

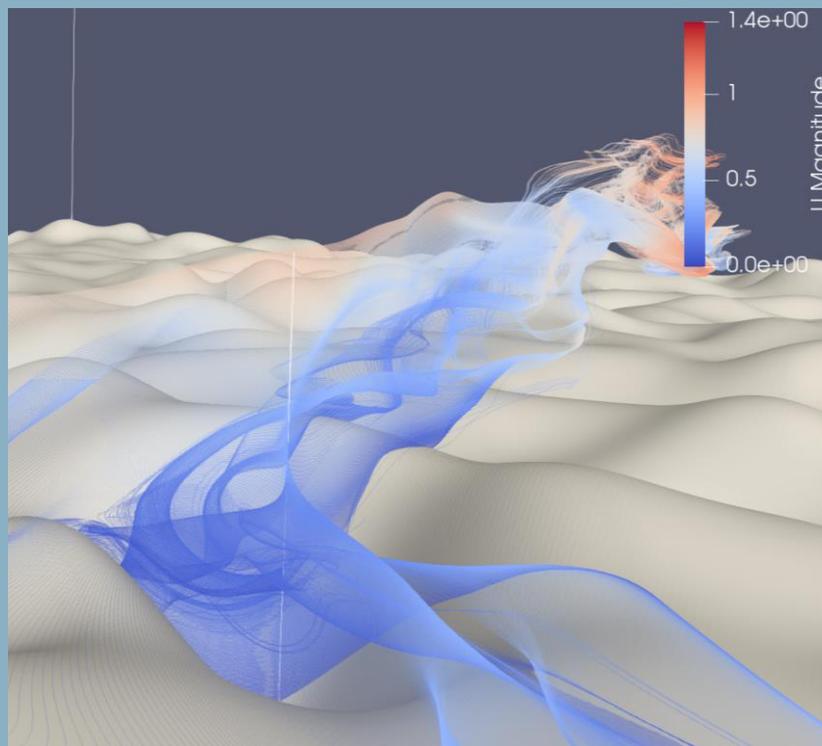


Abschlussbericht: LuFo V-3, VirT

Virtuelles Triebwerk – Hochgenaue Modellierung von Turbo-
komponenten

HAP-3: Modellierung rauher Oberflächen

HAP-4: Numerischer Prüfstand



Verfasser

Sebastian Kurth, M.Sc.
Dr. Kenan Cengiz
Prof. Dr.-Ing. Jörg Seume

Arbeitsgruppe/Abteilung

TFD – Multiphysik turbulenter Strömungen

Erscheinungsdatum

30.06.2022

Adresse:

Institut für Turbomaschinen
und Fluid-Dynamik
An der Universität 1
30823 Garbsen

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 20T1719C gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN BMWK	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Virtuelles Triebwerk – Hochgenaue Modellierung von Turbokomponenten HAP3 und HAP4	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Kurth, Sebastian, M.Sc. Cengiz, Kenan, Dr. Seume, Jörg, Prof. Dr.-Ing.	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2021
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Leibniz Universität Hannover - Fakultät für Maschinenbau - Institut für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik	9. Ber.-Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 20T1719C
	11. Seitenzahl 48
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 11019 Berlin	13. Literaturangaben 29
	14. Tabellen 5
	15. Abbildungen 23
16. DOI (Digital Object Identifier)	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Dieser Abschlussbericht fasst die Ergebnisse aus dem LuFo V-3 Verbundprojekt „Virtuelles Triebwerk–Hochgenaue Modellierung von Turbokomponenten“ zusammen. Im Hauptarbeitspaket 3 „Modellierung rauer Oberflächen“ wurden reale Rauheiten von gebrauchten Hochdruck-Verdichterschaukeln eines mittelgroßen Triebwerks mit hohem Bypass-Verhältnis systematisch variiert und in einem doppelt-periodischen Strömungskanal mittels DNS untersucht. Die Rauheiten wurden in den skalenauflösenden numerischen Simulationen mittels der Immersed Boundary Methode diskretisiert. Es konnte gezeigt werden, dass der aerodynamische Einfluss der untersuchten Rauheiten durch keine bislang bekannte Rauheitskorrelation hinreichend genau vorhergesagt wird. Die Korrelation der geometrischen und aerodynamischen Randbedingungen zeigte eine starke Korrelation der Rauheitsschiefe mit den aerodynamischen Verlusten. Mithilfe dieser Korrelation konnte die Güte eines auf dem Form- und Dichteparameter basierenden ks-Korrelationsansatzes von $R2 = 0,11$ auf $R2 = 0,90$ verbessert werden. Bei der Validierung der verbesserten ks-Korrelation zeigte sich, dass die Auswahl an geeigneten Testfällen zu gering ist und die Randbedingungen nicht hinreichend genau publiziert wurden. Dies betrifft vor Allem 2D-Höhenprofile, die zur Berechnung der Schiefeparameter benötigt werden. Zukünftig benötigt es daher angepasste Testfälle zur Validierung von Rauheitseffekten an Verdichterprofilen.	
19. Schlagwörter Turbulenzmodellierung, Rauheitsmodellierung, DNS, Immersed Boundary Methode	
20. Verlag TIB	21. Preis

Entwurf

Document control sheet

1. ISBN or ISSN BMWK	2. type of document (e.g. report, publication) Veröffentlichung (Publikation)
3. title Virtual Engine – High-Fidelity Modelling of Turbo-Components HAP3 und HAP4	
4. author(s) (family name, first name(s)) Kurth, Sebastian, M.Sc. Cengiz, Kenan, Dr. Seume, Joerg, Prof. Dr.-Ing.	5. end of project 31.12.2021
	6. publication date
	7. form of publication Document Control Sheet
8. performing organization(s) name, address Leibniz Universität Hannover - Fakultät für Maschinenbau - Institut für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik	9. originators report no.
	10. reference no. 20T1719C
	11. no. of pages 48
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 11019 Berlin	13. no. of references 29
	14. no. of tables 5
	15. no. of figures 23
16. DOI (Digital Object Identifier)	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract This final report summarizes the results from the LuFo V-3 joint project "Virtual Engine - High Fidelity Modeling of Turbo Components". In the main work package 3 "Modeling of rough surfaces", rough surfaces from used high-pressure compressor blades of a medium-size high-bypass-ratio engine are systematically varied and investigated in a double-periodic channel using DNS. The surfaces are discretized in the scale-resolving numerical simulations using the immersed boundary method. It is shown that the aerodynamic influence of the investigated roughnesses cannot be estimated with sufficient accuracy using any roughness correlation proposed so far. The present investigations prove a strong correlation of the roughness skewness with the aerodynamic losses. Derived from this, a new ks-correlation is proposed. This correlation, being based on the shape, density, and the skewness parameter, improves the curve-fit accuracy from $R^2 = 0.11$ to $R^2 = 0.90$. During the validation of the improved ks correlation, it is shown that the set of suitable test data is insufficient and the conditions of the available ones have not been published with sufficient detail. This refers especially to 2D height profiles, which are essential for the calculation of the skewness parameter. In the future, adapted test cases for the validation of roughness effects on compressor profiles will be needed.	
19. keywords Turbulence model, roughness model, DNS, Immersed Boundary Method	
20. publisher TIB	21. price

Entwurf

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	i
Tabellenverzeichnis	iii
Formelzeichen	iv
1 Kurze Darstellung	1
1.1 Aufgabenstellung	1
1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	3
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	3
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde	4
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	5
2 Eingehende Darstellung	6
2.1 Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse	6
2.1.1 Charakterisierung von Rauheiten	6
2.1.2 Aerodynamische Bewertung von Rauheiten	9
2.1.3 DNS-Testsetup	11
2.1.4 Ergebnisse	14
2.1.5 Modellierung	16
2.1.6 Validierung	24
2.1.7 Schlussfolgerungen und Ausblick	31
2.2 Wichtigste Postionen des zahlenmäßigen Nachweises	33
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	33
2.4 Voraussichtlich Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	34
2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	34
2.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	35
Literaturverzeichnis	37

Abbildungsverzeichnis

1.1	Beispiele realer Rauheiten von der dritten Stufe eines Verdichtes aus Gilge et al. (2019a). Eine große Sammlung von Rauheitsmessungen auf geflogenen Verdichter- und Blinkschaufeln findet sich in (Gilge et al. 2019b). (aus Kurth et al. 2021)	2
1.2	Balken- und Meilensteinplan	3
1.3	Einordnung der Hauptarbeitspakete HAP-3 und HAP-4 im Gesamtvorhaben „Virtuelles Triebwerk (VirT) - Hochgenaue Modellierung von Turbokomponenten“	5
2.1	Autokorrelationsfunktion R_{zz} zur Berechnung der Oberflächenparameter Sal, Str und Std	8
2.2	Referenz Rauheiten und gespiegelte Rauheiten zur systematischen Variation der Rauheitsdichte, -höhe und -Schiefe. Alle Rauheiten sind bereits für DNS mit $Re_\tau = 395$ skaliert. (aus Kurth et al. (2022))	10
2.3	Ein IBM-Netz mit eingebetteter Rauheit. Den Zellen des Netzes werden im Pre-Processing je nach Rauheitshöhe unterschiedliche Aufgaben zugewiesen.	13
2.4	Unendlicher Kanal in beide richtung mit rauen Oberflächen an der Bodenwand. Der Kanal ist symmetrisch in Richtung der Wandnormalen, wobei die graue Ebene die Symmetrieebene ist.	14
2.5	Validierung des DNS IB-Kanals mit Referenzsimulationen aus der Literatur ($Re_\tau \approx 180$). Links: mittlere Geschwindigkeitsprofile in Strömungsrichtung; rechts: Varianz der Geschwindigkeitskomponenten. Für den glatten Kanal ist nur eine Komponente dargestellt, um das Diagramm übersichtlicher zu gestalten. Samplingfehler der DNS sind kleiner als die Symbolgröße.	15
2.6	Durchschnittliche Geschwindigkeitsprofile und Reynolds-Normalspannungen im Vergleich zu einem glatten Referenzfall von (Moser et al. 1999). Samplingfehler der DNS sind kleiner als die Linienstärke.	16
2.7	Ausschnitt aus den DNS-Ergebnissen der Referenz Rauheit A. Gezeigt sind beispielhaft die drei Geschwindigkeitsfelder der Momentangeschwindigkeiten im letzten Zeitschritt der Mittelungsperiode Kurth et al. (2022)	17
2.8	Doppelt-Periodischer Strömungskanal. Auf der untere Seite wird die Rauheit durch einen ks-Wert vorgegeben. Die obere Seite hat eine symmetrische Randbedingung	18

2.9	Geschwindigkeitsprofil der Grenzschichtströmung über Referenz Rauheit A und gespiegelter Rauheit A im Vergleich zur glatten Kanalrechnung von Moser et al. (1999). (aus Kurth et al. 2022)	19
2.10	Vergleich der ks^+ -Werte mit den Korrelationen von Hummel et al. (2004) (ks_{Sa}^+) und Bons (2005) (ks_{SD}^+) berechnet, aufgetragen gegen den Geschwindigkeitsdefekt aus den DNS. (aus Kurth et al. 2022)	20
2.11	Auszug aus der Korrelationskarte für den Strömungseinfluss durch die Rauheiten zu den Rauheitsparametern. (aus Kurth et al. 2022)	21
2.12	Korrelation der Schiefe zum relativen Verhältnis der ks -Korelation basierend auf dem Form- und Dichte-Parameter und dem ks -Wert basierend auf dem Geschwindigkeitsdefekt ΔU^+ aus den DNS. (aus Kurth et al. 2022)	22
2.13	Erweiterte ks -Korrelation basierend auf dem Form-, Dichteparameter um einen Schiefe-Parameter erweitert. (aus Kurth et al. (2022))	23
2.14	Das von Leipold et al. (2000) experimentell untersuchte NACA 65 K48 Verdichterprofil mit den wichtigsten geometrischen und aerodynamischen Randbedingungen. (aus Leipold et al. (2000))	25
2.15	(a) Abbildung der von Leipold et al. (2000) aufgebrachten Rauheit als Graustufenbild. (b) das aus dem Graustufenbild rekonstruierte Höhenprofil zur Berechnung der Rauheitsparameter.	26
2.16	Verteilung der isentropen Mach-Zahl Ma_{iso} über das Schaufelprofil. Da in den Simulationen mit den verschiedenen Rauheiten keine signifikanten Unterschiede zu erkennen sind, sind nur die Ergebnisse für die Rauheitskorrelation mit dem Form- und Dichteparamter ks_{SD} dargestellt.	27
2.17	(a) Lokaler Totaldruckverlust im Nachlauf des NACA 65 K48 Profils im glatten Fall bei $Re = 600000$ (b) Differenz des lokalen Totaldruckverlusts zwischen rauher und glatter Schaufel.	28
2.18	Das von Gilge et al. (2018) experimentell untersuchte Verdichterprofil mit den wichtigsten geometrischen und aerodynamischen Randbedingungen. An den jeweils vier farblich markierten Positionen auf der Druck- und Saugseite werden Rauheiten mit Sänden aufgeklebt. (aus Gilge et al. (2018))	29
2.19	Vergleich der Druckverlust im Nachlauf des Verdichterprofils gemessen von Gilge et al. (2018) und simuliert.	30
2.20	Vergleich der Druckverluste durch die jeweils vier rauen Bereiche auf der Druck- (a) und Saugseite (b) in den experimentellen (Gilge et al. (2018)) und numerischen Untersuchungen.	31

Tabellenverzeichnis

2.1	Verschiedene Höhenprofile und deren Einfluss auf die Schräge- und Kurtosisparameter. a) positive Schiefe; b) negative Schiefe; c) leptokurtisch; d) platykurtisch (nach Thomas 1981; aus Kurth 2018)	7
2.2	Rauheitsparameter der simulierten Oberflächenrauheiten (aus Kurth et al. (2022))	11
2.3	Verwendete Diskretisierung	12
2.4	Vergleich der Netz- und Rauheitsauflösung für die durchgeführte DNS. . .	16
2.5	Die nach den verschiedenen ks-Korrelationen berechneten Rauheitswerten, die in den Simulationen des Testfalls nach Gilge et al. (2018) eingestellt werden.	30

Formelzeichen

Lateinische Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	m^2	Fläche
Es_x	-	effektive Schiefe
ks	m	äquivalente Sandkornrauheit
l	m	Sehnenlänge
\dot{m}	$\frac{kg}{s}$	Massenstrom
Ma_{iso}	-	isentropie Machzahl
n_x, n_y, n_z	-	Anzahl Zellen
p	$\frac{N}{m^2}$	Druck
Re	-	Reynoldszahl
Sa	m	arithmetische Rauheitshöhe
Sal	m	Autokorrelationslänge
sf_x, sf_y, sf_z	-	Skalierungsfaktoren
SKu	-	Kurtosis
SSk	-	Schiefe
Std	°	Vorzugsrichtung
Str	-	Isotropiekoeffizient
Sz	m	maximale Rauheitshöhe
t	m	Schaufelteilung
u_τ	$\frac{m}{s}$	Wandschubspannungsgeschwindigkeit
u, v, w	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit
U^+	-	Wandfunktion
$\overline{u_i u_i}$	-	Reynoldsspannungen
x, y, z	m	kartesische Koordinate

Griechische Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung
β		Strömungswinkel
δ	m	Grenzschichtdicke
$\epsilon_{ks^+,SD}$	-	relatives Verhältnis Rauheitskorrelationen
Λ_S	-	Form- und Dichteparameter
ν	$\frac{m^2}{s}$	kinematische Viskosität
ρ	$\frac{kg}{m^3}$	Dichte

Tiefgestellte Indizes

Indize	Einheit
∞	Größe der freien Strömung
h	isentrop
krit	kritisch
min	Minimalwert
max	Maximalwert
t, tot	Totale Größe

1 Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Um der drohenden Klimakatastrophe entgegenzuwirken, müssen in allen Bereichen der Wirtschaft und des Lebens enorme Anstrengung zur Reduktion klimaschädlicher Emissionen betrieben werden. In der Luftfahrt haben vor allem Emissionen aus den Triebwerken einen hohen klimaschädlichen Einfluss. Um diese zu verringern, definiert der sogenannte „Flightpath 2050“ ehrgeizige Ziele. So sollen z.B. klimaschädliche Emissionen bis 2050 um 75% gesenkt werden. Daher wird mit höchster Priorität an alternativen Antriebskonzepten, Treibstoffen und höherer Effizienz gearbeitet. Wohingegen die ersten beiden Ziele als langfristige Ziele angesehen werden können, können mit einer Steigerung der Effizienz bereits die Ziele für den Zeithorizont 2028-2030 erfüllt werden. Auch darüber hinaus bleiben klassische axiale Turbomaschinen eine zentrale Komponente von disruptiven hybrid-elektrischen Antriebskonzepten für die Langstreckenluftfahrt. Hierfür müssen vor allem Verdichter effizienter arbeiten, um höhere Druckverhältnisse zu erlangen, denn dies ermöglicht eine höhere Effizienz des Kerntriebwerks und eine effizientere Verbrennung bei höheren Temperaturen. Ein technologisches Ziel ist daher ein hoch genaues Modell zu erarbeiten, welches in der Entwicklung und aerodynamischen Auslegung von Verdichtern und Turbinen eingesetzt werden kann. Das Kernziel der aerodynamischen Auslegung ist hierbei die Minimierung von Strömungsverlusten im Schaufelpfad bei einem gleichbleibend hohen Leistungsumsatz.

Raue Oberflächen können einen hohen Einfluss auf die Aerodynamik von Verdichtern haben. Nach Seehausen et al. (2020) reduzieren diese den polytropen Wirkungsgrad um bis zu 3%pkt. Da moderne Verdichter nahe an ihrer Belastungsgrenze arbeiten, ist die Betrachtung und exakte Bewertung von Rauheiten im Auslegungsprozess wichtig. Abbildung 1.1 zeigt reale Rauheiten, die auf gebrauchten Hochdruck-Verdichterschaufeln eines mittelgroßen Triebwerks mit hohem Bypass-Verhältnis gemessen wurden (Gilge et al. (2019a)). Es wurden sowohl anisotrope als auch isotrope Rauheiten gemessen. Die Art und Ausprägung der Rauheit ist von der Position auf der Schaufel und der daraus resultierenden Strömung abhängig. Zur Beschreibung der Rauheit wird für RANS-Simulationen die sogenannte äquivalente Sandkornrauheit aus der Geometrie der Rauheit berechnet. Hierfür existieren viele Korrelationen, die vor allem auf klassischen Rauheitsparametern, wie z.B. der arithmetischen Rauheitshöhe, basieren (Bons (2010)). Allerdings kann keine Korrelation alle Rauheiten ausreichend gut quantitativ beschreiben. Aufgrund der daraus resultierenden Unsicherheiten müssen Sicherheiten eingeplant werden, die dazu führen, dass das Triebwerk mit geringerem Wirkungsgrad als möglich betrieben werden muss.

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des in diesem Abschlussbericht beschriebenen Hauptarbeitspakets 3 „Modellierung Realgeometrie“ ist die Untersuchung des strömungsmechanischen Einflusses realer Rauheiten mit hochauflösenden numerischen Simulationen (Direkte Numerische Simulation; DNS). Hierfür werden raue Oberflächen aus den Messungen von Gilge et al. (2019a) auf Hochdruck-Verdichterschaufeln eines mittelgroßen Triebwerks mit hohem Bypass-Verhältnis (V2500) genutzt. Die Rauheiten werden systematisch variiert um den Einfluss einzelner Rauheitsparameter wie der Rauheitsschiefe, -Dichte und -Höhe isoliert voneinander untersuchen zu können. Die Ergebnisse werden dann für eine verbesserte Charakterisierung der Rauheiten sowie einer akkurateren Modellierung des aerodynamischen Einflusses rauer Oberflächen in RANS-Simulationen genutzt. Neben den numerischen Untersuchungen wird im Hauptarbeitspakets 4 „Numerischer Prüfstand“ das umfangreiche Know-How des Instituts für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik im Umgang mit DNS und LES-Untersuchungen an den Projektpartner an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen weitergegeben.

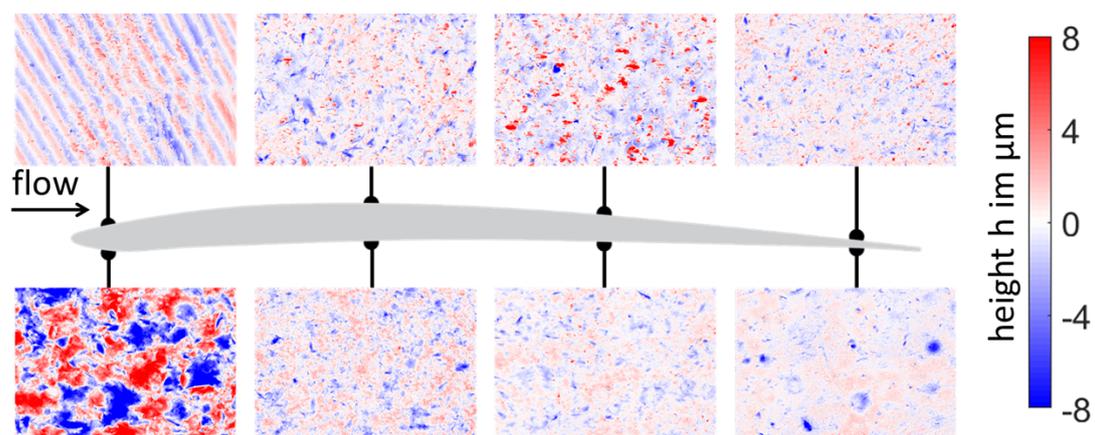


Abbildung 1.1: Beispiele realer Rauheiten von der dritten Stufe eines Verdichtes aus Gilge et al. (2019a). Eine große Sammlung von Rauheitsmessungen auf geflogenen Verdichter- und Bliskschaufeln findet sich in (Gilge et al. 2019b). (aus Kurth et al. 2021)

1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben wurde beim ZE mit den beantragten Personalmitteln bearbeitet. Für die Durchführung der DNS wurden zusätzliche Mittel beim Norddeutschen Verbund für Hoch- und Höchstleistungsrechnungen (HLRN) beantragt.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde entsprechend dem nachfolgenden Balken und Meilensteinplan geplant und bearbeitet, aus welchem sich auch die Arbeitsteilung der beantragten wissenschaftlichen Mitarbeiter ableiten lässt.

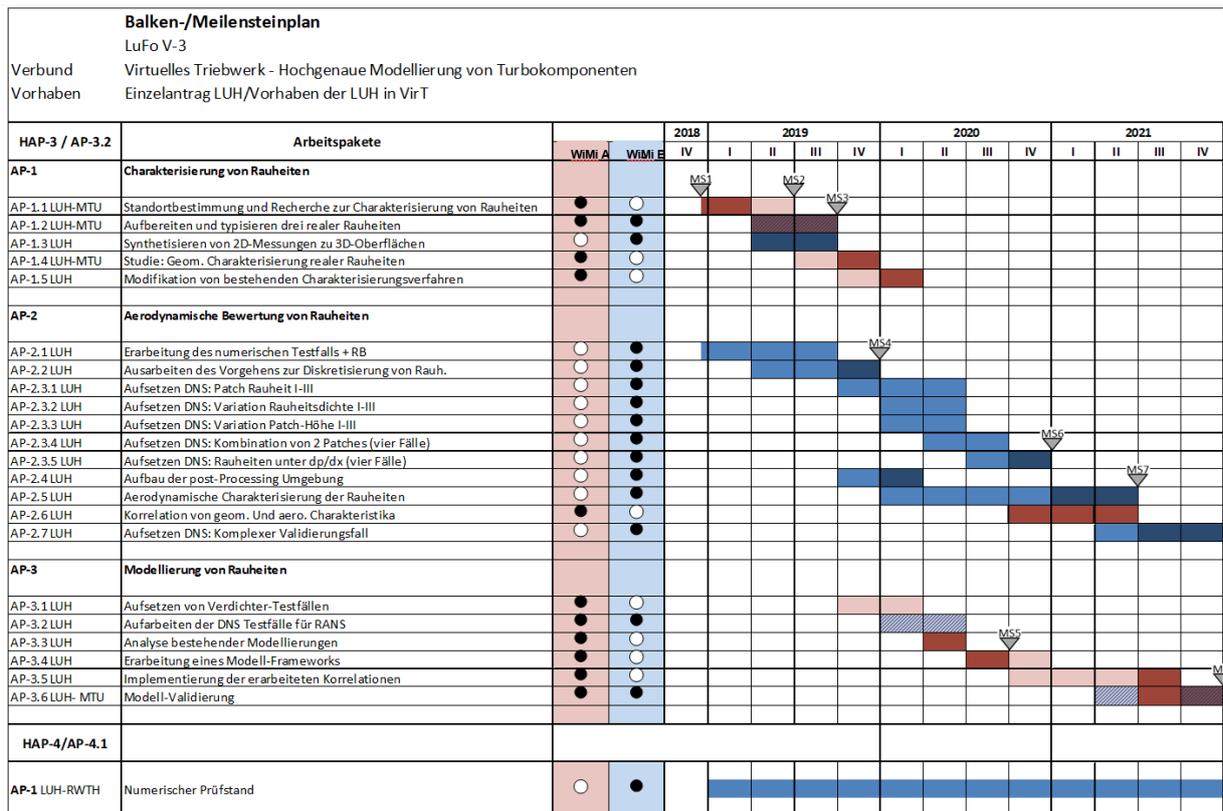


Abbildung 1.2: Balken- und Meilensteinplan

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde

Wie in dem Review-Papern (Bons 2010) ausführlich beschrieben wird, bestehen derzeit noch bedeutende Defizite bei der Klassifizierung und Modellierung von Rauheiten. Viele Modelle stützen sich noch auf die grundlegenden Untersuchungen von Nikuradse (1933) aus dem Jahr 1933, auf deren Basis die äquivalente Sandkornrauheit k_s zur Beschreibung rauer Oberflächen abgeleitet wurde. Heute ist bekannt, dass sowohl eine differenziertere Beschreibung von Rauheiten möglich ist, als auch deren aerodynamischer Effekt signifikant von dem Anwendungsfall und damit von den aerodynamischen Randbedingungen abhängt. Die Schwierigkeiten bei der Wiedergabe des aerodynamischen Einflusses von Rauheiten auf überströmten Oberflächen bestehen sowohl in der exakten und entsprechend differenzierten geometrischen Charakterisierung, sowie in der anschließenden ebenfalls differenzierten RANS-Modellierung. Die strömungsphysikalischen Zusammenhänge können auf komplexen Oberflächen mit teilweise gerichteten und ungerichteten Strukturen beliebig abstrakt werden, aber bereits die Vorhersage der Einflüsse stochastisch ungerichteter Strukturen scheitert, sobald der den Modell-Korrelationen zugrundeliegende Parameterraum verlassen wird. Es kann gezeigt werden, dass sowohl geometrische als auch aerodynamische Parameter in einem komplexen Zusammenspiel verknüpft sind, sodass die Überführung in einfachste Korrelationen nur für einen sehr begrenzten Parameterraum möglich zu sein scheint. Hochwertige Simulationsverfahren wie DNS zusammen mit der IBM bieten eine sehr hohe Genauigkeit, sowie die Möglichkeit, einzelne Effekte isoliert zu betrachten. Durch die lokale Auswertung von RANS-Modellgrößen auf Basis der DNS können Modellierungsstrategien für RANS-Modelle abgeleitet werden.

Bekanntes Verfahren und Schutzrecht

Es sind vor allem bekannte Verfahren zur Charakterisierung von Rauheiten zu nennen, siehe Abschn. 2.1.1. Diese Verfahren wurden im Rahmen dieses Vorhabens vom ZE erweitert und dadurch eine verbesserte Modellierung von Rauheiten in Verdichtern ermöglicht. Schutzrechte Dritter sind nicht bekannt.

Fachliteratur, Informations- und Dokumentationsdienste

Es wurde die im Abschlussbericht und Projektantrag zitierte Fachliteratur eingesetzt. Darüber hinaus fand ein Informationsaustausch durch persönliche Kontakte auf internationalen Konferenzen und durch nationale Arbeitskreise zur Turbulenz- und Transitionsmodellierung statt.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Förderung des Verbundprojekts „Virtuelles Triebwerk - Hochgenaue Modellierung von Turbokomponenten“ erfolgte innerhalb des Fachbereichs „Leise und effiziente Antriebe“ der Förderlinie „Technologie“. Das Verbundvorhaben hat das Ziel numerische Auslegungswerkzeuge für die zweite Generation des Geared-Turbo-Fan zu entwickeln. Innerhalb des Verbundprojekts ist das Institut für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik (TFD) an zwei Hauptarbeitspaketen (HAP) beteiligt: In HAP 3 „Modellierung Realgeometrie“ entwickelt das TFD eine verbesserte Rauheitskorrelation für die Beschreibung der realen Rauheit auf einer Verdichterschaufel. In HAP 4 „Numerischer Prüfstand“ gibt das TFD seine umfassenden Vorerfahrungen im Umgang mit DNS- und LES-Simulationen an den Projektpartner an der Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen weiter.

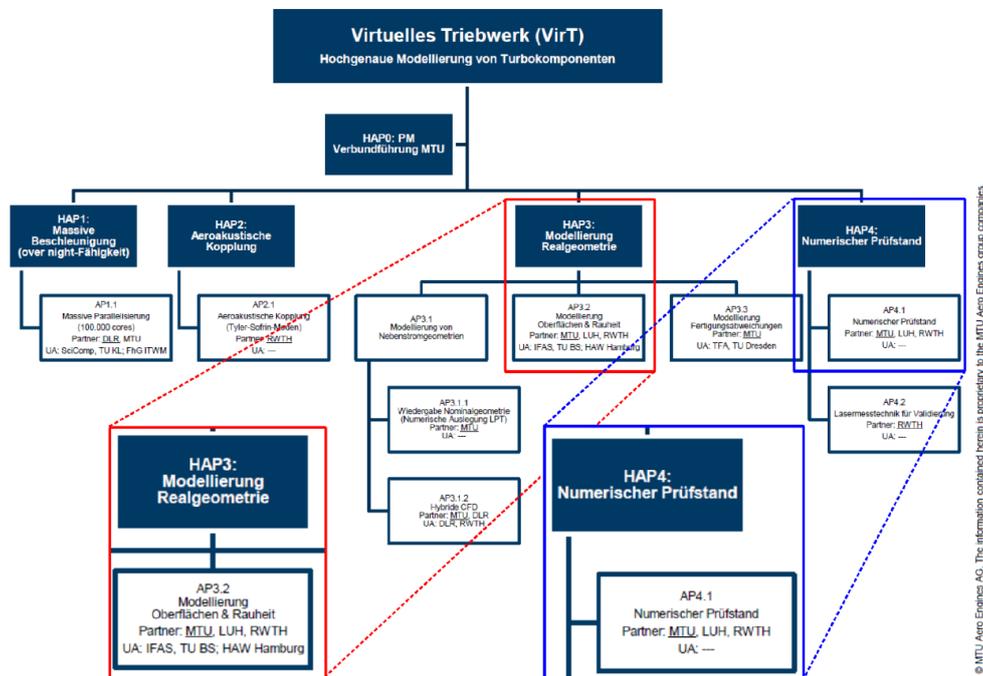


Abbildung 1.3: Einordnung der Hauptarbeitspakete HAP-3 und HAP-4 im Gesamtvorhaben „Virtuelles Triebwerk (VirT) - Hochgenaue Modellierung von Turbokomponenten“

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse

Die Zuwendungen wurden entsprechend dem Antrag verwendet und die Ziele 1) Charakterisierung und Typisierung von Rauheiten, 2) Analyse des aerodynamischen Einflusses und 3) differenziertere Modellierung bearbeitet. Die Wesentlichen Ergebnisse in den nachfolgenden Abschnitten zusammengefasst und erläutert.

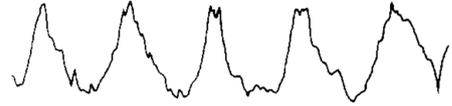
2.1.1 Charakterisierung von Rauheiten

Vor der Standortbestimmung zur Charakterisierung von Rauheiten werden in diesem Abschnitt zunächst die gängigen Parameter zur Beschreibung von Rauheiten eingeführt. Hierbei wird ein Fokus auf die, bei der Standortbestimmung benötigten Parameter gelegt.

Zur Messung des Höhenprofils von Oberflächen kann zwischen zwei Methoden unterschieden werden: taktile und optische Messverfahren. Bei taktilen Messverfahren werden 1D-Höhenprofile $h(x)$ mithilfe der Auslenkung eines Tastkopfes gemessen. Aus diesen Profilen können dann nach DIN EN ISO 4287:2009-11 Rauheitsparameter berechnet werden. Bei optischen Messverfahren wird die Oberfläche als 2D-Höhenprofil $h(x, y)$ gemessen. Die Gleichungen zur Berechnung der Rauheitsparameter für 2D-Höhenprofile sind in DIN EN ISO 25178-2:2012-09 gegeben. Hierbei kann zwischen Parametern zur Bewertung der Rauheitshöhe und der statistischen Höhenverteilung unterschieden werden: die mittlere Rauheitshöhe (R_a , S_a) oder die maximale Rauheitshöhe (R_z , S_z) geben z.B. Informationen über die Rauheitshöhe; die Schiefe (R_{sk} , S_{sk}) oder die Kurtosis (R_{ku} , S_{ku}) sind das 2. bzw. 3. zentrale statistische Moment der Rauheitshöhenverteilung. Mit den statistischen Momenten kann zwischen Rauheiten gleicher mittlerer Rauheitshöhe aber unterschiedlichen Merkmalen klassifiziert werden (Tab. 2.1). Mit der Schiefe lässt sich quantifizieren, ob eine Oberfläche eher aus Bergen (Tab. 2.1 a; $R_{sk} > 0$) oder Tälern (Tab. 2.1 b; $R_{sk} < 0$) besteht. Oberflächen mit hoher Kurtosis (Tab. 2.1 c; $R_{ku} > 3$) bestehen aus spitzeren Rauheitselementen als Oberflächen mit niedriger Kurtosis (Tab. 2.1 d; $R_{ku} < 3$).

Im Vergleich zu 1D-Höhenprofilen lassen sich mit 2D-Höhenprofilen mehr Parameter für die Rauheit, z.B. zur Quantifizierung der Isotropie, berechnen. Hierfür sind in DIN EN ISO 25178-2:2012-09 weitere Parameter beschrieben, die sich mit der Autokorrelationsfunktion R_{zz} des Höhenprofils $h(x, y)$ (Abb. 2.1 a) berechnen lassen: die Autokorrelationslänge Sal , der Isotropiekoeffizient Str und die Vorzugsrichtung Std . Die Autokorrelationsfunktion wird mit $R_{zz} > 0,2$ binarisiert und der zentrale Korrelationspeak ausgewertet (Abb. 2.1 b).

Tabelle 2.1: Verschiedene Höhenprofile und deren Einfluss auf die Schräge- und Kurtosisparameter. **a)** positive Schiefe; **b)** negative Schiefe; **c)** leptokurtisch; **d)** platykurtisch (nach Thomas 1981; aus Kurth 2018)

Höhenprofil $z_h(x)$	Verteilung	Parameter
a) 		$R_{sk} > 0$
b) 		< 0
c) 		$R_{ku} > 3$
d) 		< 3

Für die Berechnung werden der minimale und maximale Radius (\vec{R}_{\min} & \vec{R}_{\max}) der sich ergebenden Ellipse benötigt. Die Autokorrelationslänge

$$Sal = |\vec{R}_{\min}| \quad (2.1)$$

entspricht dem kleineren Radius der Ellipse. Der Isotropiekoeffizient

$$Str = \frac{|\vec{R}_{\min}|}{|\vec{R}_{\max}|} \quad (2.2)$$

ist das Verhältnis von kleinerem zu größerem Radius. Bei einer Rauheit mit $str = 1$ sind die Rauheitselemente vollständig isotrop verteilt. Umso näher der Wert des Isotropiekoeffizienten an Null liegt, umso anisotroper sind die Strukturen, die die Rauheitselemente bilden. Ist die Rauheit anisotrop, gibt die Vorzugsrichtung

$$Std = \theta = \arctan\left(\frac{R_{\max,2}}{R_{\max,1}}\right) \quad (2.3)$$

die Ausrichtung der anisotropen Strukturen an.

Die Beschreibung der Rauheit in RANS-Simulationen erfolgt über die sogenannte äquivalente Sandkornrauheit. Die ist ein empirisch entstandener Parameter, bei der aus der

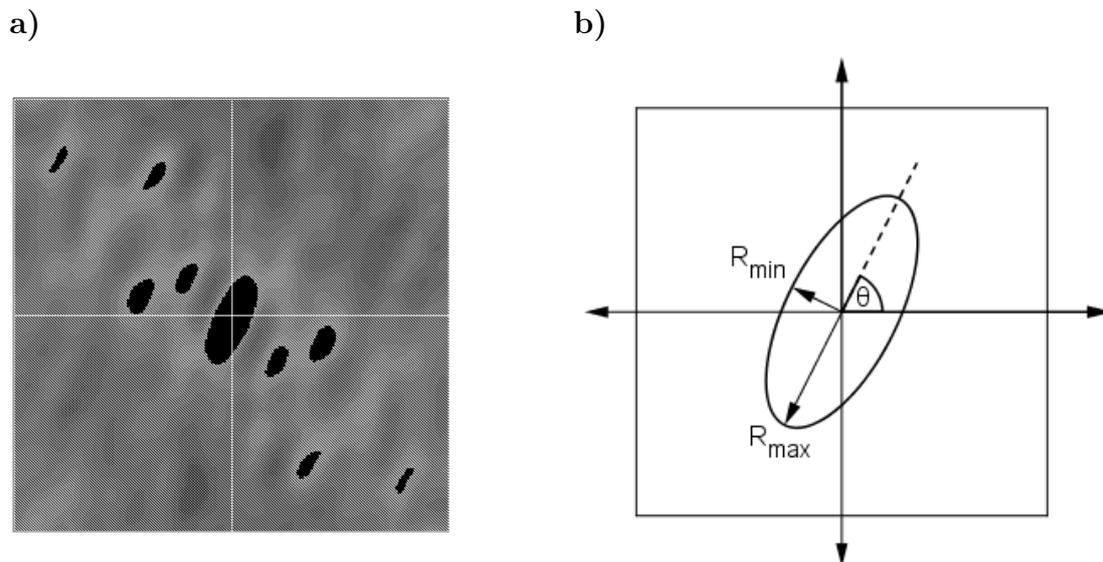


Abbildung 2.1: **a)** Autokorrelationsfunktion R_{zz} . Schwarze Bereiche: $R_{zz} > 0.2$ (DIN EN ISO 25178-2:2012-09). **b)** Geometrische Eigenschaften des zentralen Autokorrelationspeaks zur Berechnung der Oberflächenparameter. (nach DIN EN ISO 25178-2:2012-09; aus Kurth 2018).

Geometrie der realen Rauheit eine fiktive Sandkornrauheit berechnet wird, die theoretisch den selben Einfluss hat wie die Rauheit selbst. Zur Berechnung der äquivalente Sandkornrauheit existieren viele Korrelationen. Eine gute Übersicht hierzu findet sich in Bons (2010) Diese beruhen vor allem auf klassischen Rauheitsparametern, wie z.B. der arithmetischen Rauheitshöhe S_a . Ein Beispiel hierfür ist die ks-Korrelation nach Hummel et al. (2004):

$$k_{S_{Sa}} = 5,2 \cdot S_a \quad (2.4)$$

Andere Ansätze basieren auf dem Form- und Dichte-Parameter

$$\Lambda_S = \frac{S}{S_f} \left(\frac{A_f}{A_s} \right)^{-1.6} \quad (2.5)$$

nach Dirling (1973). Hierbei wird zum einen die Dichte der Rauheit durch das Verhältnis der Grundfläche S zur Frontalfläche der Rauheitselemente in Strömungsrichtung S_f berechnet. Zum anderen wird die Form der Rauheitselemente durch das Verhältnis der in Strömungsrichtung projizierten Frontalfläche der Rauheitselemente A_f zur durch die Strömung benetzten Oberfläche A_s berechnet. Ein Beispiel hierfür ist die Korrelation von Bons (2005):

$$\frac{k_{SSD}}{k} = 0,43 \cdot \log(\Lambda_S) + 0,82 \quad (2.6)$$

2.1.2 Aerodynamische Bewertung von Rauheiten

Auswahl geeigneter Testoberflächen

Es wurden zwei Arten rauer Oberflächen untersucht: neu gefertigte Oberflächen und betriebsbeanspruchte Oberflächen aus geflogenen Triebwerken. Die neu gefertigten Oberflächen wurden von dem Projektpartner (MTU Aero Engines) bereitgestellt. Aus Geheimhaltungsgründen können keine Abbildungen der Oberflächen gezeigt werden. In Tabelle ... sind ein Auswahl der Rauheitsparameter dargestellt.

Im Laufe des Projektes stellte sich heraus, dass die neu gefertigten Oberflächen für eine Modellbildung ungeeignet sind, da sie zu sehr hydraulisch glatten Oberflächen gleichen. Daher wurden für wurden zwei betriebsbeanspruchte Oberflächen aus Gilge et al. (2019b) für die weiteren Untersuchungen ausgewählt. Beide Rauheiten stammen von Hochdruckverdichterschaufeln eines mittelgroßen Triebwerks mit hohem Bypass-Verhältnis. Referenz Rauheit A (Abb. 2.2 a) wurde auf der Saugseite und Referenz Rauheit B (Abb. 2.2 d) auf der Druckseite einer Laufschaufel gemessen. Referenz Rauheit A besteht hauptsächlich aus Ablagerungen und hat daher eine positive Schiefe. Referenz Rauheit B wurde durch Einschlüge von Partikeln geformt und hat dadurch viele Täler. Diese Rauheit hat eine negative Schiefe. Die Schiefe ist ein Parameter der Oberflächen, der sich in der Standortbestimmung als relevanter Parameter herausgestellt hat und auch für den Projektpartner bei der Bewertung von Oberflächen im Produktionsprozess wichtig ist. Das Ziel ist nun durch eine systematische Variation der Rauheit, den Einfluss der Schiefe zu quantifizieren um eine verbesserte ks-Korrelation zu erarbeiten.

Systematische Variation der Rauheiten

Das Ziel der Untersuchungen war es, den Einfluss der Schiefe der Rauheit zu quantifizieren. Dafür wurden die beiden Referenz Rauheiten systematisch modifiziert. Zunächst wurden die Rauheiten jeweils an der z-Ebene gespiegelt. Dies hat den Vorteil, dass fast alle geometrischen Parameter bis auf die Schiefe konstant bleiben. Durch das spiegeln lässt sich somit die Schiefe isoliert von den anderen Rauheitsparametern variieren. In der Standortbestimmung konnte gezeigt werden, dass dieses einen deutlichen Einfluss auf die Strömung hat, da Erhebungen stärker mit der Strömung interagieren als Vertiefungen. Die Referenz Rauheiten, sowie die Spiegelungen der Rauheiten sind in Abb. 2.2 gezeigt. Alle physischen Längenangaben s wurden mit in dimensionslose Längenangaben

$$s^+ = \frac{s \cdot u_\tau}{\nu} \quad (2.7)$$

umgerechnet. Hierbei ist u_τ die Wanbdschubspannungsgeschwindigkeit und ν die kinematische Viskosität. Es ist zu erkennen, dass die gespiegelten Oberflächen geometrische Ähnlichkeiten im Vergleich zur jeweils anderen Referenz Rauheit aufweisen. Die maximalen Rauheitshöhen sind vergleichbar, wobei die Rauheitselemente bei Rauheit B in horizontaler Richtung größer sind.

Bei diesen vier Rauheiten wurden jeweils die Rauheitsdichte und Höhe systematisch verändert. Hierfür wurden die x -, y - und z -Koordinaten der Höhenkarte mit dem jeweiligen

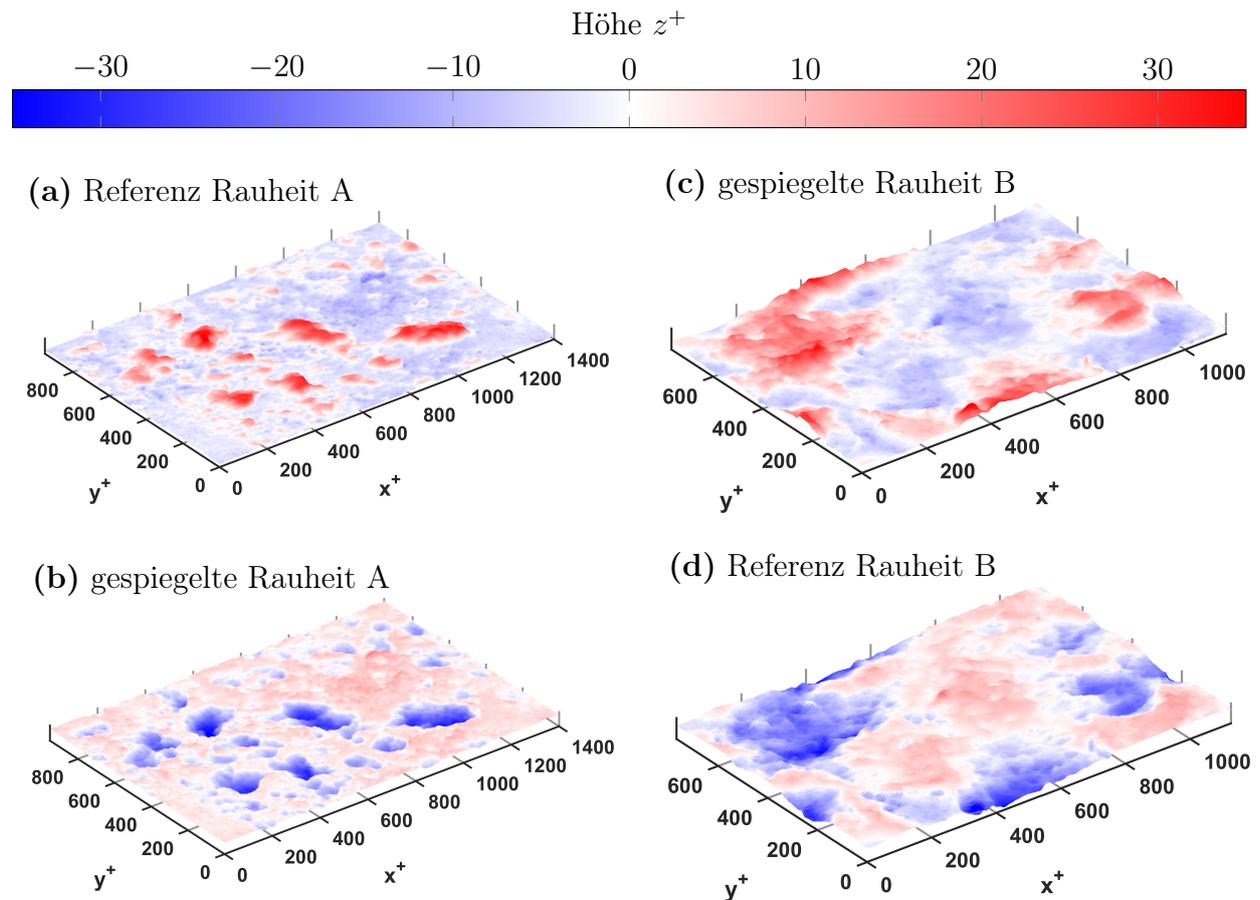


Abbildung 2.2: Referenz Rauheiten und gespiegelte Rauheiten zur systematischen Variation der Rauheitsdichte, -höhe und -Schiefe. Alle Rauheiten sind bereits für DNS mit $Re_\tau = 395$ skaliert. (aus Kurth et al. (2022))

2.1 Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse

Skalierungsfaktor sf_x , sf_y und sf_z multipliziert. Zur die Variation der Rauheitsdichte wird der der Skalierungsfaktor $sf_z = 1$ belassen und die gleiche Skalierungsfaktoren $sf_x = sf_y$ gewählt. Die Rauheitsdichte wurde um 20 % erhöht ($sf_x = sf_y = 0,8$) und um 20 % verringert ($sf_x = sf_y = 1,2$). Für die Variation der Rauheitshöhe werden alle Skalierungsfaktoren gleich gewählt. Die Rauheitshöhe wurde um 20 % erhöht ($sf_x = sf_y = 1,2$) und um 20 % verringert ($sf_x = sf_y = 0,8$).

In Tabelle 2.2 sind eine Auswahl an Rauheitsparameter aller untersuchten Rauheiten aufgeführt. Zur Vollständigkeit ist hier bereits die äquivalente Sandkornrauheit (ks_{SDS}^+) der verbesserten Korrelation aufgeführt. Es kann abgelesen werden, wie die beschriebenen Rauheitsvariationen die Rauheitsparameter beeinflussen. Durch das Spiegeln der Rauheiten wird nur die äquivalente Sandkornrauheit leicht verändert. Alle anderen Parameter bleiben konstant. Durch die Veränderung der Rauheitsdichte, bleiben Rauheitsparameter die die Rauheitshöhe beschreiben konstant. Rauheitsparameter die z.B. die Gradienten der Rauheitselemente beschreiben verändern sich.

Tabelle 2.2: Rauheitsparameter der simulierten Oberflächenrauheiten (aus Kurth et al. (2022))

	Base Roughness	Mirrored	Scaling Factor			Sa ⁺	Sz ⁺	SSk	SKu	Esx	ks _{Sa} ⁺	ks _{SD} ⁺	ks _{SDS} ⁺
			sf _x	sf _y	sf _z								
Referenz	A		1	1	1	5	29,6	1,9	7	0,19	26	23	23,6
	A	x	1	1	1	5	29,6	-1,9	7	0,19	26	24	8,6
	B		1	1	1	6,5	31,3	0,96	3,5	0,15	33,8	21	15
	B	x	1	1	1	6,5	31,3	-0,96	3,5	0,15	33,8	19,8	7,4
Höhenvariation	A		0,8	0,8	0,8	4,1	23,7	1,9	7	0,19	21,3	18,5	18,9
	A	x	0,8	0,8	0,8	4,1	23,7	-1,9	7	0,19	21,3	19,4	6,9
	B		0,8	0,8	0,8	5,2	25	0,96	3,5	0,15	27	16,8	12
	B	x	0,8	0,8	0,8	5,2	25	-0,96	3,5	0,15	27	15,8	5,9
	A		1,2	1,2	1,2	6,1	35,5	1,9	7	0,19	31,7	27,7	28,4
	A	x	1,2	1,2	1,2	6,1	35,5	-1,9	7	0,19	31,7	29,1	10,4
	B		1,2	1,2	1,2	7,8	37,6	0,96	3,5	0,15	40,6	25,3	18
	B	x	1,2	1,2	1,2	7,8	37,6	-0,96	3,5	0,15	40,6	16,8	8,8
Dichteviation	A		0,8	0,8	1	5	29,6	1,9	7	0,23	26	29,3	30
	A	x	0,8	0,8	1	5	29,6	-1,9	7	0,23	26	30,7	11
	B		0,8	0,8	1	6,5	31,3	0,96	3,5	0,18	33,8	26,8	19,1
	B	x	0,8	0,8	1	6,5	31,3	-0,96	3,5	0,18	33,8	25,2	9,37
	A		1,2	1,2	1	5	29,6	1,9	7	0,17	26	18,9	19,4
	A	x	1,2	1,2	1	5	29,6	-1,9	7	0,17	26	20	7,1
	B		1,2	1,2	1	6,5	31,3	0,96	3,5	0,12	33,8	17,3	12,3
	B	x	1,2	1,2	1	6,5	31,3	-0,96	3,5	0,12	33,8	25,2	9,4

2.1.3 DNS-Testsetup

Das verwendete CFD-Tool, *foam-extend-4.0*, basiert auf einer zellzentrierten Finite-Volumen-Diskretisierung. Für den inkompressiblen Löser, der auf *icoFoam* basiert, wird ein lineares Gauß-Schema und eine rückwärts gerichtete zeitliche Diskretisierung gewählt, was zu einer Genauigkeit zweiter Ordnung sowohl in der Zeit als auch im Raum führt. Der PISO-Algorithmus ($nCorrectors = 2$) wird für die Lösung der inkompressiblen Navier-Stokes

Gleichungen verwendet. Für alle Simulationen wird eine maximale CFL-Zahl von weniger als 0,5 eingestellt. In Tab.2.3 sind die Einstellungen des Strömungslösers zusammengefasst.

Tabelle 2.3: Verwendete Diskretisierung

Solver	<i>channelConstFric</i> (basierend auf <i>icoFoam</i>)
Time scheme	backward
Divergence schemes	Gauss linear
Gradient schemes	Gauss linear
Laplacian schemes	Gauss linear corrected
Interpolation schemes	linear

Diskretisierungsverfahren für Rauheiten

Für die räumliche Diskretisierung der Rauheiten wird die „Immersed Boundary Methode“ (IBM) zur Simulation der Strömung mit „Direkten Numerischen Simulationen“ (DNS) verwendet. Die IBM hat einige Vorteile gegenüber dem konventionellen Ansatz Körperkonforme Netze zu verwenden:

- Das Netz kann regelmäßig sein und alle Qualitätskriterien best möglich erfüllen, da es unabhängig vom eingebetteten Körper ist.
- Es müssen nur wenige Netze erstellt werden, da die Zuordnung der Zellfunktionen erst nach dem einbetten der Rauheit im Pre-Processing erfolgt.
- Die Erstellung des Netzes erfordert nur sehr wenig manuellen Aufwand und da sie einfach automatisiert werden kann.

Der in dieser Arbeit verwendete IBM-Ansatz ist in *foam-extend-4.0* implementiert. Er basiert auf der polynomialen Anpassung der Lösung auf den IB-Zellen aufgrund der Randbedingung an der Wand. Der IBM-Ansatz ermöglicht Simulationen auf unstrukturierten Netzen, indem die Zellen in Festkörperzellen und Fluid-Zellen unterteilt werden. Die Zellmittelpunkte der Festkörperzellen befinden sich innerhalb des überströmten Körpers. Die Geschwindigkeit in diesen Zellen werden auf Null gesetzt. Die Geschwindigkeiten in Fluid-Zellen, die eine Fläche mit einer Festkörperzelle teilen, werden durch quadratische Interpolation zwischen der Wand und den benachbarten Fluid-Zellen ermittelt (siehe Abb. 2.3). Eine ausführliche Erläuterung der IB-Methode ist in Senturk et al. (2019) zu finden.

Es werden inkompressible und isotherme Kanalströmungen von Newton’schen-Fluiden untersucht. Daher werden die allgemeinen Navier-Stokes-Gleichungen vereinfacht zu

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2}. \quad (2.8)$$

Mit Hilfe der DNS werden kleinskalige turbulente Fluktuationen in Zeit und Raum aufgelöst (d.h. berechnet), ohne Turbulenzmodelle einzusetzen. Im Gegensatz zu experimentellen

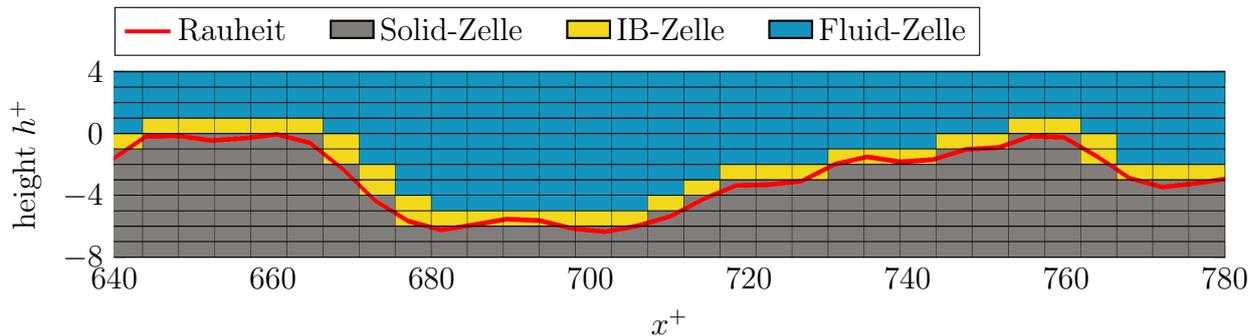


Abbildung 2.3: Ein IBM-Netz mit eingebetteter Rauheit. Den Zellen des Netzes werden im Pre-Processing je nach Rauheitshöhe unterschiedliche Aufgaben zugewiesen.

Messungen stehen die berechneten Strömungsgrößen großflächig und in unmittelbarer Nähe der Wand zur Verfügung. Dies ermöglicht umfassendere Analysen und darauf basierende Modellentwicklungen.

Randbedingungen

Für Untersuchung der Strömung über eine Rauheit eignet sich eine Kanalströmung, da die Reynoldszahl der Reibungsgeschwindigkeit

$$\text{Re}_\tau = \frac{u_\tau \cdot \delta}{\nu}, \quad (2.9)$$

leicht durch die Aufnahme einer konstanten Körperkraft in den Impulsgleichungen festgelegt werden kann. Der Widerstand an der Oberfläche wird also durch diese antreibende Kraft ausgeglichen, solange die Strömung voll entwickelt ist. Die Grenzschichtdicke δ wird durch die halbe Kanalhöhe festgelegt, wobei symmetrische Bedingungen eingeführt werden. Darüber hinaus wird den seitlichen Begrenzungen eine Periodizität festgelegt, um nicht nur ein kleineres Gebiet zu verwenden, sondern auch eine räumliche Mittelung für eine bessere und effizientere Konvergenz der statistischen Größen zu ermöglichen. An der Bodenwand ist die Rauheit in das Netz eingebettet, sodass eine raue no-slip Oberfläche gewährleistet ist. Die mittlere Höhe der Oberfläche entspricht der Ebene $z = 0$ (Abb. 2.4). Die Periodizität der Rauheit wird durch die Verwendung einer linearen Blendfunktion sichergestellt, um 10% der Rauheit an den Rändern zu überblenden. Das strukturierte Berechnungsnetz wird mit konstanten Abständen in beiden seitlichen Richtungen erzeugt. Das Netz besteht aus $n_x \times n_y \times n_z = 200 \times 138 \times 160 \approx 4,4 \cdot 10^6$ Zellen. In der wandnormalen Richtung ist der Kanal in drei Blöcke aufgeteilt: den IB-Block mit einem konstanten Abstand $z^+ \approx 0,9$, den Übergangsblock mit einer Wachstumsrate von weniger als 6% und den Kernblock mit einem konstanten Abstand von $z^+ \approx 4,9$. In dieser Studie wird für alle Simulationen eine Reibungs-Reynoldszahl von $\text{Re}_\tau \approx 395$ erzwungen. Sobald sich die Strömung entwickelt hat, werden für eine ausreichend lange Konvektionszeit statistische Daten gesammelt. Die Statistiken werden dann zusätzlich räumlich gemittelt.

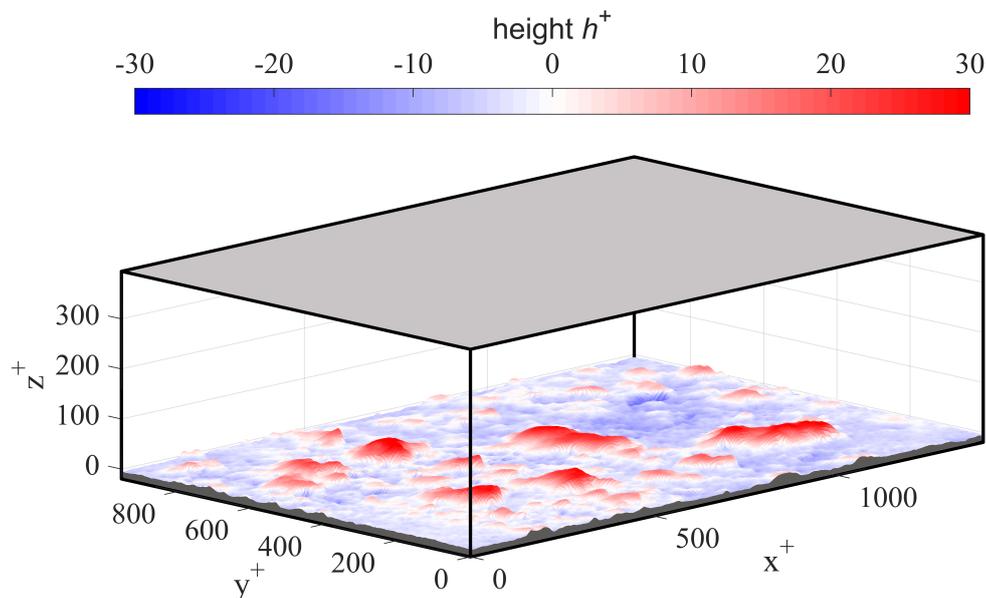


Abbildung 2.4: Unendlicher Kanal in beide richtung mit rauhen Oberflächen an der Bodenwand. Der Kanal ist symmetrisch in Richtung der Wandnormalen, wobei die graue Ebene die Symmetrieebene ist.

Der DNS-IBM-Ansatz wird sowohl mit dem $Re_\tau \approx 180$ Kanalaufbau auf einer glatten Oberfläche mit den hochaufgelösten DNS-Ergebnissen von Lee und Moser (2015) validiert, als auch auf einer rauhen Oberfläche. Alle Validierungsergebnisse sind in Kurth et al. (2021) veröffentlicht.

2.1.4 Ergebnisse

Validierung

Abbildung 2.5 zeigt die Übereinstimmung zwischen den Benchmark-Simulationen für $Re_\tau \approx 180$. Für die raue Oberfläche sind die Auflösung und die Rechengebietsgröße identisch mit denen von Thakkar et al. (2017). Für die glatte Oberfläche wird jedoch ein Rechengebiet von $6\delta \times 3\delta$ mit $\Delta x^+ = \Delta y^+ = 4,32$ betrachtet. Die Validierungsfälle werden in einem Kanal mit voller Höhe durchgeführt, während die übrigen Simulationen in einem Kanal mit halber Höhe und Symmetriebedingung in der Mittelebene des Kanals erzielt werden (Abb. 2.4). Dies ist zulässig, da die Verwendung der halben Höhe nur Auswirkungen auf die Kernströmung abseits der wandnahen und von den Rauheiten beeinflussten Strömung liegen.

So zeigen MacDonald et al. (2017), dass weder die innere Grenzschicht noch die Rauheitsfunktion von der Symmetrieannahme beeinträchtigt werden.

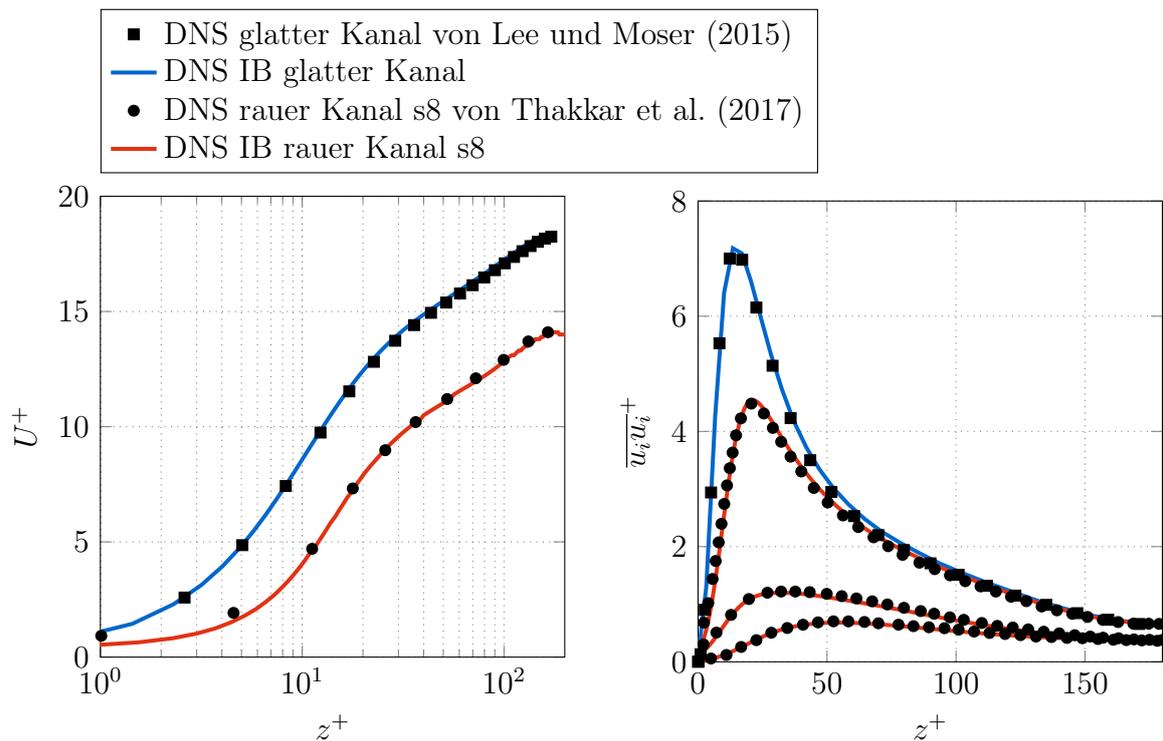


Abbildung 2.5: Validierung des DNS IB-Kanals mit Referenzsimulationen aus der Literatur ($Re_\tau \approx 180$). Links: mittlere Geschwindigkeitsprofile in Strömungsrichtung; rechts: Varianz der Geschwindigkeitskomponenten. Für den glatten Kanal ist nur eine Komponente dargestellt, um das Diagramm übersichtlicher zu gestalten. Samplingfehler der DNS sind kleiner als die Symbolgröße.

Netzstudie

Um die Auswirkungen der Netzauflösung auf die Simulationsergebnisse zu untersuchen, werden drei Simulationen durchgeführt. Alle Simulationen werden mit der gleichen Rauheit und einer konstanten DNS-typischen Rauheitsauflösung (Bei der Extraktion aus den 2D Höhenkarten) von $\Delta x^+ = \Delta y^+ \approx 4,1$, aber mit unterschiedlichen Netzauflösungen in x - und y -Richtung durchgeführt (Tab. 2.4). Die Auflösung in z -Richtung wird also konstant gehalten. Abbildung 2.6 vergleicht die durchschnittlichen Geschwindigkeitsprofile in Strömungsrichtung und die diagonalen turbulenten Normalspannungen der drei Netzauflösungen. Das Verhalten in der Nähe der Mittelebene ist auf die Symmetriebedingung zurückzuführen, die die Strömung nur in der Nähe der Mittelebene stören kann (MacDonald et al. 2017). Im Vergleich zu einer glatten Oberfläche bringt die Rauheit die Normalspannungen näher zueinander, was zu einer weniger anisotropen Turbulenz führt. Mit anderen Worten: Die stromlinienförmigen Streifen werden durch die Rauheit unterdrückt. Eine weitere Beobachtung ist, dass bei gleichem Luftwiderstand weniger kinetische Energie in der Turbulenz aufrechterhalten wird. Unterschiedliche Netzauflösungen verändern die Ergeb-

Tabelle 2.4: Vergleich der Netz- und Rauheitsauflösung für die durchgeführte DNS.

Simulation	Re_τ	Rauheit	Netz			ΔU^+
		$\Delta x^+, \Delta y^+$	$\Delta x^+, \Delta y^+$	Δz_{IB}^+	N_{cells}	
feines Netz	395	4, 1	4, 7	0, 9	$9,5 \cdot 10^6$	4,67
mittleres Netz	395	4, 1	6, 3	0, 9	$5,2 \cdot 10^6$	4,50
grobes Netz	395	4, 1	7, 3	0, 9	$3,9 \cdot 10^6$	4,51

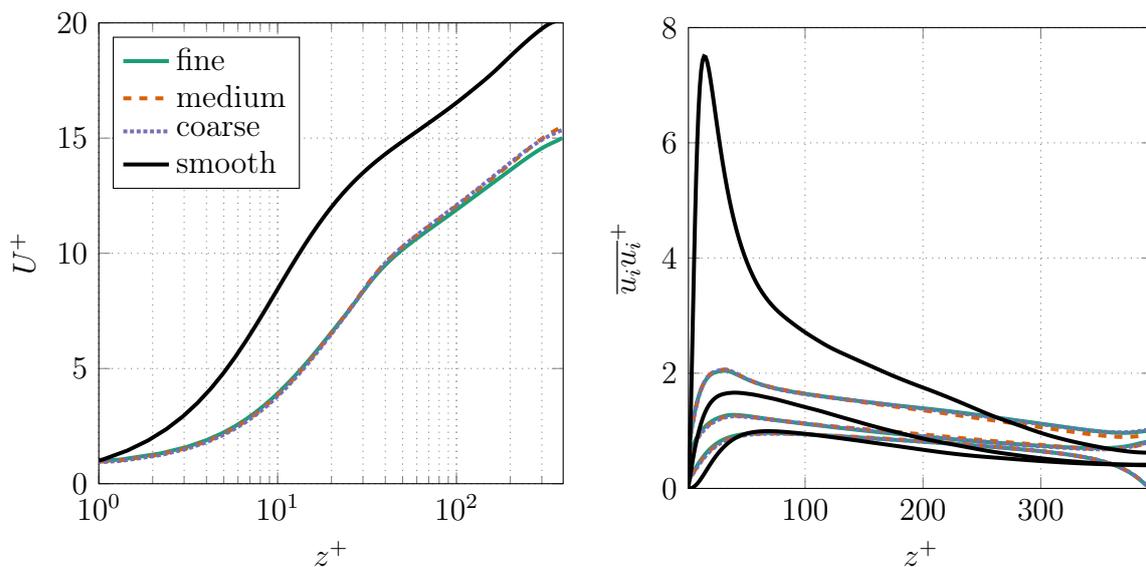


Abbildung 2.6: Durchschnittliche Geschwindigkeitsprofile und Reynolds-Normalspannungen im Vergleich zu einem glatten Referenzfall von (Moser et al. 1999). Samplingfehler der DNS sind kleiner als die Linienstärke.

nisse also in dem untersuchten Bereich bis $\Delta x^+ = \Delta y^+ \leq 7,3$ nicht. Netzkonvergenz liegt bereits auf dem groben Rechnetz vor.

2.1.5 Modellierung

[

Setups]Setups für Modellbildung und Validierung

Vor der Modellierung des Rauheitseffekts soll untersucht werden, ob die in der DNS beobachtete Strömungsbeeinflussung über die klassische ks-Modellierung in RANS Simulationen abgebildet werden kann. Hierfür wurde ein RANS Setup für die Kanalströmung erstellt. Die aerodynamischen Randbedingungen sind so gewählt, dass das selbe $Re_\tau = 395$ wie in der DNS eingehalten wird. Das RANS Setup ist in Abb. 2.8 dargestellt. Wie in

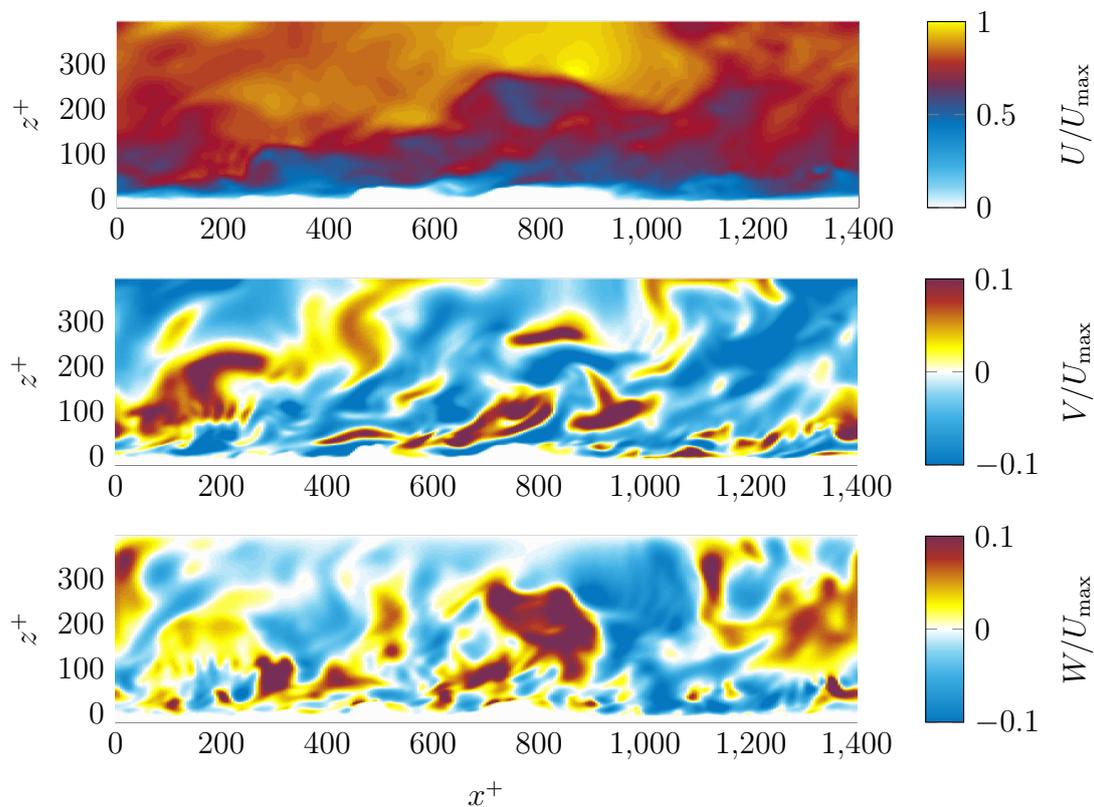


Abbildung 2.7: Ausschnitt aus den DNS-Ergebnissen der Referenz Rauheit A. Gezeigt sind beispielhaft die drei Geschwindigkeitsfelder der Momentangeschwindigkeiten im letzten Zeitschritt der Mittelungsperiode Kurth et al. (2022)

der DNS ist die Randbedingung in der Kanalmitte als symmetrisch und an den vertikalen Grenzen als periodisch gesetzt.

Die Rauheit wird im RANS Setup nicht geometrisch aufgelöst, sondern über die ω -Randbedingung im $k - \omega$ -Turbulenzmodell nach Wilcox (1988) modelliert. Die ω -Randbedingung wird aus der für die Oberfläche angegebene äquivalente Sandkornrauheit k_s der Oberfläche berechnet. Für glatte Oberflächen ($k_s = 0$) wird als Randbedingung $\omega = \infty$ gesetzt. Für Rauheiten mit $k_s > 0$ wird $\omega =$ berechnet. In folgenden wird in der RANS Simulation die äquivalente Sandkornrauheit k_s so lange angepasst, bis das Geschwindigkeitsprofil mit dem aus der DNS mit der Referenz und gespiegelter Rauheit A (Abb. 2.2 a, b) übereinstimmt.

Analyse bestehender Korrelationen

Wie in Abschnitt gezeigt, existieren für die Korrelation der äquivalenten Sandkornrauheit aus der Geometrie der Rauheit existieren sehr viele Korrelationen. Die meisten Korrelationen basieren auf der mittleren Rauheitshöhe R_a , der maximalen Rauheitshöhe R_z , der mittleren quadratischen Rauheitshöhe R_q oder nutzen den Form- und Dichteparameter

2.1 Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse

nach (Sigal und Danberg 1990). Um die Vergleiche übersichtlich zu halten, werden im repräsentativ folgende zwei Korrelation betrachtet:

1. Eine ks-Korrelation nach Hummel et al. (2004) basierend auf der mittleren Rauheitshöhe S_a

$$k_{S_{a}} = 5,2 \cdot S_a \quad (2.10)$$

2. Eine ks-Korrelation nach Bons (2005) basierend auf dem Form- und Dichteparameter Λ_S nach Dirling (1973) (Gl. 2.5)

$$\frac{k_{SD}}{k} = 0,43 \cdot \log(\Lambda_S) + 0,82 \quad (2.11)$$

Alle Kanalsimulationen wurden mit einem konstanten Re_τ und somit der selben Volumenkraft betrieben. Der Einfluss der Rauheit zeigt sich daher in einer Verringerung des Massenstroms durch den Kanal. Umso größer die Rauheit ist, umso geringer ist der Massenstrom durch den Kanal. Da auch die Dichte der Strömung konstant gehalten wird, verringert sich im gleichen Maße die Strömungsgeschwindigkeit im Kanal. Zur Bewertung des Rauheitseinflusses wird daher häufig (siehe z.B. Thakkar 2017) der normierte Geschwindigkeitsunterschied ΔU^+ zur glatten Kanalströmung ausgewertet. Abbildung 2.9 zeigt die Geschwindigkeitsprofile über zwei der untersuchten Rauheiten im Vergleich zur glatten Kanalrechnung von Moser et al. (1999). Der normierte Geschwindigkeitsunterschied ΔU^+ durch den Rauheitseinfluss ist als vertikaler Abstand der Geschwindigkeitsprofile im logarithmischen Bereich ($y^+ > 70$) definiert. Zu erkennen ist, dass die Referenz Rauheit A ($SSk > 0$) ein größeren Geschwindigkeitsunterschied ΔU^+ als die gespiegelte Rauheit A ($SSk < 0$) erzeugt. Referenz Rauheit A ist somit rauer als die gespiegelte Rauheit A.

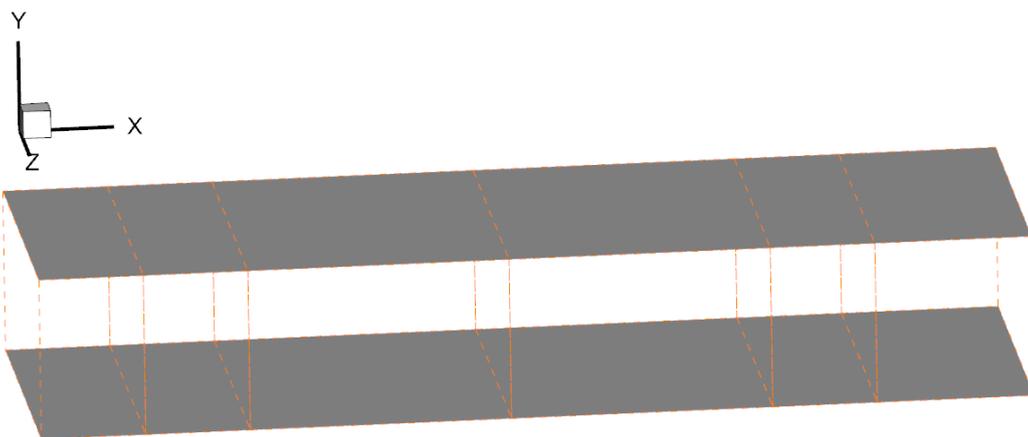


Abbildung 2.8: Doppelt-Periodischer Strömungskanal. Auf der untere Seite wird die Rauheit durch einen ks-Wert vorgegeben. Die obere Seite hat eine symmetrische Randbedingung

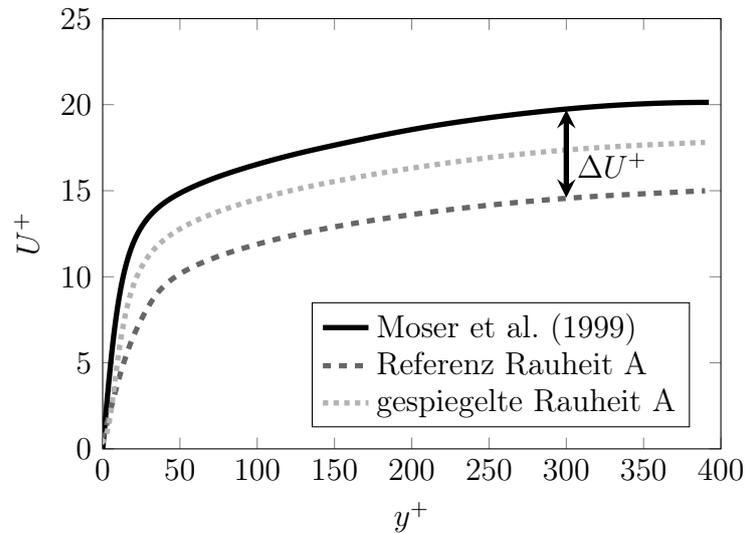


Abbildung 2.9: Geschwindigkeitsprofil der Grenzschichtströmung über Referenz Rauheit A und gespiegelter Rauheit A im Vergleich zur glatten Kanalrechnung von Moser et al. (1999). (aus Kurth et al. 2022)

Für RANS-Simulationen wird die Rauheit über die äquivalente Sandkornrauheit beschrieben. Durch experimentelle Ergebnisse von z.B. Nikuradse (1933) und Colebrook (1939) wurden in verschiedenen Rauheitsbereichen der funktionale Zusammenhang zwischen der äquivalente Sandkornrauheit und der Wandfunktion U^+ gefunden. Wilcox (1988) gibt die Wandfunktion im $k - \omega$ -Turbulenzmodell als

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B \quad (2.12)$$

an. Für die Konstanten B wird zwischen glatten

$$B = \lim_{y^+ \rightarrow \infty} \left[U^+ - \frac{1}{\kappa} \ln y^+ \right] = 5,1 \quad (2.13)$$

und rauen Oberflächen

$$B = 8,4 + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{S_R}{100} \quad (2.14)$$

Unterschieden. Hierbei gilt:

$$S_R = \begin{cases} \left(\frac{50}{ks^+} \right)^2, & ks^+ < 25 \\ \frac{100}{ks^+}, & ks^+ \geq 25 \end{cases} \quad (2.15)$$

Aus der Differenz der glatten und rauen Grenzschichtgleichung lässt sich die Geschwindigkeitsdifferenz

$$\Delta U^+ = U_{\text{glatt}}^+ - U_{\text{rau}}^+ = f(ks^+) = \begin{cases} \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{(ks^+)^2}{25} \right) - 3,4, & ks^+ < 25 \\ \frac{1}{\kappa} \ln(ks^+) - 3,4, & ks^+ \geq 25 \end{cases} \quad (2.16)$$

abhängig von der äquivalenten Sandkornrauheit ks^+ berechnen

Die Konstante κ wird meist als 0.4 angegeben. Mit der Gleichung lässt sich der zu erwartende Geschwindigkeitsunterschied ΔU^+ bei eingestellter äquivalenter Sandkornrauheit ks^+ berechnen.

Abbildung 2.10 zeigt für alle simulierten Rauheiten den aus der DNS erhaltenen Geschwindigkeitsunterschied ΔU^+ über den mit der jeweiligen Rauheitskorrelation berechneten äquivalenten Sandkornrauheit ks^+ . Idealerweise sollten die Punkte alle auf der durch die Funktion von Colebrook (1939) definierten Kurve liegen. Es ist allerdings zu erkennen, dass nur sehr wenige Punkte dies erfüllen. Vor allem mit der ks -Korrelation basierend auf der mittleren Rauheitshöhe Sa werden für viele Oberflächen die gleiche äquivalenten Sandkornrauheit berechnet trotz der offensichtlich sehr unterschiedlichen aerodynamischen Eigenschaften. Dies ist aufgrund der Auswahl und Generierung der untersuchten Rauheiten nicht verwunderlich, zeigt aber noch einmal sehr gut die Notwendigkeit einer verbesserten ks -Korrelation. Auch für die ks -Korrelation basierend auf dem Form- und Dichteparameter Λ_S liegen nur sehr wenige Punkte auf der durch die Funktion von Colebrook (1939) definierten Kurve. Hier ist jedoch schon zu erkennen, dass der Form- und Dichteparameter Λ_S besser zwischen den untersuchten Oberflächen differenzieren kann und Oberflächen mit z.B. Dichtevariationen, im Gegensatz zur ks -Korrelation basierend auf der mittleren Rauheitshöhe Sa , unterschiedlich bewertet werden.

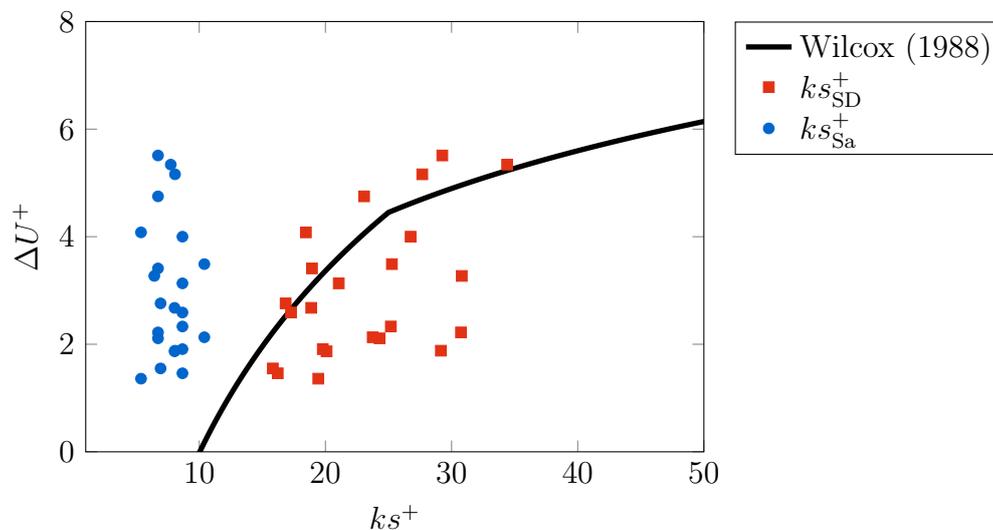


Abbildung 2.10: Vergleich der ks^+ -Werte mit den Korrelationen von Hummel et al. (2004) (ks_{Sa}^+) und Bons (2005) (ks_{SD}^+) berechnet, aufgetragen gegen den Geschwindigkeitsdefekt aus den DNS. (aus Kurth et al. 2022)

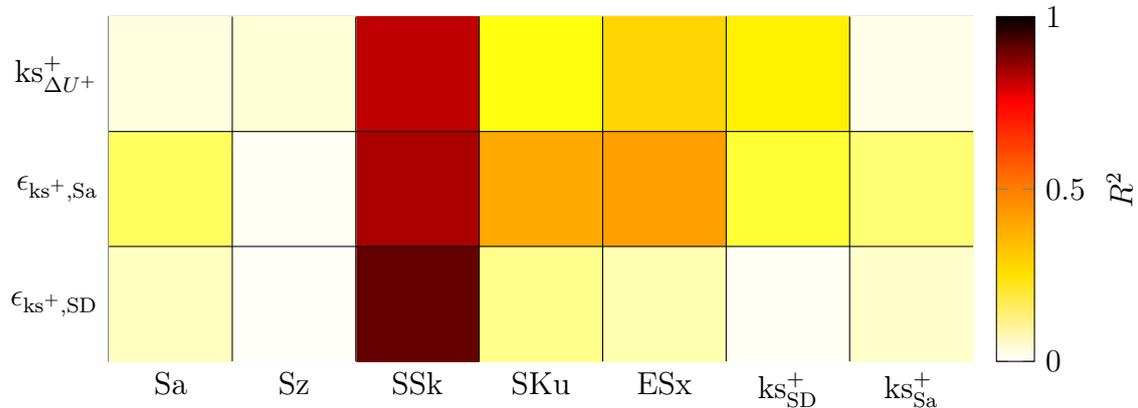


Abbildung 2.11: Auszug aus der Korrelationskarte für den Strömungseinfluss durch die Rauheiten zu den Rauheitsparametern. (aus Kurth et al. 2022)

Korrelation von geometrischen und aerodynamischen Charakteristika

Ziel der Korrelation von geometrischen und aerodynamischen Charakteristika ist es nun, Rauheitsparametere zu identifizieren, mit denen eine bessere ks-Korrelation gefunden werden kann. Ziel einer optimalen ks-Korrelation wäre es, für alle Oberflächen den ks-Wert zu berechnen, der zum in der DNS berechneten Geschwindigkeitsunterschied ΔU^+ führt. Hierfür lässt sich Gl. 2.16 so umformen, dass sich die äquivalente Sandkornrauheit ks^+ berechnen lässt, die in einer RANS-Simulation eingestellt werden muss, um den erhaltenen Geschwindigkeitsunterschied ΔU^+ richtig wiederzugeben. Es wird für die folgenden Modellierung die äquivalente Sandkornrauheit

$$ks_{\Delta U^+}^+ = f(\Delta U^+) = \begin{cases} 5 \cdot \sqrt{e^{\kappa \cdot (\Delta U^+ + 3,4)}} , & \Delta U^+ < 4,6472 \\ e^{\kappa \cdot (\Delta U^+ + 3,4)} , & \Delta U^+ \geq 4,6472 \end{cases} \quad (2.17)$$

definiert und als eine der Zielgröße für die Modellierung verwendet. Mit der äquivalenten Sandkornrauheit basierend auf dem Geschwindigkeitsunterschied ΔU^+ lässt sich das relative Verhältnis

$$\epsilon_{ks^+, i} = \frac{ks_{\Delta U^+}^+}{ks_i^+} \quad (2.18)$$

zu einer anderen, auf geometrischen Größen basierenden, ks-Korrelation berechnen.

In Abb. 2.11 sind ausgewählte aerodynamische Parameter aus der DNS (Ordinate) und geometrische Rauheitsparameter aus der Rauheitsgeometrie (Abszisse) in einer Korrelationskarte aufgetragen. In den Schnittfeldern ist die Korrelationsgüte der beiden Größen als Bestimmtheitsmaß R^2 der Korrelation mit einem Polynom 2. Grades

$$f(x) = a \cdot x^2 + b \cdot x + c \quad (2.19)$$

dargestellt. Umso näher R^2 am Wert 1 ist, umso besser korrelieren die beiden Werte miteinander. Es ist zu erkennen, dass die klassischen Rauheitsparameter (Sa oder Sz), die zur

Berechnung von äquivalenten Sandkornrauheiten benutzt werden, nur sehr schlecht mit den aerodynamischen Größen korrelieren. Auch die im letzten Abschnitt betrachteten ks-Korrelationen zeigen, wie aus Abb. 2.10 zu erwarten ist, keine gute Korrelation. Ein Grund hierfür ist die Generierung und Auswahl der Oberflächen, bei der auf aerodynamisch unterschiedliche Oberflächen bei vergleichbaren Rauheitsparametern geachtet wurde. Sehr gut korreliert hingegen der Schiefe-Parameter SSk mit den hier betrachteten aerodynamischen Größen. Die beste Korrelation besteht zwischen der Schiefe SSk und dem in Gl. 2.18 definierten Verhältnis der ks-Werte $\epsilon_{ks^+,SD}$ mit $R^2 = 0.91$. Diese Korrelation wird im nächsten Abschnitt für die Modellbildung näher analysiert.

Modellbildung

Da die Korrelationskarte nur ein Hilfsmittel zur Identifikation möglicher Korrelationen ist, muss diese nun überprüft werden. Abbildung 2.12 zeigt die im vorherigen Abschnitt als beste identifizierte Korrelation. Der graue Schatten zeigt das 95% Konfidenzintervall der Korrelationsfunktion

$$\epsilon_{ks^+,SD} = \frac{ks_{SD}^+}{ks_{\Delta U^+}^+} = 0.02664 \cdot SSk^2 + 0.1426 \cdot SSk + 0.7977 . \quad (2.20)$$

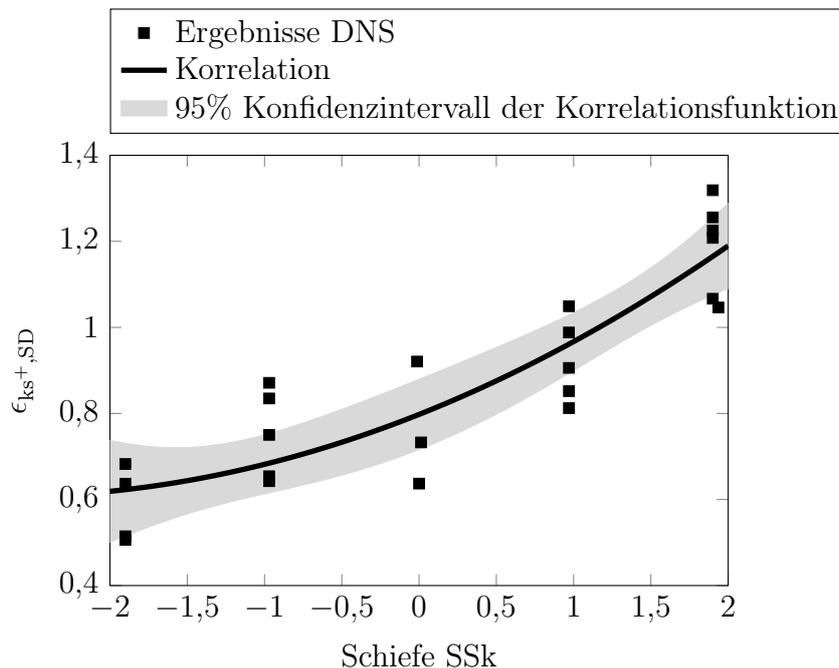


Abbildung 2.12: Korrelation der Schiefe zum relativen Verhältnis der ks-Korelation basierend auf dem Form- und Dichte-Parameter und dem ks-Wert basierend auf dem Geschwindigkeitsdefekt ΔU^+ aus den DNS. (aus Kurth et al. 2022)

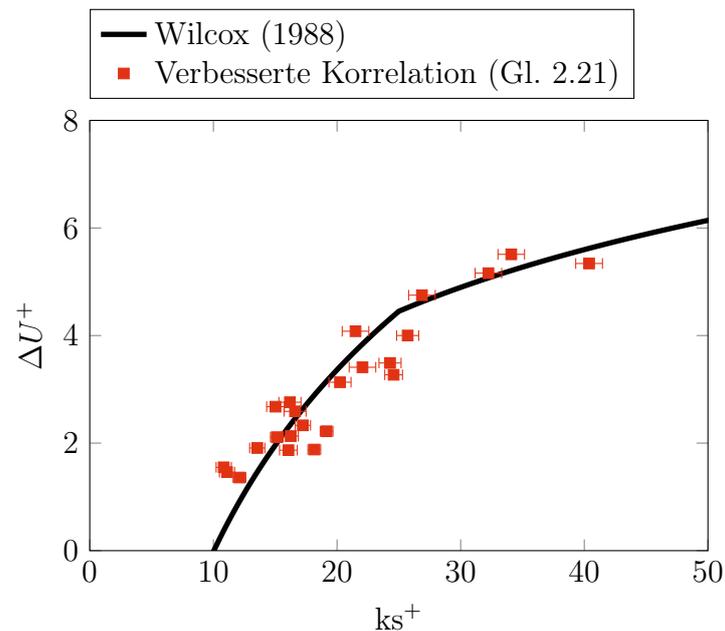


Abbildung 2.13: Erweiterte ks-Korrelation basierend auf dem Form-, Dichteparameter um einen Schiefe-Parameter erweitert. (aus Kurth et al. (2022))

Für Rauheiten mit negativer Schiefe liegen fast alle Datenpunkte innerhalb des 95% Konfidenzintervalls. Bei den Rauheiten mit großer Schiefe ($SSk \approx 2$) ist eine größere Abweichung von bis zu $\pm 20\%$ von der Korrelationsfunktion zu erkennen. Bei diesen Rauheiten überwiegen die Rauheitsberge. Es kann vermutet werden, dass der Einfluss großer Rauheitsberge von mehr Parametern als den bisher zur Beschreibung der Rauheit eingesetzten Parametern abhängt. So kann z.B. der lokale Gradient an den Rauheitsspitzen einen größeren Einfluss haben, als bis jetzt vom Formparameter berücksichtigt wird.

Mit der gefunden Korrelation kann nun die ks-Korrelation nach Bons (2005) (Gl. 2.6) zu

$$\frac{k_{SD}}{k} = \epsilon_{ks^+,SD} \cdot (0.43 \cdot \log(\Lambda_S) + 0.82) \quad (2.21)$$

erweitert werden. Abbildung 2.13 zeigt den vorhergesagten ks-Wert mit der verbesserten Korrelation. Die Fehlerbalken ergeben sich aus dem 95% Konfidenzintervall der Korrelationsfunktion. Im Vergleich zu den bisherigen Korrelationen in Abb. 2.10, liegt die neue Korrelation deutlich näher an den experimentellen Ergebnissen von Colebrook (1939). Der Korrelationskoeffizient konnte sich von $R^2 = 0.09$ für die ks-Korrelation basierend auf dem mittlerern Rauheitshöhe und $R^2 = 0.11$ für die ks-Korrelation basierend auf dem Form- und Dichteparameter auf $R^2 = 0.9$ verbessert werden.

Numerischer Prüfstand

Im Rahmen des HAP-4 / AP-4.1 war ein Mitarbeiter über die gesamte Projektlaufzeit in beratender Funktion gegenüber der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen tätig. Der Austausch fand in gemeinsamen Telefonkonferenzen und Workshops statt, bei denen auch die Projektpartner an der TU-Braunschweig, an der HAW Hamburg und bei der MTU Aero Engines beteiligt waren. Während der Telefonkonferenzen und Workshops wurden die langjährigen Vorerfahrungen des TFD auf dem Gebiet der skalenauflösenden Simulationen von Kanalströmungen und Linearkaskaden geteilt. Dies betraf beispielsweise die Wahl der räumlichen Diskretisierung und die testfallspezifische Einstellung von Randbedingungen. Hierbei konnte nicht nur auf Kompetenzen aus dem HAP-3 dieses Forschungsvorhabens zurückgegriffen werden, sondern auch aus anderen Projekten, in denen das TFD skalenauflösende Simulationen mit OpenFOAM und pyFR durchgeführt hat. Die RWTH setzte in Vergangenheit u.a. TRACE und pyFR für solche Zwecke ein. Daher war ein weiterer Schwerpunkt der Zusammenarbeit auch die Effizienz und Genauigkeit der unterschiedlichen Strömungslöser zu Vergleichen. Hieraus ließen sich für unterschiedliche Anwendungsfälle optimale Löser identifizieren.

2.1.6 Validierung

Testfälle zur Validierung der verbesserten ks-Korrelation müssen mehrere Anforderungen erfüllen:

1. Numerische oder experimentelle Untersuchung von Verdichterschaufeln mit rauen oder teilweise rauen Oberflächen.
2. Bei numerischen Simulationen müssen die Rauheiten aufgelöst sein und nicht durch eine Randbedingung beschrieben sein.
3. Von der Rauheit müssen 2D-Höhenkarten publiziert sein, aus denen sich der Form- und Dichteparameter sowie die Schiefe berechnen lassen.

Diese Anforderungen schränken die Auswahl von ohnehin schon sehr wenigen verfügbaren Testfällen weiter ein. In den meisten experimentellen Testfällen sind die Rauheiten nur über 0D-Parameter beschrieben. Hieraus lassen sich nicht der Form- und Dichteparameter oder die Schiefe berechnen. Numerische Testfälle, in denen Verdichterprofile mit aufgelösten Rauheiten untersucht werden, existieren nicht. Hierfür müssten LES oder DNS Simulationen mit hohen Reynolds-Zahlen durchgeführt und an experimentellen Daten unter Berücksichtigung aller Sensitivitäten von den Randbedingungen validiert werden. Die zwei identifizierten am besten geeigneten Testfälle werden daher im Folgenden beschrieben und betrachtet.

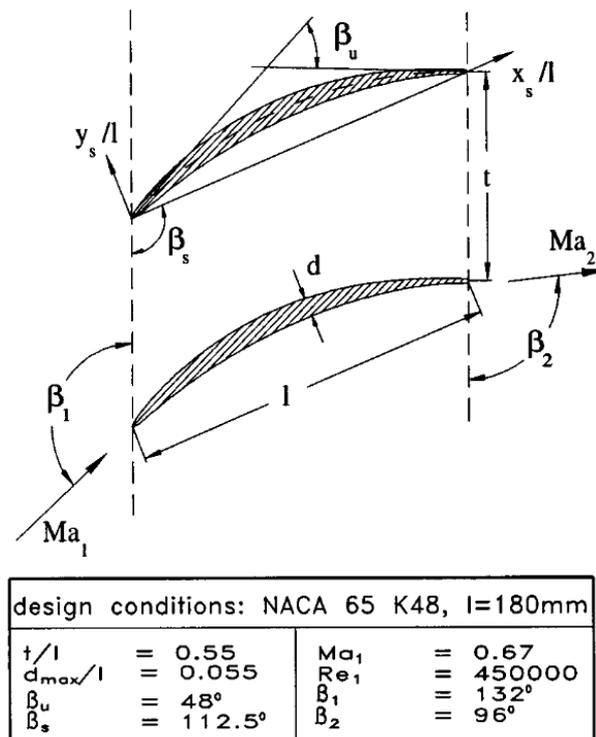


Abbildung 2.14: Das von Leipold et al. (2000) experimentell untersuchte NACA 65 K48 Verdichterprofil mit den wichtigsten geometrischen und aerodynamischen Randbedingungen. (aus Leipold et al. (2000))

Kaskadenmessungen von Leipold et al. (2000)

Im ersten Testfall wird ein NACA 65 K48 Verdichterprofil in einem Kaskadenwindkanal betrachtet (Leipold et al. 2000). Die wichtigsten geometrischen und aerodynamischen Randbedingungen sind in Abb. 2.14 aufgeführt.

Eine der auf die Schaufel aufgetragenen Rauheiten ist in Leipold et al. (2000) als Graustufenbild (Abb. 2.15 a) veröffentlicht. Für die Berechnung des Form- und Dichteparameters sowie der Schiefe wurde die Rauheit in die in Abb. 2.15 b dargestellte Höhenkarte digitalisiert. Hierfür wurden die Graustufen-Informationen des Bildes mit der angegebenen Farbskala in Höhenwerte umgerechnet. Die hierdurch erstellte Höhenkarte ist aufgrund der diskreten Grauwerte und der Auflösung des Bildes gefiltert. Die Filterweite kann dabei nicht ohne weitere Informationen quantifiziert werden. Dies beeinflusst vor allem die Gradienten der Rauheitselemente. Die Höhenwerte der Rauheitselemente werden besser wiedergegeben. Durch die möglicherweise falsche Wiedergabe der Gradienten wird die Berechnung der äquivalenten Sandkornrauheit basierend auf dem Schiefe- und Dichte-Parameter verfälscht. Die Größe der Abweichung kann nicht quantifiziert werden.

Der von Leipold et al. (2000) verwendete Kaskadenprüfstand ist mit einem Druckbehälter umhaust. Hierdurch lässt sich der Prüfstand drucküberlagert betreiben. Das ermöglicht,

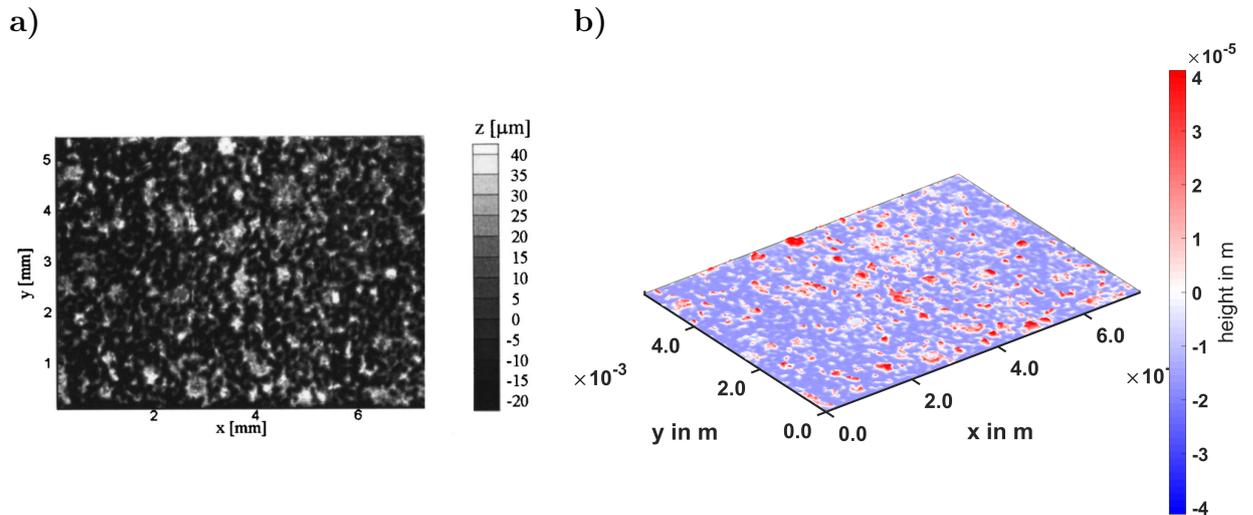


Abbildung 2.15: (a) Abbildung der von Leipold et al. (2000) aufgetragenen Rauheit als Graustufenbild. (b) das aus dem Graustufenbild rekonstruierte Höhenprofil zur Berechnung der Rauheitsparameter.

dass die Mach- und Reynolds-Zahl unabhängig voneinander eingestellt werden können. Das dargestellte Profil wurde für eine Reynolds-Zahl von $Re = 450.000$ ausgelegt und mit Reynolds-Zahlen bis $Re = 1.000.000$ untersucht. Die Mach-Zahl $Ma = 0,67$ sowie der Anströmwinkel $\beta_1 = 132^\circ$ werden konstant gehalten. Im folgenden werden die Messungen bei einer Reynolds-Zahl von $Re = 600.000$ betrachtet

Abbildung 2.16 zeigt den Verlauf der isentropen Mach-Zahl

$$Ma_h = \sqrt{\left(\left(\frac{p_{0,\infty}}{p} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \cdot \frac{2}{\gamma-1}} \quad (2.22)$$

über das Verdichterprofil. Es werden die experimentellen Ergebnisse nach Leipold et al. (2000) mit den selbst berechneten Ergebnissen verglichen. Weder im Vergleich von numerischen zu experimentellen noch im Vergleich von rauhen zu glatten Simulationen zeigen sich signifikante Unterschiede. Generell kann gesagt werden, dass die numerischen Ergebnisse sehr gut mit den experimentellen Ergebnissen übereinstimmen. Die Messergebnisse werden, mit Ausnahme der ersten 20% der Saugseite, im Rahmen der Messunsicherheit genau vorhergesagt. Bei der Position $x/L \approx 0,55$ weicht der Verlauf von glatter zu rauher Simulation voneinander ab. Diese Abweichung vom der glatten Simulation sagen alle Simulationen mit Rauheit gleich voraus. Das Experiment liefert in diesem Bereich keine hinreichend hohe Auflösung von Messpunkten um die numerische Vorhersage bewerten zu können.

In Abb. 2.17 (a) wird der lokale Totaldruckverlust

$$\omega = \frac{p_{\text{tot},1} - p_{\text{tot}}}{p_{\text{tot},1} - p_1} \quad (2.23)$$

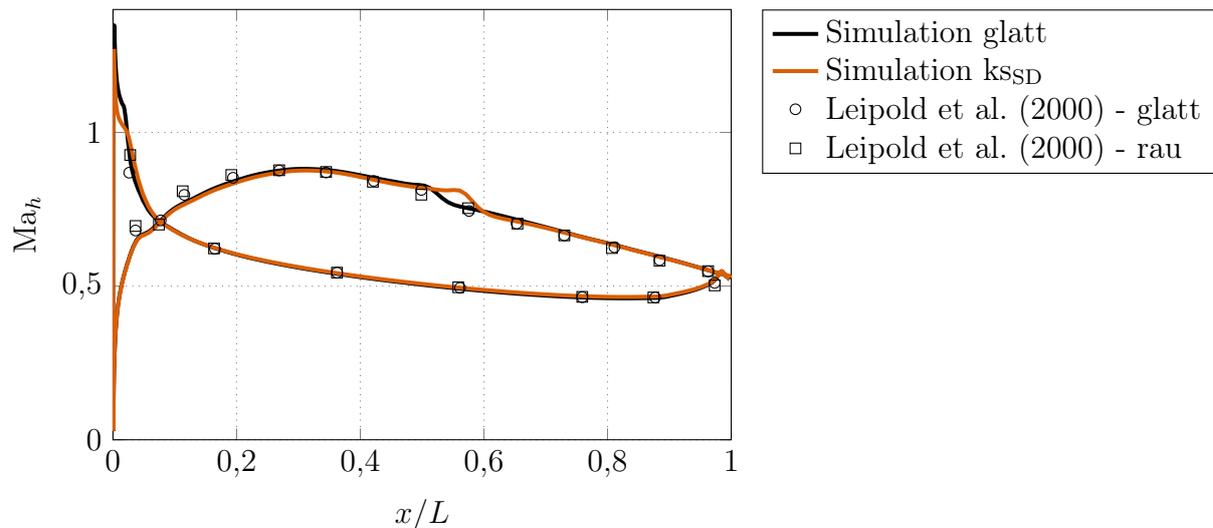


Abbildung 2.16: Verteilung der isentropen Mach-Zahl Ma_{iso} über das Schaufelprofil. Da in den Simulationen mit den verschiedenen Rauheiten keine signifikanten Unterschiede zu erkennen sind, sind nur die Ergebnisse für die Rauheitskorrelation mit dem Form- und Dichteparamter ks_{SD} dargestellt.

im Nachlauf des glatten Verdichterprofils in den Messungen und den Simulationen verglichen. Es ist zu erkennen, dass in den experimentellen Untersuchungen ein breiterer Nachlauf gemessen wurde. Vor allem in den äußeren Bereichen des Nachlaufs sind Unterschiede zu erkennen. Die Tiefe des Nachlaufs wird von den numerischen Simulationen etwas überschätzt. Insgesamt gesehen, liegen die numerischen Simulationen des glatten Profils aber dicht an den experimentellen Ergebnissen. Messunsicherheiten werden nicht angegeben, sodass eine Bewertung der Abweichungen zwischen numerischer Vorhersage und Experiment vage bleibt.

Beim Vergleich der Veränderungen im Nachlauf durch die Rauheit zeigen sich größere Unterschiede zwischen numerischen und experimentellen Ergebnissen. Die Strömungsbeeinflussung durch die rauen Oberflächen ist in den experimentellen Ergebnissen näherungsweise doppelt so hoch, wie durch die Simulationen hervorgesagt. Außerdem ist zu erkennen, dass es durch die Rauheit in den experimentellen Untersuchungen druckseitig zu einer Verringerung des Verlustes kommt. In der Numerik wird für beide Seiten eine Verlusterrhöhung hervorgesagt, die auf der Saugseite stärker ausfällt als auf der Druckseite. Es ist außerdem zu erkennen, dass die Simulationen in denen der ks -Wert über eine Korrelation basierend auf dem Form-, Dichte- und Schiefe-Parameter beruhen eine deutlich geringere Strömungsbeeinflussung vorhersagen, als die beiden anderen Korrelationen. Die höchste Strömungsbeeinflussung wird in den Simulationen mit ks_{Sa} vorhergesagt. Das bedeutet, dass die Erweiterung der ks -Korrelation basierend auf dem Form- und Dichte-Parameter um den Schiefe-Parameter zu keiner Verbesserung der Ergebnisse führt. Allerdings kann vermutet werden, dass die Korrelation des ks -Wertes mit dem Form- und Dichte-Parameter aufgrund der ungenauen Reproduktion des Höhenprofils einen falschen Wert ausgibt. Die-

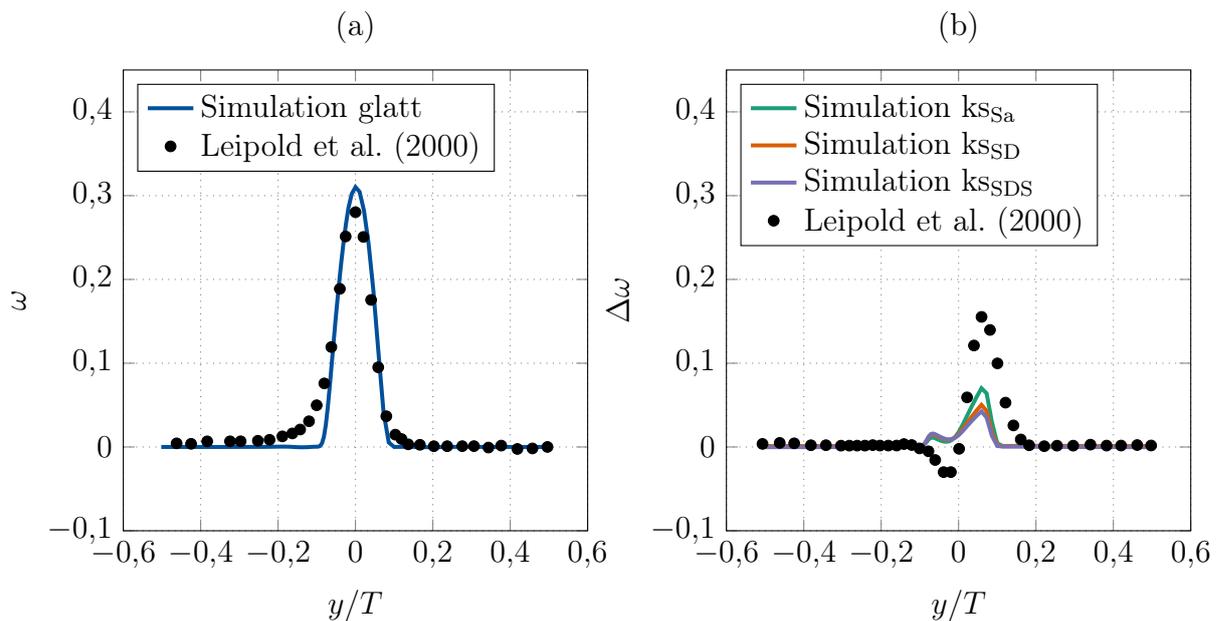


Abbildung 2.17: (a) Lokaler Totaldruckverlust im Nachlauf des NACA 65 K48 Profils im glatten Fall bei $Re = 600000$ (b) Differenz des lokalen Totaldruckverlusts zwischen rauher und glatter Schaufel.

ses Korrelation reagiert besonders sensitiv auf eine Veränderung der lokalen Gradienten der Rauheitselemente Kurth et al. (2021).

Kaskadenmessungen von Gilge et al. (2018)

Im zweiten Testfall, der zur Validierung herangezogen wird, werden experimentelle Untersuchungen an einem Verdichterprofil in einem Gitterwindkanal betrachtet (Gilge et al. 2018). In Abb. Gilge et al. (2018) sind die wichtigsten geometrischen und aerodynamischen Randbedingungen des Profils dargestellt. Rauheiten werden an den jeweils vier markierten Positionen auf der Druck- und Saugseite durch das aufkleben von Sand aufgetragen. Die Körnung des aufgeklebten Sandes richtet sich nach den Rauheiten, die in einem geflogenen Verdichter an den jeweiligen Positionen zu finden sind. Hierbei dienen die später von Gilge et al. (2019b) veröffentlichten Rauheitsmessungen als Grundlage.

In den Untersuchungen von Gilge et al. (2018) wurden eine Vielzahl an Kombinationen von Rauheiten auf dem Profil betrachtet. Im Folgenden werden die Messungen betrachtet, bei denen jeweils alle vier Rauheitspositionen auf der Druck- und Saugseite mit Sand beklebt wurden. Die im numerischen Setup als Rauheit eingestellten Werte sind für alle ks -Korrelationen in Tab. 2.5 aufgeführt. Die Rauheitswerte wurden aus 2D-Höhenkarten berechnet, die jeweils aus einer Probe gemessen wurden. Es fällt auf, dass die ks -Werte ks_{SD} und ks_{SDS} nur sehr wenig von einander abweichen. Der Grund hierfür ist die Tatsache, dass die aufgeklebten Rauheiten ihren Nullpunkt auf dem Schaufelprofil haben. Die

Rauheiten haben hiermit eine Schiefe von $SSk \approx 1,2$. Hierdurch berechnet sich ein Skalierungsfaktor $\epsilon_{ks^+,SD} \approx 1$ für die Berechnung von ks_{SD} . Somit werden die Rauheiten von beiden Korrelationen gleich bewertet.

Abbildung 2.19 zeigt den Druckverlust

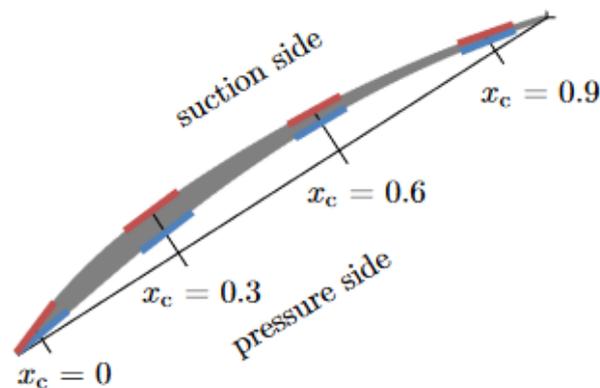
$$\Delta p = p_t - p_\infty \quad (2.24)$$

im Nachlauf des glatten Verdichterprofils. Verglichen werden die experimentellen Ergebnisse von Gilge et al. (2018) mit eigenen numerischen Ergebnissen. Zu erkennen ist, dass der maximale Druckverlust von der Simulation gut getroffen wurde. Allerdings wird der Nachlauf in der Numerik breiter vorhergesagt. Insgesamt gesehen, passen die numerischen und experimentellen Ergebnisse gut zusammen.

In Abbildung 2.20 sind die Druckverlustunterschiede

$$\Delta p = p_{\text{rau}} - p_{\text{glatt}} \quad (2.25)$$

für die Versuche mit den jeweils vier rauen Abschnitten auf der Druck- (a) und Saugseite (b) dargestellt. Hier zeigt sich ein ähnliches Verhalten wie im Testfall nach Leipold et al. (2000): Die Druckverluste in den experimentellen Untersuchungen fallen deutlich größer



$$\begin{aligned} c &= 120 \text{ mm} \\ t &= 76.5 \text{ mm} \\ Re_1 &= 717\,000 \\ Ma_1 &= 0.2 \end{aligned}$$

Abbildung 2.18: Das von Gilge et al. (2018) experimentell untersuchte Verdichterprofil mit den wichtigsten geometrischen und aerodynamischen Randbedingungen. An den jeweils vier farblich markierten Positionen auf der Druck- und Saugseite werden Rauheiten mit Sänden aufgeklebt. (aus Gilge et al. (2018))

Tabelle 2.5: Die nach den verschiedenen ks-Korrelationen berechneten Rauheitswerten, die in den Simulationen des Testfalls nach Gilge et al. (2018) eingestellt werden.

$s_C =$	Druckseite				Saugseite			
	0	0,3	0,6	0,9	0	0,3	0,6	0,9
SS ks_{Sa}^+	76	76	101	76	0	0	0	0
SS ks_{SD}^+	157	157	174	157	0	0	0	0
SS ks_{SDS}^+	160	160	176	160	0	0	0	0
DS ks_{Sa}^+	0	0	0	0	76	54	101	76
DS ks_{SD}^+	0	0	0	0	157	88	174	157
DS ks_{SDS}^+	0	0	0	0	160	88	176	160

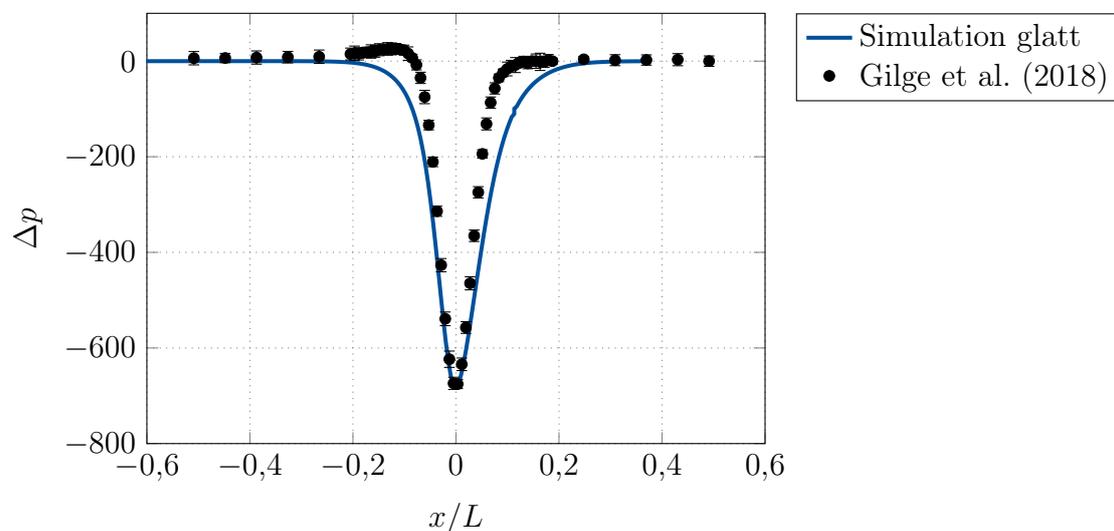


Abbildung 2.19: Vergleich der Druckverlust im Nachlauf des Verdichterprofils gemessen von Gilge et al. (2018) und simuliert.

aus als in den numerischen Simulationen. Außerdem zeigen sich in den Messungen am Profil mit der rauen Druckseite zwei lokale Minima in den Nachläufen. Diese werden in der Numerik nicht wiedergegeben. Bei diesem Testfall sind die Simulationen mit ks_{SD} bzw. ks_{SDS} näher an den experimentellen Ergebnissen. Allerdings sind diese Ergebnisse trotzdem nicht zufriedenstellend, denn die Vorhersage durch die Numerik ist zu weit von den experimentellen Ergebnissen entfernt. Ein Grund hierfür könnte sein, dass die Rauheiten nur Abschnittsweise auf dem Profil durch das Aufkleben von Sand aufgebracht worden sind. Hierdurch kommt es vor den Rauheiten zu Stolperkanten, die den Rauheitseffekt verfälschen könnten. Dieser Effekt müsste für Zukünftige Validierungen mit diesem Testfall näher untersucht werden.

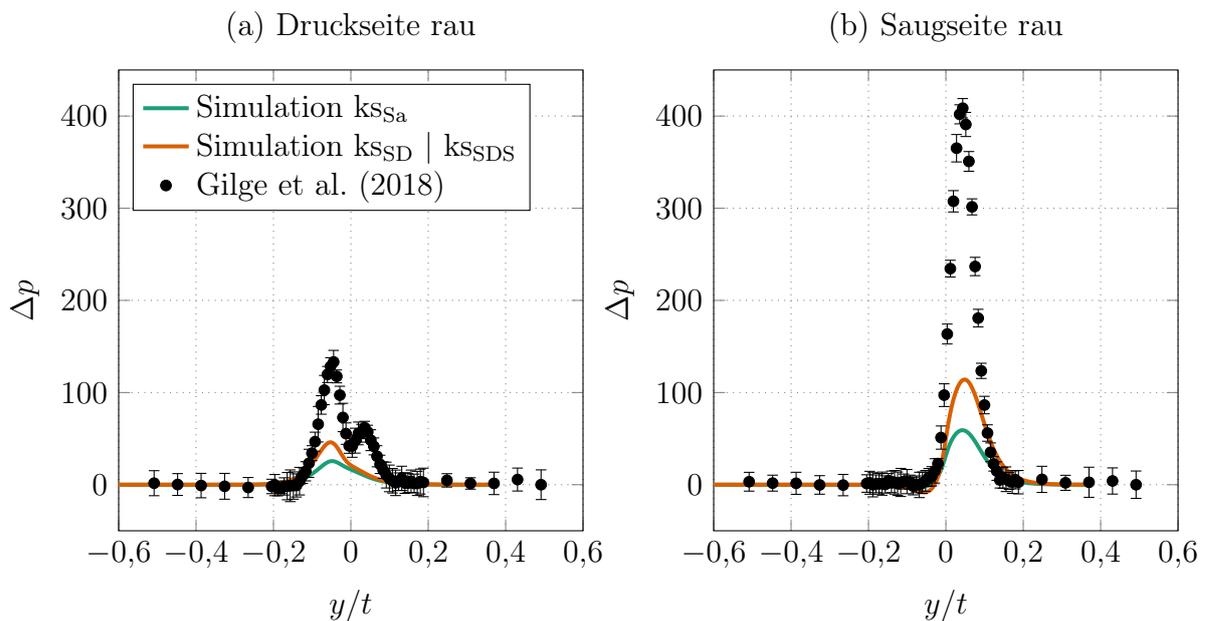


Abbildung 2.20: Vergleich der Druckverluste durch die jeweils vier rauhen Bereiche auf der Druck- (a) und Saugseite (b) in den experimentellen (Gilge et al. (2018)) und numerischen Untersuchungen.

2.1.7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Hauptarbeitspaket 3 „Modellierung rauher Oberflächen“ des Luftfahrtforschungsprojekts V-3 „Virtuelles Triebwerk - Hochgenaue Modellierung von Turbokomponenten (VirT)“ wurde die Vorhersage des Strömungsverlustes durch raue Oberflächen verbessert. Hierfür wurde zunächst eine Standortbestimmung mit bekannten Rauheitsmodellen und - Korrelationen durchgeführt. Zur Beschreibung der Rauheit in z.B. RANS-Simulationen wird die äquivalente Sandkornrauheit benutzt. Zur Berechnung der äquivalenten Sandkornrauheit existieren viele Korrelationen, die meist für bestimmte Rauheitsklassen entwickelt wurden Bons (2010). Als Eingangsgrößen für die Korrelationen werden aus dem Höhenprofil der Rauheiten berechnete Rauheitsparameter wie z.B. die arithmetische Rauheitshöhe (S_a , R_a), die maximale Rauheitshöhe (S_z , R_z) oder der Form- und Dichteparameter Λ_S nach Dirling (1973) benutzt. In aktuellen Veröffentlichungen zeigt sich, dass die Schiefe (SSk) des Höhenprofils in der strömungsmechanischen Bewertung rauher Oberflächen berücksichtigt werden muss. Die Schiefe des Höhenprofils gibt an, ob eine Oberfläche eher aus Tälern ($SSk < 0$) oder eher aus Bergen ($SSk > 0$) besteht.

Um den Einfluss der Schiefe besser verstehen und beurteilen zu können und um eine Rauheitskorrelation durch die Einbeziehung der Schiefe verbessern zu können, wurden raue Oberflächen zur numerischen Untersuchung ausgewählt. Hierbei wurden zwei Referenzrauheiten gewählt, die auf Hochdruckverdichterschaufeln eines mittelgroßen Triebwerks mit hohem Bypass-Verhältnis gemessen wurden. Um den Einfluss der Schiefe isoliert be-

trachten zu können, wurden die Rauheiten zunächst gespiegelt. Hierdurch wurden zwei Rauheiten erzeugt, bei denen die meisten klassischen Rauheitskorrelationen denselben Rauheitseffekt wie bei jeweiligen Referenzrauheiten vorhersagen, deren Schiefe aber genau umgekehrt ist. Bei diesen vier Oberflächen wurden dann systematisch die Rauheitsdichte und -höhe durch stauchen und strecken in horizontale und vertikale Richtung variiert. Alle entstandenen Oberflächen wurden in einem doppelt-periodischen Strömungskanal mittels DNS simuliert. Als Diskretisierung der Rauheiten wurde die Immersed Boundary Methode als am geeignetsten identifiziert. Bei der Immersed Boundary Methode wird die raue Oberfläche in das Rechenetz eingebettet. Dies hat den Vorteil, dass für alle Oberflächen dasselbe automatisch erstellte Rechenetz genutzt werden kann. Hierdurch kann manuelle Arbeit bei der Erstellung des Rechenetzes vermieden werden und ein Netz mit idealen Qualitätskriterien gewährleistet werden. Zur Qualitätssicherung der numerischen Ergebnisse wurde eine Netzstudie durchgeführt. Die Netzstudie zeigt, dass bereits ein Netz mit $\Delta x^+ = \Delta x^+ = 7,3$ und $\Delta x^+ = 0,9$ hinreichend genaue Ergebnisse erzeugt.

Es konnte gezeigt werden, dass die Schiefe der Rauheit ein wichtiges Bewertungskriterium für die Vorhersage des Strömungsverlustes ist. Die jeweils zusammengehörenden gespiegelten Oberflächen zeigten trotz der fast identischen Rauheitsparameter ein sehr unterschiedliches Verlustverhalten. Oberflächen mit positiver Schiefe haben einen größeren Strömungswiderstand als Oberflächen mit negativer Schiefe. Rauheitsberge ragen weiter in die Strömung und erzeugen dadurch größere Verluste.

Bei der Analyse bestehender Korrelationen zeigte sich, dass keine der existierenden Rauheitskorrelationen die Strömungsbeeinflussung ausreichend exakt vorhersagen kann. Ein Grund hierfür ist, dass die ks-Korrelationen von geometrischen Größen abhängen, die nur kaum oder gar nicht durch die Spiegelung der Oberflächen beeinflusst werden. Außerdem existiert keine Korrelation, die die Schiefe der Oberfläche berücksichtigt. So zeigte sich auch bei dem Versuch aerodynamische und geometrische Parameter miteinander zu korrelieren, dass nur die Schiefe mit den betrachteten aerodynamischen Größen korreliert. Eine Korrelation von z.B. der arithmetischen Rauheitshöhe zu den aerodynamischen Ergebnissen war nicht möglich.

Aus der gefundenen Korrelation mit der Schiefe ließ sich die auf dem Form- und Dichteparameter Λ_S von Dirling (1973) basierende ks-Korrelation von Bons (2005) um einen Schiefe-Parameter erweitern. Hierdurch verbessert sich die Güte der ks-Korrelation für die in diesem Vorhaben untersuchten Oberflächen von $R^2 = 0.11$ auf $R^2 = 0.90$.

Neben der bereits beschriebenen Verbesserung der Vorhersage der Strömungsverluste durch raue Oberflächen wurde im Hauptarbeitspaket 4 „Numerischer Prüfstand“ die Zusammenarbeit im Hochschul- und Industrieumfeld vorangetrieben. Hierfür wurden regelmäßige Telefonkonferenzen und Workshops durchgeführt, um allen Projektpartnern in Fragen der skalenauffösenden Simulationen beratend zur Seite stehen zu können. Die weiterhin erfolgreiche Zusammenarbeit der Hochschulen (RWTH, TUBS und LUH) hat zu der gemeinsamen Einreichung einer LuFo-Skizze geführt, die den Einsatz von hybriden RANS-LES Methoden in der Vorhersage von Turbomaschinenströmungen verfolgt.

In Folge der identifizierten Sensitivität der Strömungsverluste auf die Schiefe von Rauheiten zeigt sich eine Lücke in der Validierungsbasis von Rauheitsmodellen für den in-

dustriellen Einsatz. Bekannte Experimente, die in der Vergangenheit für die Validierung verwendet wurden, liefern keine hinreichend genauen Informationen über die eingesetzten Rauheiten. Daher ist keine Berechnung des Schiefeparameters möglich und die entwickelte Korrelation liefert keine besseren ks^+ -Werte als bisher bekannte Korrelationen. Bei anderen Experimenten, bei denen die Rauheiten ausschließlich durch Materialauftrag eingebracht wurde, gibt es keine negative Schiefe wie sie in Realität durch Materialabtrag entsteht. Folglich kann die neu entwickelte Korrelation nicht an realitätsnahen Anwendungsfällen abschließend validiert werden. Die Autoren beabsichtigen, diese Lücke in zu beantragenden Projekten durch Experimente und DNS von Linearkaskaden zu schließen.

2.2 Wichtigste Postionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die beiden wichtigsten Postionen des zahlenmäßigen Nachweises sind Personalkosten der Ziffern 0812 und 0822. 0812 sind Beschäftigte der Entgeltgruppen E12-E15 mit 91,5% und 0822 sind sonstige Beschäftigtenentgelte mit 3,5% der beantragten Gesamtsumme. In diesem Vorhaben wurden keine zusätzliche experimentellen Arbeiten durchgeführt, sondern bestehende Ergebnisse für die Modellentwicklung und Validierung verwendet.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Es kann gezeigt werden, dass Rauheiten den Polytropen Wirkungsgrad von Verdichtern um bis zu 3%-Punkte reduzieren und zu einer Verschiebung des Verdichterkennfeldes führen (Seehausen et al. 2020). Dies ist insbesondere für moderne Verdichter, die nahe an den aerodynamischen Stabilitätsgrenzen betrieben werden, kritisch. Eine falsche Berücksichtigung von Rauheiten während der Auslegungsphase kann durch Betriebsbeanspruchung zu einer sicherheits- und effizienzkritischen Veränderung der Verdichterperformance führen. Dies unterstreicht die Notwendigkeit nach eine hinreichend genauen und differenzierten Modellierung des aerodynamischen Einflusses von Rauheiten. Die in Absch. 2.1.5 beschriebene und neu entwickelte Korrelation ermöglicht eine differenziertere Modellierung ergänzt um den aerodynamischen Einfluss der Schiefe von Rauheiten. Sie kann direkt in die Auslegungsketten der industriellen Anwendungspartner überführt und für die Auslegung künftiger Flugtriebwerke eingesetzt werden. Ein Beispiel ist die Entwicklung der zweiten Generation des Geared-Turbo-Fan (Gen2-GTF), mit dem die ehrgeizigen Ziele des sogenannten Flightpath 2050 für den Zeithorizont 2028-2030 erfüllt werden sollen. Vor diesem Hintergrund erscheinen die Zuwendungen angemessen.

2.4 Voraussichtlich Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Aufgrund des Charakters einer Forschungseinrichtung besteht für das TFD keine direkte wirtschaftliche Verwertung der gewonnenen Ergebnisse. Die Verwertungen sind vor allem von akademischer Natur. Das erzielte Wissen und die Kompetenz zur Turbulenzmodellierung unter dem Einfluss von Rauheiten in Turbokomponenten, sowie der Erfahrungen mit hochgenauen skalenauflösenden Simulationen wurde weiter ausgebaut. Dies gilt insbesondere für die Forschungslinien des Instituts zur direkten Überführung von Ergebnissen aus skalenauflösenden Simulationen in industriell nutzbare RANS Modelle. So steigt die Kompetenz zur Bearbeitung weiterer Projekte zur Turbulenz- und Transitionsmodellierung. Durch die Bearbeitung des Vorhabens wurde ergänzend wissenschaftlicher Nachwuchs in Form von studentischen Abschlussarbeiten und Hilfstätigkeiten ausgebildet. Zusätzlich ist für die in dem Vorhaben wissenschaftlich Mitarbeitenden, die Promotion in Arbeit. Die wissenschaftlichen Ergebnisse wurden im Rahmen internationaler Veröffentlichungen in Fachzeitschriften publiziert, siehe Absch. 2.6. Somit leistet das TFD einen wichtigen Beitrag zur aktuellen Forschung auf den betreffenden Gebieten und baut sein internationales Forschungsnetzwerk weiter aus. Die beratende Tätigkeit im Rahmen des HAP-4.1 gegenüber der RWTH trug dazu bei, einen intensiven, hochschulübergreifenden Wissensaustausch zu etablieren und den Wissenszuwachs flächendeckend auszubauen. Dies zur gemeinsamen Beantragung eines Forschungsprojektes im Rahmen LuFo VI-III geführt. Zudem lässt sich auch die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen durch eine qualitativ hochwertige Ausbildung junger Ingenieurinnen und Ingenieure nachhaltig fördern. Durch die enge, langjährige Kooperation mit der MTU und dem DLR sowie den zahlreichen Arbeiten des TFD an dem von der MTU eingesetzten DLR-Strömungslöser TRACE ist ein sehr direkter Austausch zwischen Forschung und Industrie sichergestellt. Im Rahmen der Kooperation sind bereits verschiedene RANS Modelle entstanden, die von der MTU bei der Auslegung eingesetzt werden. Ergebnisse dieses Vorhabens wurden in der letzten Phase direkt in die MTU Auslegungsumgebung integriert und sind seit dem nutzbar.

2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Der Wirkung von Rauheitsparametern auf die Aerodynamik umströmter Bauteile ist Gegenstand aktueller Forschungsprojekte. Zu nennen sind hier vor allem der Einfluss der Schiefe (SSK), der effektiven Steigung (ES) oder der arithmetischen Rauheitshöhe (Sa). Experimentelle Studien von Flack et al. (2022) und numerische Studien von Kuwata und Nagura (2020) zeigen beispielsweise, dass positive SSK (Erhöhung gegenüber dem Null-

niveau des Schaufelprofils) einen größeren Einfluss hat als negativ SSK (Vertiefung gegenüber dem Nullniveau des Schaufelprofils) mit dem gleichen Betrag. Erklärt wird dies dadurch, dass positive SSK in die Grenzschicht eindringen und daher durch zusätzliche Verwirbelungen die Produktion von turbulenter kinetischer Energie anregen. Diese dissipiert schlussendlich durch die Viskosität des Fluides und führt zu einem Druckverlust Jelly und Busse (2018). Flack et al. (2022) zeigen, dass der Widerstand von rauen Oberflächen sensitiver zur Wurzel der Rauheitshöhe ist, wenn positive SSK gegenüber negativer SSK überwiegt. Die Wirkung der verschiedenen Rauheitsparameter interagiert also nicht-linear miteinander. Kuwata und Nagura (2020) zeigen, dass der Widerstand sensitiv auf die ES der Rauheit reagiert, d.h. für $ES < 0,4$ reduziert sich der Widerstand näherungsweise linear und für $ES > 0,4$ nicht-linear. Grund ist die Zusammensetzung des Widerstandes aus viskosen und Druckkräften. Mit zunehmender ES steigt auch das Verhältnis von Druckkräften zu viskosen Kräften. Diese Erkenntnisse wurden an externer Stelle bislang nicht in verbesserte Modellierungsansätze für die RANS-Simulation von turbulent durchströmten Verdichterkaskaden überführt.

2.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Neben dem Abschlussbericht wurden die nachfolgend genannten projektbezogenen Arbeiten auf internationalen Konferenzen mit und ohne Peer-Review Prozess veröffentlicht. Insbesondere die GPPS Veröffentlichungen sind kostenfrei öffentlich einsehbar (Open Access) und stehen damit einem breiten Publikum zur Verfügung:

Kurth, S.; Cengiz, K.; Wein, L.; Seume, J.R. (2022): From Measurement To Simulation A Review Of Aerodynamic Investigations Of Real Rough Surfaces By DNS, Global Power and Propulsion Society (GPPS), Xi'an, China, GPPS-TC-2021-0213 DOI: 10.33737/gpps21-tc-213 ISBN: 2504-4400

Ahrens, J., Kurth, S.; Cengiz, K.; Wein, L.; Seume, J.R. (2022): Immersed Boundary Method For The Investigation Of Real Surfaces With Isotropic And Anisotropic Roughness Components, Global Power and Propulsion Society (GPPS), Xi'an, China, GPPS-TC-2021-0214 DOI: 10.33737/gpps21-tc-214 ISBN: 2504-4400. Einreichung ins Journal wurde empfohlen und ist in Arbeit.

Kurth, S.; Hamann, C.; Seume, J.R.; Mulleners, K. (2018): Experimental Investigation of the Influence of Anisotropic Surface Structures on the Boundary Layer Flow, 2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech Forum, 8-12 January 2018, Kissimmee, Florida, USA, AIAA2018-0585 DOI: 10.2514/6.2018-0585

2.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Folgende weitere projektbezogene Publikationen wurden eingereicht und zur Veröffentlichung angenommen. Die Veröffentlichung erfolgt im Laufe des Jahres 2022:

Cengiz, Kurth, Wein: Prospects of implicit LES of flow over rough surfaces through fitting curved cell faces – CMFF 2022

Cengiz, Kurth, Wein und Seume: Implicit Large-Eddy Simulation of a Rough Turbine Blade using High-order Curved Elements - GPPS 2022

Kurth, Cengiz, Möller, Wein, Seume: Modeling the Influence of Roughness Skewness on Wall Bounded Flows by Systematic Roughness Variation - GPPS 2022

Literaturverzeichnis

- Bons, J (2005): A critical assessment of Reynolds analogy for turbine flows. In: J. Heat Transfer, Band 127(5):S. 472–485.
- Bons, J. P. (2010): A review of surface roughness effects in gas turbines. In: Journal of turbomachinery, Band 132(2).
- Colebrook, C.F. (1939): Turbulent Flow in Pipes, With Particular Reference to the Transition Region Between the Smooth and Rough Pipe Laws. In: Journal of the Institution of Civil Engineers, Band 11(4):S. 133–156. doi:10.1680/ijoti.1939.13150.
- DIN EN ISO (25178-2:2012-09): Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 2: Begriffe und Oberflächen-Kenngrößen (ISO 25178-2:2012); Deutsche Fassung EN ISO 25178-2:2012. Beuth Verlag.
- DIN EN ISO (4287:2009-11): Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 4287:1997 + Cor 1:1998 + Cor 2:2005 + Amd 1:2009); Deutsche Fassung EN ISO 4287:1998 + AC:2008 + A1:2009. Beuth Verlag.
- Dirling, R.B. (1973): A method for computing roughwall heat transfer rates on reentry nosetips. In: 8th Thermophysics Conference. S. 763.
- Flack, K.; Schultz, M. und Barros, J. (2022): Skin Friction Measurements of Systematically Varied Roughness: Probing the Role of Roughness Amplitude and skewness. In: Flow, Turbulence and Combustion 104(2), 317–329.
- Gilge, P.; Kellersmann, A.; Friedrichs, J. und Seume, J. R. (2019a): Surface roughness of real operationally used compressor blade and blisk. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, Band 233(14):S. 5321–5330.
- Gilge, P.; Kellersmann, A.; Kurth, S.; Friedrichs, J. und Seume, J. R. (2019b): Dataset: Surface roughness of real operationally used compressor blade and blisk. URL <https://doi.org/10.25835/0084372>.
- Gilge, Philipp; Seume, Jörg R und Mulleners, Karen (2018): Analysis of local roughness combinations on the aerodynamic properties of a compressor blade. In: 2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting. S. 0345.

- Hummel, F.; Lötzerich, M.; Cardamone, P. und Fottner, L. (2004): Surface Roughness Effects on Turbine Blade Aerodynamics. In: Journal of Turbomachinery, Band 127(3):S. 453–461. ISSN 0889-504X. doi:10.1115/1.1860377.
- Jelly, T. O. und Busse, A. (2018): Reynolds and Dispersive Shear Stress Contributions above Highly Skewed Roughness. In: Journal of Fluid Mechanics 852, 710–724.
- Kurth, S. (2018): Modellierung des lokalen Effekts anisotroper Rauheitsstrukturen auf turbulente Grenzschichten in RANS-Simulationen. Masterarbeit, Leibniz Universität Hannover, Institut für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik.
- Kurth, S.; Cengiz, K.; Möller, D.; Wein, L. und Seume, J.R. (2022): Modelling the Influence of Roughness Skewness on Wall Bounded Flows by Systematic Roughness Variation. In: Proceedings of the Global Power and Propulsion Society ...
- Kurth, S.; Cengiz, K.; Wein, L. und Seume, J.R. (2021): From Measurement to Simulation - A Review of Aerodynamic Investigations of Real Rough Surfaces by DNS. In: Proceedings of the Global Power and Propulsion Society, Virtual Conference, Xi'an, China.
- Kuwata, Y. und Nagura, R. (2020): Direct Numerical Simulation on the Effects of Surface Slope and Skewness on Rough Wall Turbulence. In: Physics of Fluids 32(10), 105113.
- Lee, Myoungkyu und Moser, Robert D. (2015): Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to $Re_\tau \approx 5200$. In: Journal of Fluid Mechanics, Band 774:S. 395–415. doi:10.1017/jfm.2015.268.
- Leipold, Robert; Boese, Matthias und Fottner, Leonhard (2000): The influence of technical surface roughness caused by precision forging on the flow around a highly loaded compressor cascade. In: J. Turbomach., Band 122(3):S. 416–424.
- MacDonald, M.; Chung, D.; Hutchins, N.; Chan, L.; Ooi, A. und García-Mayoral, R. (2017): The minimal-span channel for rough-wall turbulent flows. In: Journal of Fluid Mechanics, Band 816:S. 5–42. doi:10.1017/jfm.2017.69.
- Moser, R. D.; Kim, J. und Mansour, N. N. (1999): Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to $Re_\tau = 590$. In: Physics of fluids, Band 11(4):S. 943–945.
- Nikuradse, J (1933): VDI-Forschungsheft 361: Strömungsgesetze in rauhen Rohren (Laws of Turbulent Pipe Flow in Smooth Pipes.).
- Seehausen, H.; Gilge, P.; Kellersmann, A.; Friedrichs, J. und Herbst, F. (2020): Numerical Study of Stage Roughness Variations in a High Pressure Compressor. In: International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems, Band 11(3):S. 16–25.
- Senturk, U.; Brunner, D.; Jasak, H.; Herzog, N.; Rowley, C. W. und Smits, A. J. (2019): Benchmark simulations of flow past rigid bodies using an open-source, sharp interface immersed boundary method. In: Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal, Band 19(4):S. 205–219.

- Sigal, A. und Danberg, J. E. (1990): New correlation of roughness density effect on the turbulent boundary layer. In: AIAA journal, Band 28(3):S. 554–556.
- Thakkar, M. (2017): Investigation of turbulent flow over irregular rough surfaces using direct numerical simulations. Dissertation, University of Southampton.
- Thakkar, M.; Busse, A. und Sandham, N. (2017): Surface correlations of hydrodynamic drag for transitionally rough engineering surfaces. In: Journal of Turbulence, Band 18(2):S. 138–169. doi:10.1080/14685248.2016.1258119.
- Thomas, T.R. (1981): Characterization of surface roughness. In: Precision Engineering, Band 3(2):S. 97–104.
- Wilcox, D. C. (1988): Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models. In: AIAA journal, Band 26(11):S. 1299–1310.