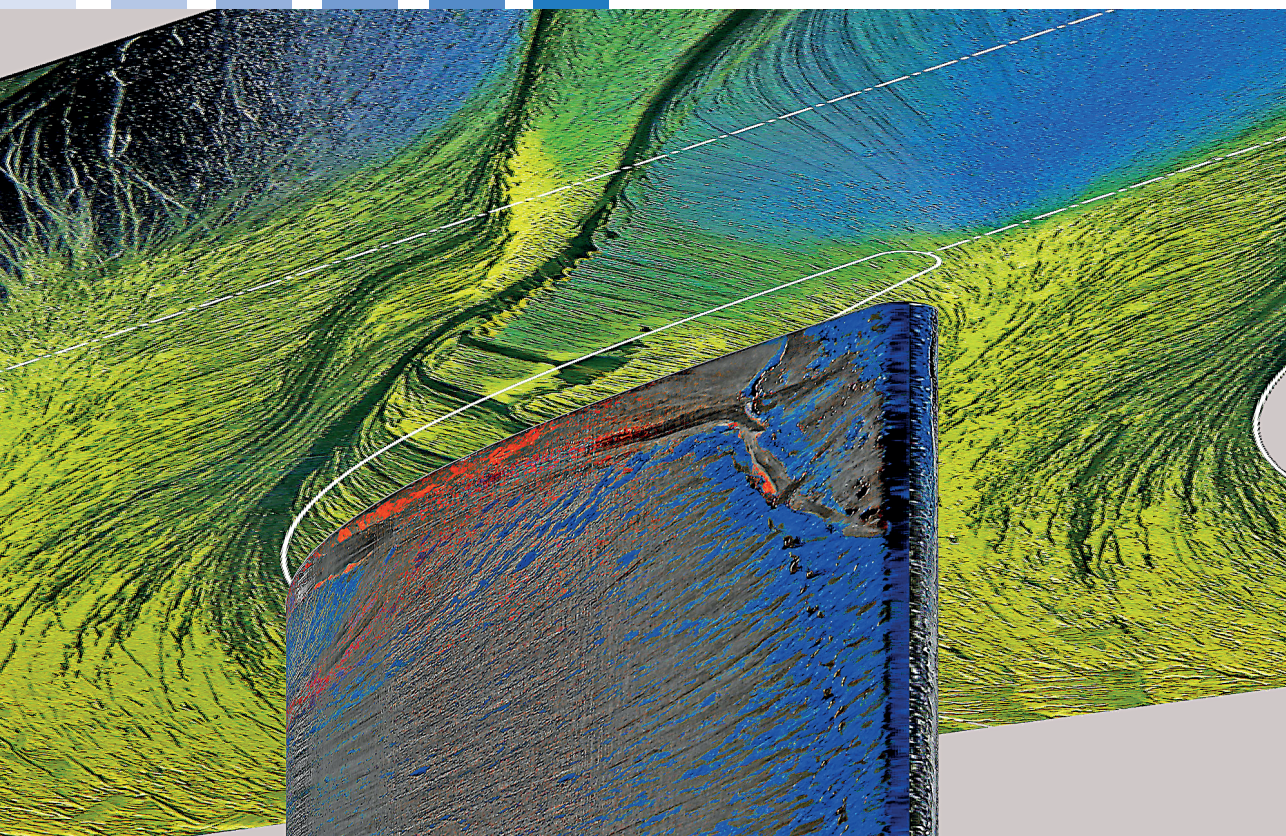


Experimentelle Untersuchungen zu transsonischen Schaufel-Spaltströmungen in Axialturbinen

Maximilian Paßmann



Experimentelle Untersuchungen zu transsonischen Schaufel-Spaltströmungen in Axialturbinen

Der Fakultät für Maschinenbau
der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte

DISSERTATION

von

Maximilian Georg Paßmann

aus Essen

Hamburg 2021

Berichte aus der Strömungstechnik

Maximilian Paßmann

**Experimentelle Untersuchungen zu transsonischen
Schaufel-Spaltströmungen in Axialturbinen**

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Hamburg, Helmut-Schmidt-Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8129-9

ISSN 0945-2230

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand im Rahmen einer kooperativen Promotion zwischen dem Laboratorium für Strömungsmaschinen (LSM) der Helmut-Schmidt Universität und dem Labor für Wärme-, Energie- und Motorentechnik des Fachbereichs Maschinenbau der FH Münster.

Mein besonderer Dank gilt zunächst einmal Herrn Prof. Dr.-Ing. Franz Joos und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan aus der Wiesche. Durch ihre ausgezeichnete Betreuung und Unterstützung sowie ihr persönliches Engagement wurde diese Arbeit erst ermöglicht.

Weiterhin möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Franz Joos für den Zugang zum transsonischen Gitterwindkanal des LSM danken. Den Mitarbeitern des LSM danke ich für die gute Zusammenarbeit und die großartige Unterstützung. Mein besonderer Dank gilt hierbei Janneck Harbeck und Silvio Geist für das große Engagement während meiner rund dreimonatigen Messkampagne am LSM.

Weiterhin bedanke ich mich herzlich bei meinen Kollegen der FH Münster Dr.-Ing. Christian Helcig, Reiner Schönfeld, Robert Wagner, Karsten Hasselmann, Felix Reinker, Marek Kapitz und Jürgen Lux. Durch eure vielfältige fachliche und persönliche Unterstützung wurde mein Arbeitsalltag stets bereichert.

Ich danke dem Promotionskolleg der FH Münster für die finanzielle Unterstützung meiner Arbeit, sowie dem Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD) für die zweimalige Bewilligung eines Stipendiums zur Teilnahme an internationalen Konferenzen.

Nicht zuletzt gilt mein ganz besonderer Dank meiner Frau Friederike und meiner ganzen Familie für die anhaltende Unterstützung und Geduld, insbesondere gegen Ende der schriftlichen Ausarbeitung dieser Arbeit.

Münster, Juni 2021

Maximilian Paßmann

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	xviii
Symbolverzeichnis	xx
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	3
1.2 Gliederung der Arbeit	4
2 Stand der Forschung	5
2.1 Historische Entwicklung	5
2.2 Inkompressible Untersuchungen	7
2.2.1 Untersuchungen der Strömung im Schaufelspalt	8
2.2.2 Untersuchungen des Spaltwirbels	12
2.2.3 Einfluss der Zuströmbedingungen	14
2.2.4 Einfluss des Anstellwinkels	15
2.2.5 Numerische Untersuchungen	16
2.3 Kompressible Untersuchungen	17
2.3.1 Untersuchung der Strömung im Schaufelspalt	17
2.3.2 Untersuchungen des Spaltwirbels und der Spaltverluste	20
2.4 Einfluss der bewegten Seitenwand	22
2.5 Spaltverlustmodelle	24
2.5.1 Modelle auf Basis von Impulsbetrachtungen	26
2.5.2 Modelle auf Basis von Energiebetrachtungen	29
2.5.3 Entropiebasierte Modelle	31
2.6 Methoden zur Reduzierung der Spaltverluste	34
2.6.1 Geometrische Ansätze	35
2.6.2 Aerodynamische Ansätze	36
3 Versuchsaufbauten	41
3.1 Experimenteller Aufbau des idealisierten Spaltmodells	41
3.1.1 Beschreibung des idealisierten Testprofils	42

3.1.2	Testsektion des idealisierten Testprofils	44
3.1.3	Aufbau des Blow-Down Windkanals	46
3.1.4	Betriebsverhalten des Blow-Down Windkanals	47
3.1.5	Zeitliches Verhalten und Wiederholgenauigkeit der Messungen . . .	50
3.2	Lineare Schaufelkaskade	51
3.2.1	Transsonischer Gitterwindkanal des LSM	51
3.2.2	Beschreibung des Testprofils	53
3.2.3	Dimensionierung des linearen Schaufelgitters	57
3.2.4	Kaskaden-Testsektion für optische Messungen	58
3.2.5	Kaskaden-Testsektion für pneumatische Messungen	60
3.2.6	Verstellung der Spaltweite	61
4	Messtechnik	63
4.1	Farbanstrich zur Strömungsvisualisierung	63
4.1.1	Praktische Anwendung der Methode	64
4.1.2	Auswertung mittels der Kritischen-Punkt-Theorie	65
4.2	Fokussierbare Schlierenoptik	67
4.2.1	Funktionsprinzip	69
4.2.2	Aufbau des Systems	70
4.2.3	Auslegung des Systems	71
4.2.4	Inbetriebnahme und Erprobung	74
4.2.5	Bildbearbeitung	75
4.3	Statische Druckmessungen	76
4.3.1	Profildruckverteilung – Idealisiertes Schaufelprofil	76
4.3.2	Profildruckverteilung – VKI-I Profil	77
4.4	Pneumatische Sonden	79
4.4.1	Fünflochsonde	79
4.5	Auswertung der Messwerte und Datenreduktion	94
4.5.1	Verlustkoeffizienten	96
4.5.2	Bildung der teilungs- und flächengemittelten Werte	100
4.5.3	Winkeldefinitionen des Abströmfeldes	104
4.5.4	Vortizität des Abströmfeldes	107
4.6	Messunsicherheiten und Fehlerrechnung	108
4.6.1	Systematische Unsicherheiten	110
4.6.2	Statistische Analyse zufälliger Unsicherheiten	113
4.6.3	Fehlerfortpflanzung	117
4.6.4	Fehleranalyse am Beispiel des Druckverhältnisses	118
5	Ergebnisse der Versuche am idealisierten Spaltmodell	121
5.1	Untersuchte Konfigurationen	121

5.2	Strömungsbedingungen am idealisierten Spaltmodell	122
5.2.1	Einstellen der Periodizität	122
5.2.2	Strömungsfeld am idealisierten Testprofil ohne Spaltströmung . . .	125
5.2.3	Zuströmung	127
5.3	Charakterisierung der Spaltströmung	129
5.3.1	Visualisierung der Spaltströmung mittels Schlierenfotografie	129
5.3.2	Einfluss der Spaltströmung auf die Profildruckverteilung	133
5.3.3	Visualisierung des oberflächennahen Strömungsfeldes	135
5.4	Einfluss der Spaltweite	141
6	Ergebnisse der Versuche an der linearen Schaufelkaskade	145
6.1	Untersuchte Konfigurationen und Einflussparameter	145
6.2	Versuchsbedingungen und Anströmung	148
6.2.1	Zeitliches Verhalten der Versuchseinrichtung	148
6.2.2	Charakterisierung des Anströmfeldes	149
6.3	Vergleich mit Literaturdaten	157
6.3.1	Vergleich der Anström-Machzahl	157
6.3.2	Vergleich der Profildruckverteilung	158
6.3.3	Vergleich der Abströmprofile	161
6.4	Charakterisierung der transsonischen Spaltströmung	163
6.4.1	Oberflächennahes Strömungsfeld der Spaltregion	164
6.4.2	Einfluss der Spaltströmung auf die Profildruckverteilung	172
6.4.3	Visualisierung des Spaltwirbels mittels Schlierenfotografie	174
6.4.4	Einfluss der Spaltströmung auf das Abströmfeld	176
6.5	Einfluss der Abström-Machzahl auf die Spaltströmung	180
6.5.1	Einfluss der Machzahl auf die spaltnahe Profildruckverteilung	184
6.5.2	Einfluss der Machzahl auf das oberflächennahe Strömungsfeld . . .	187
6.5.3	Einfluss der Machzahl auf die Abströmfelder	191
6.6	Einfluss der Spaltweite auf die Spaltströmung	196
6.6.1	Einfluss der Spaltweite auf die Profildruckverteilung	196
6.6.2	Einfluss der Spaltweite auf die Gitterströmung	200
6.6.3	Einfluss der Spaltweite auf das Abströmfeld	204
6.7	Einfluss des Anstellwinkels auf die Spaltströmung	209
6.8	Quantifizierung der aerodynamischen Verluste	218
6.8.1	Lokale Verlustbeiwerte	219
6.8.2	Darstellung der teilungsgemittelten Größen	222
6.8.3	Flächengemittelte Verlustbeiwerte	229
6.8.4	Vergleich mit Literaturdaten	234
7	Zusammenfassung und Ausblick	239

7.1	Zusammenfassung	239
7.2	Ausblick	242
	Literaturverzeichnis	245
A	Anhang	257
A.1	Koordinaten der Testprofile	257
A.1.1	Koordinaten des idealisierten Testprofils	257
A.1.2	Positionen der Profildurchbohrungen am idealisierten Testprofil . .	258
A.1.3	Koordinaten des VKI-1 Profils	258
A.1.4	Positionen der Profildurchbohrungen am VKI-1 Profil	260
A.2	Aufbau der CFD Simulationen der Testprofile	260
A.2.1	Idealisiertes Testprofil	261
A.2.2	VKI-1 Testprofil	262
A.3	Fotos der Testsektion des idealisierten Spaltmodells	264
A.4	Fotos der Instrumentierten Schaufelprofile VKI-1	264
A.5	Fotos des Versuchsaufbaus am Gitterwindkanal	265
A.6	Numerische Kalibrierung der Fünflochsonde	266
A.7	Auswahl der Berechnungsgleichungen zur Fehlerfortpflanzung	268
A.8	Umrechnung der Verlustbeiwerte	269
A.9	Herleitung der partiellen Ableitungen zur Bestimmung der Vortizität . . .	271
A.10	Schräger Verdichtungsstoß	273

Abbildungsverzeichnis

1.1	Aufbau einer axialen Turbinenstufe aus Leit- und Laufrad mit freien Schaufelenden.	2
1.2	Schematische Darstellung der Verlustmechanismen in einem axialen Schaufelgitter.	3
2.1	Spaltmodelle nach Rains (1954): (a) idealisiertes Modell basierend auf inkompressibler Potentialströmung; (b) erweitertes Modell mit Ablöseblase am druckseitigen Spalteintritt.	8
2.2	Entstehung des Spaltverlusts nach Bindon (1989): (a) Aufteilung und Entwicklung des Spaltverlusts in Abhängigkeit der Sehnenlänge; (b) Darstellung verlustbehafteter Strömungsgebiete im Schaufelspalt.	9
2.3	Einfluss der Profilbreite auf die Spaltströmung für: (a) breite Schaufelprofile $s > 4\tau$ und (b) schmale Schaufelprofile ($s < 4\tau$). In Anlehnung an Denton (1993).	10
2.4	Detaillierte Struktur der Strömung in der druckseitigen Ablöseblase im Schaufelspalt nach Sjolander und Cao (1995).	11
2.5	Ergebnisse von Sjolander und Amrud (1987): (a) Interpretation der Strömungsvisualisierung im Spalt; (b) Einfluss der Spaltströmung auf die Profildruckverteilung in Abhängigkeit der Spaltweite.	12
2.6	Schematische Darstellung der Spaltströmung auf Höhe der Schaufelhinterkante nach Yamamoto (1988): (a) untersuchtes Schaufelprofil; (b) Spaltwirbel für $\tau/c = 1,7\%$; (c) Spaltwirbel für $\tau/c = 3,7\%$	14
2.7	Modell der Strömung im Schaufelspalt für: (a) subsonische Spaltströmung; (b) transsonische Spaltströmung. In Anlehnung an Wheeler, Korakianitis und Banneheke (2013).	17
2.8	Druck und Machzahl im Schaufelspalt für verschiedene Gegendrucke nach Daten der Wasserkanal Messungen von J. Moore, J. G. Moore u. a. (1989). .	18
2.9	Darstellung der von J. Moore, J. G. Moore u. a. (1989) am Wasserkanal beobachteten Spaltströmung.	19
2.10	Einfluss der bewegten Gehäusewand auf die Spaltströmung nach Wehner (1996): (a) laminare Schleppströmung; (b) turbulente Schleppströmung. .	23

2.11	Totaldruckkoeffizient der Abströmung einer linearen Kaskade bei $\tau/H = 1,9\%$. CFD Daten aus Passmann, aus der Wiesche, Joos und Willinger (2018): (a) mit fester und (b) mit bewegter Seitenwand.	24
2.12	Übersicht gebräuchlicher Spaltverlustmodelle und Korrelationen.	25
2.13	Modellannahmen für die Strömungsgeschwindigkeiten im Schaufelgitter mit Spalt nach Bammert, Kläukens und Hartmann (1968).	27
2.14	Zusammensetzung des Spaltverlustes aus seinen einzelnen Komponenten nach Yaras und Sjolander (1992b).	30
2.15	Mischungsansatz nach Denton und Cumpsty (1987): (a) Modell der Scherschicht am Spaltaustritt und (b) Mischungsmodell zwischen Spalt- und Hauptströmung.	31
2.16	Iso-Linien der Entropie auf Basis numerischer Simulationen eines Verdichterprofils mit einer Spaltweite von $\tau/H = 4\%$. Adaptiert von Storer und Cumpsty (1994).	32
2.17	Konturierte Schaufelenden freier Schaufeln zur Reduzierung des Spaltverlusts. (a) umlaufende Streifkante; (b) druckseitige Streifkante; (c) saugseitige Streifkante; (d) Winglet.	35
2.18	Schaufeln mit Deckbändern: (a) Dreidimensionales Hochdruck Gasturbinen Profil mit drei Dichtlippen; (b) Zweidimensionales Hochdruck Dampfturbinen Profil älterer Bauart.	36
2.19	Prinzip der passiven Einblasung: (a) Ausführung der passiven Einblasung an einem Dampfturbinenprofil nach Passmann, aus der Wiesche, Joos und Willinger (2018); (b) Skizze der passiven Einblasung nach Benoni (2013).	38
2.20	Experimentelle Untersuchung zur Methode der passiven Einblasung. (a, b) Ölanstriche der spaltseitigen Kaskadenwand ohne und mit passiver Einblasung; (c) Einfluss der passiven Einblasung auf die Profildruckverteilung. Daten aus Passmann, aus der Wiesche, Joos und Willinger (2018).	39
3.1	Aufbau des idealisierten Testprofils.	42
3.2	Numerische Daten des idealisierten Testprofils im Auslegungspunkt ($\beta_1 = 60^\circ$, $\Pi = 4$): (a) isentrope Machzahl; (b, c) Totaldruckverlust-Koeffizient Y und Abströmwinkel β_2 bei 0, 25 c.	43
3.3	Aufbau der Testsektion des idealisierten Testprofils.	45
3.4	Schema des Blow-Down Kanals.	47
3.5	Kontrollvolumen zur Herleitung des Betriebsverhaltens des Blow-Down Kanals.	48
3.6	Zeitliches Verhalten von Totaldruck und Machzahl im Blow-Down Windkanal bis zum vollständigen Druckausgleich.	49

3.7	Zeitliches Verhalten der Messgrößen am Blowdown-Windkanal: (a) Totaldruckverhältnis während der ersten zwei Sekunden im Betrieb; (b, c) Totaldruckverhältnis und Machzahlen während der Messzeit. Die Signale S1 bis S5 sind Profildruckbohrungen.	51
3.8	Transsonischer Gitterwindkanal des LSM.	52
3.9	Nomenklatur des VKI-I Testprofils.	53
3.10	Krümmungsverläufe des VKI-I Testprofils: (a) Fünf Splines mit Ansatzfunktionen höherer Ordnung; (b) Finale Geometrie aus drei Splines mit tangentialen Übergängen und kreisförmiger Hinterkante.	54
3.11	Einfluss des Krümmungsverlaufs auf die Machzahl-Verteilung des VKI-I Testprofils für die Geometrien nach Abb. 3.10. Daten zweidimensionaler CFD Simulationen für $Ma_{2,is} = 0,98$	55
3.12	Geometrische Abweichungen des gefertigten Testprofils von der Nominalgeometrie auf Basis eines optischen 3D Scans bei (a) $z/H = 50\%$ und (b) $z/H = 2\%$. (c) Profil der Oberflächenrauheit.	56
3.13	Aufbau der Testsektion für die optischen Untersuchungen am transsonischen Gitterwindkanal.	59
3.14	Aufbau der Testsektion für die pneumatischen Messungen am transsonischen Gitterwindkanal.	61
3.15	Schnittdarstellung der Kaskaden Testsektion mit Traversiereinheit für Sondenmessungen in der Abströmung.	62
3.16	Verstellung der Spaltweite (Explosionsansicht).	62
4.1	Übersicht der eingesetzten Messmittel.	64
4.2	Klassifizierung der kritischen Punkte nach Détery (2001).	65
4.3	Beispiel zur Anwendung der Kritischen-Punkt-Theorie nach Détery (2001): (a) Berechnete Wandschubspannungslinien (CFD) um die Vorderkante eines Schaufelprofils; (b) Topologische Interpretation.	67
4.4	Schematische Darstellung des Funktionsprinzips einer fokussierbaren Schlierenoptik.	69
4.5	Schematische Darstellung des Aufbaus einer fokussierbaren Schlierenoptik.	70
4.6	Validierung der Schärfentiefe der fokussierbaren Schlierenoptik mittels zweier gekreuzter Überschall-Jets. Der rechte Nadel verbleibt in der Fokusebene, während die linke normal zur Bildebene verfahren wird.	73
4.7	Darstellung des Fokussiereffekts über Graustufenwerte der Schlierenbilder in Abb. 4.6.	74
4.8	Ablaufschema zur Bildbearbeitung der Rohdaten der fokussierbaren Schlierenoptik nach Kouchi, Masuya und Yanase (2017).	75
4.9	Instrumentierte Schaufelprofile zur Messung der Profildruckverteilung am idealisierten Modell.	77

4.10 Instrumentierte Schaufelprofile zur Messung der Profildruckverteilung am VKI-1 Testprofil.	78
4.11 Verwendete pneumatische Sonden: (a) Prandtl-Sonde; (b) Grenzschicht Pitot-Sonde.	79
4.12 Ermittlung der Strömungsgrößen über das Kalibrierfeld einer Fünflochsonde: (a) bei inkompressibler Kalibrierung am Beispiel des Nickwinkels α mit Daten aus B. F. Hall und Povey (2017); (b) bei kompressibler Kalibrierung aus dem mehrdimensionalen Kalibrierraum.	80
4.13 Numerische kalibrierte Fünflochsonde: (a) Aufbau der verwendeten Fünflochsonde und (b) Winkeldefinition zur Ableitung der Strömungswinkel am Sondenkopf.	82
4.14 Ablaufschema der numerischen Kalibrierung von Fünflochsonden.	83
4.15 (a-c) Fotos der Fünflochsonde während des Fertigigungsprozesses; (d) Abweichungsanalyse der Ist- zur Soll-Geometrie; (e) Ableitung der rotationssymmetrischen Geometrie.	84
4.16 (a) Randbedingungen und (b) Aufbau des blockstrukturierten Rechnetzes der numerischen Strömungssimulation.	85
4.17 (a) Darstellung der im Postprocessing berücksichtigten Parameter; (b) Illustration der Drehung des Koordinatensystems um den Rollwinkel φ zur Erzeugung dreidimensionaler Anströmverhältnisse im Postprocessing. . . .	86
4.18 Numerisch erzeugte Kalibrierräume der Fünflochsonde. (a) Kalibriermatrix mit fester Schrittweite in α , β und Ma . (b) Probe Application Matrix mit fester Schrittweite in C_α , C_β und C_M	89
4.19 Fehlermappen für Nick- und Gierwinkel (a, b), Machzahl (c), sowie Totaldruck (d) bei Verwendung der numerischen Kalibrierung im Fall inkompressibler Strömung ($Ma_\infty = 0, 2$).	90
4.20 Zu erwartende Fehler bei Einsatz der numerischen Kalibrierung in kompressiblen Strömungen: (a, b) Gierwinkel β ; (c, d) Machzahl Ma ; (e, f) Totaldruck p_0	91
4.21 Vergleich der Messgitter der Fünflochsonden-Messungen in der An- und Abströmung der linearen Kaskade: (a) 204 Messpunkte; (b) 324 Messpunkte; (c) 506 Messpunkte. (d-f) zeigen die ermittelte Machzahl der Abströmung Ma_2 bei $Ma_{2, is} = 0, 80$ und $\tau/H = 2\%$	93
4.22 Nomenklatur der Turbinenstufe: (a) Geschwindigkeitsdreiecke für Stator und Rotor; (b) Enthalpie-Entropie Diagramm der adiabaten Strömung durch eine Turbinenstufe.	97
4.23 Darstellung des Entspannungsprozesses im Schaufelgitter (Rotor) im h, s -Diagramm.	98
4.24 Messebenen und Nomenklatur der Mittelwertbildung vor und hinter dem Schaufelgitter.	100

4.25	Ermittlung gemittelter Größen am Beispiel des Totaldruckverlustkoeffizienten Y mit Daten für $x/c = 0,5$, $Ma_{2,is} = 0,98$, $\tau/H = 1\%$, $i = 0^\circ$: (a) Einfluss der Mittelungsvorschrift; (b) Einfluss des numerischen Integrationsverfahrens.	104
4.26	Definition der Strömungswinkel in den Koordinatensystemen der Fünflochsonde (x_p, y_p, z_p) und des Schaufelgitters (x, y, z) .	105
4.27	Herleitung des projizierten Sekundärströmungsvektors der Abströmung.	106
4.28	Darstellung der Messdatenaufnahme: (a) Messkette der Versuchsreihen am Blow-Down Windkanal (idealisiertes Testprofil); (b) Messkette der Versuchsreihen am Gitterwindkanal (VKI-1 Testprofil).	110
4.29	Überprüfung der Kalibrierung der Differenzdrucksensoren (GE-UNIK 5000, $\Delta p = \pm 3,5$ bar): (a) Statische Kalibrierung mit dem RUSKA 2465 Gaskolbenmanometer; (b) Dynamische Überprüfung der Messkette nach Abb. 4.28(a) bei einer Frequenz von 500 Hz.	114
4.30	Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Messung: (a) Darstellung der Grenzverteilung bei Annahme einer Normal-Verteilung und einer Studentschen t -Verteilung mit $\nu = 5$. (b) t -Wert der Studentschen t -Verteilung für die 68 %, 95 % und 99 % Vertrauensintervalle in Abhängigkeit der Freiheitsgrade ν im Vergleich zu den Werten der Normalverteilung (gestrichelte Linien). In Anlehnung an Hughes und Hase (2010).	115
4.31	Repräsentative Beispiele der Häufigkeitsverteilung mit zusätzlicher Studentschen t -Verteilungskurve (schwarze Kurve) unterschiedlicher Messreihen der vorliegenden Arbeit: (a) Messung des Totaldrucks der Zuströmung $p_{0,1}$ am Blow-Down Windkanal; (b) Messung des Profildrucks am VKI-1 Profil ($z/H = 2\%$, $\tau/H = 3\%$ und $M_{2,is} = 0,8$, Bohrung S_{10} nach Abb. 4.10); (c) Fünflochsondenmessung in der Abströmung am VKI-1 Profil ($z/H = 2\%$, $\tau/H = 3\%$ und $M_{2,is} = 0,8$).	117
5.1	Überprüfung der numerischen Auslegung des idealisierten Spaltmodells bei verschiedenen Stellungen des saugseitigen Tailboards TB_{SS} ($p_R = 0,25$): (a) Profildruckverteilung auf Höhe der Kanalmitte ($z/H = 50\%$) ohne Spaltströmung ($\tau/H = 0\%$); (b) Isentrope Machzahl im Nachlauf bei $1/4 c$ (vgl. Abb. 3.3).	123
5.2	Vergleich der Schlierenbilder des Strömungsfeldes auf Höhe der Hinterkante des idealisierten Testprofils bei $z/H = 50\%$, $\tau/H = 0\%$ und $p_R = 0,25$: (a) CFD - periodisch; (b) CFD - Testsektion des idealisierten Spaltmodells mit $TB_{SS} = 1^\circ$; (c) experimentelles Schlierenbild bei $z/H = 50\%$ und $TB_{SS} = 1^\circ$.	124
5.3	Berechnete Machzahl Verteilung des idealisierten Spaltmodells auf Höhe der Kanalmitte ($z/H = 50\%$) bei einer Spaltweite von $\tau/H = 0\%$. Daten einer dreidimensionalen CFD Simulation für $p_R = 0,25$ und $TB_{SS} = 1^\circ$.	125

5.4	Fokussierte Schlierenaufnahme des Strömungsfelds um das idealisierte Profil auf Höhe der Kanalmitte ($z/H = 50\%$) ohne Schaufelspalt ($\tau/H = 0\%$) für ein Druckverhältnis von $p_R = 0,25$. Die Schlierenaufnahme ist aus zwei Einzelbildern bei $x/c \approx 0,95$ zusammengesetzt.	126
5.5	Machzahl der Zuströmung am idealisierten Modell: (a) Machzahl entlang der Kanalbreite B ; (b) Machzahl als Funktion der Spaltweite.	128
5.6	Schematische Darstellung der Orientierung der Fokusebenen der fokussierbaren Schlierenoptik am idealisierten Testprofil.	129
5.7	Fokussierte Schlierenbilder der Profilmströmung des idealisierten Testprofils bei $\tau/H = 2,86\%$ und $p_R = 0,25$ in fünf unterschiedlichen Fokusebenen (a-e) und deren topologische Interpretation (f-j).	131
5.8	Detailaufnahme des saugseitigen Strömungsfeldes am idealisierten Testprofil in drei unterschiedlichen Fokusebenen für eine Spaltweite von $\tau/H = 2,86\%$ und ein Druckverhältnis von $p_R = 0,25$	133
5.9	Profildruckverteilung des idealisierten Testprofils für $\tau/H = 2,86\%$ und $p_R = 0,25$. Vergleich experimenteller und numerischer Daten bei $z/H = 50\%$ und $z/H = 5\%$: (a) Druckverhältnis $p/p_{0,1}$; (b) Isentrope Machzahl Ma_{is} nach Gl. 4.37.	134
5.10	Perspektivische Darstellung der Ölanstriche des idealisierten Spaltmodells bei $\tau/H = 2,86\%$: (a) Schaufelspitze und Profil-Saugseite; (b) Testprofil mit spaltseitiger Wand.	136
5.11	Ölanstrich der Saugseite bei $\tau/H = 2,86\%$ und $p_R = 0,25$: (a) Ölanstrich; (b) topologische Interpretation. Die roten Punkte markieren die Positionen der Profildruckbohrungen.	137
5.12	Ölanstrich der Schaufelspitze bei $\tau/H = 2,86\%$ und $p_R = 0,25$: (a) Ölanstrich; (b) topologische Interpretation.	137
5.13	Ölanstrich der spaltseitigen Wand des idealisierten Testprofils, für $\tau/H = 2,86\%$ und $p_R = 0,25$: (a) Ölanstrich; (b) topologische Interpretation. . . .	139
5.14	Qualitative Interpretation der Spaltströmung auf Basis der Ölanstriche und Schlierenbilder.	141
5.15	Schlierenbilder in vier Fokusebenen des idealisierten Testprofils für Spaltweiten von $\tau/H = 2,86\%$ und $5,71\%$, bei $p_R = 0,25$	142
5.16	Profildruckverteilung und isentrope Machzahl auf Höhe der Kanalmitte ($z/H = 50\%$) und in Spaltnähe ($z/H = 5\%$) für Spaltweiten von $\tau/H = 1,43\%$; $2,86\%$ und $5,71\%$, bei $p_R = 0,25$	144
6.1	Grafische Darstellung der betrachteten Einflussgrößen der Messreihen am VKI-1 Profil.	146

6.2	Repräsentativer zeitlicher Verlauf des Druckverhältnisses $p_{0,1}/p_{umg}$ (a) und Temperatur der Zuströmung T_1 (b) während eines Messlaufs am Gitterwindkanal des LSM.	149
6.3	Boxplot der prozentualen Abweichung von der nominellen Druckerhöhung für alle Messläufe in Abhängigkeit der Spaltweite: (a) $Ma_{2,is} = 0,80$; (b) $Ma_{2,is} = 0,98$; (c) $Ma_{2,is} = 1,08$	149
6.4	Zuströmung der Schaufelkaskade ($z/H = 50\%$) über die drei zentralen Schaufelteilungen für $Ma_{2,is} = 0,98$ und $\tau/H = 2\%$. Die grau hinterlegten Bereiche zeigen die experimentellen Unsicherheiten.	150
6.5	Machzahl, Totaldruckverhältnis und Strömungswinkel der Anströmung, $1,0 \times c$ vor dem Schaufelgitter bei $\tau/H = 2\%$ und $Ma_{2,is} = 0,80$	151
6.6	Massenstromgewichtete teilungs- und flächengemittelte Strömungsgrößen der Anströmung nach Daten aus Abb. 6.5: (a) Machzahl; (b) normierter Totaldruck; (c, d) Anströmwinkel. Die grau schattierten Bereiche beschreiben die Standardabweichung.	152
6.7	Machzahl der Anströmung Ma_1 als Funktion der Abström-Machzahl $Ma_{2,is}$ (a) und der Spaltweite τ (b) an der linearen Schaufelkaskade des VKI-1 Profils.	153
6.8	Grenzschichtprofile der Anströmung an drei Positionen entlang der zentralen Schaufelteilung ($y/t = -0,5; 0,0; 0,5$), in Abhängigkeit der Abström-Machzahl bei $\tau/H = 2\%$	154
6.9	Einfluss der Spaltweite auf die Grenzschichtprofile der Anströmung, gemessen auf Höhe der Teilungsmitte ($y/t = 0,0$) für unterschiedliche Abström-Machzahlen.	155
6.10	Vergleich von Verdrängungsdicke δ_* und Impulsverlustdicke δ_{**} als Funktion der (a) Spaltweite τ/H und (b) Abström-Machzahl $Ma_{2,is}$	156
6.11	Anström-Machzahl des VKI-1 Profils bei $\tau/H = 0\%$: (a) Anström-Machzahl Ma_1 der HSU Kaskade; (b) Vergleich der Anström-Machzahl mit Literaturdaten nach Kiock u. a. (1986).	158
6.12	Vergleich der Profildruckverteilung (isentropie Machzahl) bei $z/h = 50\%$ und $\tau/H = 0\%$, mit CFD-Daten und Literaturdaten nach Kiock u. a. (1986) und Baines u. a. (1986). Detail (a) zeigt die experimentelle Unsicherheit.	160
6.13	Prozentuale Abweichungen der Literatur und CFD Daten von den HSU-Messwerten für die in Abb. 6.12 gezeigten Daten. Boxplots zeigen die mittleren Abweichungen, die Standardabweichung (Abmaße der Box), sowie die minimal und maximal auftretenden Abweichungen (Fehlerbalken).	161
6.14	Vergleich der lokalen und teilungsgemittelten Verläufe von Machzahl Ma_2 , Energie-Verlustkoeffizient $\zeta_{2,is}$ und Abströmwinkel β_2 der Abströmung: (a) HSU Daten ($z/H = 50\%$; $\tau/H = 0\%$); (b-e) Literaturdaten nach Baines u. a. (1986).	162

6.15	Dreidimensionale Darstellung des VKI-1 Schaufelgitters mit projizierten Ölanstrichen (Texture Mapping) und Positionen der Fünflochsonden-Messebenen in der Abströmung für $Ma_{2,is} = 0,98$, $\tau/H = 2\%$ und $i = 0^\circ$	164
6.16	Perspektivische Ansichten der Ölanstriche des VKI-1 Profils für $Ma_{2,is} = 0,98$, $\tau/H = 2\%$ und $i = 0^\circ$	165
6.17	Perspektivische Ansichten der Ölanstriche in der Spaltregion (Texture Mapping) für $Ma_{2,is} = 0,98$, $\tau/H = 2\%$ und $i = 0^\circ$	166
6.18	Ölanstriche der Druck- (a) und Sautseite (b) des VKI-1 Profils für $Ma_{2,is} = 0,98$, $\tau/H = 2\%$ und $i = 0^\circ$. Fotografien der Ölanstriche (oben) und topologische Interpretation (unten).	167
6.19	Ölanstrich der Schaufelspitze des VKI-1 Profils für $Ma_{2,is} = 0,98$, $\tau/H = 2\%$ und $i = 0^\circ$: (a) Fotografie des Ölanstrichs; (b) topologische Interpretation des Ölanstrichs; (c-e) Interpretation der oberflächennahen Strömung nahe der Vorderkante und (f-h) nahe der Hinterkante.	168
6.20	Ölanstrich der spaltseitigen Kaskadenwand für einen Betriebspunkt von $Ma_{2,is} = 0,98$, $\tau/H = 2\%$ und $i = 0^\circ$: (a) Fotografie des Ölanstrichs; (b) topologische Interpretation.	170
6.21	Profildruckverteilung des VKI-1 Profils in Spaltnähe $z/H = 2\%$ und auf Höhe der Kanalmitte $z/H = 50\%$ für $Ma_{2,is} = 0,98$ und $\tau/H = 2\%$: (a) Totaldruckverhältnis und (b) isentrope Machzahl.	173
6.22	Schlierenaufnahmen der Gitterströmung mit Spaltströmung in vier Fokusebenen entlang der Schaufelhöhe für einen Betriebspunkt von $Ma_{2,is} = 0,98$, $\tau/H = 3\%$ und $i = 0^\circ$	175
6.23	Abströmung der VKI-1 Kaskade $0,5 \times c$ (a-c) und $1,0 \times c$ (d-f) hinter der Schaufelreihe für $Ma_{2,is} = 0,98$, $\tau/H = 2\%$ und $i = 0^\circ$: Machzahl Ma_2 (a,d); Totaldruckverhältnis $p_{0,2}/p_{0,1}$ (b,e); bezogener statischer Druck $p_2/p_{0,1}$ (c,f).	177
6.24	Abströmung der VKI-1 Kaskade $0,5 \times c$ (a-c) und $1,0 \times c$ (d-f) hinter der Schaufelreihe für $Ma_{2,is} = 0,98$, $\tau/H = 2\%$ und $i = 0^\circ$: Abströmwinkel α_2^+ (a, d); Abströmwinkel β_2^+ (b, e); Sekundärgeschwindigkeitsvektoren auf Basis von $Ma_{2y,sek}$, $Ma_{2z,sek}$ (c, f).	178
6.25	Vortizität des Abströmfeldes der VKI-1 Kaskade $0,5 \times c$ (a) und $1,0 \times c$ (b) hinter der Schaufelreihe ($Ma_{2,is} = 0,98$, $\tau/H = 2\%$ und $i = 0^\circ$).	180
6.26	Einfluss der Abström-Machzahlen auf die Gitterströmung auf Höhe der Kanalmitte ($z/H = 50\%$) und nahe des Schaufelspalts ($z/H = 5\%$) bei $\tau/H = 2\%$ und $i = 0^\circ$	181
6.27	Bildreihe zeitaufgelöster Schlierenaufnahmen der transsonischen Hinterkantenströmung ($Ma_{2,is} = 0,80$) um eine kreisförmige Hinterkante mit einem Durchmesser von $d_{TE}/c = 0.04$	182
6.28	Schlierenbilder des Strömungsfeldes für eine Abström-Machzahl $Ma_{2,is} = 0,80$ in vier Fokusebenen entlang der Kanalhöhe bei $\tau/H = 2\%$ und $i = 0^\circ$	183

6.29 Einfluss der Abström-Machzahl auf die Profildruckverteilung auf Höhe der Kanalmitte ($z/H = 50\%$) und in Spaltnähe ($z/H = 2\%$) für $\tau/H = 2\%$ und $i = 0^\circ$	185
6.30 Einfluss der Abström-Machzahl auf die Profildruckverteilung in Spaltnähe $z/H = 2\%$. Daten für $\tau/H = 2\%$ und $i = 0^\circ$. (a) Totaldruckverhältnis und (b) isentrope Machzahl.	186
6.31 Einfluss der Abström-Machzahl $Ma_{2,is}$ auf den Ölanstrich der Saugseite ($\tau/H = 2\%$; $i = 0^\circ$).	188
6.32 Einfluss der Abström-Machzahl $Ma_{2,is}$ auf den Ölanstrich der Schaufelspitze bei $\tau/H = 2\%$ und $i = 0^\circ$	189
6.33 Einfluss der Abström-Machzahl $Ma_{2,is}$ auf den Ölanstrich der spaltseitigen Kaskadenwand bei $\tau/H = 2\%$ und $i = 0^\circ$	190
6.34 Skizze der überlagerten Ölanstriche der spaltseitigen Kaskadenwand bezüglich der Verläufe der primären und sekundären Ablöselinien.	191
6.35 Totaldruckverhältnis $p_{0,2}/p_{0,1}$ der Abströmung $0,5 \times c$ (a-c) und $1,0 \times c$ (d-f) hinter dem Schaufelgitter für $\tau/H = 2\%$ und $i = 0^\circ$	192
6.36 Machzahl Ma_2 der Abströmung $0,5 \times c$ (a-c) und $1,0 \times c$ (d-f) hinter dem Schaufelgitter für $\tau/H = 2\%$ und $i = 0^\circ$	193
6.37 Sekundärgeschwindigkeitsvektoren der Abströmung $0,5 \times c$ (a-c) und $1,0 \times c$ (d-f) hinter dem Schaufelgitter auf Basis von $Ma_{2y,sek}$, $Ma_{2z,sek}$ für $\tau/H = 2\%$ und $i = 0^\circ$	194
6.38 Dimensionslose Vortizität ω^* der Abströmung $0,5 \times c$ (a-c) und $1,0 \times c$ (d-f) hinter dem Schaufelgitter für $\tau/H = 2\%$ und $i = 0^\circ$	195
6.39 Einfluss der Spaltweite auf die Profildruckverteilung auf Höhe der Kanalmitte $z/H = 50\%$ für $M_{2,is} = 0,98$ und $i = 0^\circ$: (a) Totaldruckverhältnis und (b) isentrope Machzahl.	197
6.40 Einfluss der Spaltweite auf die spaltnahe Profildruckverteilung $z/H = 2\%$ in Abhängigkeit der Abström-Machzahl für $i = 0^\circ$: (a, c, e) Totaldruckverhältnis und (b, d, f) isentrope Machzahl.	198
6.41 Schlierenaufnahmen des Strömungsfeldes in vier Fokusebenen für unterschiedliche Spaltweiten bei einer Abström-Machzahl von $M = 0,80$ und $i = 0^\circ$. Die spaltseitige Kanalwand liegt bei $z/H = 0\%$	201
6.42 Schlierenaufnahmen des Strömungsfeldes in vier Fokusebenen für unterschiedliche Spaltweiten bei einer Abström-Machzahl von $M = 0,98$ und $i = 0^\circ$. Die spaltseitige Kanalwand liegt bei $z/H = 0\%$	202
6.43 Schlierenaufnahmen des Strömungsfeldes in vier Fokusebenen für unterschiedliche Spaltweiten bei einer Abström-Machzahl von $M = 1,08$ und $i = 0^\circ$. Die spaltseitige Kanalwand liegt bei $z/H = 0\%$	203
6.44 Einfluss der Spaltweite auf die Abström-Machzahl Ma_2 bei $x/c = 0,5$ und allen untersuchten Druckverhältnissen.	205

6.45 Einfluss der Spaltweite auf das Totaldruckverhältnis $p_{0,2}/p_{0,1}$ bei $x/c = 0,5$ und allen untersuchten Druckverhältnissen.	206
6.46 Einfluss der Spaltweite auf die Sekundärgeschwindigkeiten der Abströmung ($Ma_{2y,sek}, Ma_{2z,sek}$) bei $x/c = 0,5$ und allen untersuchten Druckverhältnissen.	207
6.47 Einfluss der Spaltweite auf die dimensionslose Vortizität der Abströmung ω^* bei $x/c = 0,5$ und allen untersuchten Druckverhältnissen.	208
6.48 Ölanstriche des Schaufelkopfes für Inzidenzwinkel $i = -12^\circ, 0^\circ$ und 12° bei $Ma_{2,is} = 0,98$ und $\tau/H = 2\%$	211
6.49 Ölanstriche der Saugseite (obere Reihe) und topologische Interpretation (untere Reihe) für Inzidenzwinkel $i = -12^\circ, 0^\circ$ und 12° bei $Ma_{2,is} = 0,98$ und $\tau/H = 2\%$	212
6.50 Ölanstriche der spaltseitigen Kaskadenwand für Inzidenzwinkel $i = -12^\circ, 0^\circ$ und 12° bei $Ma_{2,is} = 0,98$ und $\tau/H = 2\%$	213
6.51 Fokussierte Schlierenbilder für Inzidenzwinkel $i = -12^\circ, 0^\circ$ und 12° bei $Ma_{2,is} = 0,98$ und $\tau/H = 2\%$	214
6.52 Profildruckverteilung auf Höhe der Kanalmitte ($z/H = 50\%$) für Inzidenzwinkel $i = -12^\circ, 0^\circ$ und 12° bei $Ma_{2,is} = 0,98$ und $\tau/H = 0\%$	215
6.53 Profildruckverteilung in Spaltnähe ($z/H = 2\%$) für Inzidenzwinkel $i = -12^\circ, 0^\circ$ und 12° bei $Ma_{2,is} = 0,98$ und $\tau/H = 0\%$	216
6.54 Einfluss des Inzidenzwinkels i auf Abström-Machzahl Ma_2 (a-c) und Totaldruckverhältnis $p_{0,2}/p_{0,1}$ (d-f) bei $x/c = 0,5$, $Ma_{2,is} = 0,98$ und $\tau/H = 2\%$	217
6.55 Einfluss des Inzidenzwinkels i auf die Sekundärgeschwindigkeitsvektoren ($Ma_{2y,sek}, Ma_{2z,sek}$) (a-c) und dimensionslose Vortizität ω^* (d-f) bei $x/c = 0,5$, $Ma_{2,is} = 0,98$ und $\tau/H = 2\%$	218
6.56 Einfluss von Spaltweite τ/H und Abström-Machzahl $Ma_{2,is}$ auf die Verteilung des lokalen Energieverlustkoeffizienten ζ_{is} bei $x/c = 0,5$ und $i = 0^\circ$	220
6.57 Einfluss des Anstellwinkels i auf die Verteilung des Energieverlustkoeffizienten in der Abströmung ($Ma_{2,is} = 0,98$; $\tau/H = 2\%$; $x/c = 0,5$).	222
6.58 Einfluss der isentropen Abström-Machzahl auf die radiale Verteilung des teilungsgemittelten isentropen Energieverlustkoeffizienten $\bar{\zeta}_{is}$ bei $x/c = 0,5$ und $i = 0^\circ$	223
6.59 Einfluss der isentropen Abström-Machzahl auf die radiale Verteilung des teilungsgemittelten Abströmwinkels $\tilde{\beta}_2$ bei $x/c = 0,5$ und $i = 0^\circ$	224
6.60 Einfluss der Spaltweite τ/H auf die radiale Verteilung des teilungsgemittelten isentropen Energieverlustkoeffizienten $\bar{\zeta}_{is}$ bei $x/c = 0,5$ und $i = 0^\circ$	225
6.61 Einfluss der Spaltweite τ/H auf die radiale Verteilung des teilungsgemittelten Abströmwinkels $\tilde{\beta}_2$ bei $x/c = 0,5$ und $i = 0^\circ$	226
6.62 Einfluss des Anstellwinkels auf die radiale Verteilung des teilungsgemittelten isentropen Energieverlustkoeffizienten $\bar{\zeta}_{is}$ bei einer Spaltweite von $\tau/H = 2\%$ und $x/c = 0,5$	227

6.63 Einfluss des Anstellwinkels auf die radiale Verteilung des teilungsgemittelten Abströmwinkels $\tilde{\beta}_2$ bei einer Spaltweite von $\tau/H = 2\%$ und $x/c = 0,5$	228
6.64 Gemittelte Gesamt- und Profilverlustbeiwerte des VKI-1 Profils in Abhängigkeit der isentropen Abström-Machzahl (a) und der bezogenen Spaltweite τ/H (b).	230
6.65 Entwicklung des Spaltverlusts des VKI-1 Profils in Abhängigkeit der Abström-Machzahl $Ma_{2,is}$ (a) und der Spaltweite τ/H (b).	231
6.66 Gemittelte Abströmwinkel des VKI-1 Profils in Abhängigkeit der isentropen Abström-Machzahl (a) und der bezogenen Spaltweite τ/H (b).	233
6.67 Vergleich der normierten teilungsgemittelten isentropen Energieverlustkoeffizienten $\bar{\zeta}_{is}$ mit Literaturdaten nach Wheeler, Korakianitis und Banneheke (2013) für $\tau/H = 2\%$, $x/c = 1,0$ und $i = 0^\circ$	235
6.68 Vergleich der Verlustbeiwerte und Abströmwinkel der HSU Messreihen ($\tau/H = 2\%$, $i = 0^\circ$, $x/c = 1,0$) mit Literaturdaten nach Kiock u. a. (1986) und Wheeler, Korakianitis und Banneheke (2013).	236
6.69 Vergleich des Spaltverlustbeiwerts der vorliegenden Messreihen ($\tau/H = 2\%$, $i = 0^\circ$, $x/c = 1,0$) mit Literaturdaten nach Wheeler, Korakianitis und Banneheke (2013).	237
A.1 Randbedingungen der CFD Simulationen des idealisierten Testprofils.	261
A.2 Beispiel eines blockstrukturierten dreidimensionalen Rechnernetzes des idealisierten Testprofils.	262
A.3 Randbedingungen der CFD Simulationen des VKI-1 Testprofils.	263
A.4 Beispiel eines blockstrukturierten dreidimensionalen Rechnernetzes des VKI-1 Testprofils.	263
A.5 Testsektion zur Untersuchung transsonischer Spaltströmungen an einem idealisierten Modell: (a) spaltseitige Ansicht mit Schaufel-Vorderkante (LE); (b) Ansicht von Seite des Schaufelfußes mit Schaufel-Hinterkante (TE) und Tailboards.	264
A.6 Herstellung der instrumentierten Schaufelprofile zur Vermessung der Profildruckverteilung am VKI-1 Profil: (a) Ansicht des gefrästen Oberteils mit Profildruckbohrungen in Spaltnähe; (b) Innengeometrie des Schaufel-Oberteils; (c) Oberteil des instrumentierten Profils zur Messung der Profildruckverteilung in der Kanalmitte.	264
A.7 Fokussierbaren Schlierenoptik am transsonisches Gitterwindkanal des LSM.	265
A.8 Traversiersystem für die Sondenmessungen am transsonisches Gitterwindkanal des LSM: (a) Konfiguration zur Vermessung der Anströmung; (b) Konfiguration zur Vermessung der Abströmung.	265

A.9	Kalibriereinheit am Niedergeschwindigkeitswindkanal $Ma_\infty = 0,2$ des Labors für Wärme-, Energie- und Motorentechnik der FH Münster zur experimentellen Kalibrierung der Fünflochsonde.	266
A.10	Aufbau zur Überprüfung der numerischen Kalibrierung der Fünflochsonde bei kompressiblen, subsonischen Strömungen am Blow-Down Windkanal des Labors für Wärme-, Energie- und Motorentechnik der FH Münster. . .	266
A.11	Aufbau zur Überprüfung der numerischen Kalibrierung der Fünflochsonde bei kompressiblen, supersonischen Strömungen am Blow-Down Windkanal des Labors für Wärme-, Energie- und Motorentechnik der FH Münster. . .	267
A.12	(a) Einfluss des Turbulenzmodells auf die Druckverteilung am Sondenkopf der Fünflochsonde im Vergleich zu experimentellen Daten der Bohrungen p_2 bis p_5 bei $Ma = 0,68$ und $\theta = 30^\circ$; (b) Einfluss des Rechengitters auf die Druckverteilung am Sondenkopf für $Ma = 1,16$ und $\theta = 30^\circ$	267
A.13	Zusammenhang zwischen Stoßwinkel β und Umlenkungswinkel δ in Abhängigkeit der Zuström-Machzahl Ma_1 für den schrägen Verdichtungsstoß des idealen Gases ($\kappa = 1,4$): (a) Nomenklatur des schrägen Verdichtungsstoßes; (b) graphische Darstellung.	274

Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleich einiger Testaufbauten zur Untersuchung von Spaltverlusten. . . .	6
3.1	Geometrische Größen des idealisierten Testprofils.	42
3.2	Hauptabmaße der Testsektion des idealisierten Testprofils.	45
3.3	Geometrische Kenngrößen des VKI-I Testprofils.	53
3.4	Abmaße des linearen Schaufelgitters.	58
3.5	Vergleich der linearen Kaskade mit den Konfigurationen aus Kiock u. a. (1986).	58
4.1	Spezifikationen der fokussierbaren Schlierenoptik im Vergleich mit Systemen aus der Literatur.	72
4.2	Abmessungen der numerisch kalibrierten Fünflochsonde.	82
4.3	Unsicherheit der numerisch kalibrierten Fünflochsonde im Bereich $0,1 \leq Ma \leq 1,4$	92
4.4	Übersicht der Vorgehensweise zur Bestimmung der teilungs- und flächengemittelten Auswertegrößen der vorliegenden Arbeit.	103
4.5	Unsicherheiten der verwendeten Analog-Digital-Wandler für die Untersuchungen am Blow-Down Kanal und am Gitterwindkanal des LSM.	111

4.6	Unsicherheiten der verwendeten Druck- und Temperatursensoren für die Untersuchungen am Blow-Down Kanal und am Gitterwindkanal des LSM.	112
4.7	Vergleich der t -Werte und Standardabweichungen σ_{x_m} mit 95 % Vertrauensintervall der in Abb. 4.31 gezeigten Messungen, bei Annahme einer Normalverteilung und der Studentschen t -Verteilung.	116
4.8	Vorgehensweise zur Ermittlung der Gesamtunsicherheit δp_R des Druckverhältnisses p_R	119
5.1	Untersuchte Spaltweiten am idealisierten Spaltmodell.	122
5.2	Abschätzung der Strömungsgrößen vor (Index 1) und hinter (Index 2) dem schrägen Verdichtungsstoß S_1 bei $z/H = 55\%$ für Spaltweiten von $\tau/H = 0\%$ und $\tau/H = 2,86\%$ ($p_R = 0,25$).	130
6.1	Untersuchte Druckverhältnisse und korrespondierende isentrope Abströmmachzahlen der Messreihen am VKI-1 Profil.	147
6.2	Untersuchte Spaltweiten der Messreihen am VKI-1 Profil.	147
6.3	Zusammenfassung der Grenzschichtparameter der Anströmung.	156
A.1	Koordinaten des idealisierten Testprofils.	257
A.2	Positionen der Profildruckbohrungen an den instrumentierten Schaufelprofilen des idealisierten Testprofils.	258
A.3	Koordinaten des VKI-1 Testprofils nach Kiock et al. Kiock u. a., 1986. . . .	258
A.3	Koordinaten des VKI-1 Testprofils nach Kiock et al. Kiock u. a., 1986 (fortgesetzt).	259
A.4	Positionen der Profildruckbohrungen an den instrumentierten Schaufelprofilen (VKI-1).	260
A.5	Modelle, Lösungs- und Diskretisierungsverfahren der stationären RANS Simulationen.	260

Symbolverzeichnis

Lateinsche Buchstaben

A	Apertur des Schlierenobjektivs in Kapitel 4.2.3	[–]
A	Querschnittsfläche	[mm ²]
a	Breite der lichtundurchlässigen Streifen im Cutoff-Grid (Kapitel 4.2.3)	[mm]
a	Schallgeschwindigkeit	[m s ^{–1}]
B	Kanalbreite	[mm]
b	Breite der transparenten Streifen im Cutoff-Grid (Kapitel 4.2.3)	[mm]
c	Sehnenlänge	[mm]
c_0	Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht im Vakuum	[m s ^{–1}]
C_α	Nickwinkel-Koeffizient der Fünflochsonde nach Gl. 4.15	[–]
C_β	Gierwinkel-Koeffizient der Fünflochsonde nach Gl. 4.16	[–]
C_D	Durchflusskoeffizient nach Gleichung 2.1	[–]
C_I	Konstante nach Gleichung 3.5	[–]
C_L	Auftriebsbeiwert nach Gleichung 2.5	[–]
C_M	Machzahl-Koeffizient der Fünflochsonde nach Gl. 4.19	[–]
c_p	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	[J kg ^{–1} K ^{–1}]
C_T	Totaldruck-Koeffizient der Fünflochsonde nach Gl. 4.20	[–]
c_x	Axiale Sehnenlänge	[mm]
d	Durchmesser	[mm]
d_a	Kopfdurchmesser der Fünflochsonde	[mm]
d_{TE}	Durchmesser der Profilhinterkante	[mm]
DS	Scharfe Schärfentiefe der fokussierbaren Schlierenoptik (Kapitel 4.2.3)	[mm]
DU	Unscharfe Schärfentiefe der fokussierbaren Schlierenoptik (Kapitel 4.2.3)	[mm]
F	Brennweite	[mm]
f	Ablösefrequenz	[s ^{–1}]

$F_{\#}$	Objektiv-Blendenzahl (Kapitel 4.2.3)	[-]
H	Kanalhöhe	[mm]
h	Schaufelhöhe	[mm]
h	Spezifische Enthalpie	[J kg ⁻¹]
I	Graustufenwert in Kap. 4.2.4	[-]
k	Gladstone-Dale Konstante	[m ³ kg ⁻¹]
$k_{s,zul}$	Zulässige Sandkornrauheit	[μm]
k_{tech}	Mittlere technische Rauheit	[μm]
L	Abstand Source-Grid zu Schlieren-Objektiv (Kapitel 4.2.3)	[mm]
L	Messlänge des Profilometers in Kapitel 3.2.2	[mm]
l	Abstand Fokusebene zu Schlieren-Objektiv (Kapitel 4.2.3)	[mm]
L'	Abstand Cutoff-Grid zu Schlieren-Objektiv (Kapitel 4.2.3)	[mm]
l'	Abstand Bildebene zu Schlieren-Objektiv (Kapitel 4.2.3)	[mm]
m	Bildvergrößerung der fokussierbaren Schlierenoptik (Kapitel 4.2.3)	[-]
n	Brechungsindex (Kapitel 4.2.3)	[-]
o	Breite des engsten Querschnitts	[mm]
p	Druck	[Pa]
p_0	Totaldruck	[Pa]
p_m	Mittlerer Druck auf dem Kegelstumpf der Fünflochsonde	[Pa]
p_R	Druckverhältnis	[-]
p_{umg}	Umgebungsdruck (absolut)	[Pa]
p_{dyn}^*	Pseudo-dynamischer Druck nach Gleichung 4.17	[Pa]
R	Spezifische Gaskonstante	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
r	Dimensionsloser Term nach Gleichung 3.6	[-]
R_a	Mittenrautiefe	[μm]
r_{TE}	Radius der Profil-Hinterkante	[mm]
s	Profildicke	[mm]
s	Spezifische Entropie	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
T	Temperatur	[K]

t	Schaufelteilung	[mm]
t	Zeit in Kapitel 3.1.4	[s]
U	Umfangsgeschwindigkeit	[m s ⁻¹]
u_τ	Wandschubspannungsgeschwindigkeit	[m s ⁻¹]
V	Strömungsgeschwindigkeit	[m s ⁻¹]
w	Relativgeschwindigkeit	[m s ⁻¹]
w_x	Axialgeschwindigkeit	[m s ⁻¹]
x	Axiale Koordinate	[mm]
x'	Axiale Koordinate im Schaufel-Koordinatensystem	[mm]
Y	Totaldruckverlustkoeffizient	[-]
y	Koordinate in Umfangsrichtung	[mm]
Y^*	Inkompressibler Totaldruckverlustkoeffizient	[-]
z	Koordinate in radialer Richtung	[mm]

Griechische Buchstaben

α	Nickwinkel der Fünflochsonde	[°]
β	Gierwinkel der Fünflochsonde	[°]
β_1	Anströmwinkel	[°]
β_2	Abströmwinkel	[°]
β_m	Mittlerer Strömungswinkel durch die Schaufelreihe nach Gleichung 2.6	[°]
β_S	Staffelungswinkel	[°]
δ_*	Verdrängungsdicke	[mm]
δ_{***}	Energieverlustdicke	[mm]
δ_{**}	Impulsverlustdicke	[mm]
δ_{99}	99 %-Grenzschichtdicke	[mm]
ε	Fehlergrößen der numerischen Kalibrierung der Fünflochsonde nach Gl. 4.26	[%]
ε_{min}	Kleinster detektierbarer Ablenkungswinkel der fokussierbaren Schlierenoptik [arc-sec]	
$\varepsilon_{x,y}$	Strahl-Ablenkungswinkel nach Gl. 4.7	[arcsec]
η	Wirkungsgrad	[-]
Γ	Eulersche Gamma-Funktion in Gl. 4.83	[-]

Γ	Kennzeichnung eines Wirbelkerns	
γ	Staffelungswinkel	[°]
κ	Isentropenexponent (c_p/c_v)	[-]
λ	Lichtwellenlänge	[nm]
μ	Dynamische Viskosität	[kg m ⁻¹ s ⁻¹]
ν	Kinematische Viskosität	[m ² s ⁻¹]
Ω	Drehrichtung	[s ⁻¹]
ω	Vortizität	[s ⁻¹]
ω^*	Dimensionslose Vortizität	[-]
ϕ	Anzahl überlagerter Einzelbilder der fokussierbaren Schlierenoptik	[-]
ψ	Keilwinkel - zwischen Saug und Druckseite des idealisierten Testprofils	[°]
ρ	Dichte	[kg m ⁻³]
τ	Spaltweite	[mm]
θ	Richtungswinkel der Fünflochsondenkalibrierung	[°]
φ	Rollwinkel der Fünflochsondenkalibrierung	[°]
ζ	Energieverlustkoeffizient nach Gl. 4.42	[-]
$\zeta_{is,ges}$	Gesamtverlustkoeffizient der Messebene	[-]
$\zeta_{is,P}$	Profilverlustkoeffizient	[-]
$\zeta_{is,Sp}$	Spaltverlustkoeffizient	[-]
ζ_{is}	Energieverlustkoeffizient nach Gl. 4.43	[-]

Subskripte

∞	Ungestörter Strömungszustand
0	Ebene in der Beruhigungskammer
1	Ebene der Zuströmung
2	Ebene der Abströmung
AM	Größe des Verlustmodells nach Ainley und Mattheison
cl	Werte auf Höhe der Kanalmitte ($z/H = 0,5$) „Center-line“
LE	Profil-Vorderkante
n	Normalenrichtung

PS	Profil-Druckseite
R	Verhältnis
ref	Referenzzustand
RV	Größe des Verlustmodells nach Rains und Vavra
SS	Profil-Saugseite
TE	Profil-Hinterkante
w	Wandnaher Wert
YS	Größe des Verlustmodells nach Yaras und Sjolander

Superskripte

*	Zustandsgröße bei $Ma = 1$
+	Von der Messebene der Abströmung aus gemessene Winkel
–	Teilungsgemittelte Größe
=	Flächengemittelte Größe
$\hat{=}$	Flächengewichtete flächengemittelte Größe
$\wedge$	Flächengewichtete teilungsgemittelte Größe
$\approx$	Massenstromgewichtete flächengemittelte Größe
$\sim$	Massenstromgewichtete teilungsgemittelte Größe

Dimensionslose Kennzahlen

$Ma_{1, \text{ch}}$	Sperrmachzahl
Ma_{is}	Isentrope Machzahl nach Gl. 4.37
Ma	Machzahl $Ma = \frac{V}{a}$
Re	Reynolds-Zahl $Re = \frac{Vl}{\nu}$
Re_{τ}	Reynoldszahl gebildet mit Spaltweite τ $Re_d = \frac{V\tau}{\nu}$
Re_d	Sonden-Reynoldszahl $Re_d = \frac{V d_a}{\nu}$
St	Strouhal-Zahl $St = \frac{f d_{TE}}{V}$
$C_{p0,2}$	Totaldruckkoeffizient bei inkompressibler Strömung $C_{p0,2} = \frac{p_{0,2} - p_{0,1}}{0,5 \rho w_1^2}$

Abkürzungen

CRVP	Gegenläufig rotierendes Wirbelpaar „Counter-Rotating-Vortex-Pair“
HSU	Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr, Hamburg

LE	Profil-Vorderkante „Leading-Edge“
LSM	Laboratorium für Strömungsmaschinen der HSU
PI	Passive Einblasung
S	Verdichtungsstoß
SBLI	Stoß-Grenzschicht-Interaktion, „Shock wave boundary layer interaction“
SL	Ablöselinie
TE	Profil-Hinterkante „Trailing-Edge“
TL	Trennlinie in Ölanstrichbildern „Dividing-streamline“
TLV	Spaltwirbel „Tip-leakage vortex“
VKI	Von Kármán Institut für Strömungsmechanik