

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	7
2.1	Grundlegende Definitionen	7
2.2	Ähnlichkeit von Ventilatoren	9
2.3	Historie der Aufwertemethoden	15
2.4	Neuere Aufwertemethoden für Ventilatoren	18
2.5	Trennung von Mach- und Reynoldszahl	19
2.6	Versuchsanlagen	21
2.7	Ersatzschaltbild von axialen und radialen Ventilatoren	22
2.8	Gängige Verlustmodelle	23
2.8.1	Reibungsverlust	24
2.8.2	Trägheitsverlust	27
2.8.3	Induzierter Verlust	30
2.8.4	Wellen- und Kompressionsverlust	30
3	Modellbildung	33
3.1	Skalierung des Wirkungsgrads	34
3.2	Verlustmodellierung	35
3.2.1	Reibungsverlust	37
3.2.2	Inzidenzverlust	42
3.2.3	Carnotscher Stoßverlust	47
3.2.4	Spaltverlust	48
3.2.5	Induzierter Verlust	50
3.2.6	Wellen- und Kompressionsverlust	52
3.2.7	Zusammenfassung der Verlustmodellierung	52
3.3	Skalierung der Leistungszahl	53
3.3.1	Reibung im Radseitenraum	54
3.3.2	Spaltverlust	54
3.3.3	Zusammenfassung der Leistungszahlmodellierung	55
3.4	Skalierung der Druckziffer	56
3.5	Anwendung der Skalierungsmethode	57
3.5.1	Skalierung von Mach- und Reynoldszahl	58
3.5.2	Skalierung der Reynoldszahl und Grenzverhalten für hohe Reynoldszahlen	58
3.5.3	Skalierung der relativen Rauheit	60

4 Versuchsaufbau	63
4.1 Versuchsventilatoren	65
4.2 Messgrößen	67
4.3 Ventilatorprüfstände	68
4.3.1 Normprüfstände	68
4.3.2 Messketten und Messbereich	69
4.3.3 Auswertung der Kennfeldmessungen	73
4.4 Druckkammerprüfstand	74
4.4.1 Versuchsaufbau	74
4.4.2 Messketten unter Über- und Unterdruck	75
4.4.3 Bestimmung des Volumenstroms	77
4.4.4 Bestimmung der Gaseigenschaften	78
4.4.5 Anwendung und Grenzen des Druckkammerprüfstands	81
4.5 Messunsicherheit	83
4.5.1 Systematische Messunsicherheiten	83
4.5.2 Statistische Messunsicherheit	86
4.5.3 Berechnung der Messunsicherheit	87
4.5.4 Diskussion der Messunsicherheit	89
5 Ergebnisse der Kennlinienmessungen	91
5.1 Messungen unter Umgebungsbedingungen	93
5.2 Messungen in der Druckkammer	98
5.3 Verschiebung des Wirkungsgradoptimums	100
5.4 Zusammenfassung und Diskussion	103
6 Anwendung und Validierung	105
6.1 Verteilung der modellierten Verluste	105
6.2 Reibungseinfluss	108
6.3 Kompressibilitätseinfluss	111
6.4 Kombinierter Mach- und Reynoldszaehleinfluss	122
6.5 Spalteinfluss	125
6.6 Weitere Maschinentypen	126
6.7 Zusammenfassung der Validierung	129
7 Unsicherheit und Sensitivitätsanalyse	131
7.1 Eingangsgrößen	134
7.2 Aufbau der Simulationen	136
7.3 Skalierungsunsicherheit	136
7.4 Sensitivitätsanalyse	139
7.5 Diskussion Mess- und Modellunsicherheit	142
8 Zusammenfassung und Ausblick	143

INHALTSVERZEICHNIS	IX
Literaturverzeichnis	147
A Herleitung der freien Weglänge	155
B Strömungsgeschwindigkeiten	157
B.1 Axialventilatoren	157
B.2 Radialventilatoren	159
C Ergänzung Inzidenzverlust	163
Kontinuitätsgleichung	163
Impulssatz	164
Energieerhaltung	164
D Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen	167