nachteilig sind dabei die großen Drehzahlsprünge. Es können immer nur ganze Polpaare, also geradzahlige Polzahlen auftreten. Die Normdrehzahl wird durch die Polzahl und die Netzfrequenz bestimmt:

- bei 50 Hz und Polzahl 2: $n = 3.000$ Umdrehungen pro Minute
- bei 50 Hz und Polzahl 4: $n = 1.500$ Umdrehungen pro Minute
- bei 50 Hz und Polzahl 6: $n = 1.000$ Umdrehungen pro Minute
- bei 50 Hz und Polzahl 8: $n = 750$ Umdrehungen pro Minute

Zusammen mit dem Schlupf ergibt sich im Auslegungspunkt eine Nenndrehzahl von ca. 2.900 Umdrehungen pro Minute bei 2-poligen Motoren. Mit polumschaltbaren

¹⁷ VEM Produktkatalog, 2008, S. 16

Motoren lassen sich verstellbare Drehzahlen und damit auch Leistungsstufen realisieren. Je nach Ausführung haben polumschaltbare Motoren in beiden Stufen das gleiche Drehmoment oder in der unteren Stufe ein geringeres Drehmoment. Andere Drehzahlen müssen durch Zwischenschaltung eines Getriebes erreicht werden.

Um den hohen Anfahrstrom zu begrenzen wird die Stern/Dreieck-Schaltung verwendet. Mit dem Stern/Dreieck-Anlauf (beim Anlauf Stern, im Betrieb Dreieck) liegen in der Sternschaltung 230 Volt an. Nach einer kurzen Zeit (Motor ist hoch gelaufen) wird durch einen externen Schalter oder Schützkontakt in die Dreieckschaltung umgeschaltet und 400 V sind angelegt. In der Sternschaltung hat der Motor - bei gleicher Netzspannung - nur ein Drittel des Anlaufstromes und des Drehmomentes.

Asynchronmotoren lassen sich preiswert herstellen und sind ohne Schleifringe fast wartungsfrei. Der Entfall der Schleifringe hat auch den Vorteil, dass der Motor ohne Funkenbildung läuft und ein Einsatz in einem explosionsgeschützten Bereich möglich ist. Die folgende Abbildung 19 zeigt einen Drehstrom-Asynchronmotor des Fabrikats VEM Motors. Gut zu erkennen ist die Motorwelle, auf der bei dem direkt angetriebenen freilaufenden Ventilator das Laufrad montiert wird. Die vielen Kühlrippen dienen der Wärmeabfuhr. Die Bauform des dargestellten Motors ist „B3“. Die Bauform legt die Lage und Befestigungsart der Maschine nach DIN 42950 fest, in diesem Fall stehend durch die Standfüße.



Abb.19: Drehstrom-Asynchronmotor Fabrikat VEM mit Kühlrippen¹⁸

¹⁸ VEM-Produktkatalog, 2008, S. 3

Ein Betrieb am Drehstromnetz ist meist ohne Anlaufhilfe möglich. Aufgrund dieser Vorteile sind Asynchronmaschinen die überwiegende Zahl der heute eingesetzten Drehstrommotoren zum Antrieb von Ventilatoren. Diese weite Verbreitung sorgt dafür, dass der Anwender aus einem großen Angebot verschiedener Lieferanten auswählen kann. Um die Kompatibilität der angebotenen Motoren zu gewährleisten, wurden viele Eigenschaften in internationalen Normen festgelegt. Europaweit sind für Motoren bis 132 kW die Leistungsstufen und die zugehörigen Abmessungen in der DIN EN 50347 (2003-09) festgelegt. Man spricht hier von „Normmotoren“. Es werden insbesondere die Achshöhe und die Wellenenden-Abmessungen genormt, so dass in diesem Leistungsbereich die Motoren problemlos gegen die eines anderen Herstellers ausgetauscht werden können.

Oberhalb von 132 kW beginnt der Bereich der „Transnormmotoren“. Hier werden die Abmessungen aus der DIN IEC 60072 (2006-03) entnommen. Diese sind aber keinen Leistungsstufen zugeordnet, so dass bei diesen Maschinen teilweise nicht einmal die Baureihen des gleichen Herstellers problemlos austauschbar sind.

5.2.4 Auswahl des Motors

Die Auswahl des Förderantriebs sollte unter dem Gesichtspunkt erfolgen, welche Variante über die Lebensdauer des Motors am wirtschaftlichsten ist. Bei Motoren haben die Anschaffungskosten einen geringen Einfluss auf die Lebenszykluskosten. Auch die Installationskosten unterscheiden sich kaum, solange es sich um Normmotoren handelt. Die Folgekosten übertreffen die Anschaffungskosten eines Motors oft schon im ersten Jahr. Asynchronmotoren haben eine durchschnittliche Lebensdauer von 12 Jahren im Bereich unter 7,5 kW, von 16 Jahren im Bereich zwischen 7,5 und 75 kW und etwa 20 Jahren bei Leistungen größer als 75 kW. Angesichts dieser hohen Lebensdauer bestimmen die Wartungs- und vor allem die Energiekosten die Summe der Lebenszykluskosten. Durch hocheffiziente Motoren können die Energiekosten und somit die Lebenszykluskosten gesenkt werden.

5.2.5 Wirkungsgrad von Elektromotoren

Der elektrische Wirkungsgrad eines Förderantriebs wird durch Energieverluste an verschiedenen Stellen bestimmt. Der Widerstand in den Kupferdrähten führt zu einer Erwärmung der Motorwicklung. Diese Wärmeenergie muss abgeführt werden und kann nicht mehr für den Förderantrieb genutzt werden. Wenn bei der Kupferwicklung an Material gespart wird, sind die Verluste höher. Auch in der Rotorwicklung entsteht Wärme. Obwohl die Rotorwicklung oft aus Aluminium besteht, spricht man auch hier von Kupferverlusten. Reibungsverluste entstehen durch Lagerreibung. Hier kann auch die Energie für den Betrieb des Lüfters hinzugezählt werden. Art, Nennleistung und Belastung der Motoren entscheiden über die Verluste von Elektromotoren im Dauerbetrieb. Mit steigender Nennleistung nehmen die relativen Verluste ab: Große Motoren haben wesentlich bessere Wirkungsgrade als kleine, aufgrund der geringeren Wicklungsverluste durch die höheren Leiterquerschnitte. Die Streuung der Wirkungsgrade von verschiedenen Motoren einer Leistungsklasse nimmt ebenfalls mit wachsender Leistung ab. Da viele Motoren aber hohe Betriebsstundenzahlen erreichen, ist jeder Prozentpunkt Wirkungsgrad eine enorme Einsparquelle.

Eine Orientierung gibt die Klassifizierung nach der freiwilligen Vereinbarung zwischen der Europäischen Kommission und dem Komitee der Hersteller von elektrischen Maschinen und Leistungselektronik (CEMEP). Sie teilt Motoren im Leistungsbereich zwischen 1,1 kW und 90 kW in Effizienzklassen ein. Dabei wird nach Baugröße und Polzahl differenziert. Für Motoren, die mit hoher Auslastung laufen, bietet die Klasse „EFF1“ (Hocheffizienzmotoren) einen hohen Wirkungsgrad. Für Anwendungen mit geringeren Betriebsstundenzahlen reicht die Klasse „EFF2“ (im Wirkungsgrad verbesserte Motoren). Motoren der Klasse „EFF3“ entsprechen nicht mehr dem Stand der Technik und dürfen nicht mehr verkauft und eingesetzt werden. Befindet sich im Katalog oder auf dem Typenschild keine Angabe, kann das ein Hinweis darauf sein, dass der Motor nach CEMEP-Norm in die Effizienzkategorie EFF3 fällt.

Der Wirkungsgrad eines Elektromotors lässt sich in erster Linie verbessern durch:

- Reduktion der Verluste in den Wicklungen. Dies kann durch Vergrößerung des Leiterquerschnitts oder durch geeignete Verbesserungen der Wickeltechnik erreicht werden

- Verbesserung der Luftführung im Motor
- Verkleinerung der Fertigungstoleranzen

5.2.6 Zukünftige Entwicklung der Motoreffizienz

Die zukünftige Entwicklung auf dem Motorenmarkt wird zu deutlichen Veränderungen führen, denn ab dem 16. Juni 2011 dürfen nur noch hocheffiziente Asynchron-Drehstrommotoren des Leistungsbereichs 0,75 Kilowatt bis 375 Kilowatt verkauft werden. Diesen Beschluss fasste der Ökodesign-Regelungsausschuss für Elektromotoren für die EU-Mitgliedstaaten und veröffentlichte die „Mindestanforderungen für Energieeffizienz von Asynchron-Drehstrommotoren“ im Amtsblatt 640/2009 der EU. Da diese Motorenart am häufigsten in der Industrie und im Gewerbe zum Einsatz kommt und diese im Jahr 2008 fast 90 Prozent des Stromverbrauchs der Elektromotoren in den 27 EU-Mitgliedstaaten verursachten (laut der Studie von P. Radgen), ergeben sich erhebliche Energieeinsparpotentiale. Mit effizienteren Elektromotoren ließen sich so allein europaweit bis zum Jahr 2020 voraussichtlich 135 Milliarden kWh einsparen laut der Studie. Umgerechnet in Kohlenstoffdioxidausstoß in die Atmosphäre wäre dies eine Einsparung von 70 Millionen Tonnen Kohlendioxid. Allein in Deutschland können so bis zum Jahr 2020 circa 27 Milliarden Kilowattstunden Strom weniger verbraucht und damit rund 14 Millionen Tonnen CO₂-Emissionen vermieden werden, diese Rechnung ist in den Formel 6 gezeigt:

$$E_{CO_2} = A_{CO_2} \cdot P_{Einsparung}$$

Formel 6 CO₂-Emmisionseinsparung

Legende

E_{CO_2} = CO₂-Einsparung [Pa]

A_{CO_2} = CO₂-Emmissionen [kg CO₂ / kWh]

$P_{Einsparung}$ = Einsparung elektr. Energie [kWh]

$$E_{CO_2} = 0,52 \frac{kgCO_2}{kWh} \cdot 135 \cdot 10^9 kWh = \underline{\underline{70,2 \cdot 10^9 kgCO_2}} \quad \text{bezogen auf die EU-Staaten}$$

$$E_{CO_2} = 0,52 \frac{kgCO_2}{kWh} \cdot 27 \cdot 10^9 kWh = \underline{\underline{14,04 \cdot 10^9 kgCO_2}} \quad \text{bezogen auf Deutschland}$$

Diese Werte ergeben sich über den bundesdeutschen Durchschnitt von 520 Gramm CO₂-Emissionen pro kWh für die Erzeugung von Elektroenergie laut Bundesumweltministerium (Emissionsfaktor des deutschen Strommixes von 2007). Es handelt sich hierbei um den ermittelten durchschnittlichen Wert, dieser ist jedoch nur als mögliches maximales Einsparpotential zu werten, da sich der Anteil an regenerativen Energien an der Gesamtenergieerzeugung erhöht und die durchschnittlichen CO₂-Emissionen pro kWh somit sinken.

Zum Vergleich: Man könnte durch die Einsparung auf den Bau von acht Großkraftwerken mit einer elektrischen Leistung von je 700 Megawatt verzichten.

Effizienzklassen ermöglichen, elektrische Antriebe nach ihrem Stromverbrauch und ihrem Wirkungsgrad zu klassifizieren. Die weltweite Entwicklung bei Energiesparmotoren hat in den vergangenen Jahren zu einer Vielzahl von länderspezifischen Vorschriften, Gesetzen und Normen geführt, die es schwer machen, eine vergleichbare Bewertung der einzelnen Produkte durchzuführen. Um hier wieder eine global einheitliche Basis zu erreichen, wurde die neue IEC-Norm 60034-30 geschaffen. Die bisherigen europäischen Effizienzklassen (EFF) werden nach einer Übergangsfrist künftig durch die weltweit gültigen Effizienzklassen IE1 (entspricht EFF2), IE2 (entspricht EFF1), sowie IE3 ersetzt und ergänzt. Die Kennzeichnung erfolgt in Anlehnung an die Schutzartkennzeichnung IP (International Protection) mit IE (International Efficiency).

neue Klasse	Bedeutung der Klasse	ersetzt Effizienzklasse
IE1	„Standard efficiency“, bedeutet Standard-Effizienz-Motor	EFF2
IE2	„High efficiency“, bedeutet Hocheffizienz-Motor	EFF1
IE3	„Premium efficiency“, bedeutet höchste Effizienz	-

Tab. 3: Neue Wirkungsgradklassen bei Motoren

Der Einsatz der IE2- und der noch effizienteren IE3-Motoren ist sehr wirtschaftlich. Bereits nach wenigen Jahren erbringen die neuen Effizienzvorgaben finanzielle Entlastungen für die Unternehmen.

Auch nach 2020 ermöglicht der zunehmende Einsatz hocheffizienter Elektromotoren mit höherer Lebensdauer enorme Energieeinsparpotentiale. Ohne die Einführung verpflichtender Mindeststandards ließe sich diese Stromeinsparung nicht erreichen.

In Europa ist der Verkaufsanteil der Hocheffizienzmotoren – trotz ihrer hohen Wirtschaftlichkeit – in den vergangenen zehn Jahren nur von zwei Prozent auf rund neun Prozent gestiegen. In den nächsten Jahren wird sich dieser Anteil jedoch deutlich erhöhen, denn laut Amtsblatt 640/2009 der EU dürfen ab 2011 Motoren der bisherigen Effizienzklasse EFF2 nicht mehr verkauft werden. Außerdem können in Europa nur noch asynchrone Drehstrommotoren des Leistungsbereichs von 0,75 kW bis 375 kW in Verkehr gebracht werden, falls sie den künftigen Effizienzstandard IE2 erfüllen.

Ein weiterer Schritt, den Wirkungsgrad der Elektromotoren zu erhöhen folgt ab Januar 2015: Dann dürfen in der Effizienzklasse IE2 im Leistungsbereich 7,5 kW bis 375 kW nur noch Elektromotoren mit Drehzahlregelung in Verkehr gebracht werden. Andernfalls müssen sie die höhere Effizienzklasse IE3 erfüllen. Ab Januar 2017 gilt dies auch für Elektromotoren des Leistungsbereichs 0,75 kW bis 7,5 kW.

In den USA gelten seit Jahren Mindesteffizienzstandards. Dort erreichen die Hocheffizienzmotoren (IE2) bereits einen Anteil von 54 Prozent und die noch effizienteren IE3-Motoren derzeit schon 16 Prozent laut der Studie von P. Radgen. In Deutschland und Europa liegt der Anteil der IE3-Motoren noch bei unter einem Prozent.

5.3 Ventilatorenregelung

5.3.1 Bedarf einer Ventilatorenregelung

Welche Regelung am besten ist, hängt einerseits von der Form und Veränderlichkeit der Anlagenkennlinie und andererseits vom Typ des Ventilators ab. Generell gilt aber, dass es in den meisten Fällen besser ist, den Ventilator der Anlage als umgekehrt die Anlage dem Ventilator anzupassen.

Nach den Proportionalgesetzen verhält sich die Erhöhung des Volumenstroms proportional zur Drehzahl des Ventilators, daraus folgt eine Druckerhöhung in der 2. Potenz, und die zu erbringende elektrische Leistung steigt mit der 3. Potenz. Eine Halbierung des Volumenstroms reduziert demnach den Energiebedarf des Ventilators auf ein Achtel. Dies ist in den folgenden Proportionalitätsgesetzen zu erkennen:

$$\frac{\overset{\circ}{V}_1}{\overset{\circ}{V}_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad \Rightarrow \quad \overset{\circ}{V}_2 = \overset{\circ}{V}_1 \cdot \frac{n_2}{n_1}$$

Formel 7 Proportionalität Volumenstrom

$$\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \quad \Rightarrow \quad \Delta p_2 = \Delta p_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2$$

Formel 8 Proportionalität Druckdifferenz

$$\frac{P_{w1}}{P_{w2}} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^3 \quad \Rightarrow \quad P_{w2} = P_{w1} \cdot \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^3$$

Formel 9 Proportionalität Wellenleistung

Legende

$\overset{\circ}{V}$ = Volumenstrom [m³/h]

Δp = Druckdifferenz [Pa]

P_w = Wellenleistung [W]

Indizes:

1 = Parameter im Fall 1

2 = Parameter im Fall 2

Es werden im Folgenden zwei Möglichkeiten zur Leistungsregelung durch Veränderung der Anlagenkennlinie (Drossel- und Bypassregelung), sowie zwei Optionen zur Veränderung der Ventilator-kennlinie (Drall- und Drehzahlregelung) beschrieben.

5.3.2 Die Drosselregelung

Bei der Drosselregelung wird durch einen verstellbaren Widerstand in der Kanalleitung (Drosselklappe) der Strömungsdruckverlust künstlich erhöht. Dadurch wird die Anlagenkennlinie steiler und der Betriebspunkt wird in Richtung des kleineren Volumenstroms verschoben, wie in der Abbildung 20 erkennbar ist. Die Leistungsaufnahme des Ventilators verringert sich dadurch kaum. Die nicht als Strömungsenergie gebrauchte Leistung wird in weniger wertvolle bzw. bei Kühlvorgängen sogar schädliche Wärmeenergie umgewandelt. Aus energetischer Sicht ist von dieser Art der Regelung abzuraten. Da eine Drosselregelung in der Anschaffung billiger ist als andere Regelvorrückungen, ist sie dennoch in einigen Anlagen zu finden. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht ist dies nur in zwei Fällen zu rechtfertigen: Wenn der Volumenstrom nur selten und nur um weniger Prozent

abgesenkt werden soll oder wenn die Drosselventile zur Einzelregelung des Luftstroms für verschiedene Verbraucher genutzt werden und eine zusätzliche Regelung die Ventilatorleistung an den Gesamtluftbedarf anpasst.

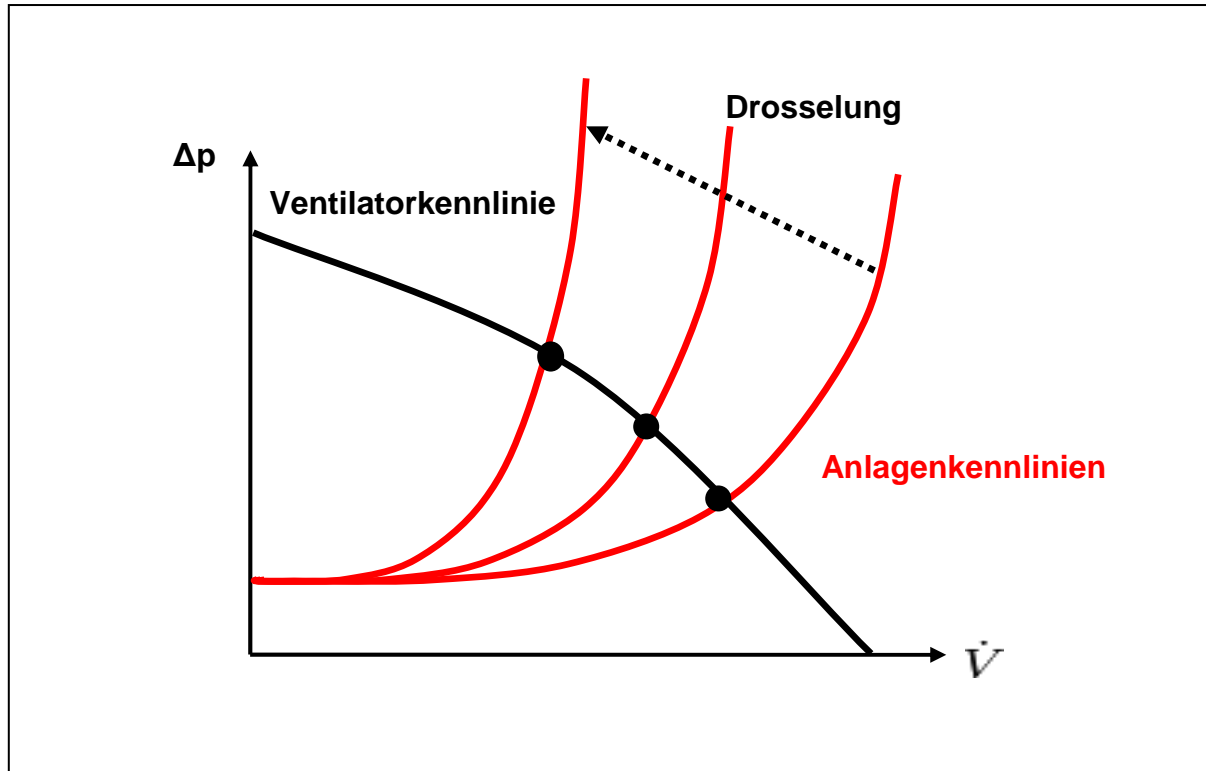


Abb. 20: Darstellung der Auswirkungen einer Drosselregelung

5.3.3 Die Bypassregelung

Ein Bypass ist eine Umgehungsleitung, die von der Druckseite des Ventilators zurück zur Saugseite führt. Wird der Bypass geöffnet, strömt nur noch ein Teil der Luft an die Stelle, die eigentlich von der Lüftungsanlage versorgt wird, der Rest strömt auf die Saugseite zurück. Dadurch sinkt der effektive Förderstrom der Anlage. Gleichzeitig reduziert sich durch den Bypass die Gesamtdruckverluste über den Ventilator. Je nach Ventilatorcharakteristik kann der Ventilatorförderstrom dadurch so stark ansteigen, dass der Energieverbrauch sogar höher ist, als bei geschlossenem Bypass. Dieser Energieverbrauch führt, wie bei der Drosselregelung, zu einer Aufheizung des Luftstroms. Im Interesse geringerer Betriebskosten ist von einer Bypassregelung abzuraten.

5.3.4 Die Drallregelung

Ein Drallregler ist ein Leitrad mit verstellbaren Schaufeln vor dem Ventilatoreintritt. Ein solcher ist auf Abbildung 21 dargestellt. Die Luft wird in eine Drehbewegung (Drall) versetzt. Dreht sich die Luft im gleichen Drehsinn wie das Laufrad (Gleichdrall), nimmt der Förderstrom des Ventilators ab. Durch einen Gegendrall lässt sich der Förderstrom sogar höher als der Nennförderstrom einstellen. Bei Radialventilatoren werden jedoch nur Drallregler eingesetzt, um den Volumenstrom nach unten zu regeln. Für Trommelläufer ist eine Drallregelung nicht geeignet, da sie hier zu großen Wirkungsgradverlusten führen würde. Sie wird deshalb nur bei Radialventilatoren mit rückwärts gekrümmten Laufschaufeln genutzt.

Der Drallregler bewirkt eine Verschiebung der Ventilator Kennlinie. Entsprechend stellt sich am neuen Schnittpunkt mit der Anlagenkennlinie ein neuer Betriebspunkt ein. Bei einer Drallregelung sinkt auch die Leistungsaufnahme des Motors. Diese Regelung ist dadurch gegenüber Drossel- und Bypassregelung zu bevorzugen. Der Wirkungsgradverlust bei geöffneten Schaufeln (voller Volumenstrom) liegt nur bei etwa 2-3 Prozent. Gesamtkostenvorteile hat ein einfacher Drallregler insbesondere dann, wenn er bei Anlagen eingesetzt wird, die häufig bei vollem bzw. geringfügig vermindertem Volumenstrom laufen und selten stark runter geregelt werden.

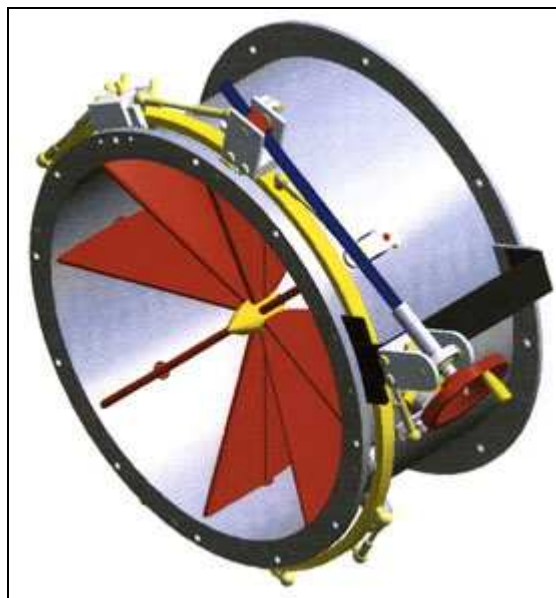


Abb. 21: Darstellung eines Drallreglers¹⁹

¹⁹ Lexis, 2000, S.112

5.3.5 Die Drehzahlregelung

Eine Reduzierung der Antriebsdrehzahl bewirkt eine Verschiebung der Ventilator Kennlinie nach unten wie die Abbildung 22 zeigt. Entsprechend wandert auch der Schnittpunkt mit der Anlagenkennlinie. In der Praxis wird die Drehzahlregelung häufig angewendet, insbesondere für starke Volumenstromreduzierungen.

Die Drehzahlregelung ist die technisch beste Art, ein Anlagensystem unterschiedlichen Betriebsbedingungen anzupassen. Die Energieeinsparung der Drehzahlregelung ist enorm, da der Leistungsbedarf bei Verringerung der Drehzahl in der 3. Potenz der Drehzahl abnimmt (siehe Formel 9 auf Seite 38). Ein weiterer Vorteil ist die Abnahme der Schallintensität, denn bei Verminderung der Drehzahl werden die Ventilatoren wesentlich leiser. Neben dem Frequenzumformer gibt es die Möglichkeit die Drehzahl über Regelgetriebe, polumschaltbare Motoren oder elektronisch geregelte Motoren (EC-Motoren) zu steuern.

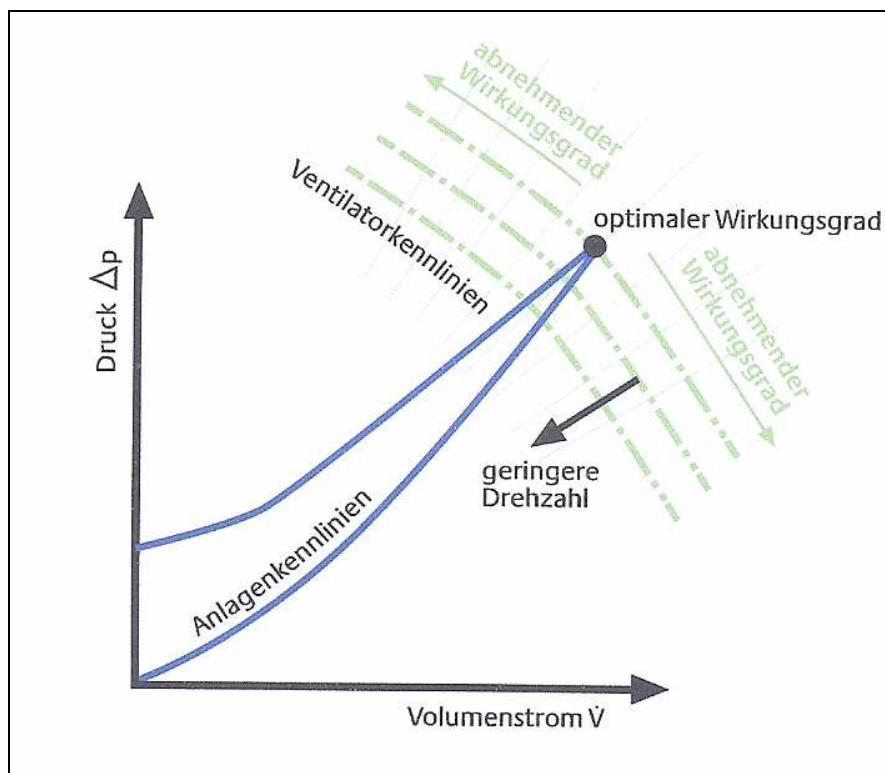


Abb. 22: Darstellung der Auswirkungen einer Drehzahlregelung²⁰

²⁰ Trogisch, 2009, S. 67

5.3.5.1 Betrieb mit Frequenzumformer

Frequenzumformer (FU) ermöglichen eine bedarfsgerechte und energiesparende Betriebsweise, bei der sich der Volumenstrom am Bedarf orientiert. In Antriebsaufgaben mit periodischer Beschleunigung und Bremsung liegen große Potenziale zur Energieeinsparung und Vermeidung von Verlusten durch Einsatz eines Frequenzumformers. Ein Frequenzumformer erlaubt eine fast verlustfreie Drehzahl- und Drehmomentenregelung, da der Wirkungsgrad meist über 95 Prozent beträgt.

Nötig wird der Einsatz eines Frequenzumrichters aufgrund der benötigten Drehzahlveränderung der Motoren. Frequenzumrichter werden insbesondere an Drehstrommotoren eingesetzt, um deren Anlauf- und Drehzahlverhalten zu verbessern oder zu erweitern. Werden Asynchronmotoren direkt am Wechselspannungsnetz betrieben, haben sie eine von ihrer Polzahl und der Netzfrequenz abhängige feste Nenndrehzahl wie schon beschrieben wurde.

Im Prinzip besteht der elektronische Frequenzumrichter aus einem Gleichrichter, der einen Gleichstrom-Zwischenkreis speist, und einem aus diesem Zwischenkreis gespeisten Wechselrichter. Die Höhe der Ausgangsspannung und auch dessen Frequenz können in weiten Grenzen geregelt werden.

Ein Frequenzumrichter ist somit ein Gerät, das aus einem Wechselstrom einer bestimmten Frequenz einen Wechselstrom einer anderen Frequenz macht. Mit dieser umgerichteten Frequenz wird dann der Verbraucher betrieben.

Frequenzumrichter gestatten den Einsatz von preiswerten Normmotoren (Asynchronmotoren) in einem weiten Drehzahlbereich. Mit besonderen Umformern kann die Bremsenergie elektrischer Maschinen wieder ins Netz zurückgespeist werden. Energierückspeisung spart elektrische Energie und Kosten für zusätzliche Kühlung, denn die Bremsenergie wird sonst in Wärme umgewandelt und belastet den Motor und Frequenzumrichter. Anstelle die Energie in Wärme umzuwandeln, wird die Energie mit einem zusätzlichen Wechselrichter phasensynchron ins Netz zurückgegeben.

Bei fachgerechter Anwendung kann diese Art der Drehzahlsteuerung somit zu besserer Prozesssteuerung, weniger Verschleiß mechanischer Bauteile, geringerem Geräuschpegel und erheblichen Energieeinsparungen führen. Diese Einsparungen sind in Abbildung 23 deutlich zu erkennen. Ein Vergleich der Leistungsaufnahme bei Betrieb mit einem Frequenzumformer (rote Kurve) zeigt ein wesentliches Einsparungspotenzial gegenüber der mechanischen Volumenstromregelung mit Drosselklappe (blaue Kurve). Die grüne Fläche zeigt das Energieeinsparpotential abhängig vom Volumenstrom. Um dieses Einsparpotential zu unterlegen, beschreibt ein Fallbeispiel im Abschnitt 5.3.5.2 den tatsächlichen Nutzen einer Umstellung auf eine Drehzahlsteuerung über Frequenzumrichter.

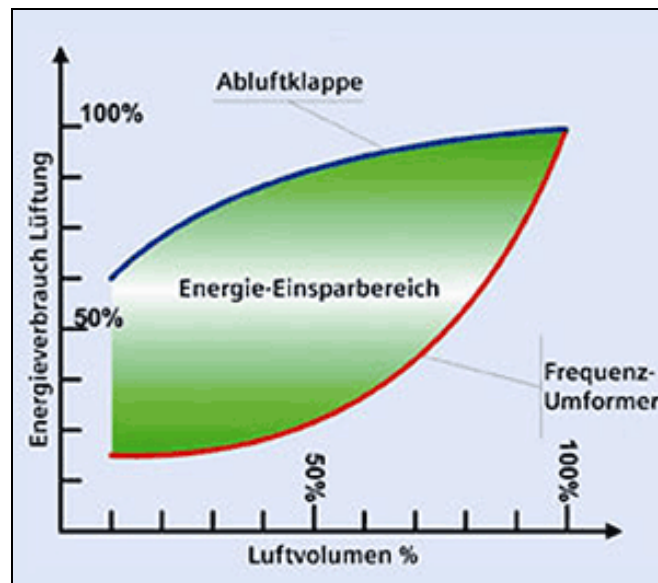


Abb. 23: Einsparpotential von Frequenzumrichtern²¹

5.3.5.2 Fallbeispiel Energieeinsparung im Zementwerk Volan

Das Werk der Volan Cement Plant Group, etwa 100 km entfernt von der Stadt Jining in der Inneren Mongolei im Norden von China, produziert mit vier Produktionslinien insgesamt 10.500 Tonnen Zement am Tag. Eine Ansicht des Werkes ist in der nachfolgenden Abbildung 24 zu erkennen. Das Werk ist im Jahr 2000 in Betrieb gegangen und hatte sich zum Ziel gesetzt, seinen Gesamtenergieverbrauch um 20 Prozent zu senken. Besonderes Augenmerk wurde auf die Antriebstechnik gelegt, denn diese benötigt den größten Teil der elektrischen Anschlussleistung eines Zementwerks. Als besonders hohe Energieverbraucher gelten hierbei die Antriebe der Ventilatoren. In einem Zementwerk sind das die Ventilatoren für Ofen, Kühler und Mühlen.

²¹ Trogisch, 2009, S. 72



Abb. 24: Volan Zementwerk in Jining (China)²²

Als die wirkungsvollste Maßnahme wird definiert: Statt den Luftstrom wie bisher mit mechanischen Drosselklappen zu regeln, soll dies jetzt über die Änderung der Motordrehzahl durch einen Frequenzumrichter erfolgen. Das bedeutet, nun laufen die Ventilatorenmotoren nur noch bei Erfordernis auf vollen Touren. Dies ist der Unterschied zu mechanischen Regelprinzipien wie Drosselklappen, die ständig ihre auf die maximale Fördermenge ausgelegte Nennleistung vom Stromversorgungsnetz beziehen, während der Luftstrom durch mechanische Widerstände gedrosselt wird. Das Energieeinsparpotential liegt also in der Differenz zwischen der tatsächlichen und der maximal möglichen Fördermenge. Ein Frequenzumrichter hingegen passt die Motordrehzahl immer genau an die aktuell erforderliche Fördermenge an, das heißt, es wird nur so viel Leistung aufgenommen, wie aktuell benötigt wird. Durch die daraus resultierenden Einsparungen amortisiert sich die Anschaffung eines Frequenzumrichters oft schon nach wenigen Monaten.

Die Volan Cement Plant Group rüstete daher die Ventilatormotoren der Kühler seiner drei Produktionslinien zu drehzahlvariablen Systemen mit Frequenzumrichtern um. Es wurde eine Energiesparanalyse nach der Umrüstung durchgeführt, um den Effekt zu überprüfen. Die Ergebnisse waren äußerst positiv: Bei der Produktionslinie 1 mit

²² Siemens Energieoptimierungsbericht

insgesamt sieben Motoren ergab sich eine Energieeinsparung von 37,12 Prozent, bei Produktionslinie 2 mit insgesamt fünf Motoren betrug sie 33,75 Prozent und bei Produktionslinie 3 mit insgesamt vier Motoren lag die Energieeinsparung bei 37,44 Prozent. Insgesamt sank der Energieverbrauch der Produktionslinien im Durchschnitt um rund 36 Prozent (35,78 %).

Der drehzahlvariable Betrieb mit Frequenzumrichter erzielt gleichzeitig noch weitere Vorteile. Die Drallregler, die zuvor den Luftstrom geregelt hatten, verschlissen durch den feinen Zementstaub schnell und mussten ständig gewartet beziehungsweise ausgetauscht werden. Diese Kostenfaktoren sparen die neuen Frequenzumrichter ein. Des Weiteren entfallen beim Betrieb am Frequenzumrichter die Stromspitzen beim Hochfahren und die damit verbundenen starken Momentenstöße. Das bedeutet auch, dass Druckwellen, die bisher das Rohrleitungssystem belasteten, nicht mehr auftreten. Der sanfte An- und Auslauf entlastet zudem die Mechanik des gesamten Antriebsstranges und erhöht dessen Lebensdauer.

Als Zusammenfassung ist festzustellen, dass durch die Ausrüstung der Ventilatoren im Volan-Zementwerk mit Frequenzumrichtern hohe Energieeinsparungen erzielt wurden, die dem Betreiber neue Marktchancen und eine erhöhte Wettbewerbsfähigkeit eröffnen.

5.3.6 Vergleich verschiedener Regelungsvarianten

Alle Regelungen zeigen ein unterschiedliches Verhalten und verursachen unterschiedliche Kosten, je nach dem, mit welchem Ventilator typ sie verwendet werden. Die Abbildung 25 zeigt einen Überblick über den Einsatzbereiche der Regelungen und zeigt, dass sich nur die Drehzahlregelung für einen energetisch vertretbaren Betrieb über fast den gesamten Stellbereich eignet.

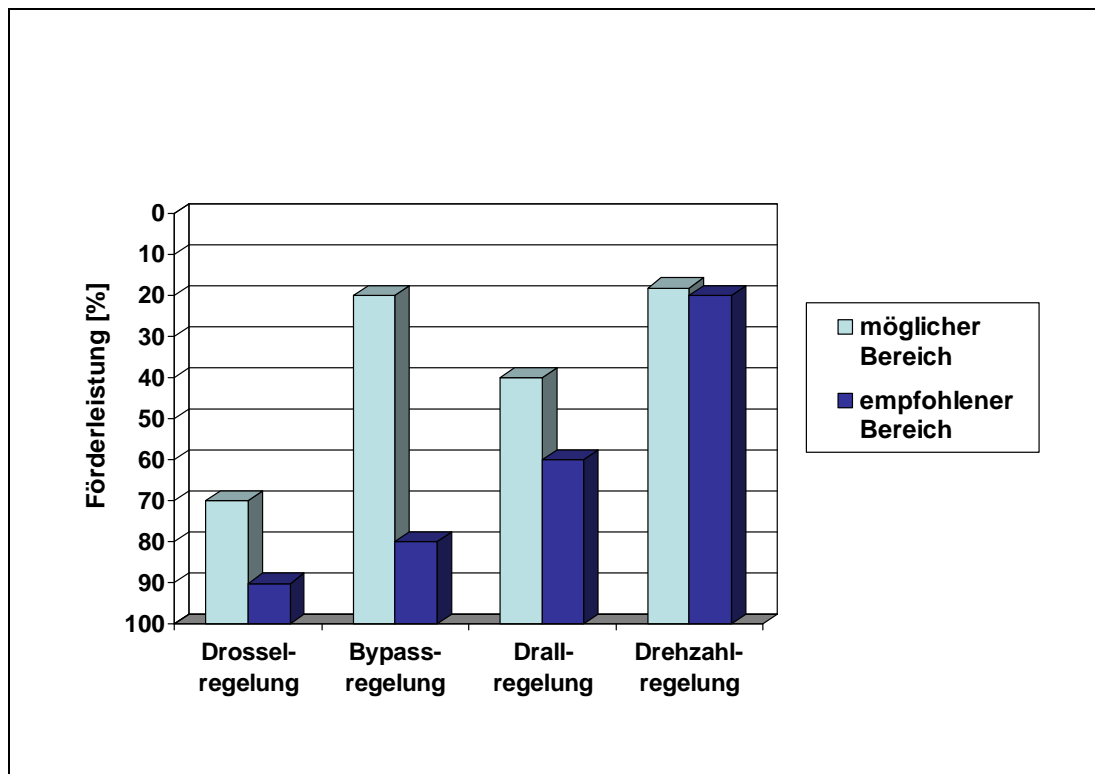


Abb. 25: Überblick über den Einsatzbereich der Regelungen

Ohne dass dies in jedem Einzelfall gültig wäre, treffen für die meisten Anwendungsfälle die folgenden Verallgemeinerungen zu:

- Drossel- und Bypassregelungen sind sehr uneffizient und sollten nur eingesetzt werden, wenn die Anlage fast immer auf Volllast laufen soll und nur selten der Volumenstrom reduziert wird.
- Drallregelungen eignen sich vor allem dann, wenn in erster Linie bei Volllast und im oberen Teillastbereich gefahren wird.
- Drehzahlregelungen sind besonders wirtschaftlich, wenn die Anlage viel im mittleren Teillastbereich arbeitet.
- Unter Lärmschutzgesichtspunkten sind Drossel-, Drall- und Bypassregelung wenig vorteilhaft.
- Mit einer Drehzahlregelung reduzieren sich sowohl Ventilator- als auch Motorengeräusch.
- Die Instandhaltungskosten werden durch keine der genannten Regelungsarten übermäßig erhöht.

6 Entwicklung eines verbesserten freilaufenden Radiallaufrades

6.1 Erfordernis zur Verbesserung von Laufrädern

Die Optimierung von freilaufenden Radiallaufrädern, besonders für den Einsatz in zentralen RLT-Geräten, wird aufgrund der zunehmenden Forderungen nach hoher Energieeffizienz nötig. Dabei haben sich in den letzten Jahren vor allem direktgetriebene freilaufende Räder mit rückwärts gekrümmten Schaufeln für den Einsatz in Klimazentralgeräten durchgesetzt. Dies hat den Grund, dass diese der Forderung der RLT-Gerätehersteller nach energetisch optimierten, kompakten und gleichzeitig leistungsstarken Ventilatoren in RLT-Anlagen am stärksten nachkommen. Ziel der Entwicklung der freilaufenden Radialräder ist daher, ein Laufrad zu entwickeln, das sich durch seine kompakte Bauweise und gleichzeitig hohe Energieeffizienz und Leistungsdichte auszeichnet.

6.2 Anforderungen an freilaufende Räder

Freilaufende Radialräder werden größtenteils in zentralen RLT-Geräten eingesetzt und so werden Aussehen, Geometrie und Leistungsbereiche der Laufräder von diesen bestimmt. Es werden im Folgenden die für die Gerätehersteller wichtigen Parameter beschrieben:

Ein wichtiges Kriterium für den Einsatz in RLT-Geräten ist die Kompaktheit der Laufräder, denn diese sollten einen möglichst großen Leistungsbereich bei gleichzeitig geringer Baugröße aufweisen. Denn daraus ergeben sich entscheidende Vorteile wie geringe Anschaffungskosten, reduzierter Platzbedarf und verbesserte Hygiene.

Entscheidend für die Einsatzbreite und die Wirtschaftlichkeit des RLT-Gerätes ist das Zusammenspiel zwischen Leistungsvermögen, Schallemission und mechanischer Beanspruchung (maximal mögliche Drehzahl). Daraus ergebend sollte das Laufrad in einem breiten Volumenstrombereich bei gleichzeitig hohem Spitzenwirkungsgrad arbeiten können. Es bringt also dem Hersteller wenig, wenn das Rad einen Spitzenwirkungsgrad weit über 80 % aufweist, diesen aber nur über einen kleinen Volumenstrombereich aufrecht erhalten kann, wie die Abbildung 26 deutlich macht.

Denn hier sind die verschiedenen Einsatzbereiche anhand eines Wirkungsgradsgradminimums abgegrenzt. Laufrad 1 weist einen sehr hohen Wirkungsgrad auf, aber nur einen kleinen Einsatzbereich und ist somit für diesen Fall ungeeignet. Das Rad 2 hingegen besitzt keinen so hohen Wirkungsgrad wie Rad1, ist jedoch durch seinen breiten Einsatzbereich für dieses Beispiel besser geeignet. Denn die Gerätehersteller fordern Laufräder, welche weder zum kleineren noch zum größeren Volumenstrom stark abfallen.

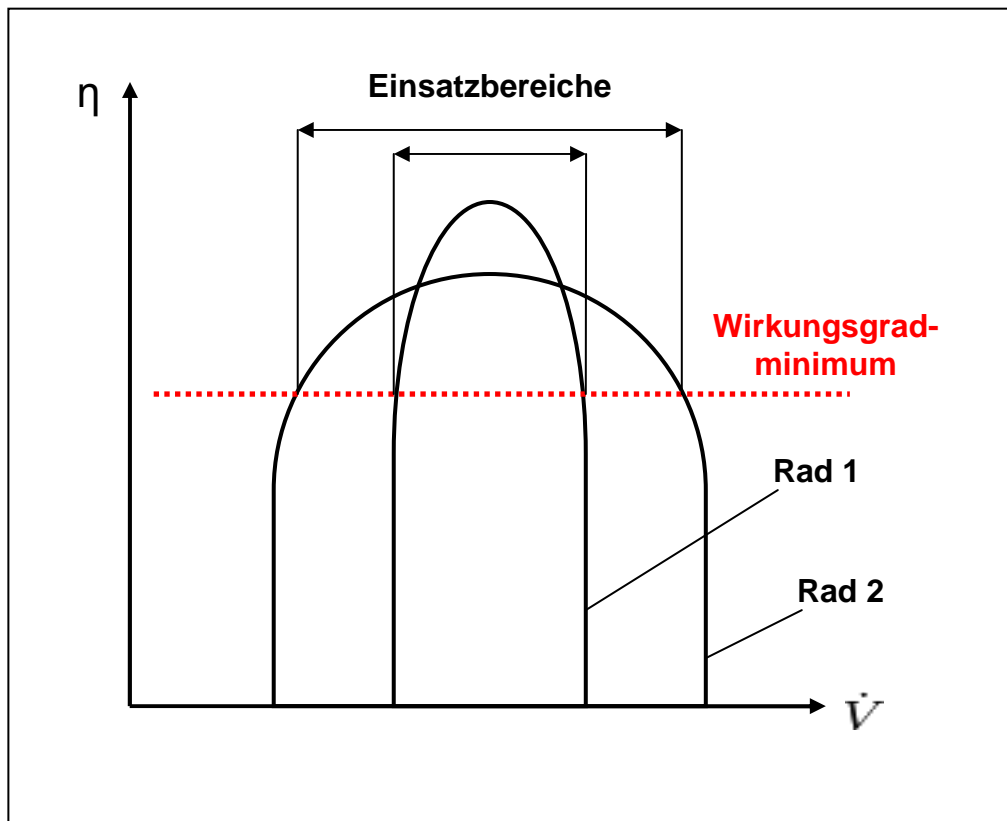


Abb. 26: Einsatzgrenzen zweier Radialräder

Um erhöhte Kosten für eine nachträgliche Schalldämpfung zu vermeiden, sind auch die durch das Laufrad auftretenden Schallemissionen von wichtiger Bedeutung. So soll ein Wirkungsgradmaximum mit einem möglichst geringen Schallpegel erreicht werden. Ein weiterer Punkt für den Gerätehersteller ist die mechanische Beanspruchbarkeit des Laufrades. Durch die bessere Regelbarkeit seit dem Einsatz von Frequenzumrichtern werden die Laufräder über ein breites Drehzahlpektrum eingesetzt und dabei oft bis an die mechanischen Grenzen der Laufradkonstruktion beansprucht.

6.3 Umsetzung der Entwicklung eines neuen Laufrades

6.3.1 Ausgangssituation

Das Ventilatorenprogramm der BerlinerLuft umfasst rückwärts gekrümmte Laufräder in radialer Bauart, in einem Spiralgehäuse als Gehäuseventilatoren oder als freilaufendes Rad in Kastengeräten (zum Beispiel für den Einsatz in Klimageräten, Trocknern oder Tunnelöfen). Dem Angebot an verschiedenen Gehäuseventilatoren soll ein weiterer freilaufender Ventilator hinzugefügt werden. Eine Zeichnung eines solchen direkt angetriebenen freilaufenden Ventilators ist im Anhang 3 auf der Seite 77 abgebildet. Deutlich zu erkennen auf der Zeichnung sind die einzelnen Bestandteile des Ventilators: auf einem Grundrahmen ist der Motorbock befestigt, auf welchem der Motor sitzt. Direkt auf der Motorwelle ist das Laufrad über eine Nabe befestigt und die Einlaufdüse führt zu einem optimalen strömungstechnischen Lufteintritt in das Laufrad. Zur Schwingungskompensation und zur Verhinderung einer Schwingungsübertragung auf andere Bauteile werden Kompensatoren und Federschwingungsdämpfer eingesetzt, wie auf der Zeichnung zu erkennen ist.

Aus den beschriebenen Anforderungen an freilaufende Laufräder ergibt sich das Entwicklungsziel nach einem energetisch optimierten freilaufenden Ventilators, der in einem breiten Einsatzbereich verwendet werden kann.

Der aktuelle Freiläufer REU 729/3.0 soll strömungstechnisch verbessert werden. Die Bezeichnung hat folgende Bedeutung:

- R: für „radial“
- E: für „einseitig saugend“
- U: für „Umwälzer“
- 7: beschreibt den Quotienten aus Laufradeintrittsdurchmesser (d_0) und Durchmesser zwischen den Schaufelenden (d_2) multipliziert mit 10
- 2: Kennzeichnung verschiedener Schaufelformen
- 9: Schaufelanzahl
- 3.0: Breitenverhältnis als Quotient aus der Schaufelbreite (b_2) und dem Durchmesser zwischen den Schaufelenden (d_2) multipliziert mit 10

Eine Darstellung dieser Parameter ist in Abbildung 27 zu erkennen und gleichzeitig stellt die Abbildung das Laufrad REU 729/3.0 als 3D-Modell dar. Auch zu erkennen sind die 9 rückwärts gekrümmten Schaufeln.

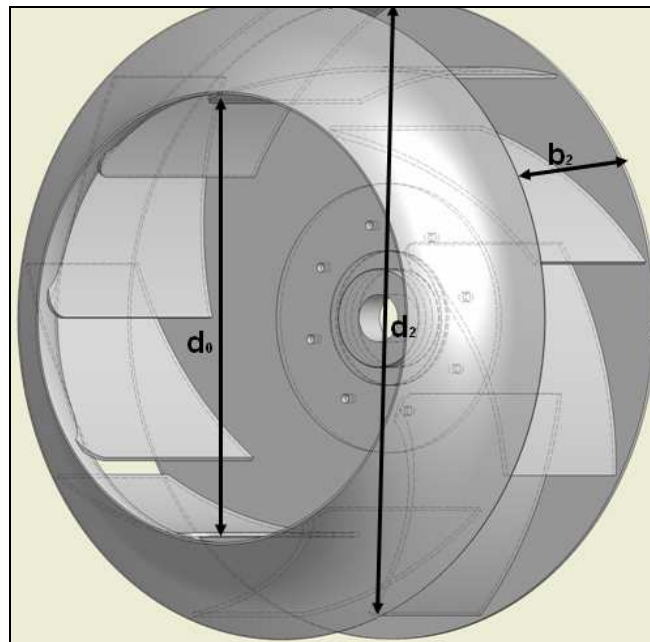


Abb. 27: Darstellung des Laufrades REU 729/3.0²³

6.3.2 Entwicklung des neuen Freiläuferlaufrades REU 737

6.3.2.1 Grundlagen der Entwicklung

Das Laufrad eines Ventilators ist das wichtigste Bauelement der Maschine, da in ihm die mechanische Antriebsenergie in Strömungsenergie umgewandelt wird. Soll ein Ventilator optimal laufen, das heißt bei vorgegebenen Betriebsdaten Volumenstrom und Druckerhöhung einen möglichst hohen Wirkungsgrad erzielen (eine kleine Antriebsleistung bei niedrigem Geräuschniveau), muss das Laufrad bezüglich seiner Geometrie passend zu einer gegebenen Drehzahl optimal gestaltet sein. Außerdem muss das Laufrad auch festigkeitsmäßig nachgerechnet werden, aufgrund hoher Drehzahlen eines Hochleistungsventilatorlaufrades und zudem muss es fertigungsgerecht gestaltet werden, damit eine günstige Herstellung gewährleistet wird.

Am Anfang der Entwicklung des neuen Laufrades REU 737 standen die schon in Abschnitt 6.2 beschriebenen Anforderungen an ein freilaufendes Laufrad. Trotz einer Standardisierung der Ventilatoren ist es nötig, diese optimal an den kundenspezifischen Anwendungsfall anzupassen. Der Einsatz von entsprechender Entwicklungssoftware ist dabei unerlässlich. Es kommen verschiedene

²³ BerlinerLuft firmenintern

Berechnungsprogramme, CAD-Systeme und auch FEM-Spannungsanalysen (Finite-Element-Analyse) und CFD-Systeme (Computational Fluid Dynamics) zum Einsatz. Die CFD-Systeme bieten dem Anwender die Möglichkeit, ganze Ventilatoren oder Teilsegmente am Computer zu simulieren und strömungstechnisch zu untersuchen.

6.3.2.2 Die FEM-Spannungsanalyse

Computergestützte Berechnungsmethoden zur Lösung von praxisbezogenen und ingenieurmäßigen Problemen gibt es seit etwa 40 Jahren. Mit der Methode der Finiten Elemente (FEM), deren Ursprung aus dem Bauingenieurwesen stammt, wird eine gewählte Radkonstruktion auf ihre statische, dynamische, bruchmechanische sowie thermische Festigkeit überprüft und dimensioniert. Durch die Anwendung verschiedener Hilfsprogramme beschleunigt sich die Entwicklungszeit eines solchen Produktes erheblich.

6.3.2.3 Die CFD-Analyse

Die ersten kommerziellen Softwarepakete zur Simulation von Strömungen kamen Mitte der 80er Jahre auf den Markt. Diese haben aber seit dieser Zeit eine rasante Entwicklung durchlaufen, so dass heute komplexe industrielle Strömungsaufgaben, wie zum Beispiel auch der Strömungsverlauf in Ventilatorlaufrädern, mit hoher Genauigkeit erfolgreich bearbeitet werden können.

CFD (Computational Fluid Dynamics) ist das international gebräuchliche Kürzel für die Computersimulation von Strömungen. Die Vorteile der Strömungssimulation liegen in der Zeitersparnis: man kann auf eine Vielzahl von Messungen und Versuchen verzichten. Zusätzlich können die Messungen nicht die Gesamtheit der Strömung abbilden, da diese nur an ganz bestimmten Punkten durchgeführt werden können, nämlich dort, wo sich die Messsonde befindet. Im schlechten Falle kann die Strömung durch die Messung so gestört werden, dass das Ergebnis verfälscht wird. Bei der Strömungssimulation hingegen werden alle relevanten Größen einer Strömung im gesamten Betrachtungsgebiet ersichtlich. Die Reduktion auf nur einzelne verfügbare Daten (Messpunkte) entfällt. Daraus ergibt sich eine breite Einsicht in das Strömungsgeschehen, im Gegensatz zu einem Strömungsbild, das sich aus der Interpolation zwischen zwei Messpunkten ergibt. Die breite Sicht auf die

Strömung hat direkte Konsequenzen: man kann sofort erkennen, wo kritische Stellen in der Strömung auftreten, wo sie herkommen und wie man sie vermeiden könnte. So wird es im Vorfeld möglich zu entscheiden, welche Variante gut, besser oder schlecht ist. Dies reduziert die Wahrscheinlichkeit einer Fehlentwicklung deutlich und aus diesem Grund müssen meist weniger Prototypen hergestellt werden.

Aber trotz der zur Verfügung stehenden Möglichkeiten, einen Ventilator mit aufwändigen Rechenverfahren zu optimieren, kann auf herkömmliche Rechenmethoden, den Bau verschiedener Prototypen, praktische Messungen und wichtige Erfahrungswerte nicht verzichtet werden.

Die Testreihen zur Optimierung des Radialventilators REU 737 ohne Spiralgehäuse mit rückwärts gekrümmter Laufradbeschaufelung wurden auf einem Prüfstand durchgeführt, auf dem der Ventilator druckseitig frei ausbläst und in einer Saugleitung der Volumenstrom, der Gesamtdruck und die Gesamtschalleistung im Kanal ermittelt wurden. Dieser Prüfstand ist in Abschnitt 3.2.1 bereits beschrieben.

6.3.2.4 Aufgabe der CFD-Analyse des Laufrades REU 737/3.0

Die CFD-Analyse des neu entwickelten Laufrades REU 737/3.0 der BerlinerLuft erfolgte über ein externes Unternehmen, welches sich auf CFD-Strömungssimulationen spezialisiert hat. Die EAS GmbH in Karlsruhe hatte die Aufgabe, anhand einer CFD-Berechnung die Strömungseigenschaften des neuen Radialfreiläufers zu ermitteln. Im besonderen Augenmerk lagen dabei Untersuchungsgrößen, die messtechnisch nur mit einem hohen Aufwand zu erfassen sind. Diese sollten Aufschlüsse über mögliche Veränderungen des Laufrades zur Verbesserung des Wirkungsgrades geben.

Der zu berechnende Radialfreiläufer REU 737/3.0-710 wurde als CAD-Modell zur Verfügung gestellt. Die zu berechnenden Kennlinienpunkte wurden anhand von Volumenstromvorgaben von der BerlinerLuft vorgegeben. Es wurde folgender Kennlinienpunkt als Betriebspunkt festgelegt:

$$\dot{V} = 5,2 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\rho = 1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$n = 1140 \text{ 1}/\text{min}$$

In Abbildung 28 ist das aus den CAD-Daten erstellte CFD-Modell des Laufrades mit Einströmdüse zu sehen.

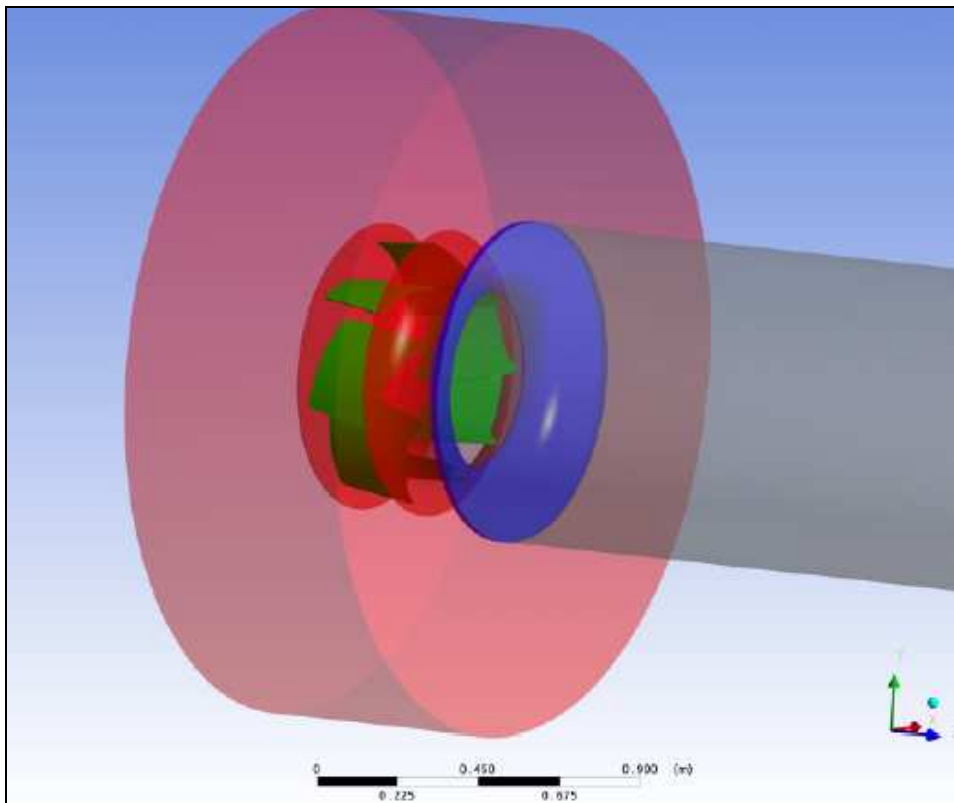


Abb. 28: Geometriemodell des Laufrades mit Einströmdüse²⁴

6.3.2.5 Ergebnisse der Analyse

Es sollen nachfolgend die Ergebnisse der durchgeführten Ist-Analyse und der aufgrund der Strömungsanalyse erfolgten Modifikationen dargestellt werden. Es entstanden vier Modifikationen.

Die Analyse ergab für die erste Änderung eine Anpassung des Eintrittswinkels. Durch die Anpassung wurde der Krümmungsradius der Schaufeln geringfügig verändert. Dieses Modell trägt die Bezeichnung Modifikation-01. Der berechnete Wirkungsgrad konnte von 77,2 % auf 78,2 % verbessert werden.

Die Ergebnisse von Modifikation-01 als Prototyp auf dem Prüfstand führten durch die Vergrößerung der Laufradbreite um 14 mm zu Modifikation-02. Diese Maßnahme führte zu einer Verbesserung des Wirkungsgrades auf 79,4 %.

Als nächste Änderung wurde die Abströmkante parallel zur Achse, unter Einhaltung des Radgrößendurchmessers von 710mm, ausgeführt (Modifikation-03). Doch der

²⁴ Analysebericht der EAS GmbH

Versuch die Abströmkante parallel zur Drehachse laufen zu lassen, ergab eine Verschlechterung des Wirkungsgrades auf unter 77 %.

Da Modifikation-03 keine Verbesserung durch die aufgenommenen Prüfstandsdaten brachte, diente als Grundlage für Modifikation-04 die alte Modifikation-02. Es erfolgte eine Verkleinerung der Bodendecke um 48 mm vom Durchmesser 803 mm auf den Durchmesser 755 mm. Das Ergebnis von Modifikation-04 zeigt einen gleich bleibenden Wirkungsgrad zu Modifikation-02 (79,4 %). Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 auf Seite 56 ersichtlich.

Die statische Druckverteilung der Modifikation-04 ist in der folgenden Abbildung 29 Zu erkennen. Gut zu erkennen ist der ansteigende Druckverlauf der Luft auf dem Weg durch das Laufrad.

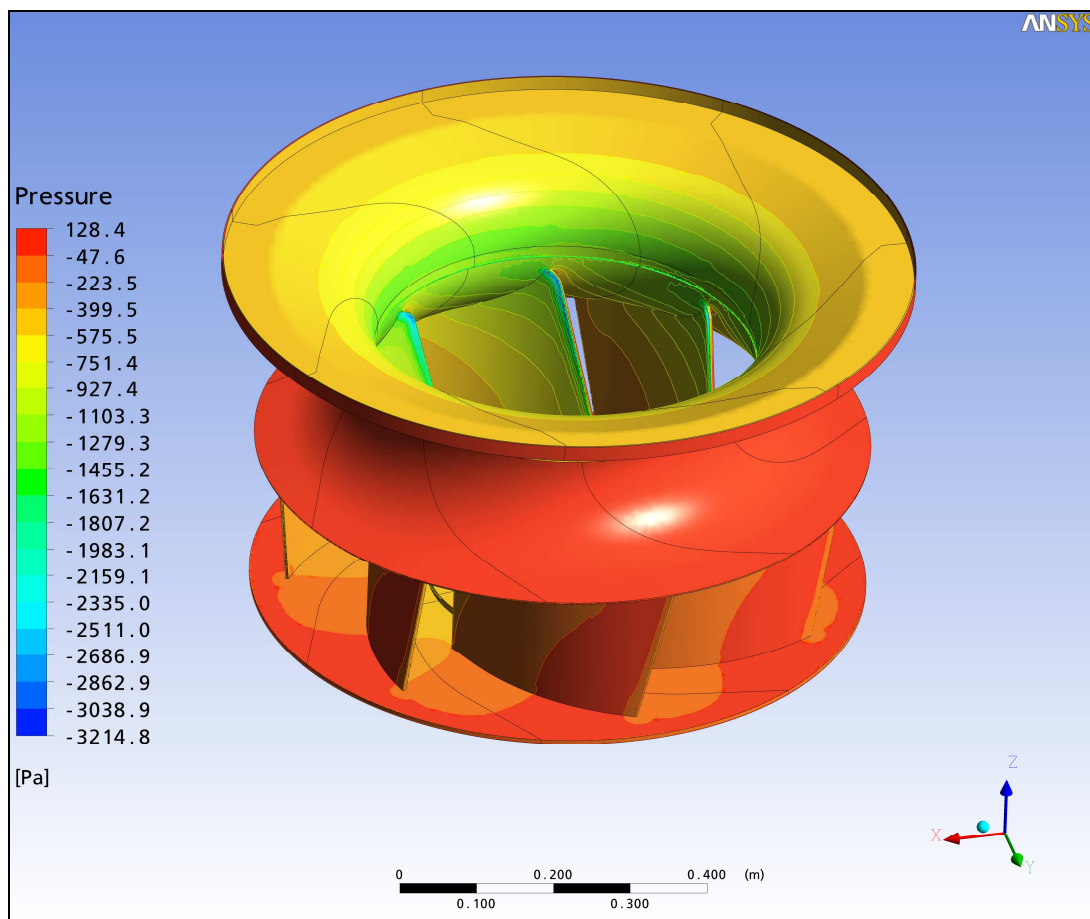


Abb. 29: Statische Druckverteilung im Laufrad²⁵

Zur Vermittlung eines Eindruckes über die Strömungsstruktur in einer Strömung, eignen sich Stromliniendarstellungen. Eine solche ist in Abbildung 30 der Modifikation-04 zu erkennen, in welcher auch die unterschiedliche

²⁵ Analysebericht der EAS GmbH

Geschwindigkeitsverteilung im Laufrad anhand der verschiedenen Farben ersichtlich ist:

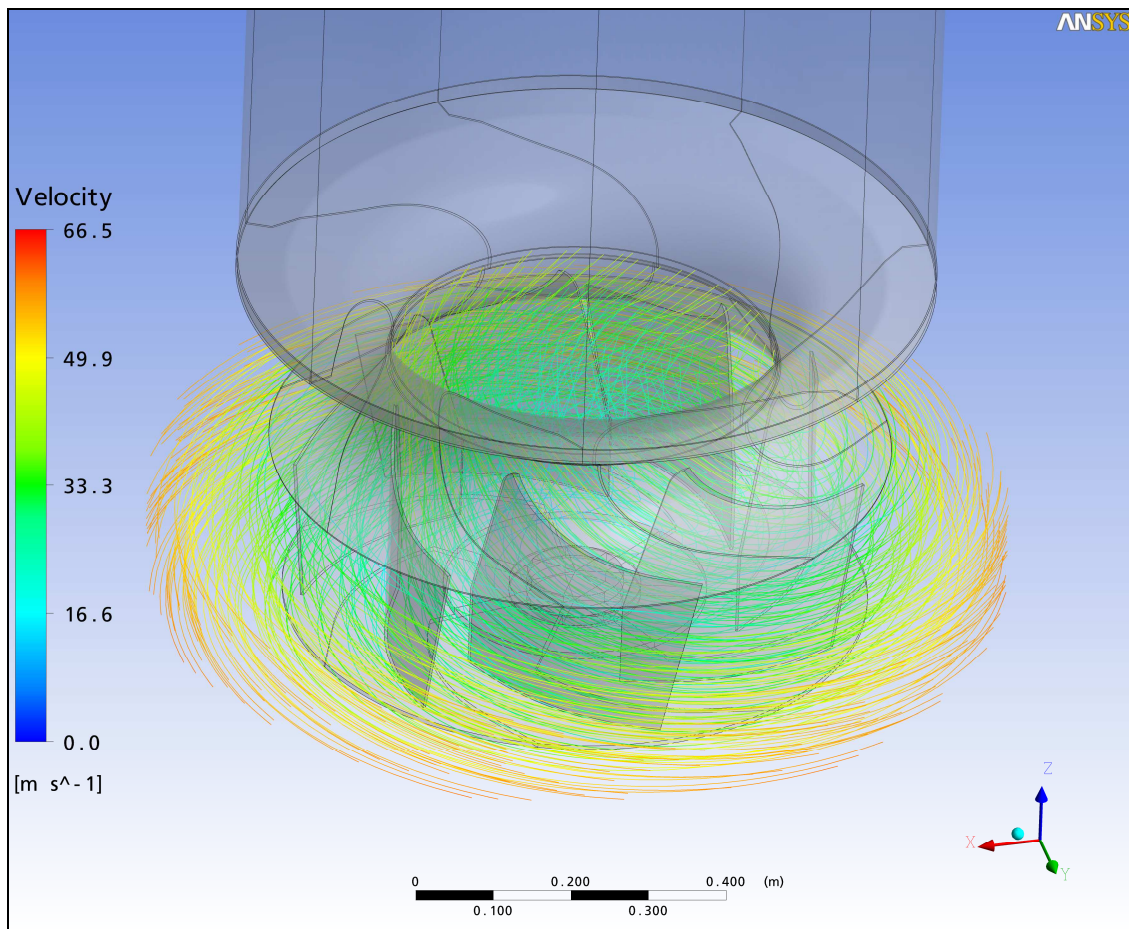


Abb. 30: Stromlinien und Geschwindigkeitsverteilung im Laufrad²⁶

Festzustellen war, dass die beschriebenen Modifikationen zu einem erhöhten Leistungsbedarf führten wie in Tabelle 4 zu erkennen ist. Durch die gleichzeitige Steigerung der Totaldruckerhöhung konnte dieses, bezüglich des Wirkungsgrades negativ scheinende, Verhalten überkompensiert werden, wodurch eine Wirkungsgradsteigerung entstand. Zu bedenken ist, dass die durchgeführten Maßnahmen in nur einem Betriebspunkt entstanden. Daher konnte keine Aussage über das Verhalten für die komplette Kennlinie gemacht werden. Aus diesem Grund wurde eine weitere Prüfstandsmessung von Modifikation-04 durchgeführt, um die komplette Kennlinie zu ermitteln. Aus Modifikation-04 ist als Ergebnis der neue Ventilator mit der Bezeichnung REU 737/3.0-710 geworden. Die Abmessungen des Ventilators gegenüber dem alten REU 729/3.0-710 sind gleich geblieben und daher hat die in Anhang 3 auf Seite 77 dargestellte Zeichnung auch für den neuen

²⁶ Analysebericht der EAS GmbH

Ventilator bestand. Die ermittelte Kennlinie zu dem neuen Ventilator ist in Anhang 4 auf Seite 78 dargestellt. Diese zeigt einen breiteren Einsatzbereich gegenüber dem alten Laufrad, das bedeutet der Volumenstrombereich und der Druckerhöhungsbereich in dem das Laufrad energetisch optimal arbeiten kann ist deutlich größer.

Modell	\dot{V} [m ³ /s]	ϕ [-]	Ψ [-]	Δp_{ges} [Pa]	P_w [kW]	η [%]
Ist-Zustand	5,2	0,258	0,562	598	4,0	77,2
Modifikation-01	5,2	0,258	0,574	611	4,1	78,2
Modifikation-02	5,2	0,242	0,633	673	4,4	79,4
Modifikation-03	5,2	0,242	0,600	639	4,3	76,9
Modifikation-04	5,2	0,242	0,625	665	4,4	79,4

Tab. 4: Auswertung Volumenzahl ϕ , Druckzahl Ψ , Wellenleistung P_w , Wirkungsgrad η ²⁷

6.3.2.6 Umrechnung der Ergebnisse auf eine komplette Baureihe

Da jedoch eine komplette Baureihe entwickelt werden sollte und nicht nur eine Laufradgröße, benötigt man zu Vergleichszwecken dimensionslose Kennwerte, die es möglich machen, eine Umrechnung des gleichen Laufrades auf unterschiedliche Baugrößen zu bestimmen:

$$\phi = \frac{\dot{V} \cdot 4}{u \cdot \pi \cdot d^2}$$

Formel 10 Lieferzahl ϕ

Legende

\dot{V} = Volumenstrom [m³/s]
 u = Umfangsgeschwindigkeit [m/s]
 d = Laufraddurchmesser [m]

Die Lieferzahl beschreibt das Verhältnis der tatsächlichen zur theoretisch möglichen Fördermenge (Produkt aus der Kreisfläche des Rades und der Umfangsgeschwindigkeit). Das einfachste Mittel, die Volumenzahl ϕ bzw. Schluckfähigkeit zu erhöhen, ist die Vergrößerung der Laufradbreite. Der Durchsatz des Laufrades wächst dabei proportional zur Verbreiterung der Schaufeln an, jedoch kann die Schaufelbreite nicht beliebig erhöht werden. Die physikalischen Grenzen liegen dabei in der Einhaltung einer abrissfreien Strömung und in der mechanischen Festigkeit des Laufrades.

²⁷ Vgl. Untersuchung der EAS GmbH

$$\psi = \frac{\Delta p \cdot 2}{\rho \cdot u^2}$$

Formel 11 Druckzahl ψ

Legende

Δp = Druckdifferenz [N/m²]

ρ = Dichte [kg/m³]

u = Umfangsgeschwindigkeit [m/s]

Die Druckzahl des Laufrades ergibt sich aus dem Verhältnis der vom Laufrad erzeugten Druckdifferenz zum Staudruck der Umfangsgeschwindigkeit. Vergrößert kann die Druckzahl bei rückwärts gekrümmten Schaufeln durch die Vergrößerung des Schaufelwinkels erfolgen. Dieser lässt sich aber nicht beliebig steigern, denn bei konstanter Schaufelzahl und vergrößertem Schaufelaustrittswinkel kann es zu Strömungsablösungen durch die wachsende Schaufelbelastung kommen. Die Ablösung während der axialen in eine radiale Strömung führt zu einer Verminderung der Druckerhöhung und Verminderung des Wirkungsgrades. Eine Erhöhung des Schaufelaustrittswinkels und damit der Druckzahl kann also nur durch eine Erhöhung der Schaufelzahl passieren, um die Schaufelbelastung und damit das Abreißen der Strömung zu begrenzen.

$$\eta = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p}{P_w}$$

Formel 12 Wirkungsgrad Ventilator η

Legende

\dot{V} = Volumenstrom [m³/s]

Δp = Druckdifferenz [N/m²]

P_w = Wellenleistung [W]

Der Wirkungsgrad beschreibt das Verhältnis der Förderleistung zur Wellenleistung. Der Wirkungsgrad des untersuchten freilaufenden Rades sollte sich für den Auslegungsfall in Klimazentralgeräten in einem Bereich von 65 % bis über 80 % bewegen. Dabei ist eine hohe Schluckfähigkeit ϕ bei gleichzeitig hoher Druckzahl ψ zu erzielen.

Der Einsatz dieser dimensionslosen Kennzahlen wurde auch zur Bestimmung der gesamten Baureihe des neuen REU 737/3.0 benutzt. Zum sicheren Vergleich und zur Kennlinienabstimmung zwischen den berechneten Kennwerten und dem tatsächlichen Parametern wurden weitere Prototypen mit einem Laufraddurchmesser

von 450 mm und 1000 mm gefertigt. Diese wurden auf dem Prüfstand getestet und die gemessenen Daten wurden zur Kennliniendarstellung verwendet.

Das endgültige Serienprodukt ist als 3D-Modell in der folgenden Abbildung 31 dargestellt. Das dargestellte Laufrad ist in der Baugröße 800, also einem Laufraddurchmesser von 800 mm, abgebildet und trägt die Bezeichnung REU 737/3.0-800. Die Erläuterung der Bezeichnung ist analog zu der des alten Laufrades. Im Vergleich zum REU 729/3.0-800 haben sich zusammenfassend folgende Werte geändert: Die Schaufelzahl hat sich von 9 auf 7 verringert und die Gitterform (Schaufelanordnung und Schaufelwinkel sowie Einlaufkrümmung ins Laufrad) hat sich ebenfalls verändert. Zum Vergleich dient die Abbildung 27 auf Seite 50, die das alte Laufrad REU 729/3.0-800 noch einmal gegenüber stellt.

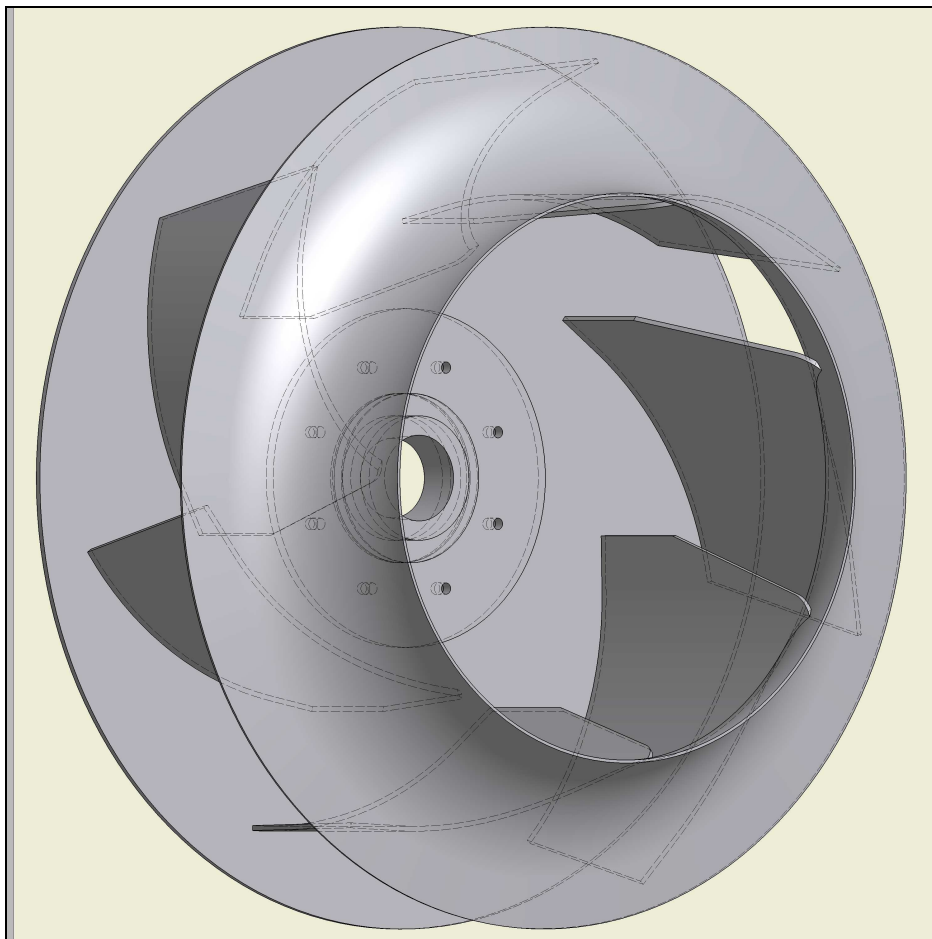


Abb. 31: Darstellung des neuen Laufrades REU 737/3.0-800²⁸

6.3.2.7 Entwicklungsvergleich

Die Abbildung 32 stellt zum Vergleich vier 4 Laufräder bei einer konstanten Drehzahl gegenüber. Rot dargestellt ist das neue Laufrad REU 737/3.0-710. Grün dargestellt

²⁸ BerlinerLuft firmenintern

ist eine weitere Version mit zusätzlich verkleinerter Bodendecke, mit ähnlichen Werten wie das REU 737/3.0-710, jedoch mit einer nicht ganz so hohen statischen Druckerhöhung im kleineren Volumenstrombereich. Das Vorgängermodell REU729/3.0-710 ist rosa dargestellt und zeigt den deutlichen Entwicklungsschritt des neuen Laufrades. Denn bei gleicher Drehzahl erzeugt das neue Laufrad eine deutlich höhere Pressung. Die blau dargestellte Laufradkurve beschreibt ein vergleichbares Modell der Firma TLT Turbo GmbH.

Die Länge der Kurven ergibt sich aus einem Mindestwirkungsgrad von 60 %. Dabei ist die Neuentwicklung REU 737/3.0-710 deutlich die längste Kurve, was bedeutet, dass es den breitesten Einsatzbereich der zum Vergleich stehenden Laufräder besitzt. Das anfänglich beschriebene Ziel der Laufradentwicklung nach einem breiten Volumenstrombereich bei gleichzeitig hohem Wirkungsgrad des Laufrades wurde somit erfüllt und zeigt, dass die Entwicklung des neuen REU 737/3.0 ein positives Ergebnis ergeben hat. Es wird von der BerlinerLuft in 17 verschiedenen Baugrößen mit einem Laufraddurchmesser von 250 mm bis 1600 mm produziert und verkauft.

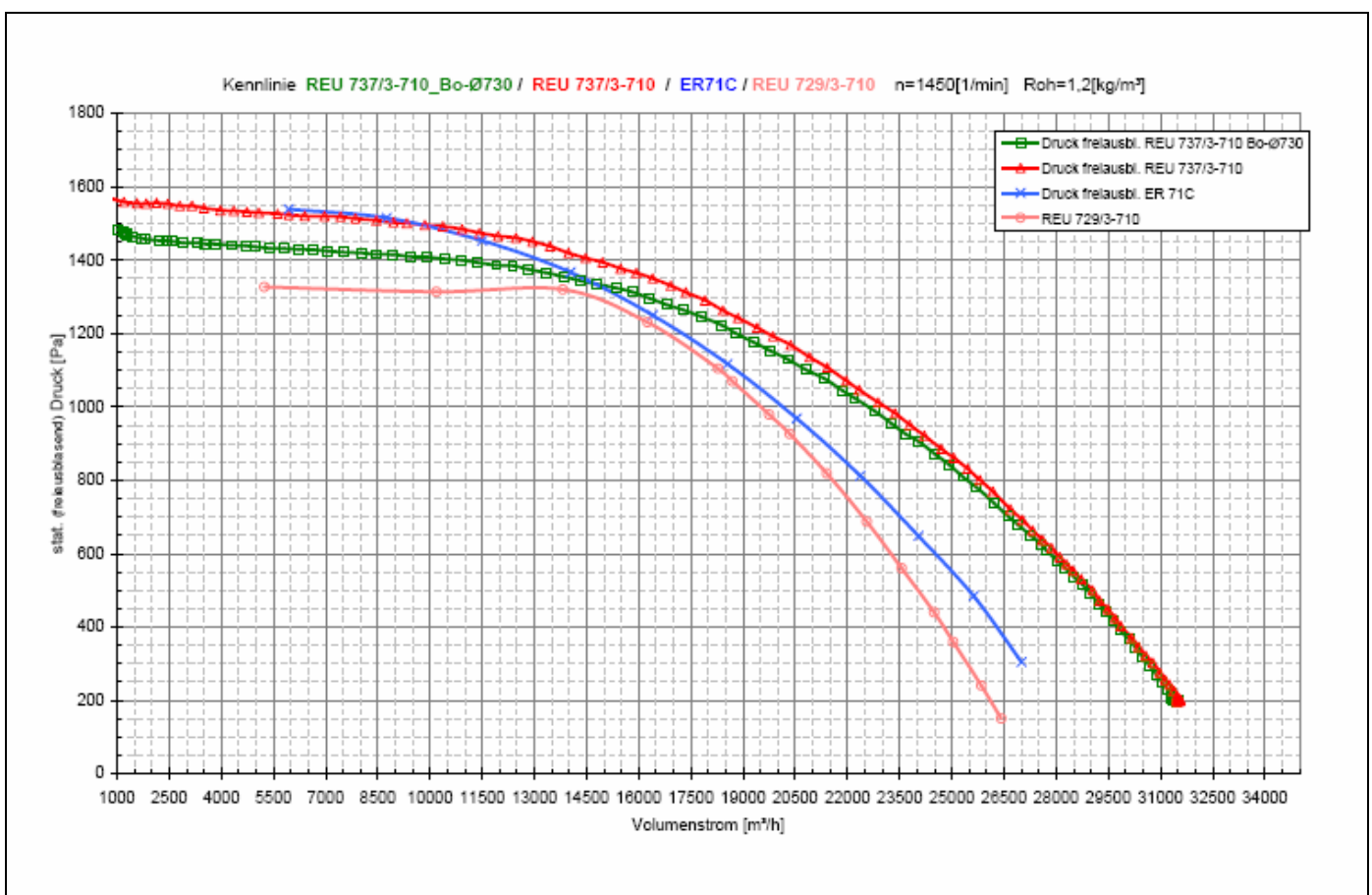


Abb. 32: Kennlinien verschiedener Laufräder²⁹

²⁹ BerlinerLuft firmenintern

7 Bestimmung des Einsparpotentials an einer Referenzanlage

7.1 Beschreibung der Referenzanlage³⁰

Als Referenzanlage wird das in der Studienprojektierung ausgelegte Teilklimagerät ausgewählt. Es handelt es sich um ein Gebäude in Chemnitz mit zwei Ladengeschäften, welche durch zentrale Teilklimageräte klimatisiert werden.

Das Gebäude unterteilt sich in vier Etagen, in denen sich zwei Ladengeschäfte befinden, wobei in dem zweiten Ladengeschäft ein textiler Einzelhandel entstehen soll. Die Planung umfasste nur das zweite Ladengeschäft, sowie die dazu gehörigen Sozial - und Abstellräume der Belegschaft. Diese werden über die RLT-Anlage versorgt. Die Beheizung und Kühlung des Ladenbereiches erfolgt ausschließlich über die RLT-Anlage. Das eingesetzte Zentralgerät wird aufgrund der Ausmaße auf dem Dach des Gebäudes aufgestellt.

Die Raumparameter für den Verkaufsraum wurden vom Bauherrn wie folgt festgelegt:

$$t_{\min.} = 21^{\circ}\text{C}$$

$$t_{\max.} = 26^{\circ}\text{C}$$

Die interne Kühllast wurde mit 120 W/m^2 angegeben. Es resultierte daraus eine Gesamtkühllast von $153,54 \text{ kW}$.

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta t$$

Formel 13

Wärmemenge

$$\dot{m} = \frac{Q}{c_p \cdot \Delta t}$$

Formel 14

Massenstrom

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho}$$

Formel 15

Volumenstrom

Legende

c_p = spezifische Wärmekapazität [kJ/kgK]

Δt = Temperaturdifferenz [K]

ρ = Dichte [kg/m³]

³⁰ Studienprojektierung Prof. Scheibe

$$\dot{m} = \frac{153540W}{1,005 \frac{kJ}{kgK} \cdot 10K \cdot 10^3} = 15,27 \frac{kg}{s} \cdot 3600 \frac{s}{h} = \underline{\underline{54998 \frac{kg}{h}}}$$

$$\dot{V} = \frac{54998 \frac{kg}{h}}{1,225 \frac{kg}{m^3}} = \underline{\underline{44896 \frac{m^3}{h}}}$$

Aus den Raumparametern und einer Untertemperatur von 10 K ergibt sich ein Zuluftvolumenstrom von 44.900 m³/h bei einer Zulufttemperatur von 16°C wie in Formeln 14 und 15 ersichtlich ist. Der Anteil des hygienisch bedingten Volumenstromes laut VDI 2082 beträgt 6720 m³/h. Im Winterfall wird die Anlage mit gleichem Volumenstrom und einer Übertemperatur von 4,6 Kelvin betrieben. Die Heizlast beträgt 41,32 kW.

Zur Energie- und Betriebskosteneinsparung wurde die RLT-Anlagen mit Umluft und Wärmerückgewinnung geplant. Eine Zeichnung des zentralen Teilklimagerätes ist in Anhang 5 auf Seite 79 dargestellt. Die Zeichnung zeigt die Orte der Einbindung der beiden Ventilatoren im Zentralklimagerät.

Das angeschlossene Kanalnetz besitzt auf der Zuluft- und Abluftseite einen Druckverlust von 300 Pascal. Die Teilklimazentrale hat auf der Zuluftseite einen Druckverlust von 566 Pascal und auf der Abluftseite 463 Pascal. Wie in der Zeichnung ersichtlich, gibt es einen Zuluft- und einen Abluftventilator, diese sind als gehäuselose Einbauventilatoren mit rückwärts gekrümmten Schaufeln ausgelegt. Zur Auslegung der Ventilatoren ergaben sich folgende Parameter:

	Zuluftventilator	Abluftventilator
benötigter stat. Druck	866 Pa	763 Pa
Volumenstrom	44900 m ³ /h	44900 m ³ /h

Tab. 5: Parameter zur Ventilatorauswahl

Zum Einsatz kommen die freilaufenden Ventilatoren REU 729/3.0-1001 der BerlinerLuft. Diese besitzen einen Laufraddurchmesser von 1000 mm. Es wird im

Klimazentralgerät jeweils ein Ventilator im Zuluft- sowie Abluftbereich installiert. Die Ventilatoren werden mit Frequenzumrichter betrieben. Zur Schwingungsisolierung wird ein Kompensator eingesetzt, der die Weiterleitung der Schwingungen auf andere Anlagenbauteile verhindert. Zudem werden Federschwingungsdämpfer zur weiteren Schwingungseindämmung eingesetzt. Der Motor entspricht standardmäßig der Effizienzklasse EFF2 und ist durch Kaltleiter für den Einsatz am Frequenzumformer geeignet. Aufgrund der Parameter ergaben sich folgende Ventilator肯ndaten:

Zuluft-Ventilator typ: REU 729/3.0- 1001

Dichte: 1,20 [kg/m ³]		Ausblasgeschwindigkeit: 13,2 [m/s]						
Temperatur: 20 [°C]		dynamischer Druck: 105 [Pa]						
Förderstrom: 44900 [m ³ /h]		Wellenleistung: 19,0 [kW]						
Druckdifferenz p _{fa} : 971 [Pa]		max. Wellenleistung: 21.03 [kW]						
Ventilator drehzahl: 1180 [U/min]		Massenträgheitsmoment: 17,50 [kgm ²]						
max. Ventilator drehzahl: 1570 [U/min]		Wirkungsgrad: 72,5 [%]						
Masse (ohne Motor): 270 [kg]								
Schalleistung:								
Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
dB	105	102	101	106	98	87	85	79
Summenpegel: 106 [dB(A)]								
Motortyp: IM B3 225 M				Fabrikat: VEM				
Schutzgrad/Isolierklasse: IP 55/F				Motor-Spannung: 400/690 D/Y [V]				
Polzahl: 6-polig				Nennfrequenz: 50 [Hz]				
Betriebsfrequenz: 60,2 [Hz]				Nennstrom (400V): 61 [A]				
max. Frequenz: 80 [Hz]				Nennleistung: 30,00 [kW]				
Motormasse: 214 [kg]				Motor-Nenn drehzahl: 980 [U/min]				

Tab. 6: Technische Daten Zuluftventilator REU 729/3.0-1001

Abluft-Ventilator typ: REU 729/3.0- 1001

Dichte: 1,20 [kg/m ³]	Ausblasgeschwindigkeit: 13,2 [m/s]
Temperatur: 20 [°C]	dynamischer Druck: 105 [Pa]
Förderstrom: 44900 [m ³ /h]	Wellenleistung: 17,4 [kW]
Druckdifferenz p _{fa} : 868 [Pa]	max. Wellenleistung: 19,53 [kW]
Ventilator drehzahl: 1150 [U/min]	Massenträgheitsmoment: 17,50 [kgm ²]
max. Ventilator drehzahl: 1570 [U/min]	Wirkungsgrad: 71,9 [%]
Masse (ohne Motor): 270 [kg]	
Schalleistung:	
Hz	63 125 250 500 1000 2000 4000 8000
dB	104 103 101 106 98 87 85 79
Summenpegel: 105 [dB(A)]	
Motortyp: IM B3 200 L	Fabrikat: VEM
Schutzgrad/Isolierklasse: IP 55/F	Motor-Spannung: 400/690 D/Y [V]
Polzahl: 6-polig	Nennfrequenz: 50 [Hz]
Betriebsfrequenz: 59,0 [Hz]	Nennstrom (400V): 45,5 [A]
max. Frequenz: 80 [Hz]	Nennleistung: 22,00 [kW]
Motormasse: 183 [kg]	Motor-Nenn drehzahl: 975 [U/min]

Tab. 7: Technische Daten Abluftventilator REU 729/3.0-1001

Die beiden Betriebspunkte der Ventilatoren sind in die Kennlinie des Ventilators im Anhang 6 und 7 auf Seite 80-81 eingezeichnet. Die Erklärung zum Lesen der Kennlinie und dem Ablesen der einzelnen Parameter ist bereits in Abschnitt 3.2.2 beschrieben.

7.2 Alternativer Einsatz der Neuentwicklung REU 737/3.0

Im Folgenden soll der alternative Einsatz des neu entwickelten freilaufenden Radialventilators REU 737 geprüft werden. Gleichzeitig soll ein mögliches Energieeinsparpotential anhand dieser Vergleichsanlage ermittelt werden. Vorwegzunehmen ist, dass ein mögliches Einsparpotential nur auf die gewählte Referenzanlage bezogen ist und bei anderen Anlagen abweichen kann.

Anhand der Kennlinien des neuen REU 737 wird nach einer geeigneten Baugröße gesucht. Die Vorauswahl ergab, dass sich der neue REU 737/3.0-1001 für den Einsatz in dem gegebenen Zentralklimagerät eignet, da er im Wirkungsgradoptimum der Kennlinie des Ventilators liegt. Der Ventilator besitzt die gleichen Maße wie der vorher geplante REU 729/3.0-1001, eine Umplanung des Klimagerätes ist somit nicht nötig. Gleichzeitig soll der Einsatz von Energiesparmotoren der Klassifizierung EFF1 geprüft werden und die Amortisationszeit der Mehrkosten gegenüber den geplanten EFF2-Motoren ermittelt werden. Die Betriebspunkte des neuen Abluft- und Zuluftventilators sind in die jeweiligen Kennlinien der Ventilatoren im Anhang 8 und 9 auf den Seiten 82-83 eingezeichnet. Zu sehen ist die geringere Gesamtdruckdifferenz aufgrund des niedrigeren dynamischen Druckanteils des neuen Ventilators REU 737/3.0-1001 gegenüber dem geplanten REU 729/3.0-1001. Die technischen Daten des neuen Zuluftventilators sind in der folgenden Tabelle ersichtlich:

Zuluft-Ventilator typ: REU 737/3.0- 1001

Dichte: 1,20 [kg/m ³]		Ausblasgeschwindigkeit: 12,4 [m/s]						
Temperatur: 20 [°C]		dynamischer Druck: 93 [Pa]						
Förderstrom: 44900 [m ³ /h]		Wellenleistung: 16,1 [kW]						
Druckdifferenz p _{fa} : 959 [Pa]		max. Wellenleistung: 16,88 [kW]						
Ventilator drehzahl: 1000 [U/min]		Massenträgheitsmoment: 19,33 [kgm ²]						
max. Ventilator drehzahl: 1470 [U/min]		Wirkungsgrad: 81,7 [%]						
Masse (ohne Motor): 270 [kg]								
Schalleistung:								
Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
dB	94	98	100	99	95	92	89	80
Summenpegel: 101 [dB(A)]								
Motortyp: IM B3 200 L		Fabrikat: VEM						
Schutzgrad/Isolierklasse: IP 55/F		Motor-Spannung: 400/690 D/Y [V]						
Polzahl: 6-polig		Nennfrequenz: 50 [Hz]						
Betriebsfrequenz: 51,3 [Hz]		Nennstrom (400V): 45,5 [A]						
max. Frequenz: 75 [Hz]		Nennleistung: 22,00 [kW]						
Motormasse: 183 [kg]		Motor-Nenn drehzahl: 975 [U/min]						

Tab. 8: Technische Daten Zuluftventilator REU 737/3.0-1001

Für den neuen Abluftventilator ergeben sich folgende technische Parameter:

Abluft-Ventilator typ: REU 737/3.0- 1001

Dichte: 1,20 [kg/m ³]	Ausblasgeschwindigkeit: 12,4 [m/s]
Temperatur: 20 [°C]	dynamischer Druck: 93 [Pa]
Förderstrom: 44900 [m ³ /h]	Wellenleistung: 14,4 [kW]
Druckdifferenz p _{fa} : 856 [Pa]	max. Wellenleistung: 15,68 [kW]
Ventilator drehzahl: 975 [U/min]	Massenträgheitsmoment: 19,33 [kgm ²]
max. Ventilator drehzahl: 1470 [U/min]	Wirkungsgrad: 82,0 [%]
Masse (ohne Motor): 270 [kg]	
Schalleistung:	
Hz	63 125 250 500 1000 2000 4000 8000
dB	93 97 99 98 94 91 88 79
Summenpegel: 100 [dB(A)]	
Motor typ: IM B3 200 L	Fabrikat: VEM
Schutzgrad/Isolierklasse: IP 55/F	Motor-Spannung: 400/690 D/Y [V]
Polzahl: 6-polig	Nennfrequenz: 50 [Hz]
Betriebsfrequenz: 50,0 [Hz]	Nennstrom (400V): 38,5 [A]
max. Frequenz: 75 [Hz]	Nennleistung: 18,50 [kW]
Motormasse: 161 [kg]	Motor-Nenn drehzahl: 975 [U/min]

Tab. 9: Technische Daten Abluftventilator REU 737/3.0-1001

7.3 Vergleich der Ventilatoren REU 729/3.0 und REU 737/3.0

Der Vergleich der beiden Ventilatoren des Planungsmodells und des neu entwickelten freilaufenden Ventilators bedarf einer Reihe von Festlegungen. So sind die Betriebsstunden mit 3600 Stunden im Jahr festgelegt. Dieser Wert ergibt sich nicht aus den tatsächlichen Betriebsstunden der Anlage, denn diese wird 24 Stunden an 365 Tagen im Jahr betrieben. Dieser durchgehende Betrieb ergibt sich aus der Aufgabe der RLT-Anlage zur alleinigen Deckung der Heiz- und Kühllasten. Jedoch ist die Anlage auf die maximalen Lasten ausgelegt, die nur an wenigen Tagen im Jahr benötigt werden. Aus diesem Grund werden Frequenzumrichter verwendet, die die Drehzahl der Ventilatoren auf den jeweiligen, zur Lastendeckung ausreichenden, Volumenstrom anpassen. Diese energetisch optimale Anlagenbetriebsweise bedarf

also nicht das komplette Jahr der Auslegungswellenleistung der Ventilatoren. Es ergibt sich, auf das Jahr gesehen, eine Reduzierung der elektrischen Leistungsaufnahme. Um diesen Fakt in die Betrachtung aufzunehmen, wurden die tatsächlichen Betriebsstunden von 8760 Stunden im Jahr auf 3600 Stunden im Jahr reduziert. Diese starke Reduzierung ergab sich aus den Proportionalitätsgesetzen (siehe Formel 9 auf Seite 50), die besagen, dass eine Halbierung der Drehzahl des Ventilators eine Reduzierung der elektrischen Leistungsaufnahme auf ein Achtel bewirkt. So ergab sich eine „Betriebszeit“ von 3600 Stunden, bezogen auf die maximale Leistungsaufnahme der Ventilatoren und des damit berücksichtigten Teillastbetriebes.

7.3.1 Berechnung des Energieeinsparpotentials

Die Analyse der Zuluftventilatoren im Anhang 10 auf Seite 84 zeigt, dass eine Umplanung der Ventilatoren auf den neuen freilaufenden Ventilator REU 737/3.0-1001 sinnvoll ist, aufgrund des hohen Einsparpotentials. Aufgrund des höheren Wirkungsgrades kann man eine Motorenbaugröße kleiner wählen und dies wirkt sich auf den Kaufpreis positiv aus, denn es ergibt sich eine Einsparung von 350,- €. Doch das größte Sparpotential liegt bei den Betriebskosten. Die aufgenommene Leistung im Schaltschrank ist geringer. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die geringere Schallabstrahlung. Der Schalleistung-Summenpegel des neuen Ventilators liegt im Auslegungspunkt 5 dB(A) unter dem des vorher geplanten Ventilators REU 729/3.0. Der Grund dieses niedrigeren Schallpegels ist die geringere Drehzahl des neuen freilaufenden Ventilators. Das hat weitere positive Folgen auf die Gesamtanlage, denn so können die geplanten Schalldämpfer kleiner ausgewählt werden, was zu weiteren Platz- und Investitionskosteneinsparungen führt.

Zur Erklärung des Vergleichs der Zuluftventilatoren auf Seite 84 im Anhang 10 dienen folgende Berechnungen:

$$\eta_{Antrieb} = \eta_{Motor} \cdot \eta_{FU} \cdot \eta_{Riemen} \quad \text{Formel 16} \quad \text{Wirkungsgrad des Antriebes}$$

$$\text{REU 729/3.0: } \eta_{Antrieb} = 0,902 \cdot 0,97 = 0,875 = \underline{\underline{87,5\%}}$$

$$\text{REU 737/3.0: } \eta_{Antrieb} = 0,892 \cdot 0,97 = 0,875 = \underline{\underline{86,5\%}}$$

$$\eta_{System} = \eta_{Antrieb} \cdot \eta_{Ventilator} \quad \text{Formel 17} \quad \text{Wirkungsgrad des Ventilatorsystems}$$

$$\text{REU 729/3.0: } \eta_{System} = 0,875 \cdot 0,725 = 0,634 = \underline{\underline{63,4\%}}$$

$$\text{REU 737/3.0: } \eta_{Antrieb} = 0,865 \cdot 0,817 = 0,704 = \underline{\underline{70,4\%}}$$

Jährlicher Stromverbrauch der Ventilatoren nach Formel 3 und 4 (Seite 18-19):

$$\text{REU 729/3.0: } Q = 3600 \text{ h/a} \cdot 24,03 \text{ kW} = \underline{86.508 \text{ kWh/a}}$$

$$\text{REU 729/3.0: } Q = 3600 \text{ h/a} \cdot 19,51 \text{ kW} = \underline{70.236 \text{ kWh/a}}$$

$$\text{Einsparung: } 86.508 \text{ kWh/a} - 70.236 \text{ kWh/a} = \underline{16.272 \text{ kWh/a}}$$

$$16.272 \text{ kWh/a} \cdot 16,8 \text{ Cent/kWh} = \underline{2.733,70 \text{ €/a}}$$

Die Berechnung der Einsparung durch den alternativen Einsatz von EFF1-Motoren erfolgt nach den gleichen Formeln. Die Amortisationszeit der Mehrkosten für den Energiesparmotor ergibt sich wie folgt:

$$\text{Amortisationszeit} = \frac{\text{Mehrkosten Investition}}{\text{Einsparung pro Jahr}} \quad \text{Formel 18} \quad \text{Amortisationszeit}$$

$$\text{REU 729/3.0: } \text{Amortisationszeit} = \frac{410,00 \text{ €}}{338,69 \text{ €/a}} = \underline{\underline{1,21 \text{ a}}}$$

$$\text{REU 737/3.0: } \text{Amortisationszeit} = \frac{330,00 \text{ €}}{223,78 \text{ €/a}} = \underline{\underline{1,47 \text{ a}}}$$

Die Berechnungen und der Vergleich zeigen deutlich das Einsparpotential durch den Einsatz des neuen Ventilators REU 737/3.0. Die Einsparungen des neuen Zuluftventilators belaufen sich auf 2.733,70 Euro im Jahr. Der Grund für diese Einsparung ergibt sich aus der Erhöhung des Systemwirkungsgrades um 7,3 Prozent. Bei einem Kaufpreis von 2.820,- Euro übersteigen die Energieeinsparungen schon im zweiten Jahr des Betriebes deutlich die Investitionskosten des Ventilators. Dies macht deutlich, dass die Auswahl des Ventilators mit einem hohen Wirkungsgrad in Verbindung mit einer effizienten Regelung über einen Frequenzumrichter und einem Energiesparmotor einen erheblich höhere Bedeutung als die Investitionskosten haben sollten.

Die Amortisationsrechnung des Einsatzes von Energiesparmotoren der Klassifizierung EFF1 hat aufgezeigt, dass sich der Einsatz lohnt. Der Mehrpreis der Motoren amortisiert sich nach weniger als 2 Jahren und führt nach Überschreiten dieses Punktes (Break-Even-Point) zu weiteren erheblichen Energieeinsparungen.

Bei den Abluftventilatoren zeigt sich ein ähnliches Bild, wie im Anhang 11 auf Seite 85 ersichtlich ist. Die Berechnungsschritte sind identisch zu dem Vergleich der Zuluftventilatoren und werden darum nicht noch einmal aufgeführt. Wie in der Tabelle ersichtlich ist belaufen sich die jährlichen Energiekosteneinsparungen auf 2.618,78 Euro im Jahr beim Einsatz des neuen REU 737/3.0-1001 gegenüber dem vorher geplanten REU 729/3.0-1001. Es kann ebenfalls eine Motorbaugröße kleiner gewählt werden, was den günstigeren Kaufpreis des neuen Ventilators begründet. Auch bei dem neu gewählten Abluftventilator rechnet sich der Einsatz eines EFF1-Energiesparmotors nach weniger als 14 Monaten.

7.3.2 Zusammenfassung des Energieeinsparpotentials

Als Zusammenfassung soll das Einsparpotential des Zu- und Abluftventilators zusammengeführt werden, um somit die komplette Einsparung durch die Ventilatoren des Klimazentralgerätes zu ermitteln. Dabei wird als erstes die Einsparung nur durch den Einsatz des neuen Ventilators REU 737/3.0 ermittelt. Die Übersicht der Ergebnisse dieses Vergleiches ist im Anhang 12 auf Seite 86 dargestellt. Die Übersicht über die einzelnen Berechnungswege wird im weiteren Verlauf aufgezeigt. Als weitere Untersuchung soll das maximale Einsparpotential gegenüber der geplanten Variante ermittelt werden. Das bedeutet, es wird der neue Ventilator REU 737/3.0 in Verbindung mit einem Energiesparmotor der Klasse EFF1 dem Planungsventilator REU729/3.0 mit einem Motor der Klasse EFF2 gegenübergestellt. Dieses maximale Einsparungspotential ist im Anhang 13 auf Seite 87 nach zu verfolgen.

Es sollen die Einsparungen über den kompletten Lebenszyklus des Ventilators ermittelt werden. Dafür wird die mittlere Lebenserwartung der Ventilatoren laut VDI 2067 Blatt 1 benötigt. In der VDI 2067 wird die mittlere Lebensdauer für RLT-Anlagenteile wie Ventilatoren mit 15 Jahren angegeben. Dieser Wert ist gleichzeitig der Betrachtungszeitraum der Kosteneinsparuntersuchung. Als Zinssatz für die

Zahlungen wurden 3 Prozent angenommen. Um eine Preissteigerung des Stromes zu berücksichtigen, wird die durchschnittliche jährliche Erhöhung der Strompreise der letzten fünf Jahre in Höhe von 2,5 Prozent pro Jahr herangezogen (laut einer Studie des BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. von 2009). Um die Gesamtkosteneinsparung der Ventilatoren bezogen auf den kompletten Lebenszyklus zu ermitteln, wurde die Annuitätsmethode verwendet.

Die Annuitätsmethode ist ein Verfahren der klassischen, dynamischen Investitionsrechnung. Die „Investition“ ist in diesem Fall die Kosteneinsparung. Die Einsparung wird auf die Nutzungsdauer verteilt, so dass sie in eine Annuität umgewandelt wird. Um die Preissteigerung der Stromkosten zu berücksichtigen, wird der preisdynamische Annuitätsfaktor „ba“ benötigt. Dieser Faktor wandelt die gleichprozentig angenommene Strompreissteigerung von 2,5 % in konstante Annuitäten um. Mit diesem Faktor kann man die Annuität pro Jahr bestimmen, um im letzten Schritt die Gesamteinsparung über die Nutzungszeit und die Einsparung oder Mehrkosten bei den Investitionen zu ermitteln. Die Vorgehensweise ist in den folgenden benötigten Formeln dargestellt:

$$ba = \frac{(q^T - r^T) \cdot (q - 1)}{(q - r) \cdot (q^T - 1)}$$

Formel 19 preisdynamischer Annuitätsfaktor ba

$$q = 1 + i$$

Formel 20 Zinsfaktor q

$$r = 1 + j$$

Formel 21 Preisänderungsfaktor r

$$A = Z \cdot ba$$

Formel 22 Annuität pro Jahr A

$$E = A \cdot T + E_{inv}$$

Formel 23 Gesamteinsparung E

Legende

T = Nutzungszeit [a]

i = Zinssatz [%]

j = Preisänderungssatz [%/a]

Z = Einsparung pro Jahr [€/a]

E_{inv} = Einsparung Investitionskosten [€]

Als Einsparung durch den Einsatz des neuen Ventilators REU 737/3.0 wurden folgende Berechnungen durchgeführt (siehe auch Anhang 12 auf Seite 86):

$$q = 1 + i = 1 + 0,03 = \underline{1,03} \quad r = 1 + j = 1 + 0,025 = \underline{1,025}$$

$$ba = \frac{(q^T - r^T) \cdot (q - 1)}{(q - r) \cdot (q^T - 1)} = \frac{(1,03^{15} - 1,025^{15}) \cdot (1,03 - 1)}{(1,03 - 1,025) \cdot (1,03^{15} - 1)} = \underline{1,17931}$$

$$A = Z \cdot ba = (2.733,70 + 2.618,78) \frac{\text{€}}{a} \cdot 1,17931 = \underline{6.312,22 \frac{\text{€}}{a}}$$

$$E = A \cdot T + E_{inv} = 6.312,22 \frac{\text{€}}{a} \cdot 15a + (350 + 160) \text{€} = \underline{\underline{95.193,35 \text{€}}}$$

Der zweite Vergleich, der das maximale Einsparpotential durch den Einsatz des neuen verbesserten Ventilators in Verbindung mit einem Energiesparmotor EFF1 gegenüber dem Planungsventilator mit EFF2-Motor ermittelt, ist in den folgenden Berechnungen dargestellt (siehe auch Anhang 13 auf Seite 87):

$$A = Z \cdot ba = (2.957,47 + 2.842,56) \frac{\text{€}}{a} \cdot 1,17931 = \underline{6.840,02 \frac{\text{€}}{a}}$$

$$E = A \cdot T + E_{inv} = 6.840,02 \frac{\text{€}}{a} \cdot 15a + (20 - 100) \text{€} = \underline{\underline{102.520,34 \text{€}}}$$

Ein mögliches weiteres Einsparpotential im Platzbedarf ergibt sich in der gewählten Referenzanlage nicht. Die Abmessungen des neuen REU 737/3.0-1001 entsprechen durch die gleiche Baugröße exakt den Abmaßen des vorher ausgewählten REU 729/3.0-1001. Bei der Prüfung des Einsatzes des neuen Ventilators in anderen Anlagen hat sich jedoch ergeben, dass durch den höheren Wirkungsgrad die Auswahl einer kleineren Baugröße möglich ist. Das ist mit den geringeren Drehzahlen des neuen Ventilators zu begründen, da bei gleicher Drehzahl somit ein höherer Volumenstrom erreicht wird. Dies führt zu Einsparungen im Anschaffungspreis und außerdem verringern sich die benötigten Maße im Klimagerät.

Ein weiterer Vorteil durch die niedrigeren Drehzahlen in dieser Referenzanlage ergibt sich durch die möglichen kleineren Schalldämpfer. Da der Summenschallleistungspegel zu- und abluftseitig durch die neuen Ventilatoren 5 dB(A) unter dem Wert der alten Ventilatoren liegt, werden die eingesetzten Kulissenschalldämpfer deutlich kleiner. Da die Kulissenschalldämpfer in ihren Investitionskosten einen hohen Anteil am Gesamtpreis einer RLT-Anlage einnehmen, ist dieser Einsparfaktor bei der Ventilatorauswahl in jeder Hinsicht zu berücksichtigen.

Anhand der Berechnungen und Beschreibungen wird deutlich, welches enorme Potential die Umplanung der Ventilatoren hat. Es können über 15 Jahre gesehen über 100.000 Euro allein an Betriebskosten eingespart werden. Um dies noch einmal deutlich zu machen, sind in Abbildung 33 die Kosten für den 15 jährigen Betrieb der Ventilatoren als Tortendarstellung zu erkennen. So haben die Betriebskosten der Ventilatoren in dieser Referenzanlage einen Anteil von 97,3 Prozent. Eine sich lohnende Umplanung auf die neuen Ventilatoren REU 737/3.0-1001 in Verbindung mit Energiesparmotoren ist somit erfolgreich nachgewiesen. Die Entwicklung des neuen Laufrades wurde anhand dieses Beispiels als ein positiver Entwicklungsschritt bestätigt.

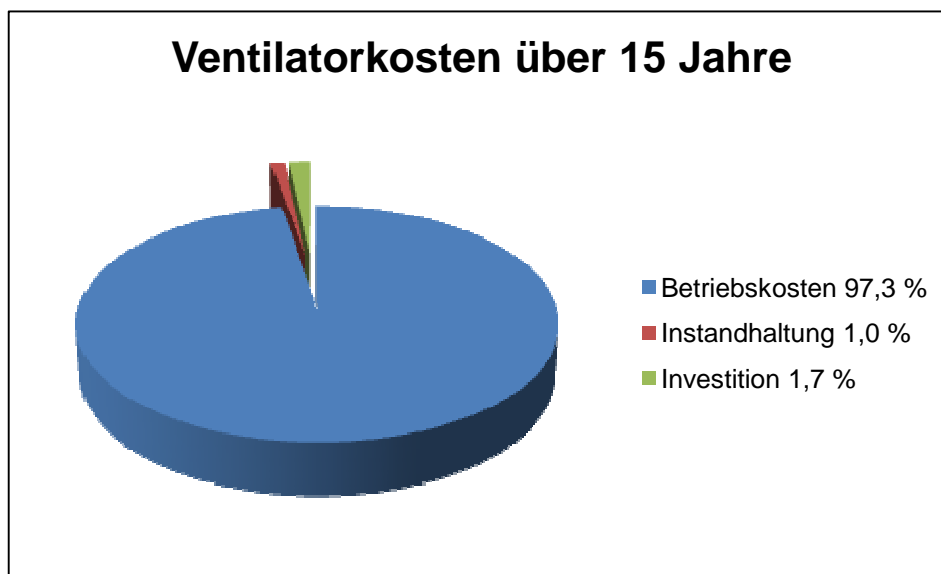


Abb. 33: Ventilatorgesamtkosten über 15 Jahre

8 Fazit

Ventilatoren sind zentraler Bestandteil aller Lüftungstechnischen Anlagen- bzw. Gerätesysteme und daher für deren Funktionstüchtigkeit von ausschlaggebender Bedeutung.

Neben der Bedeutung der Ventilatorauslegung für die Anlagenplanung wird auch zum Verständnis die Funktionsweise erläutert. Ventilatoren gibt es in verschiedenen Bauarten für verschiedene Anwendungen. Eine generelle Empfehlung für eine zu bevorzugende Bauart ist nicht möglich. Bei der Auswahl muss auf den Wirkungsgrad, die Regelbarkeit, stabiles Verhalten im Betriebsbereich und die Geräuschentwicklung geachtet werden. Bei Motoren und Antrieben ist es wichtig, Komponenten mit einem hohen Wirkungsgrad einzusetzen, wie anhand von Einsparrechnungen nachgewiesen wurde.

Aber auch die Ventilatorenregelung spielt eine wichtige Rolle in der Gesamtbewertung einer raumlufttechnischen Anlage und wurde hervorgehoben. Der Betrieb am Frequenzumrichter stellt die wirtschaftlichste Betriebsweise durch die Drehzahlanpassung an den Bedarfsfall dar. Aber auch Lösungen von Parallel- oder Reihenschaltungen von Ventilatoren werden als sehr positiv hervorgehoben, da hier eine zusätzliche Betriebssicherheit erreicht wird.

Die Umstellung der Effizienzklassen bei den Drehstrommotoren kann wie beschrieben als Anstoß genutzt werden, um die Antriebe nicht nach den Investitionskosten, sondern nach Effizienzklasse auszuwählen. Wie die Berechnungen der Referenzanlage gezeigt haben, lagen die Amortisationszeiten der Mehrkosten für Energiesparmotoren immer unter zwei Jahren und der höhere Wirkungsgrad verbessert gleichzeitig den Gesamtwirkungsgrad des Ventilatorsystems.

Bei der Untersuchung des Einsparpotentials des neu entwickelten freilaufenden Radialventilators in der Referenzanlage „Kaufhaus Chemnitz“ hat sich das enorme Potential durch die Wirkungsgradverbesserung aufgezeigt. Die Einsparungen von bis zu 100.000 € allein bei den Betriebskosten, bezogen auf den Lebenszyklus der Ventilatoren, haben die Erwartungen übertroffen. Der Einsatz des neuen Ventilators wird daher empfohlen. Gleichzeitig dient dieses positive Ergebnis als Bestätigung zur Erfüllung der vorher gesetzten Entwicklungsziele des neuen Freiläufers. Weitere wichtige Faktoren, wie die geringeren Drehzahlen und die damit verbundene geringere Schallbelastung haben positive Auswirkungen auf die Gesamtkosten der Anlage.

Zusammenfassend ist zu erkennen, dass die Ventilatorenauswahl ein wichtiger Bestandteil der Anlagenplanung ist und wie bewiesen wurden, eine korrekte

Auslegung erhebliche Energieeinsparpotentiale beinhaltet. Festzustellen ist, dass die erzielten Ergebnisse nicht auf jeden RLT-Anlagentyp übertragbar sind. Eine genaue Prüfung der gewählten Ventilatoren in Verbindung mit den Parametern der Gesamtanlage ist daher unerlässlich. Eine generelle Empfehlung eines Ventilators und der dazu einzusetzenden Antriebs- und Regelungskomponenten ist somit nicht möglich und muss im Einzelfall geprüft werden.

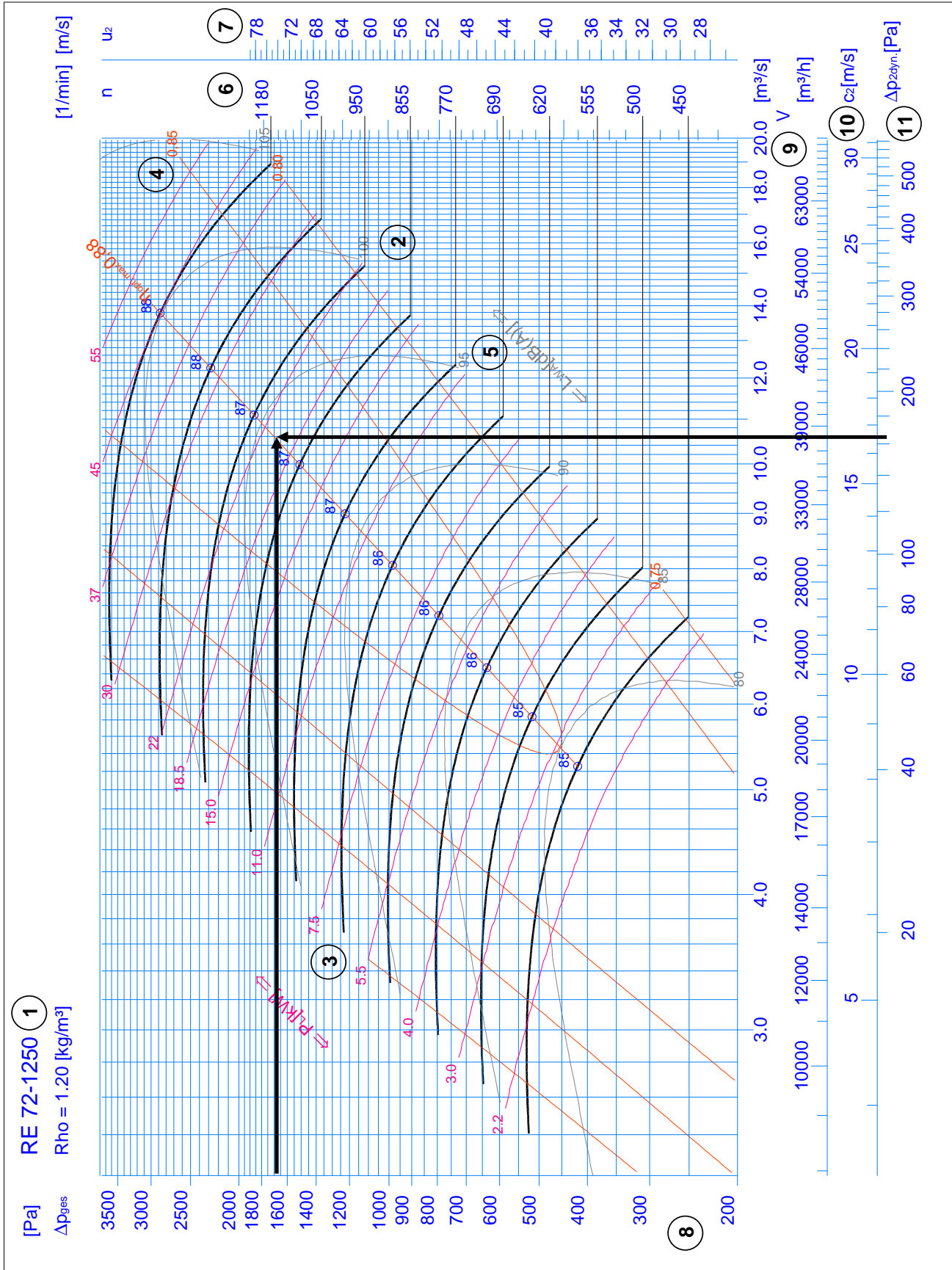
Die Arbeit hat belegt, dass der Austausch älterer und nicht wirtschaftlicher Ventilatoren gegen energieeffiziente Modelle sich nach einer kurzen Amortisationszeit rechnet, da die Investitionskosten im Verhältnis zum Betriebskosteneinsparpotential gering sind. Es ergibt sich eine klare Verbesserung der Energieeffizienz, bei gleichzeitiger Reduktion der Geräuschemissionen.

Hauptentwicklungsziele bei Ventilatoren für die Zukunft sind eine weitere Steigerung der Wirtschaftlichkeit, Betriebssicherheit, Werkstoffbelastbarkeit und Verschleißfestigkeit.

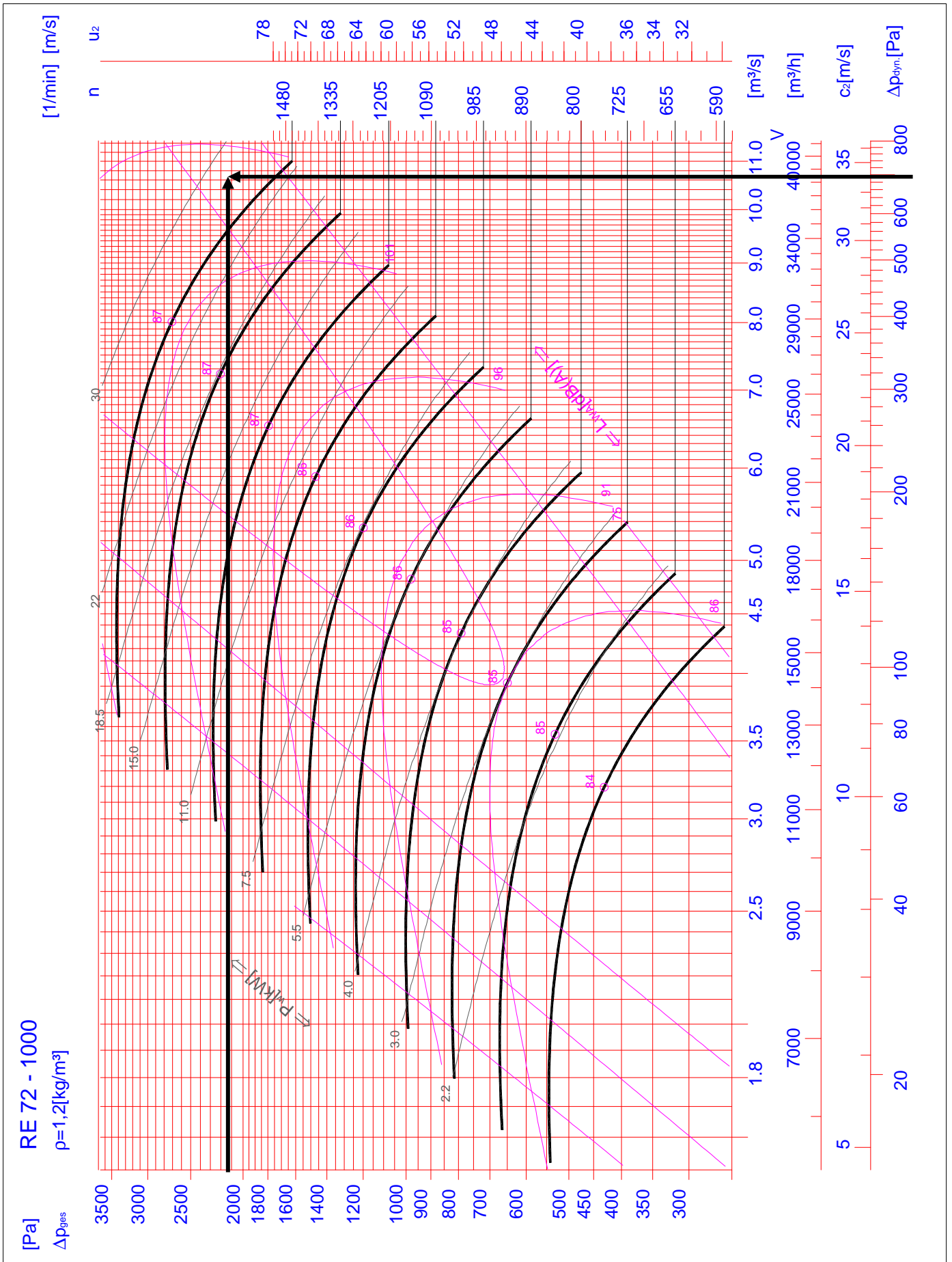
Anhangsverzeichnis

ANHANG 1: Ventilator Kennlinie RE 72 – 1250 der BerlinerLuft.....	75
ANHANG 2: Ventilator Kennlinie RE 72 – 1000 der BerlinerLuft.....	76
ANHANG 3: Zeichnung des freilaufenden Ventilators REU 729/3.0-710.....	77
ANHANG 4: Kennlinie des neuen Ventilators REU 737/3.0-710	78
ANHANG 5: Zeichnung des Klimazentralgerätes des Kaufhauses Chemnitz	79
ANHANG 6: Kennlinie des geplanten Zuluftventilators REU 729/3.0-1001	80
ANHANG 7: Kennlinie des geplanten Abluftventilators REU 729/3.0-1001	81
ANHANG 8: Kennlinie des neuen Zuluftventilators REU 737/3.0-1001	82
ANHANG 9: Kennlinie des neuen Zuluftventilators REU 737/3.0-1001	83
ANHANG 10: Vergleich Zuluftventilatoren REU 729/3-1001 & REU 737/3-1001	84
ANHANG 11: Vergleich Abluft-Ventilatoren REU 729/3-1001 & REU 737/3-1001 ...	85
ANHANG 12: Zusammenfassung des Einsparpotentials des Tausches der Ventilatoren	86
ANHANG 13: Maximales Einsparpotentials der neuen Ventilatoren in Verbindung mit EFF1-Motoren.....	87

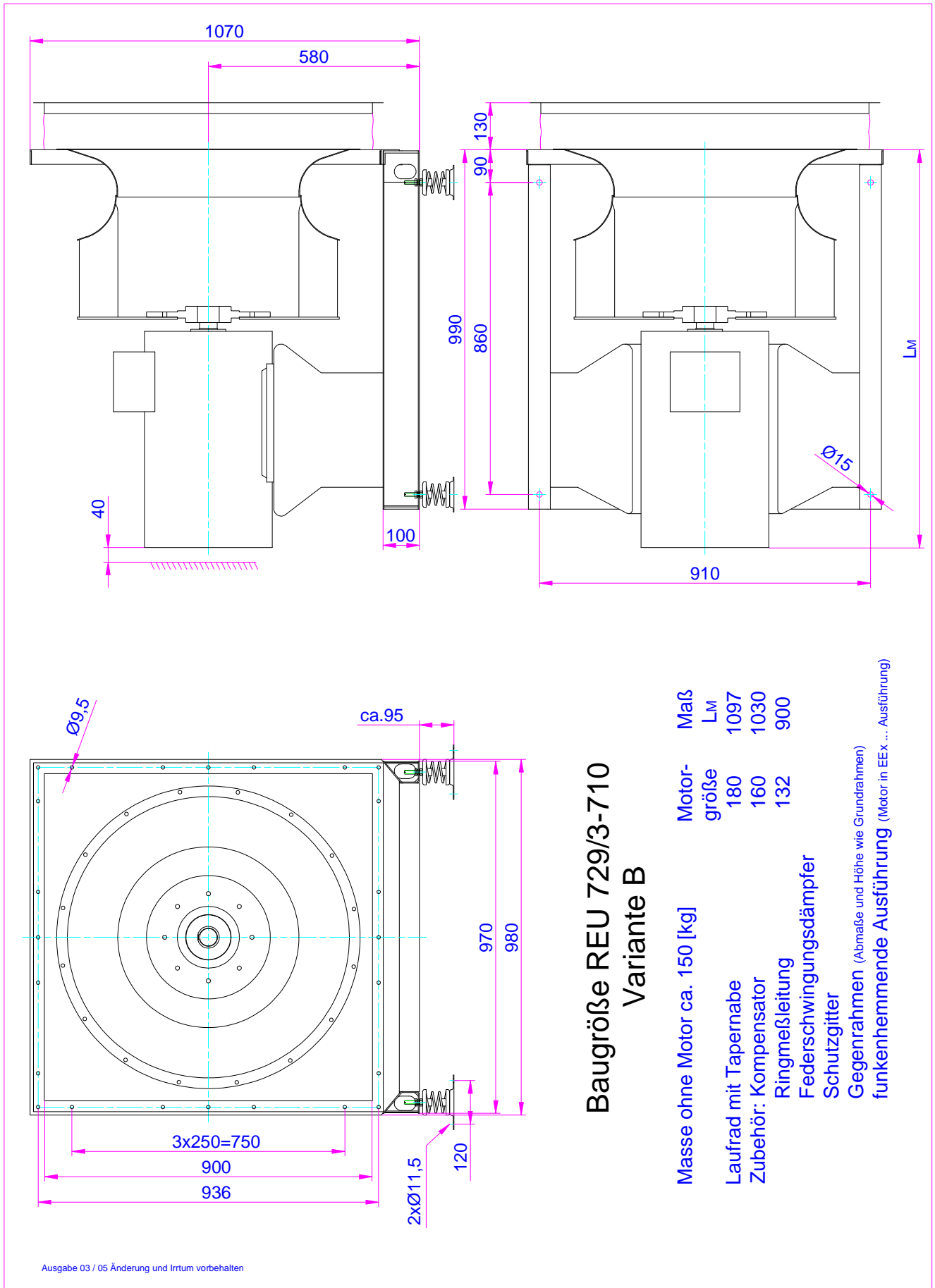
ANHANG 1: Ventilatorcharakteristik RE 72 – 1250 der BerlinerLuft



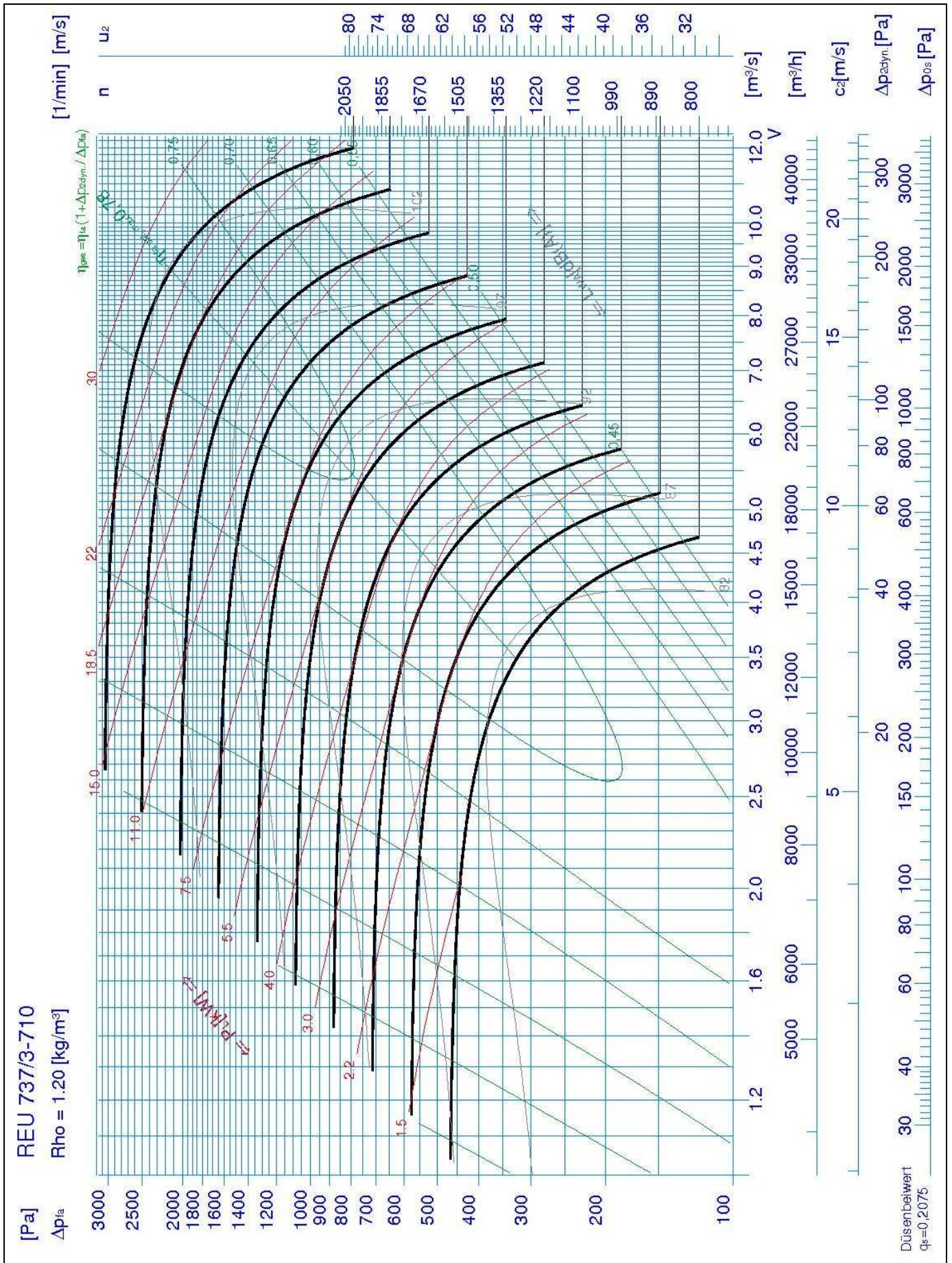
ANHANG 2: Ventilatorcharakteristik RE 72 – 1000 der BerlinerLuft



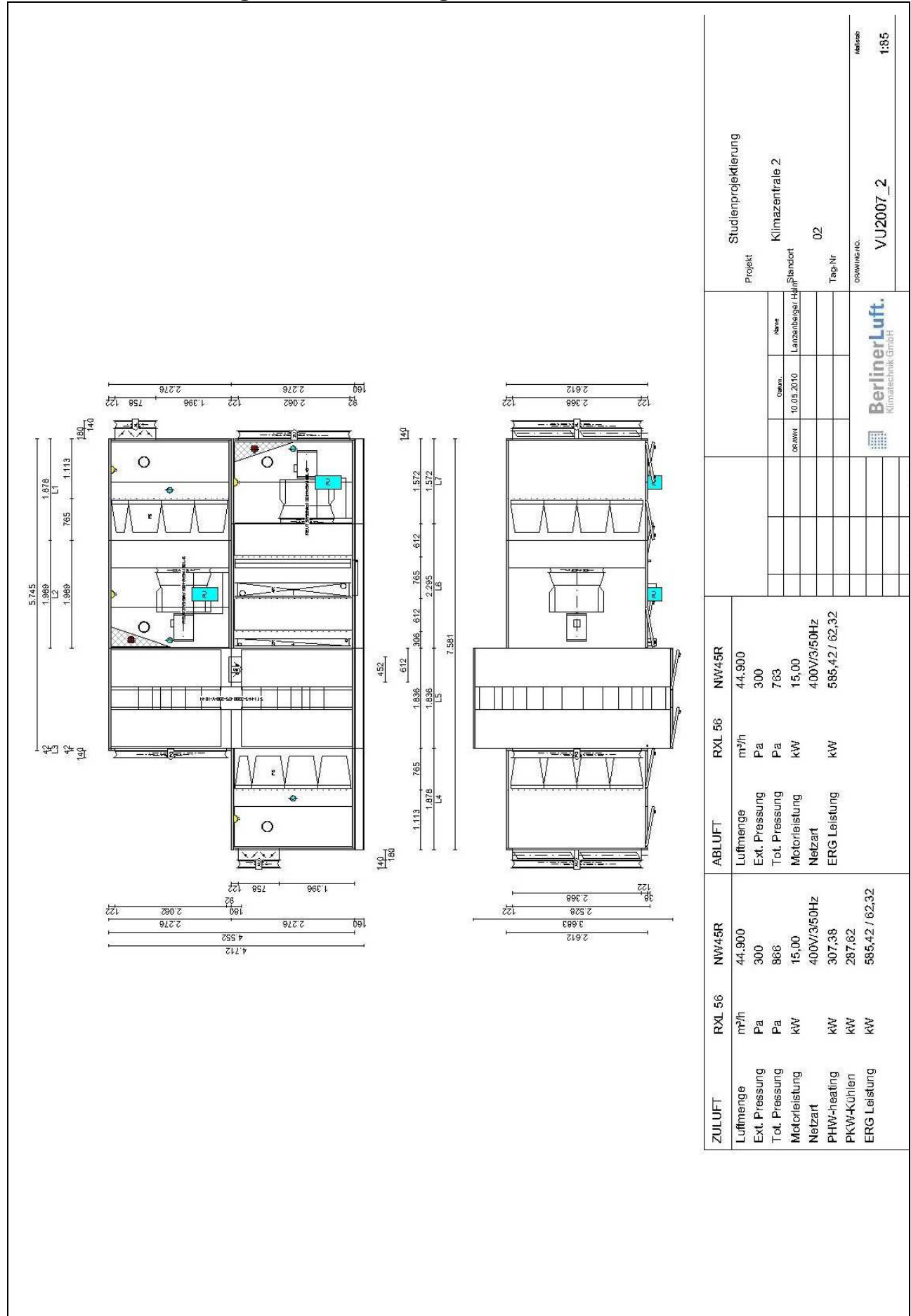
ANHANG 3: Zeichnung des freilaufenden Ventilators REU 729/3.0-710



ANHANG 4: Kennlinie des neuen Ventilators REU 737/3.0-710



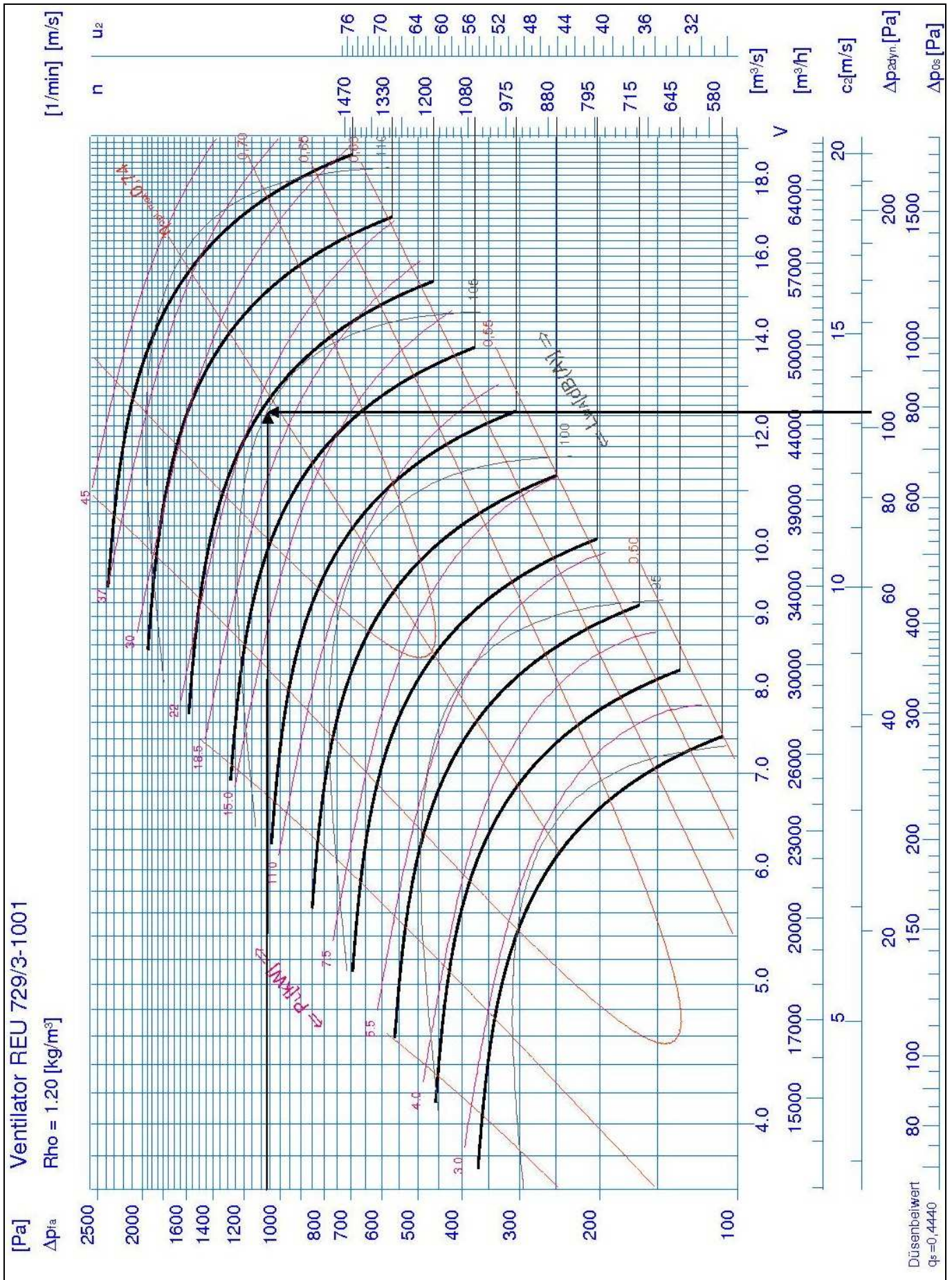
ANHANG 5: Zeichnung des Klimazentralgerätes des Kaufhauses Chemnitz



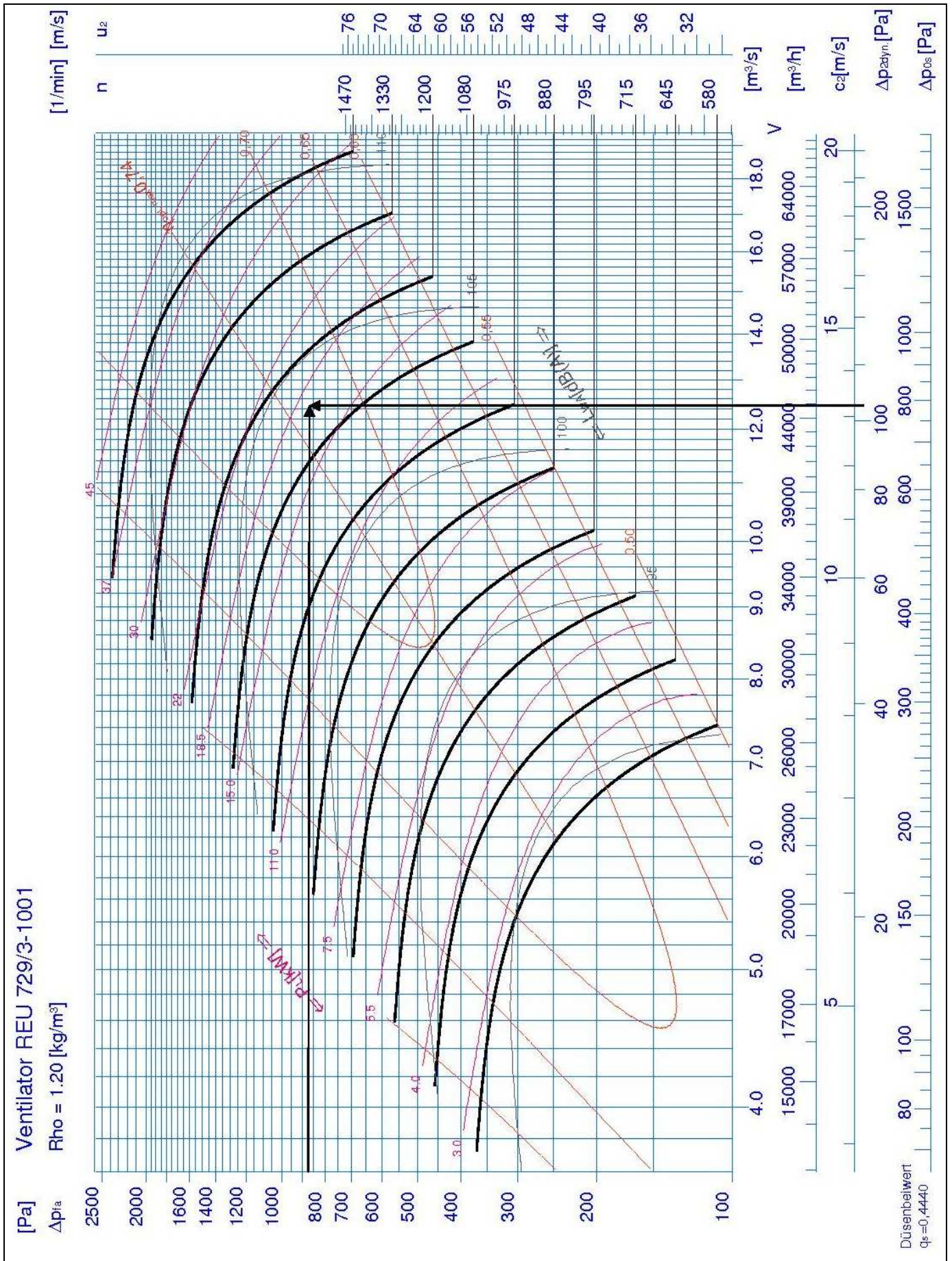
Projekt	Studienprojektleitung		
Standort	Klimazentrale 2		
Tag-Nr	02		
OSRAM-NO.	VU2007_2		
Netznr.	1185		

OSRAM	10.05.2010	Heine	Lanzsbergstr. 140
BerlinerLuft. Klimatechnik GmbH			

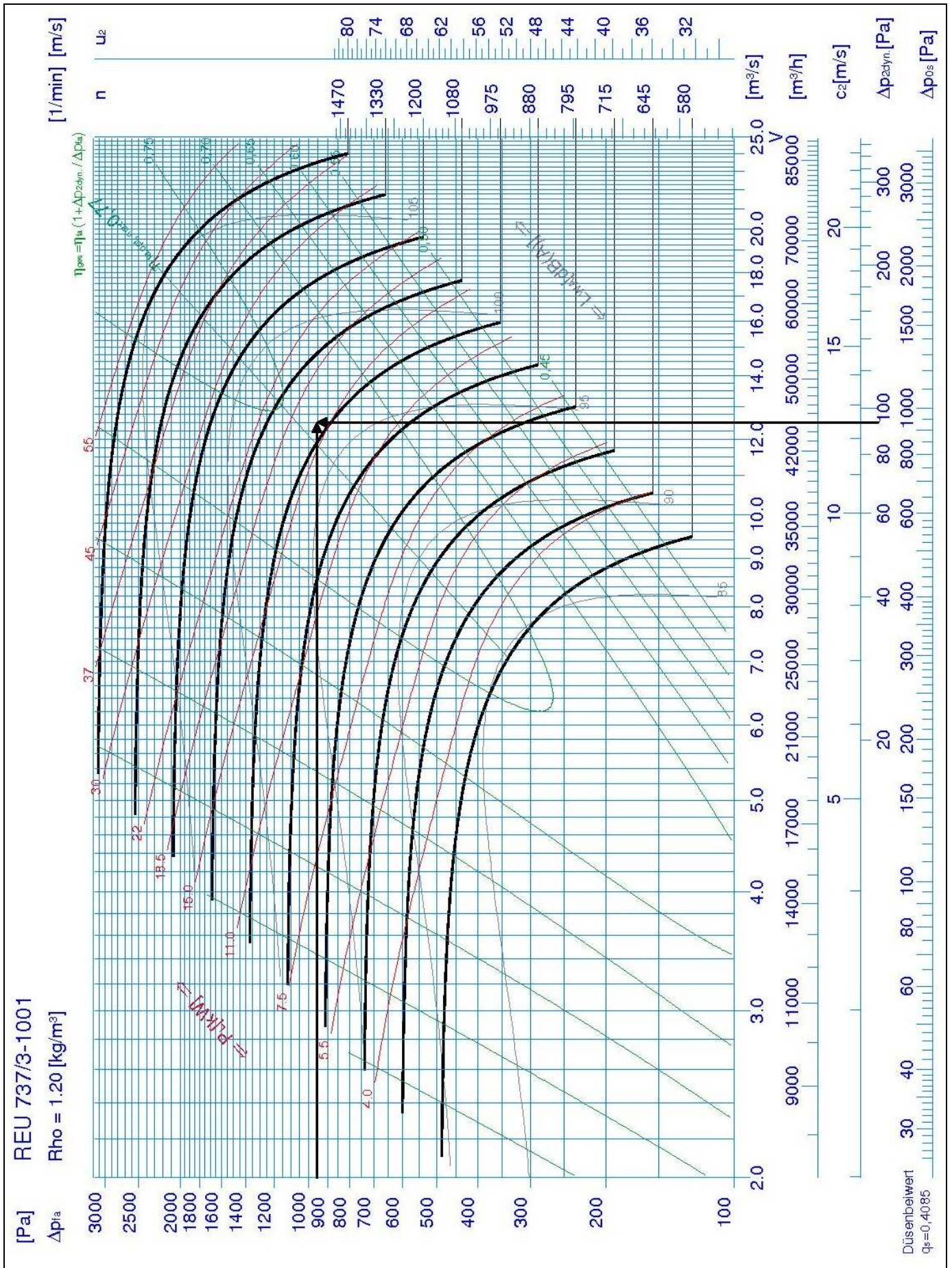
ANHANG 6: Kennlinie des geplanten Zuluftventilators REU 729/3.0-1001



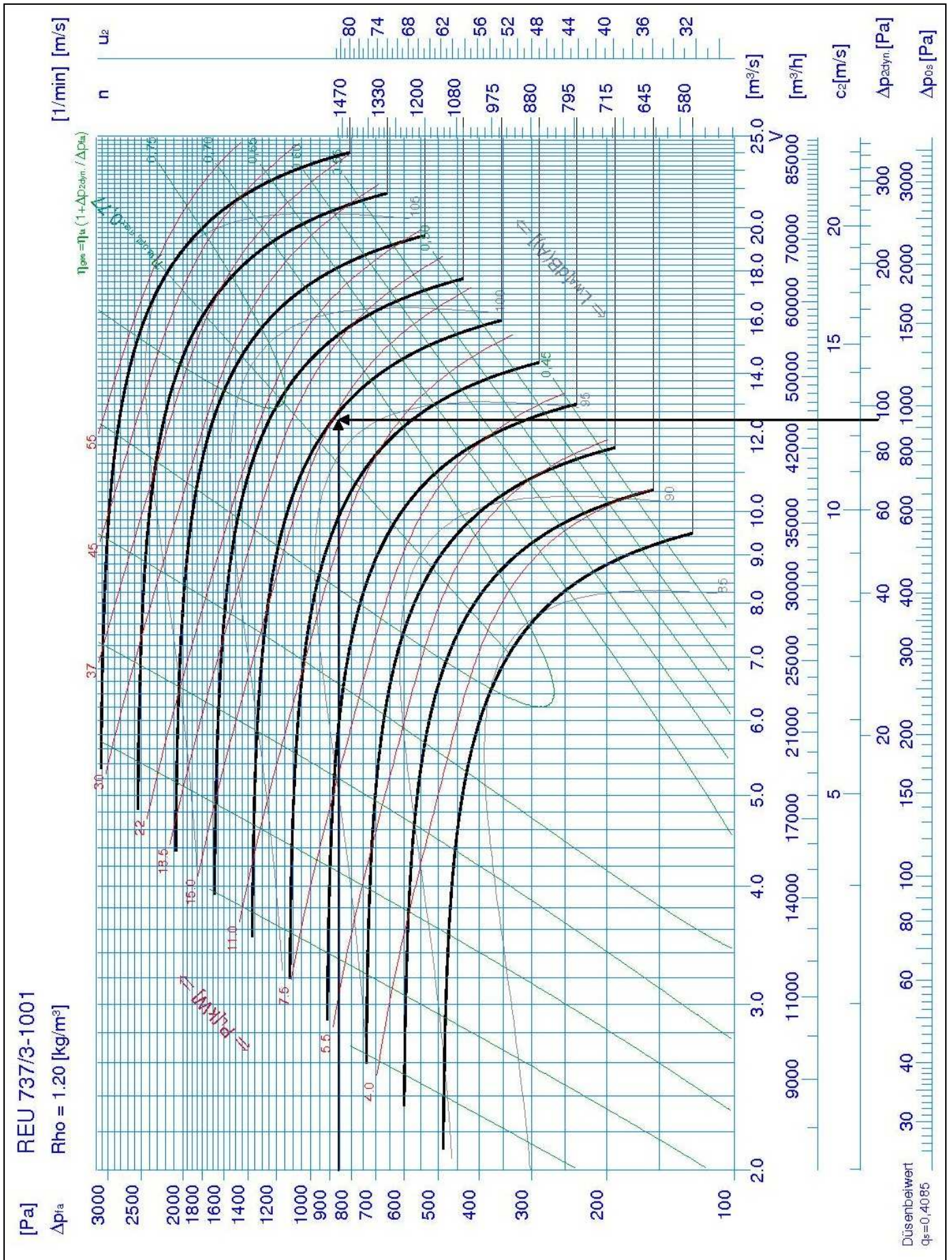
ANHANG 7: Kennlinie des geplanten Abluftventilators REU 729/3.0-1001



ANHANG 8: Kennlinie des neuen Zuluftventilators REU 737/3.0-1001



ANHANG 9: Kennlinie des neuen Zuluftventilators REU 737/3.0-1001



ANHANG 10: Vergleich Zuluftventilatoren REU 729/3-1001 & REU 737/3-1001

Ventilatortyp	Einheit	REU 729/3.0-1001 (Planungsventilator)	REU 737/3.0-1001 (Neuentwicklung)
Volumenstrom	m³/h	44.900	44.900
Anzahl Ventilatoren		1	1
Totaldruckerhöhung	Pa	971	959
nutzbarer statischer Druck	Pa	866	
Drehzahl Ventilator	1/min	1.180	1.000
Wirkungsgrad Ventilator	%	72,5	81,7
Schallleistung Summenpegel	dB(A)	106	101
Wellenleistung	kW	21,03	16,88
Motor-Nennleistung	kW	30	22
Wirkungsgrad Motor	%	90,2	89,2
Wirkungsgrad FU	%	97,0	97,0
Wirkungsgrad Antrieb	%	87,5	86,5
Aufgenommene Leistung im Schaltschrank	kW	24,03	19,51
Laufzeit im Jahr	h/a	3.600	
Durchschnittl. Strompreis	ct./kWh	16,8	
Einsparung an Strom der Neuentwicklung	kWh/a	16.272	
Einsparung an Stromkosten der Neuentwicklung	€/a	2.733,70	
Systemwirkungsgrad	%	63,4	70,7
Kaufpreis, netto	€	3.170,-	2.820,-
Einsatz eines Energiesparmotors der Klasse EFF1 (IE2)			
Mehrpreis des Motors	€	410,-	330,-
Wirkungsgrad Motor	%	92,4	90,9
Wirkungsgrad Antrieb	%	89,6	88,2
Aufgenommene Leistung im Schaltschrank	kW	23,47	19,14
Einsparung gegenüber dem Standard-Motor	kW	0,56	0,37
Einsparung gegenüber dem Standard-Motor	€/a	338,69	223,78
Amortisationszeit des Energiesparmotors	a	1,21	1,47

ANHANG 11: Vergleich Abluft-Ventilatoren REU 729/3-1001 & REU 737/3-1001

Ventilatorotyp	Einheit	REU 729/3.0-1001 (Planungsventilator)	REU 737/3.0-1001 (Neuentwicklung)
Volumenstrom	m³/h	44.900	44.900
Anzahl Ventilatoren		1	1
Totaldruckerhöhung	Pa	868	856
nutzbarer statischer Druck	Pa	763	
Drehzahl Ventilator	1/min	1.150	975
Wirkungsgrad Ventilator	%	71,9	82,0
Schallleistung Summenpegel	dB(A)	105	100
Wellenleistung	kW	19,53	15,68
Motor-Nennleistung	kW	22	18,5
Wirkungsgrad Motor	%	89,2	88,6
Wirkungsgrad FU	%	97,0	97,0
Wirkungsgrad Antrieb	%	86,5	85,9
Aufgenommene Leistung im Schaltschrank	kW	22,58	18,25
Laufzeit im Jahr	h/a	3.600	
Durchschnittl. Strompreis	ct./kWh	16,8	
Einsparung an Strom der Neuentwicklung	kWh/a	15.588	
Einsparung an Stromkosten der Neuentwicklung	€/a	2.618,78	
Systemwirkungsgrad	%	62,2	70,4
Kaufpreis, netto	€	2.820,-	2.660,-
Einsatz eines Energiesparmotors der Klasse EFF1 (IE2)			
Mehrpreis des Motors	€	330,-	260,-
Wirkungsgrad Motor	%	90,9	90,4
Wirkungsgrad Antrieb	%	88,2	87,7
Aufgenommene Leistung im Schaltschrank	kW	22,14	17,88
Einsparung gegenüber dem Standard-Motor	kW	0,44	0,37
Einsparung gegenüber dem Standard-Motor	€/a	266,11	223,78
Amortisationszeit des Energiesparmotors	a	1,24	1,16

ANHANG 12: Zusammenfassung des Einsparpotentials des Tausches der Ventilatoren

	Einheit	ZULUFT	ABLUFT
Volumenstrom	m ³ /h	44.900	44.900
Anzahl Ventilatoren		1	1
nutzbarer statischer Druck	Pa	866	763
Wirkungsgrad Ventilator REU 729	%	72,5	71,9
Wirkungsgrad Ventilator REU 737	%	81,7	82,0
Systemwirkungsgrad REU729	%	63,4	62,2
Systemwirkungsgrad REU737	%	70,7	70,4
Aufgenommene Leistung im Schaltschrank REU 729	kW	24,03	22,58
Aufgenommene Leistung im Schaltschrank REU 737	kW	19,51	18,25
Einsparung Leistung	kW	4,52	4,33
Einsparung Stromkosten	€/a	2.733,70	2.618,78
Einsparung Kaufpreis, netto	€	350,-	160,-
Gesamteinsparung Stromkosten	€/a	5.352,48	
Gesamteinsparung Kaufpreis	€	510,-	
Nutzungsdauer	a	15	
Preissteigerung	%/a	2,5	
Realzinssatz	%	3,0	
Summe der Stromeinsparung	€	94.683,35	
Gesamteinsparung	€	95.193,35	

ANHANG 13: Maximales Einsparpotentials der neuen Ventilatoren in Verbindung mit EFF1-Motoren

	Einheit	ZULUFT	ABLUFT
Volumenstrom	m ³ /h	44.900	44.900
Anzahl Ventilatoren		1	1
nutzbarer statischer Druck	Pa	866	763
Wirkungsgrad Ventilator REU 729	%	72,5	71,9
Wirkungsgrad Ventilator REU 737	%	81,7	82,0
Systemwirkungsgrad REU729	%	63,4	62,2
Systemwirkungsgrad REU737	%	72,1	71,9
Aufgenommene Leistung im Schaltschrank REU 729	kW	24,03	22,58
Aufgenommene Leistung im Schaltschrank REU 737	kW	19,14	17,88
Einsparung Leistung	kW	4,89	4,70
Einsparung Stromkosten	€/a	2.957,47	2.842,56
Einsparung Kaufpreis	€	20,-	- 100,-
Gesamteinsparung Stromkosten	€/a	5.800,03	
Gesamteinsparung Kaufpreis	€	- 80,-	
Nutzungsdauer	a	15	
Preissteigerung	%/a	2,5	
Realzinssatz	%	3,0	
Summe der Stromeinsparung	€	102.600,34	
Gesamteinsparung	€	102.520,34	

Quellenverzeichnis

- ECK,B.: *Ventilatoren*. Springer-Verlag, Berlin, 2002
- SCHLENDER, F.: *Ventilatoren im Einsatz*. Springer-Verlag, Berlin, 2007
- FITZNER,K.: *Raumklimatechnik – Band 2 Raumluft- und Raumkühltechnik*. Springer-Verlag, Berlin, 2008
- TROGISCH, A.: *Planungshilfen Lüftungstechnik*. Müller-Verlag, Hüthig, 2009
- MÜLLER, U.: *Nur Ventilatorentauschen genügt nicht*. Sonderdruck aus CCI Print 7/2006
- LEXIS, J.: *Ventilatoren in der Praxis*. Gentner-Verlag, 2000
- RECKNAGEL,H.: *Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik*. Oldenbourg Industrieverlag, 2008
- BERLINERLUFT: *Broschüre Luftförderung*, 2009
- TROGISCH, A.: *Planungs- und Qualitätsmanagement von RLT-Anlagen: Leitfaden für die Planungspraxis*, Müller-Verlag, Hüthig, 2009
- VEM: *Produktkatalog Niederspannungs-Asynchronmotoren*, 2008
-
- DIN 24166: 1989-01: Ventilatoren; Technische Lieferbedingungen
- DIN EN 13779: 2007-09: Lüftung von Nichtwohngebäuden
- VDI 2067 Blatt 1 und 21: 2005-02: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen
-
- URL: http://www.rlt-info.de/RLtgeraet/Ventilator/Planungshinweise_Vent/body_planungshinweise_vent.html (Stand 14.06.2009)
- URL: <http://www.klimapartner-berlin.de/default.asp?file=383464.xml> (Stand 30.06.2008)
- URL: <http://www.bva-kockelmann-gmbh.de/login-technik-ventilator.htm> (Stand Dezember 2007)
- URL: <http://www.tlt.de/?ID=32&Sprache=Deutsch&Kategoriewahl=29> (Stand 21.04.2009)
- URL: http://www.industrie-energieeffizienz.de/uploads/media/L04-Ventilatoren_01.pdf (Stand Mai 2008)
- URL: http://www.schweizer-fn.de/lueftung/ventilator/v2_ventilator.htm (Stand 2007)
- URL: <http://www.motor-challenge.de/module/tech-gen/modul-ventilatoren.pdf> (Stand 01.01.2003)

Ehrenwörtliche Erklärung

"Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich",

1. dass ich meine Studienarbeit mit dem Thema

„Untersuchungen zum Energieeinsparpotential von Radialventilatoren in Lüftungs- und Klimageräten“

ohne fremde Hilfe angefertigt habe,

2. dass ich die Übernahme wörtlicher Zitate aus der Literatur sowie die Verwendung der Gedanken anderer Autoren an den entsprechenden Stellen innerhalb der Arbeit gekennzeichnet habe und
3. dass ich meine Diplomarbeit bei keiner anderen Prüfung vorgelegt habe.

Ich bin mir bewusst, dass eine falsche Erklärung rechtliche Folgen haben wird.

Berlin, der 19.08.2010

Ort, Datum

Unterschrift