

TOLERANT AIRFOILS – NUMERISCHE UND EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES KLEINSKALIGER GEOMETRIEVARIATIONEN AUF DIE AERODYNAMIK VON VERDICHTERSCHAUFELN

Jörg Hartmann, Katharina Winter, Peter Jeschke
Institut für Strahlantriebe und Turboarbeitsmaschinen
RWTH Aachen
Templergraben 55, D-52062 Aachen

Manfred Lahmer, Christoph Feiler
MTU Aero Engines GmbH
Dachauer Straße 665, D-80995 München

Zusammenfassung

Die vorliegende Veröffentlichung stellt die Arbeiten am Institut für Strahlantriebe und Turboarbeitsmaschinen (IST) zur Untersuchung der Auswirkungen kleinskaliger Geometrieabweichungen auf die Aerodynamik von Verdichterprofilen vor. Mit kleinskalig sind dabei lokale Geometrievariationen gemeint, welche eine Größenordnung kleiner als die Ausgangsgeometrie sind bzw. im Toleranzband selbiger liegen.

Motiviert sind diese Arbeiten durch die Tatsache, dass das Verständnis des aerodynamischen Einflusses solcher Abweichungen in der modernen Triebwerksindustrie stetig an Bedeutung gewinnt. Grund hierfür sind Faktoren wie die hohen Effizienzanforderungen, die vermehrt integralen Fertigungsstrategien und die zunehmende Verzahnung verschiedener Fachdisziplinen in der industriellen Praxis. Folgerichtig ist das Ziel der hier vorgestellten Arbeiten am IST, einen grundlegenden Beitrag zur aerodynamischen Bewertung von Geometrieabweichungen zu leisten. Umgesetzt werden soll dies mit Hilfe von eng aufeinander abgestimmten experimentellen und numerischen Untersuchungen, deren Methoden hier vorgestellt werden.

In diesem Zusammenhang wird zunächst der für die Experimente ausgewählte ebene Gitterwindkanal diskutiert. Hierbei wird insbesondere auf das Prüfstandskonzept zum Erreichen der beabsichtigten hohen Messgenauigkeit eingegangen. Im Anschluss wird ein numerisches Vorgehen in Form einer Prozesskette vorgestellt, welches es ermöglicht die aufwändigen experimentellen Untersuchungen effizient vorzubereiten. Die Notwendigkeit und Umsetzung eines hohen Automatisierungsgrades, um die umfassenden Vorstudien durchzuführen, steht hierbei im Mittelpunkt. Gleichzeitig muss die Numerik jedoch genauso wie das Experiment eine sehr hohe Genauigkeit gewährleisten, um die erwarteten Phänomene bestmöglich abzubilden. Als Abschluss werden die Ergebnisse einer ersten Voruntersuchung anhand von saugseitigen Welligkeiten präsentiert, welche anhand von Wellenlänge und Wellenhöhe variiert werden, und so die Leistungsfähigkeit der entwickelten Prozesskette verdeutlicht.

1. EINLEITUNG

Bei der Entwicklung von Turboflugtriebwerken ist für jedes Bauteil eine integrierte Optimierung von teils widersprüchlichen Anforderungen von Nöten. Es muss ein Kompromiss zwischen den beteiligten Fachdisziplinen, wie z.B. Aerodynamik, Strukturmechanik und Fertigung gefunden werden. Aufgrund des in der kurzen Entwicklungszeit nur schwer zur Verfügung stehenden oder unzureichenden Wissens können jedoch häufig nicht alle Optimierungspotentiale ausgeschöpft werden. So werden z.B. auch heute noch Bauteile nach Erfahrungswerten ausgelegt bzw. bewertet und auf diese Weise implizit bestimmte Fertigungsverfahren, Toleranzen bzw. Ausprägungen vorausgesetzt.

Dies führt besonders bei modernen Fertigungsverfahren, welche vermehrt auf Integralbauteile setzen, wie z.B. die „Blisk“ („Blade-Integrated-Disk“), „Bling“ („Blade-Integrated-Ring“) oder „Leitschaufelcluster“ unter Umständen zu sehr hohen Fertigungskosten. Grund ist, dass hier jeweils viele Schaufeln in einem einzelnen Gesamtbauteil integriert sind. So kann eine Hochdruckverdichter-Blisk leicht aus 100 Schaufeln bestehen. Liegt hier nun nach aktuellen Bewertungskriterien eine „Serienprozessausschussrate von typischerweise 1-3%“ [7] vor, ist dies bei einer konventionell gefertigten Schaufelreihe bestehend aus Einzelschaufeln kein nennenswertes Problem. Bei dem erwähnten Beispiel der Blisk müsste jedoch jedes gefertigte Gesamtteil zu Ausschuss erklärt werden. Um dies zu verhindern werden gezwungenermaßen die Prozesse deutlich vorsichtiger und somit aufwendiger gefahren als notwendig, um die Ausschussraten zu reduzieren.

Besonders hinsichtlich der aerodynamischen Bewertung ist es deshalb sinnvoll eine fundierte Wissensbasis zur Verfügung zu stellen, welche die Sensitivitäten von bestimmten Merkmalen beschreibt. So können sehr viel leichter Merkmale identifiziert werden, welche in entsprechenden Grenzen keinen nennenswerten aerodynamischen Einfluss haben, jedoch in der Fertigung zu hohen Ausschussraten und somit zu hohen Kosten führen und die Tolerierung entsprechend angepasst werden. Darüber hinaus ist es möglich, mit dem Wissen um die Sensitivitäten von ausgewählten Merkmalen, bereits im Auslegungprozess die Schaufelgestaltung im Sinne der Fertigung positiv zu beeinflussen ohne die Aerodynamik maßgeblich zu verschlechtern.

2. ZIELSETZUNG UND EINORDNUNG

Unter dem Eindruck der im vorherigen Kapitel dargestellten Problematik sollen am Institut für Strahlantriebe und Turboarbeitsmaschinen (IST) eingehende Untersuchungen betreffend des aerodynamischen Einflusses kleinskaliger Geometrievariationen durchgeführt werden. Ziel ist es Sensitivitäten zu ermitteln und bereitzustellen, um Wissenslücken zu schließen, historisch tradierte Auslegungs- und Toleranzregeln zu überprüfen (ggf. zu ersetzen) und eine größere Unabhängigkeit von Erfahrungswerten zu schaffen. Hierzu gilt es zunächst geeignete Geometriemerkmale zu identifizieren. Für die Untersuchung von Axialverdichterschaukeln kommen hierfür z.B. die Schaufelvorderkante, die Hinterkante, die Sehnenlänge, die Schaufelstellstellung, die Oberflächengüte und evtl. Krümmungsabweichungen auf der Saug- und Druckseite in Frage, da dies Merkmale sind, die auch in der industriellen Praxis im Allgemeinen überprüft werden.

Zu einzelnen Merkmalen wurden in der Literatur bereits Arbeiten durchgeführt. Häufig betrachtet wurde z.B. die Oberflächenrauigkeit, deren Einfluss schon seit längerer Zeit untersucht wird, wie auch die Arbeit von Bammert und Milsch zeigt [2]. Es wurde hier die Entwicklung der Grenzschicht an Schaufeln von Axialverdichtern, die sich während des Betriebs durch Korrosion oder Erosion aufgeraut haben, untersucht, um den damit einhergehenden Einfluss auf die Verluste zu ermitteln. Neuere numerische Arbeiten wie von Ang und Chen [1] und Paterson und Peltier [10] hingegen hatten die Untersuchung von Hinterkantenformen mit instationären RANS-Simulationen bzw. mit Hilfe einer inkompressiblen DES-Simulation und stationären RANS-Simulationen zum Ziel. Benner, Sjolander, Moustapha [3] widmeten sich dem Thema des Einflusses der Vorderkantengeometrie auf die Verluste unter variierender Inzidenz. Bei den Geometrievariationen handelte es sich um Radiusvariationen verbunden mit einer Änderung des Wedge Angle. Grundlagenorientierter stellt sich die Arbeit von Narasimha und Prasad [9] dar, in welcher der Einfluss der Vorderkante auf die laminare Grenzschicht an einer ebenen Platte untersucht wurde. Auch hier beschränkten sich die Geometrien auf kreis- bis ellipsenförmige Kanten. Insbesondere auf den Optimierungsprozess legten Xing und Damodaran [13] ihr Augenmerk, als sie die Vorderkante eines Fans mit Hilfe dreidimensionaler Simulation betrachteten.

Die genannten Arbeiten lassen sich in Teilen für die Einschätzung verschiedener Designgeometrien nutzen, nicht aber direkt für die Einschätzung des aerodynamischen Einflusses von Fertigungsabweichungen, da sie sich ausschließlich mit „Normabweichungen“ befassen. Mit Normabweichungen sind in diesem Zusammenhang Variatio-

nen der Geometrie gemeint, die grundlegend auch das Ausgangsdesign einer Schaufel darstellen könnten, und keine fertigungsbedingten Abweichungen beschreiben. Am ehesten in diese Richtung geht z.B. die am IST durchgeführte Arbeit von H. Hönen [6], in der der Einfluss verschiedener betriebs- bzw. reparaturbedingter Geometrieänderungen der Vorderkanten von Verdichterbeschaukelungen untersucht wurde. Ziel war die Optimierung der Rekonturierung, wobei hauptsächlich numerische Methoden zum Einsatz kamen. Jedoch war auch hier nicht das Ziel Sensitivitäten für die nicht mehr zeichnungsgemäßen Geometrien selber zu entwickeln. Weiterhin ist die Arbeit von Suder, Chima und Strazisar [12] zu nennen. Hier wurden die Auswirkungen der Veränderung von Oberflächenrauigkeit und Profildicke hinsichtlich des Wirkungsgrades eines axialen Verdichters betrachtet.

Darüber hinaus sind die probabilistischen Arbeiten auf dem Gebiet der Fertigungsabweichungen zu erwähnen. Hierzu zählen die Arbeiten von Garzon [4, 5] oder auch Lange [8], um nur zwei Autoren auf diesem Gebiet zu nennen. Diese Arbeiten verfolgen jedoch nicht das Ziel funktionale Zusammenhänge zu erarbeiten und haben aufgrund der Verwendung statistischer Methoden eine grundlegend andere Herangehensweise zur Bewertung von Fertigungsabweichungen. Sie zielen nicht direkt auf die Entwicklung grundlegender funktionaler Zusammenhänge bzw. Auslegungsrichtlinien ab. So bewertet Lange in seiner Arbeit vermessene Verdichterschaukeln, was jedoch die genaue Definition der Abweichungen und so auch die Ableitung funktionaler Zusammenhänge zwischen Ausprägung und Wirkung erschwert.

Die Analyse der in der Literatur vorgestellten Arbeiten zeigt, dass viele Merkmale in Ansätzen untersucht wurden. Die Untersuchungen beziehen sich jedoch zumeist auf Optimierungen bzw. mögliche Sollgeometrien oder verfolgen wie im Fall der Probabilistik eine andere Herangehensweise. Hierdurch findet eine Ableitung von deterministischen Zusammenhängen nur eingeschränkt statt.

In Abgrenzung zu der vorgestellten Literatur sollen im Rahmen der hier vorgestellten Arbeiten am Institut vornehmlich deterministische Zusammenhänge für die Anwendung in der industriellen Praxis erarbeitet werden. Hierzu sollen umfangreiche numerische und experimentelle Arbeiten durchgeführt werden. In ausführlichen numerischen Voruntersuchungen, deren Vorgehen in Kapitel 4 beschrieben wird, werden verschiedene Merkmale untersucht. Aus den Ergebnissen wird eine Auswahl an Merkmalsausprägungen getroffen, die in einem extra auf diesen Zweck ausgerichteten hochgenauen Prüfstand, welcher in Kapitel 3 vorgestellt wird, vermessen werden.

3. EXPERIMENT

Für die experimentellen Untersuchungen fiel die Wahl der Untersuchungsmethode auf den ebenen Gitterwindkanal des IST. Aus vielerlei Gründen erweist sich für die Untersuchung der angestrebten Phänomene ein ebener Gitterwindkanal als besonders geeignet. Wesentlichster Punkt in diesem Zusammenhang ist die deutliche Reduktion der Problematik und der auftretenden Einzeleffekte von einer stark dreidimensionalen Strömung in der realen Turbomaschine auf eine deutlich vereinfachte Durchströmung eines ebenen Schaufelgitters. Dies ermöglicht eine gezielte Interpretation der relevanten durch die Geometrievariationen hervorgerufenen Strömungsphänomene. Außerdem wird eine optimale messtechnische Zugänglichkeit zum

Gitter und der Kanalströmung gewährleistet. Des Weiteren reduziert die begrenzte Anzahl an Bauteilen im Vergleich zu herkömmlichen Rig-Tests deutlich die Versuchskosten und ermöglicht eine große Modularität, welche effiziente Sensitivitätsstudien erst durchführbar werden lässt.

Ein weiterer Vorteil des ebenen Gitterwindkanals am IST ist der Betriebsbereich. Er zeichnet sich durch einen hohen Unterschallbereich und durch die unabhängige Variation von Reynolds- und Machzahl aus. Im Folgenden soll der Prüfstand und der auf die Messaufgabe angepasste Versuchsaufbau näher vorgestellt werden.

3.1. Prüfstands Aufbau

Der prinzipielle Aufbau des ebenen Gitterwindkanals ist in Abbildung 1 dargestellt. Es zeigt den Gitterwindkanal mit seiner gesamten Zu- und Abströmung, wie er im zentralen Versorgungsnetz des Institutes eingebunden ist.

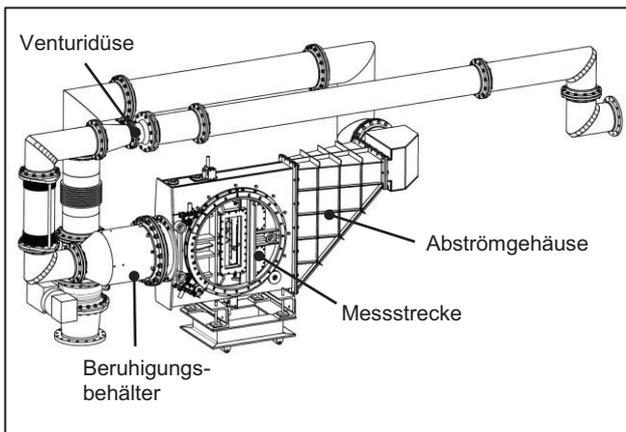


BILD 1. CAD-Ansicht ebener Gitterwindkanal

Die vom Versorgungsverdichter bereitgestellte Druckluft wird in die Zulaufstrecke eingeleitet. Am Ende der Zulaufstrecke befindet sich eine Venturidüse nach DIN EN ISO 5167-3 zur Massenstrombestimmung. Nach zwei 90°-Krümmern wird durch einen Wide-Angle-Diffuser die Strömung verzögert und in einen Beruhigungsbehälter geführt. Verschiedene Einbauten sorgen hier für eine Homogenisierung und Gleichrichtung der Strömung. Über eine Düse wird die Strömung auf einen konstanten Rechteckquerschnitt von 195mm x 80mm beschleunigt. Nach einer kurzen Zulaufstrecke trifft die Strömung auf das Messgitter.

Das Messgitter ist drehbar gelagert, sodass eine Variation des Zuströmwinkels im Bereich von $90^\circ \leq \beta_1 \leq 160^\circ$ möglich ist (vgl. Abbildung 2). Um die Anzahl der Schaufeln im Messgitter bei allen Winkeln möglichst optimal auf den konstanten Messquerschnitt anzupassen, wurde das Schaufelsystem hoch modular gestaltet. Weiter befindet sich an der oberen und unteren Kanalberandung ein flexibles Kulissen- und Tailboardsystem zur Sicherstellung der Strömungsperiodizität. Hinter dem Gitter findet eine sprunghafte Querschnittserweiterung ins Abströmgehäuse statt, wodurch dem Gitter ein konstanter Gegendruck aufrägt wird. Dem Abströmgehäuse schließt sich die Abluftleitung an.

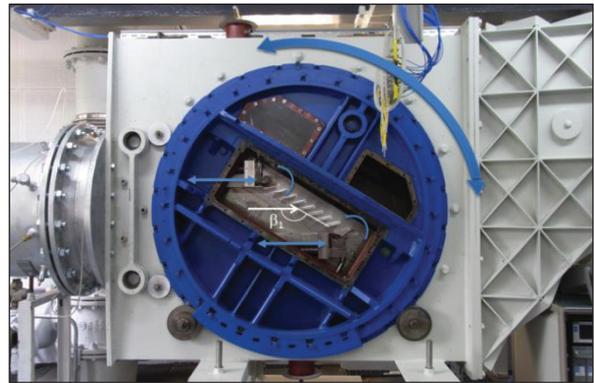


BILD 2. Ansicht Messstrecke

3.2. Betriebsbereich

Der ebene Gitterwindkanal des ISTs wird kontinuierlich betrieben und ist dazu in das zentrale Versorgungsnetz des Institutes eingebunden. Durch die geschlossene Bauweise kann der Prüfstand in einem gewissen Bereich evakuiert werden, sodass wie bereits erwähnt unabhängig von der Machzahl auch die Reynoldszahl variiert werden kann. Der sich ergebende Betriebsbereich für ein Verdichtergitter ist in Abbildung 3 dargestellt.

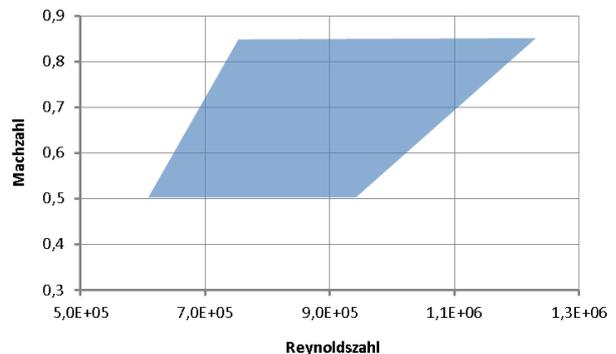


BILD 3. Betriebsbereich des ebenen Gitterwindkanals

Er eignet sich hervorragend für die angestrebten Untersuchungen, da er für die ein typisches Verdichterprofil repräsentativ ist. Die wesentlichen Daten des Windkanals sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Einstellbereich der Variationsgrößen	
Machzahl	$0,5 \leq Ma_1 \leq 0,85$
Reynoldszahl	$6,2 \cdot 10^5 \leq Re_1 \leq 1,2 \cdot 10^6$
Zuströmwinkel	$90^\circ \leq \beta_1 \leq 160^\circ$
Zuströmquerschnitt	80mm x 195mm

TAB 1. Datenübersicht ebener Gitterwindkanal

3.3. Instrumentierung

Die Instrumentierung des Prüfstandes folgt vier grundlegenden Zielsetzungen: Der Betriebspunktüberwachung, der Überprüfung der Homogenität und Periodizität der Strömung, der Erfüllung der Messaufgabe und der Redundanz. Im Folgenden soll vor allem auf die Messaufgabe eingegangen werden. Ziel der Messungen ist es die wesentlichen Gittercharakteristiken zu ermitteln und diese dann zwischen verschiedenen Schaufelkonfigurationen zu vergleichen.

Wichtigste Größe in diesem Zusammenhang ist der (Totaldruck-) Verlustbeiwert ω . Daneben spielt zum einen die statische Druckumsetzung und zum anderen die Gitterumlenkung eine wichtige Rolle. Um die Profilmströmung bewerten zu können wird die Druckverteilung am Schaufelprofil gemessen. Die verschiedenen Messebenen und die Standardinstrumentierung sind in Abbildung 4 dargestellt.

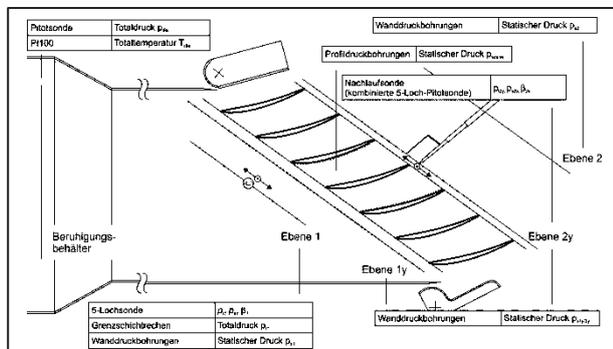


BILD 4. Messebenen und Instrumentierung

Im Beruhigungsbehälter werden der Totaldruck und die Totaltemperatur gemessen. In Ebene 1 besteht die Möglichkeit mit verschiedenen Sonden die Zuströmung zu traversieren. Des Weiteren ermöglichen statische Wanddruckbohrungen die Überwachung des Betriebspunktes. Zwei Grenzschichtrechen überwachen kontinuierlich die Zuströmungsgrenzschicht und dienen zusätzlich neben den Standardgrößen als wertvolle Eingangsgröße für die Numerik. Statische Wanddruckbohrungen in den Ebenen 1y und 2y dienen der Überwachung der Periodizität. Die Schaufeln in Umfangsrichtung ober- und unterhalb der Schaufel in Kanalmitte sind saug- bzw. druckseitig mit Profildruckbohrungen versehen. In der Ebene 2y kommt eine kombinierte 5-Loch-Pitotsonde zum Einsatz (vgl. Abbildung 5). Dadurch wird die auf den Verlustbeiwert übermäßig sensitiv wirkende Totaldruckmessung in der Ebene 2y von der 5-Lochsondenmessung entkoppelt und damit ihre Genauigkeit deutlich verbessert.

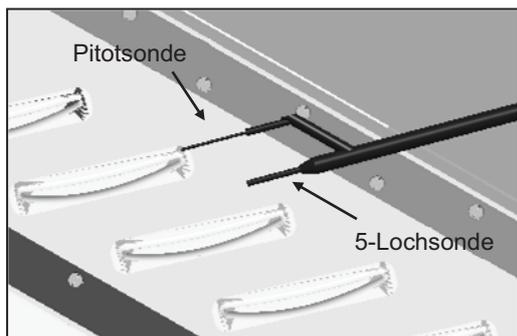


BILD 5. Kombinierte Nachlaufsonde

In Hinblick auf die Messgenauigkeit wurde auch die Lage der Messebene 2y sehr bewusst ausgewählt. Sie liegt in einem nach Scholz [11] üblichen Bereich, jedoch so, dass die zu messenden Totaldruckdifferenzen und damit auch die Gradienten in der Nachlaufdüse bereits abgenommen haben. Dabei wurde darauf geachtet, dass im Mittenschnitt in allen Betriebspunkten noch eine unbeeinflusste Kernströmung vorliegt.

3.4. Messtechnik

Um den Einfluss besonders kleiner Geometrievariationen feststellen zu können wurde der Prüfstand mit modernster Messtechnik ausgestattet. Bei der Auslegung der Messtechnik wurden verschiedene Kombinationen von Absolut- und Differenzdruckaufnehmern unterschiedlicher Hersteller evaluiert. Es zeigte sich, dass die beste Messgenauigkeit erzielt werden kann, wenn als Referenzdruck der Totaldruck im Beruhigungsbehälter genommen wird und dazu alle Drücke in Differenz gemessen werden. Dabei wird der Absolutdruck im Beruhigungsbehälter über einen Druckaufnehmer der Firma Mensor mit einer Genauigkeit von 0,01% IS-50 bestimmt. Für die anderen Messstellen werden Druckaufnehmer der Firma Esterline mit einer Genauigkeit von $\pm 0,05\%$ Fullscale verwendet. Der Fullscalebereich wurde dabei, um ihn möglichst klein zu halten, gezielt auf die erwarteten Messbereiche ausgelegt.

Als weitere Maßnahme zur Erhöhung der Messgenauigkeit ist für die Messung des sensitiven Totaldrucks im Nachlauf ein weiterer Differenzdruckaufnehmer der Firma Mensor mit einer Genauigkeit von 0,01% Fullscale mit angepasstem Druckbereich vorgesehen.

Für die Messung der Temperatur wird ein Multimeter der Firma Agilent eingesetzt. Aufgrund der geringeren Sensitivität der Zielgrößen auf die Temperatur kommen hier handelsübliche Pt-100 Widerstandsthermometer der Toleranzklasse 1/10 B zum Einsatz.

3.5. Datenverarbeitung und -auswertung

Die Datenverarbeitung am Prüfstand erfolgt mit dem Programm LabView. Während der Messung werden sämtliche anfallende Daten unbearbeitet gespeichert, sodass das langsamste Messgerät eine angegebene Anzahl redundanter Daten zu einem Messpunkt generiert. In der Nachbearbeitung werden dann die Daten entsprechend gemittelt. Dadurch wird der komplette Pool an Daten im Sinne der Messgenauigkeit optimal ausgeschöpft. Darüber hinaus bleiben die Rohdaten nachvollziehbar und das Messprogramm wird durch die Reduzierung interner Mittelungen entlastet.

Während der Messung findet lediglich eine Auswertung im Sinne der Betriebsüberwachung (Mach- und Reynolds-zahlverlauf, Periodizitätsüberwachung, etc.) statt. Die eigentliche Auswertung erfolgt nach der Messung über eine automatisierte Routine, in der verschiedene Auswerteschemata ausgewählt werden können. Die angewendeten Berechnungsmethoden sind dabei identisch zu denen in der Numerik.

3.6. Fazit Messkonzept/Messgenauigkeit

Der Prüfstand wurde dahingehend optimiert hochgenau kleine Änderungen am Profil zu detektieren. Als wesentliche Maßnahmen sind zum einen die Messung von Differenzdrücken und die Referenzierung der Differenzdrücke auf den Beruhigungsbehälter (und nicht auf den Umgebungsdruck) zu nennen. Zum anderen werden hochgenaue Messtechnik, Druckaufnehmer mit angepasstem Druckbereich und differenzierte, bewusst platzierte Sonden eingesetzt.

Auf diese Weise wurde am Prüfstand ein Messkonzept umgesetzt, dass es ermöglicht die erwarteten Abweichungen eindeutig zu bestimmen.

4. NUMERIK

Um die experimentellen Arbeiten zu begleiten sind umfangreiche numerische Untersuchungen unabdingbar. Diese dienen dabei nicht nur dem besseren Verständnis der Experimente, sondern auch deren Vorbereitung. So ist es z.B. sinnvoll bereits vor Beginn der ersten Experimente numerische Voruntersuchungen durchzuführen, um die zu vermessenden Geometrien möglichst gezielt auswählen zu können. Damit geht jedoch einher, dass eine sehr große Anzahl an Rechnungen durchgeführt werden muss.

Aus diesem Grund wurde eine in weiten Teilen automatisierte Prozesskette entwickelt, welche hier vorgestellt werden soll. Aus Umfangsgründen soll hierbei nur auf die wichtigsten Teilaspekte der Prozesskette eingegangen werden.

4.1. Automatisierte Prozesskette

Die entwickelte Prozesskette zur effizienten Durchführung der Sensitivitätsuntersuchungen schließt alle Bereiche von der Geometrieerzeugung über die Geometriemanipulation, die Vernetzung, die Rechnungserstellung, die Lösung, bis zur Auswertung der Ergebnisse mit ein. Auf diese Weise ist es möglich ein großes Spektrum an möglichen Geometrien zu untersuchen. Da deren Anzahl jedoch ebenfalls durch die zur Verfügung stehenden rechentechnischen Ressourcen begrenzt wird, wurden in die Prozesskette Berechnungsmethoden und numerische Löser mit unterschiedlichem Abstraktionsgrad implementiert.

Als Standardlöser kommt der RANS-Löser TRACE zum Einsatz. Mit diesem können hierbei sowohl Rechnungen mit einer vollen 3D-Abbildung der Geometrie, als auch „quasidreidimensionale“ (Q3D) Rechnungen, in welchen nur der zweidimensionale Mittelschnitt der Kaskade abgebildet wird, durchgeführt werden. Außerdem wurde als weitere Möglichkeit der Eulerlöser MISES integriert. Weiter werden über die Prozesskette PDesk als Geometrieerzeuger, G3DMesh als Netzgenerator, GMC als Pre-Processor und Tecplot als Post-Processor eingebunden. Alle Programmteile werden dabei über die Skriptsprache Python miteinander gekoppelt, wie es schematisch in Bild 6 dargestellt ist.

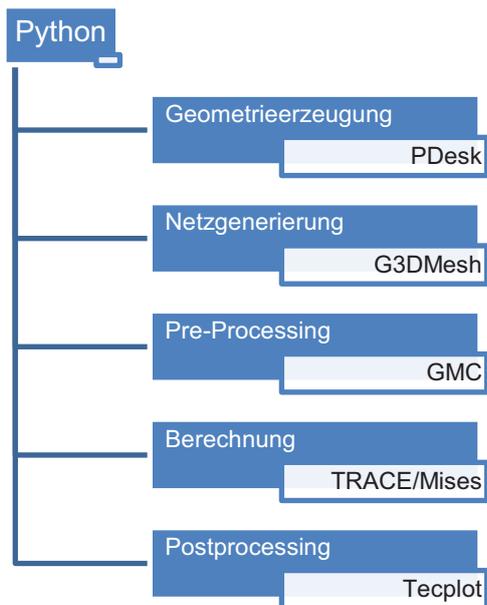


BILD 6. Kopplung der Prozessschritte und Programmteile

Hierbei ermöglicht Python nicht nur das Ansprechen der einzelnen Programme über online generierte Makros und den Datenaustausch unter ihnen, sondern ebenfalls in großem Umfang die Datenmanipulation und Auswertung.

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte der Prozesskette vorgestellt. Hinzuweisen ist hierbei darauf, dass alle Schritte ausschließlich von einer einzigen zentralen Parameterdatei definiert werden. Neben dieser sind zu Beginn einer Variationsuntersuchung lediglich eine Parameterdatei für die anfallenden Vernetzungen und eine xml-Datei mit der Ursprungsgeometrie notwendig.

4.1.1. Geometrieerzeugung und Manipulation

Am Beginn der hier vorgestellten Prozesskette, wie natürlich jeder numerischen Berechnung, ist es notwendig eine dem Untersuchungsziel angemessene Abbildung der gewünschten Geometrie bereitzustellen. Als Basis hierfür wurde in diesem Fall der Schaufeldesigner PDesk ausgewählt. In diesem ist die Ausgangsgeometrie der entsprechenden Beschaukelung in parametrisierter Form auf einzelnen Profilschnitten sowie die Kanalgeometrie im xml-Format hinterlegt. Auf diese Weise können die Geometrien beliebig anhand aller Design-Parameter (bspw. Radien, Winkel etc.) verändert werden, indem durch Python generierte Makros zum Einsatz kommen. Es ist so bereits möglich eine Vielzahl an Geometrieveränderungen abzubilden. Diese Variationen beschreiben im Grundsatz jedoch alle „Normabweichungen“. Also solche Geometrien, die theoretisch auch für eine Nominalschaukel in Frage kommen.

Sollen hingegen Abweichungen, insbesondere solche lokaler Art auf der Druck- und Saugseite, erzeugt werden, welche Fertigungsabweichungen entsprechen, ist PDesk als Schaufeldesigner nicht geeignet. Grund ist, dass es keine lokalen Abweichungen definieren kann. Es ist deswegen notwendig auf Grundlage der Daten der Ausgangsgeometrie aus PDesk die gewünschten Abweichungen nachträglich aufzubauen (vgl. Abbildung 7).

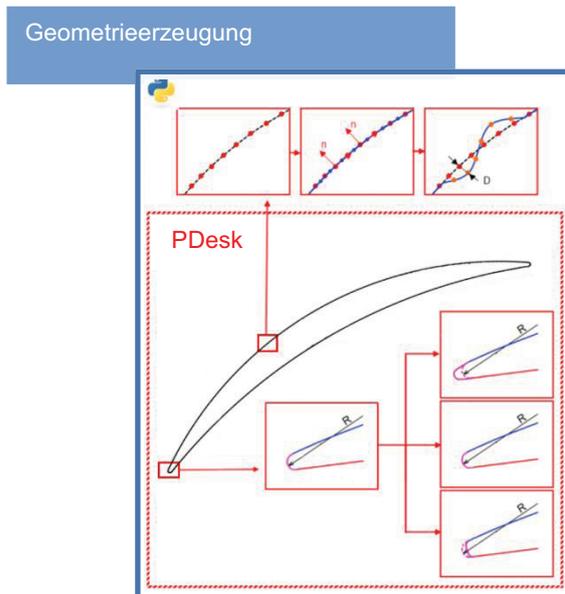


BILD 7. Grundsätzliche Arten der Geometriemanipulation

Hierzu werden die Daten in Form von Punktwolken für beliebige Profilschnitte exportiert und im Anschluss mit Hilfe kubischer Splines abgebildet. Dies ist erforderlich,

um durch die zusätzlichen Informationen der Interpolation, wie z.B. den Ableitungen, definierte Variationen aufprägen zu können. Auch ermöglicht die Interpolation eine nachträgliche lokale Verfeinerung der Punktdaten zur besseren Abbildung von Abweichungen.

Am Ende werden die Geometriedaten, sowohl bei einer Geometriemanipulation über PDesk, wie auch über Python, in eine für den anschließenden Netzgenerator geeignete Form konvertiert und gespeichert.

4.1.2. Netzgenerierung

Für die Netzgenerierung kommt der skriptbasierte Netzzeuger G3DMesh zum Einsatz, der sich besonders gut in eine Skriptumgebung einbinden lässt. Er ermöglicht es auf Grundlage einer identischen Parameterdatei für die Vernetzung aller auf derselben Basis fußenden Geometrievariationen topologische und von der Elementanzahl identische Netze zu erzeugen.

Zum Einsatz kommt für die hier interessierenden Verdichtungsprofile eine OCH-Topologie. Die Verwendung eines einzigen Parameter-Files ermöglicht es des Weiteren für die Berechnung sensible Parameter, wie bspw. die Wandauflösung, für alle vernetzten Geometrien als konstant festzuschreiben, sowie die Netzdichte sehr einfach anzupassen. Diese Möglichkeit wird genutzt um in Verbindung mit Python eine automatische Netzskalierung und eine y+ Anpassung zu ermöglichen. Auch können sowohl entsprechende Netze für eine Q3D sowie voll 3D Berechnung erstellt werden. In beiden Fällen wird das Gesamtnetz jeweils durch ein S1-Netz sowie ein S2M-Netz definiert.

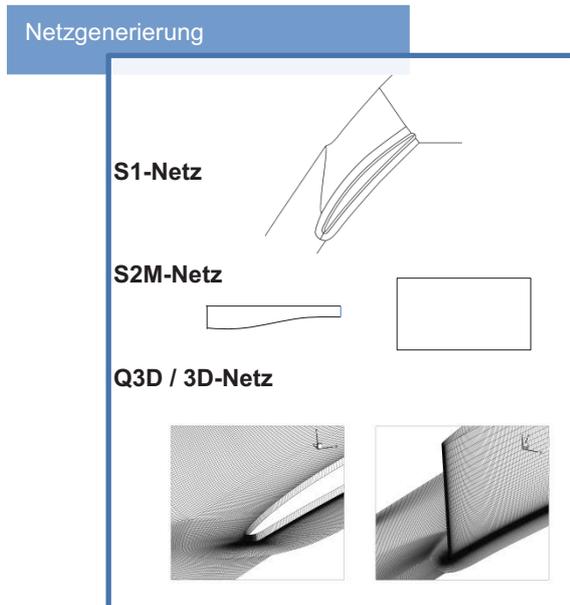


BILD 8. Netzgenerierung über S1- und S2M-Netz

Das S2M-Netz definiert im Q3D-Fall optional auch die Querkontraktion. Diese ist notwendig um den im Q3D-Fall fehlenden Einfluss der Seitenwandgrenzschichten nachzubilden, was durch eine zum 3D-Fall äquivalente kontinuierliche Kontraktion des Rechnernetzes in Strömungsrichtung geschieht. Der Verlauf der Kontraktion kann dabei linear über einen einzelnen Faktor oder basierend auf vorhergehenden 3D-Rechnungen beschrieben werden. Hierauf wird im Kapitel Post-Processing noch näher eingegangen.

4.1.3. Pre-Processing

Für die Definition der Rechnungen kommt im Kern das Tool GMC zum Einsatz, welches innerhalb der Prozesskette, wie der Schaufeldesigner PDesk, durch online erzeugte Makros angesprochen wird. Hierdurch wird es möglich nicht nur sämtliche Randbedingungen automatisiert zu setzen, sondern ebenfalls alle verwendeten Modelle. Hinsichtlich der Randbedingungen können dabei nicht nur einfache Werte direkt, sondern ebenfalls komplexe Randbedingungen über separat mit Python erzeugte Input-Files verwendet werden. Ein Beispiel hierfür ist die Angabe eines Grenzschichtprofils am Eintritt des Berechnungsgebietes. Dieses wird zunächst auf Grundlage der angegebenen Zulaufänge oder wahlweise der Grenzschichthöhe abgeschätzt und anschließend für die dem S2M-Netz entsprechenden Knotenverteilung bereitgestellt.

4.1.4. Löser

Als numerischer Löser kommt wie bereits erwähnt entweder der vom DLR entwickelte RANS-Löser TRACE zum Einsatz oder wahlweise der Eulerlöser MISES. Beide sind dabei vollständig in die Prozesskette eingebunden und ihr Aufruf erfolgt automatisch entweder lokal oder auf dem Hochleistungsrechencluster des Institutes.

4.1.5. Post-Processing

Wie die vorherigen Schritte der numerischen Prozesskette, erfolgt auch die Auswertung der produzierten Ergebnisse hochautomatisiert. Der größte Teil der Informationen wird dabei direkt mit Hilfe von Pythonskripten verarbeitet. Besonders soll hierbei auf die Verwendung der Impulsmitteilung nach Scholz [11] verwiesen werden. Bei dieser Methode werden die Strömungsgrößen einzelner Schnitte der zweidimensionalen mittleren S2M-Ebene mit Hilfe der Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie auf „homogenisierte“ Größen zurückgeführt.

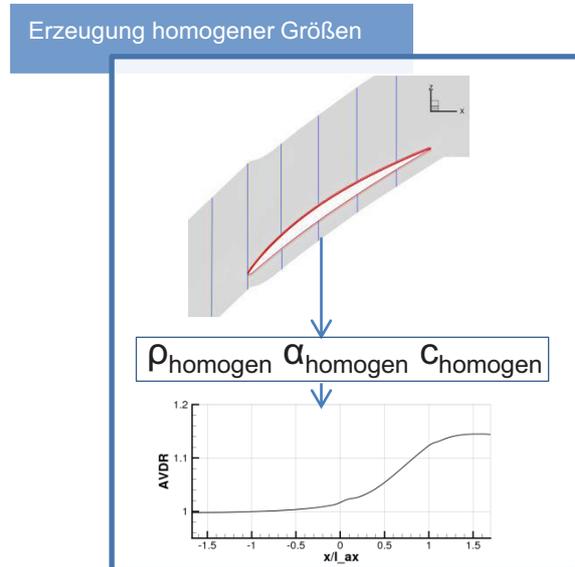


BILD 9. Bildung homogener Größen

Dies ermöglicht nicht nur das Bilden von globalen Bewertungsgrößen, wie dem Verlustbeiwert zwischen frei definierbaren Auswertebenen, sondern ebenfalls die Darstellung aller Strömungsgrößen im axialen Verlauf. Besondere Bedeutung gewinnt dies für die Ermittlung des Axial Velocity Density Ratio (AVDR) Verlaufes über das Berech-

nungsgebiet. Hierzu werden für eine vorher definierte Anzahl von vertikalen Schnitten der ausgemischte Strömungswinkel, die Strömungsgeschwindigkeit und die Dichte bestimmt und der jeweilige AVDR Wert gebildet. Dieser wiederum spiegelt direkt den Einfluss der Seitenwandgrenzschichten im dreidimensionalen Fall auf die Kontraktion der Kernströmung wieder. Der so ermittelte Verlauf der Querkontraktion kann dann benutzt werden um den Einfluss der Seitenwandgrenzschichten auch im Falle einer quasidimensionalen Rechnung zu berücksichtigen. Natürlich können auf diese Weise auch beliebige andere Zustandsgrößen im axialen Verlauf bestimmt werden, um einen besseren Eindruck des Strömungsfeldes zu erhalten.

Die letztendliche Darstellung erfolgt dann mit dem Post-Processor Tecplot, welcher die erzeugten Daten aller Prozessschritte verarbeitet. Erzeugt werden hierbei, für Einzelrechnungen sowie Variationsrechnungen, Übersichtsblätter, in welchen alle relevanten Daten wie bspw. Profilverläufe, Kenngrößen, gewählte Randbedingungen und Rechnungsverläufe zusammengefasst werden. Dargestellt sind in Bild 10 beispielhaft die automatisch erzeugten Profilverläufe des E/CA-2 Testcases.

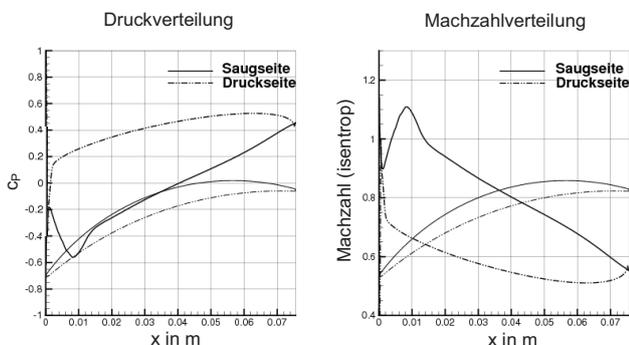


BILD 10. Profilverläufe einer Beispielrechnung für den Testcase E/CA-2

4.2. Anwendung und erste Ergebnisse

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse einer ersten Parameterstudie, sowie das entwickelte Vorgehen bzw. der Einsatz der Prozesskette vorgestellt werden. Als zu untersuchende Geometrievariation wurde hierzu die Betrachtung von Welligkeiten definiert. Diese wurden in Form einer Sinuswelle auf die Druck- bzw. Saugseite aufgebracht.

4.2.1. Definition der Welligkeiten

Bei der Grundform der aufzuprägenden Welle wurde sich für eine einfache Sinuswelle entschieden, welche über die Halbwellenlänge (HWL) und die Wellenhöhe (WH) definiert wird. Des Weiteren werden der Beginn sowie das Ende der Welligkeit auf der Druck bzw. Saugseite vorgegeben.

Am Anfang und Ende der Welligkeit wird diese durch eine Dämpfungsfunktion, jeweils bis zum ersten und ab dem letzten Maximum, überlagert. Dies stellt einen krümmungsstetigen Verlauf zwischen Originalprofil und aufgeprägter Welligkeit sicher. Abbildung 11 verdeutlicht an einem Beispiel die definierte Welligkeit.

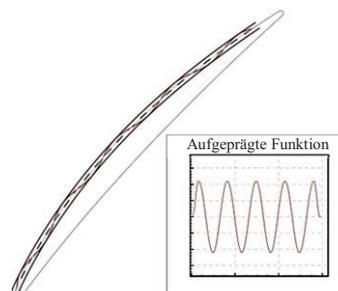


BILD 11. Welligkeit im Toleranzband (5-fach überhöht dargestellt) und aufgeprägte Funktion

4.2.2. Auswahl der ersten Welligkeiten

In einem ersten Schritt wurden die ausgewählten Welligkeiten über die gesamte Saugseite aufgeprägt. Dabei wurden für die Vorstudie 15 Welligkeiten definiert, welche sich aus fünf verschiedenen Halbwellenhöhen und drei Wellenlängen zusammensetzen. Auf diese Weise entsteht die in Bild 12 dargestellte Matrix. Um eine möglichst gute Vergleichbarkeit sicher zu stellen, wurden alle Welligkeiten so gewählt, dass sie jeweils aufsteigend beginnen und absteigend enden.

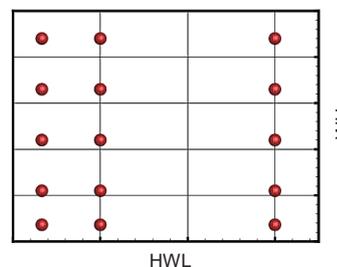


BILD 12. Definierte Welligkeiten

4.2.3. Methodisches Vorgehen

Hinsichtlich des methodischen Vorgehens wurden in einem ersten Schritt Rechnungen mit einer dreidimensionalen Abbildung der Geometrie durchgeführt. Hierbei wurden für einen ausgewählten Betriebspunkt zehn verschiedene Zuströmwinkel berechnet um eine aussagekräftige Verlustpolare zu erhalten. Aus diesen Rechnungen wurde der AVDR Verlauf über das Berechnungsgebiet für alle Zuströmwinkel bestimmt, welcher genutzt werden konnte um entsprechende Netze für die Q3D-Rechnungen zu erstellen. Die mit Hilfe dieser Netze für das Nominalprofil durchgeführten Rechnungen dienten als Grundlage bzw. Vergleichswerte für die Bewertung der verschiedenen aufgeprägten Welligkeiten. Auch diese wurden ausschließlich als Q3D-Rechnungen ausgeführt.

4.2.4. Numerische Ergebnisse

In diesem Abschnitt sollen die Ergebnisse der ersten Vorstudie vorgestellt werden. Dabei werden der beschriebenen Methodik aus 4.2.3 folgend zuerst die Ergebnisse der 3D-Rechnungen vorgestellt. Hierauf folgen die Ergebnisse der Q3D Rechnungen, welche kurz mit den Ergebnissen der 3D-Rechnung verglichen werden. Zum Abschluss werden die Ergebnisse der vorgenommenen Variationen vorgestellt.

4.2.4.1. 3D Nominalprofil

Als erster Schritt musste das gegebene Windkanalprofil möglichst genau berechnet werden. Hierzu kamen zunächst die aufwendigeren 3D Rechnungen zum Einsatz. Ziel war unter anderem den AVDR Verlauf zu ermitteln, welcher wichtig ist um adäquate Q3D-Rechnungen durchzuführen. In Abbildung 13 ist das erzeugte Netz mit insgesamt 100 über die Schaufelhöhe verteilten Knoten, und einem y^+ Wert von ≈ 1 auf der Schaufeloberfläche und der Seitenwand zu sehen. Die Eintrittsebene des Berechnungsgebietes wurde hier identisch zu der Messebene 1 des Experimentes festgelegt.

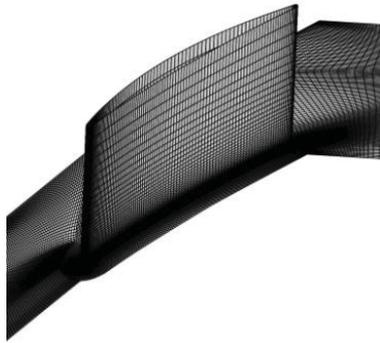


BILD 13. Netz für 3D-Rechnungen

Als Betriebspunkt wurde ein Punkt mit hoher subsonischer Zuströmmachzahl gewählt. Dieser entspricht typischen Werten des Profils und liegt im oberen linken Bereich des in Abbildung 3 dargestellten experimentellen Betriebsbereiches.

Um möglichst realitätsnahe Zuströmbedingungen zu erhalten, wurden neben den je Rechnung konstanten Größen Zuströmwinkel, Turbulenzintensität, Längenmaß und Totaltemperatur, der Totaldruck und die Machzahl als Grenzschichtprofil vorgegeben. Hierbei wurde von der in Kapitel 4.1.3 beschriebenen Möglichkeit Gebrauch gemacht, selbige über die Zulaufänge des Gitterwindkanals abzuschätzen. Am Austritt wurde der Massenstrom vorgegeben, um eine möglichst exakte Einstellung der Eintrittsmachzahl zu gewährleisten. Die weiteren verwendeten Modelle sind in Tabelle 3 gegeben.

Randbedingungen

Eintritt	$\beta_1, p_t, T_t, T_u, L_{TU}$
Austritt	dm/dt
Turbulenzmodell	$k-\omega$
Mittelschnitt	Symmetrie
Wandbehandlung	Low-Reynolds ($y^+ \approx 1$)
Transition	$\gamma-Re_\theta$ -Modell

TAB 2. Verwendete Randbedingungen

Als Ergebnis der Rechnungen ist in Abbildung 14 beispielhaft die Druckverteilung auf Schaufel und Seitenwand dargestellt.

Die maximale Machzahl auf dem Profil für den gewählten Betriebspunkt liegt nur geringfügig unterhalb von $Ma = 1,0$. Dies ist, wie sich später zeigen wird, ein wichtiger Punkt bei der Diskussion der durch die Welligkeiten auftretenden zusätzlichen Verluste.

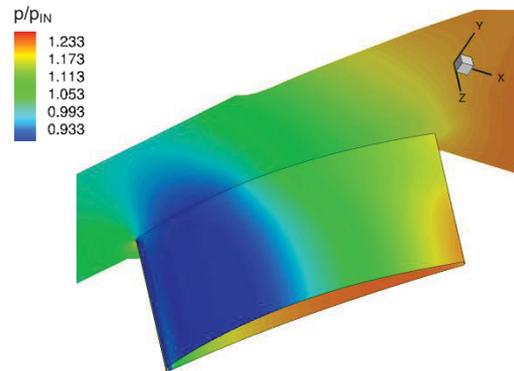


BILD 14. Druckverteilung für 3D-Rechnung

Aus den durchgeführten Rechnungen wurden die AVDR-Verläufe bestimmt. Abbildung 15 zeigt hierzu die AVDR-Werte über den Zuströmwinkel bei der Bildung zwischen Ein- und Austrittsebene.

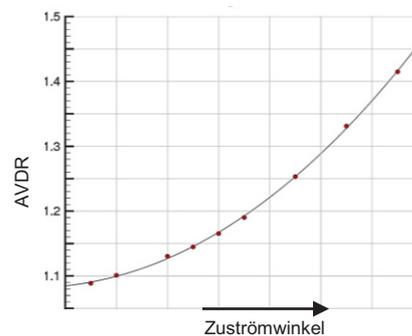


BILD 15. AVDR-Verlauf über Zuströmwinkel

Zu jedem Winkel gehört ein axialer AVDR-Verlauf, wie er exemplarisch in Abbildung 16 gezeigt ist. Dabei sind deutlich die drei Bereiche der Grenzschicht zu erkennen die sich im Verlauf des AVDR-Wertes widerspiegeln. Zuerst wächst die Kontraktion bis zur Schaufelvorderkante moderat durch die natürlich mit der Lauflänge wachsende Grenzschichtdicke an. Dies verursacht, wie auch im Experiment, dass sich direkt vor dem Gitter eine leicht höhere Machzahl einstellt als in der Eintrittsebene. Hierauf folgt ein sehr starker Anstieg im Gitter selbst, welcher durch die Verzögerung der Grenzschicht hervorgerufen wird und die Kenngrößen des Gitters maßgeblich mitbestimmt. Im dritten Bereich hinter dem Schaufelgitter findet dann noch eine leichte Kontraktion auf den Endwert statt.

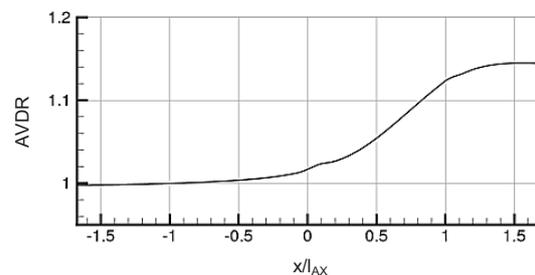


BILD 16. Beispielhafter AVDR-Verlauf

4.2.4.2. Q3D Nominalprofil

Die Q3D-Rechnungen wurden mit den gleichen Randbedingungen und auf Basis des gleichen S1-Netzes durchgeführt wie für den 3D-Fall. Einzige Ausnahme stellt die Seitenwand dar, bei welcher es sich nun um eine nichtvis-

kose Wand handelt und welche dem vorher berechneten AVDR-Verlauf folgend die Querkontraktion vorgibt. Abbildung 17 zeigt links die Abweichung des c_P -Wertes zwischen 3D- und Q3D-Rechnung und rechts die überlagerten Nachlaufprofile beider Rechnungen im direkten Vergleich.

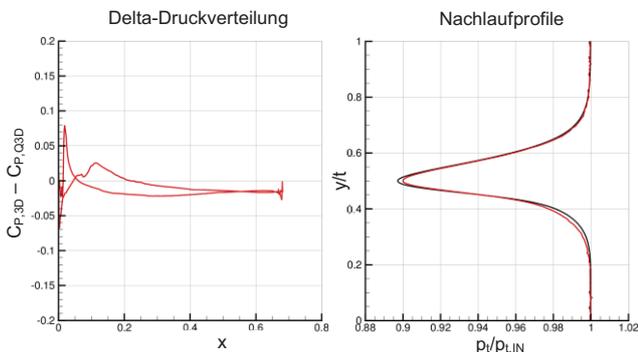


BILD 17. Vergleich von 3D- und Q3D-Rechnung anhand des c_P -Verlaufs und der Nachlaufprofile

Der sehr sensitive c_P -Wert zeigt dabei nur geringe Abweichungen und auch die Nachlaufprofile zeigen eine sehr gute Übereinstimmung. Es wurde deswegen davon ausgegangen, dass sich auch die Tendenzen der Welligkeiten durch die Q3D-Rechnungen korrekt voraussagen lassen. In Abbildung 18 ist die berechnete Verlustpolare, welche hierdurch nun als Vergleichsgrundlage für die Variationen dienen kann, mit den gewählten Bewertungsgrößen dargestellt.

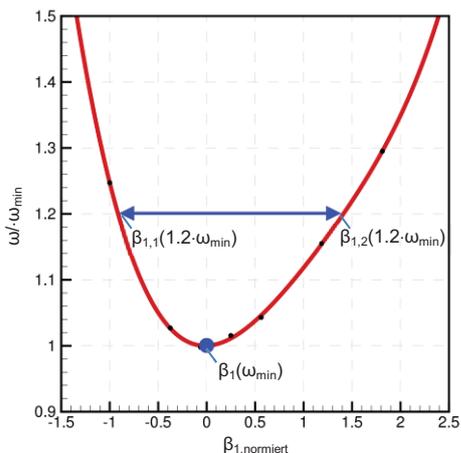


BILD 18. Verlustpolare der Q3D-Rechnung mit Bewertungsgrößen

4.2.4.3. Q3D Welligkeiten

Nach den 3D- sowie Q3D-Rechnungen erfolgte die Berechnung der mit den Welligkeiten variierten Geometrien. Aufgeprägt wurden die bereits unter 4.2.2 genannten Variationen. Abbildung 19 zeigt das Ergebnis der Rechnungen zunächst anhand der Verlustpolaren. Es sind links die Verlustpolaren mit steigender Wellenhöhe bei minimaler Wellenlänge und rechts bei maximaler Wellenhöhe und steigender Wellenlänge dargestellt. Es ist zu sehen, dass die Verluste sowohl mit steigender Wellenhöhe (HWL = konstant) als auch mit sinkender Wellenlänge (WH = konstant) anwachsen und bei minimaler Wellenhöhe bzw. maximaler Wellenlänge mit dem glatten Nominalprofil (rot dargestellt) übereinstimmen.

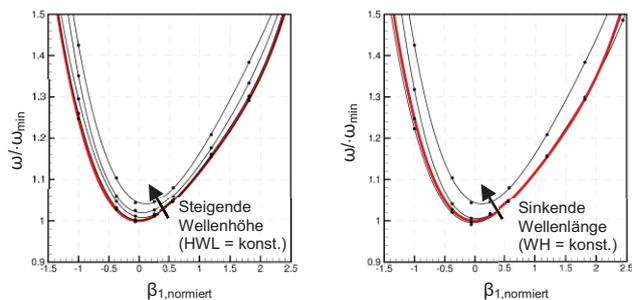


BILD 19. Auswirkung der Welligkeit (schwarz) auf die Verlustpolare im Vergleich zum Nominalprofil (rot)

Noch übersichtlicher lässt sich dies darstellen, wenn eine zusätzliche Bewertungsgröße definiert wird. In diesem Fall ist dies das Produkt aus dem minimalen Verlustbeiwert und der Verlustpolarenbreite (vgl. Abbildung 18) jeweils relativ zum Nominalprofil, was im Folgenden als Verluststeigerung Ω bezeichnet werden soll. Hierbei ermöglicht die Einbeziehung nicht nur des minimalen Verlustes, sondern auch des Arbeitsbereiches über die Polarenbreite, eine umfassendere Bewertung des Einflusses der aufprägten Variationen. Für die berechneten Welligkeiten ist das Ergebnis in Abbildung 20 dargestellt.

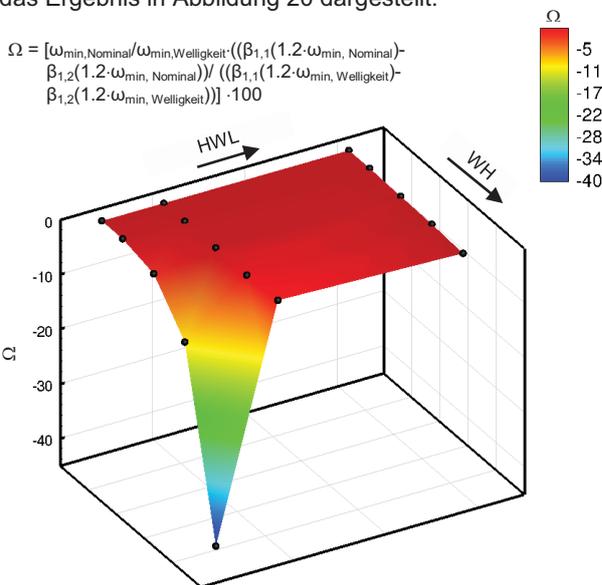


BILD 20. Verlustanstieg durch die Welligkeit

Es wird deutlich, dass sowohl die Vergrößerung der Wellenhöhe als auch die Verringerung der Wellenlänge einen deutlicheren Einfluss auf die Verluststeigerung haben. Hierbei hat die Wellenhöhe einen direkten Einfluss, wohingegen die Wellenlänge zu großen Teilen über die Position des Wellenmaximums auf dem Profil einght. Betrachtet man hierzu die Machzahlverteilung im Mittelschnitt (vgl. Abbildung 21), wird der Grund hierfür deutlich.

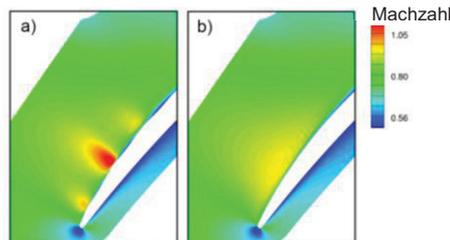


BILD 21. Machzahlvergleich Welligkeit a) - Nominalprofil b)

Oberhalb der Maxima der Welligkeiten bildet sich ein Gebiet lokaler Übergeschwindigkeit aus. Da auf dem Profil bei dem gegebenen Betriebspunkt jedoch schon im Ausgangsfall isentrope Machzahlen knapp unter 1 vorliegen, führt dies zu Überschallgebieten. Es ist zu vermuten, dass hier der überwiegende Teil der zusätzlichen Verluste, welcher bei der gewählten hohen subsonischen Zuströmung zu beobachten ist, generiert wird. Eine Bestätigung findet dies bei der Betrachtung von Rechnungen für verschiedene Zuströmmachzahlen. In Abbildung 22 ist hierzu die Totaldruckdifferenz zwischen Ein- und Austrittsebene als Verlustkenngröße aufgetragen.

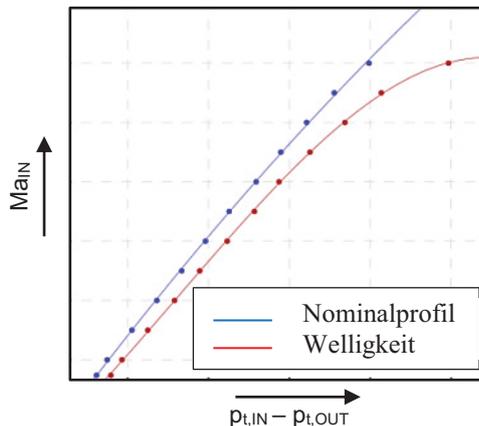


BILD 22. Totaldruckdifferenz Welligkeit zu Nominalprofil mit steigender Eintrittsmachzahl

So ist der Verlustzuwachs bei gleicher aufgeprägter Welligkeit über einen großen Machzahlbereich nahezu konstant. Erst bei hinreichend hohen Zuströmmachzahlen, bei welchen die maximale Profilmachzahl hoch genug ist, steigen die Verluste durch den beschriebenen Effekt stark an. Ein Faktor welcher hierdurch in den Hintergrund gedrängt wird, die Verluste aber ebenfalls stark mitbestimmt und von den aufgebrauchten Welligkeiten beeinflusst wird, ist der Transitionsvorgang. Im Fall der vorliegenden Rechnungen ist dessen Einfluss, auch durch die Wahl einer Freistromturbulenz am Eintritt im maschinenähnlichen, mittleren einstelligen Prozentbereich, im Vergleich gering. So setzt der Transitionsvorgang bereits kurz hinter der Vorderkante der Schaufel ein, wodurch die Welligkeit diesen nur noch gering beeinflussen kann.

5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In der Einleitung wurden ausführlich die Wichtigkeit der Thematik kleinskaliger Geometrieabweichungen und der Forschungsbedarf in diesem Bereich dargelegt. In diesem Sinne wurden am IST Untersuchungen angestoßen, die experimentell am ebenen Gitterwindkanal durchgeführt werden und stark durch numerische Betrachtungen begleitet werden sollen.

Es wurde zuerst der Prüfstand mit seinen messtechnischen Möglichkeiten bzw. das umgesetzte Konzept vorgestellt. Danach wurden die Methoden und insbesondere die entwickelte Prozesskette beschrieben. Anhand von kleinskaligen Welligkeiten, als eine mögliche Geometrievariation, wurde die Leistungsfähigkeit der Prozesskette demonstriert. Es zeigte sich, dass die Welligkeit einen signifikanten Einfluss auf die Verluste im Schaufelgitter hat. Hierbei hatte die Wellenhöhe einen größeren Einfluss auf die Verluste, als die Wellenlänge. Zu vermuten ist, dass dies an den sich ausprägenden Gebieten lokaler Übergeschwindigkeit oberhalb der Wellenmaxima liegt. Besonde-

ren Einfluss gewinnt dies, wenn es durch eine ohnehin hohe Profilmachzahl in diesen Gebieten zu einer Überschallströmung kommt. Der vorhergesagte Verlustzuwachs liegt dabei im Bereich der abgeschätzten Messgenauigkeit des diesbezüglich optimierten ebenen Gitterwindkanals. Damit eignen sich die definierten Variationen grundsätzlich für eine experimentelle Untersuchung. Es gilt nun die numerischen Ergebnisse dahingehend auszuwerten, dass besonders aussagekräftige Abweichungen für die Experimente ausgewählt werden können. Auf diese Weise können die numerischen Ergebnisse validiert und entsprechende Sensitivitäten abgeleitet werden. Ziel ist es damit, wie beabsichtigt, einen Beitrag zum Verständnis kleinskaliger Geometrieabweichungen an Verdichterschaufeln zu leisten.

LITERATURANGABEN

- [1] Ang D., Chen L., Tu T.: "Unsteady RANS Simulation of High Reynolds Number Trailing Edge Flow", 15th Australian Fluid Mechanics Conference, 2004
- [2] Bammert K., Milsch R.: „Das Verhalten der Grenzschichten an rauhen Verdichterschaufeln“, Forsch. Ing.-Wes. Bd. 38, 1972
- [3] Benner, Sjolander, Moustapha: "Influence of Leading-Edge Geometry on Profile Losses in Turbines at Off-Design Incidence", Journal of Turbomachinery Vol. 119, 1997
- [4] Garzon V. E., Darmofal D. L.: "Impact of geometric variability on axialcompressor performance", Journal of Turbomachinery, 125(4):692–703, 2003
- [5] Garzon V. E., Darmofal D. L.: "On the aerodynamic design of compressorblades for robustness under geometric uncertainty", In Proceedings of the ASME Gas Turbo Expo, number GT2004-53581, American Society of Mechanical Engineers, 2004.
- [6] Hönen, H., Ellenberger K: "Jet Engine Compressor Blade Refurbishment by Application of the Advanced Re-contouring Process", ASME 2003, GT2003-38721, 2003
- [7] Jeschke, P.: „Dynamisierung der Gestaltungsprozesse von Flugtriebwerken“ Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress DGLR-2010-161333, 2010
- [8] Lange A., Voigt M., Vogeler K., Schropp H., Johann E., Gümmer V.: "Impact of manufacturing variability and non-axisymmetry on high-pressure compressor stage performance", ASME Turbo Expo, GT2011-45718, Vancouver, 2011; Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, GTP-11-1154
- [9] Narasimha R., Prasad S.: "Leading edge shape for flat plate boundary layer studies", 1994
- [10] Paterson E., Peltier L.: "Detached-Eddy Simulation of High-Reynolds-Number Beveled-Trailing-Edge Boundary Layers and Wakes", Journal of Fluids Engineering Vol. 127, 2005
- [11] Scholz N.: "Über die Durchführung systematischer Messungen an ebenen Schaufelgitter", ZfW 4, 1956
- [12] Suder, Chima, Strazisar, Roberts: "The Effect of Adding Roughness and Thickness to a Transonic Axial Compressor Rotor", Journal of Turbomachinery Vol. 117, 1995
- [13] Xing X., Damodaran M.: "Optimal Design of Transonic Fan Blade Leading Edge Shape Using CFD and Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation Method", Singapore