

Eine Methode zur schnellen Fanlärmrechnung basierend auf einem aerodynamischen Mehrschnittverfahren

Robert Meier zu Ummeln¹, Dr. Antoine Moreau²

¹ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 10623 Berlin, Deutschland, Email: Robert.MeierzuUmmeln@dlr.de

² Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 10623 Berlin, Deutschland, Email: Antoine.Moreau@dlr.de

Einleitung

Um in der Vorauslegung eines Flugzeugtriebwerks die Akustik berücksichtigen zu können, ist es aufgrund der kurzen Entwicklungszyklen notwendig, schnelle Lärmvorhersagen machen zu können. Hierzu bietet sich beispielsweise eine analytische Berechnung der Schallquellen im Frequenzbereich an. Da die Strömungsakustik am Turbofan eines Triebwerks insbesondere beim Abflug eine der dominantesten Lärmquellen ist, bildet die Strömungsberechnung am Fan eine wichtige Grundlage für die Lärmvorhersage.

Das in der Abteilung für Triebwerksakustik (DLR, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) entwickelte Fanakustik-Vorhersage-Tool PropNoise [1] basiert auf einer Schaufel-Antwort-Funktion ähnlich zu AMIET [2], welche die Stärke der akustischen Dipole entlang der Schaufelhöhe berechnet. Daraus wird der abgestrahlte Druck mittels einer GREEN'schen Transferfunktion berechnet. Das Schallfeld wird anhand von Kanalmoden beschrieben. Es ist außerdem unter anderem möglich, die Berechnung der Aerodynamik über einen einfachen Mittelschnittansatz durchzuführen [1]. Dieser Ansatz unterliegt naturgemäß gewissen Einschränkungen, ist aber in der Lage, gute qualitative Abschätzungen für das Strömungsfeld zu liefern [3][4]. Alternativ existiert die Möglichkeit, das Strömungsfeld aus einer 3D-RANS (REYNOLDS-averaged NAVIER-STOKES equations) Berechnung zu extrahieren [5], was die Genauigkeit der Ergebnisse verbessert, aber auch den Rechenaufwand für die Bestimmung des Strömungsfelds erhöht.

Eine weitere schnelle und hinreichend präzise Methode bietet die Berechnung des Strömungsfelds mithilfe eines Mehrschnittansatzes (sogenannte Throughflow-Solver), der insbesondere in der Vorauslegung weit verbreitet ist [6][7]. Die Meridianströmung wird hierbei in der Regel über ein Stromlinienkrümmungsverfahren berechnet. Die radiale Verteilung der Strömungsgrößen wird über eine radiale Kraft- und Impuls-Gleichgewichts-Beziehung bestimmt. Durch die Erweiterung mit weiteren Modellen können unter anderem Kanalwandeffekte, wie Wandgrenzschichten und Blattspitzenwirbel, berücksichtigt werden.

In diesem Beitrag wird eine erste Anwendung des neuen Ansatzes gezeigt, wobei die neue Methode dazu genutzt wird, die Lärmemission eines modernen Fans mit hohem Nebenstromverhältnis abzuschätzen und die Ergebnisse mit den anderen beiden Methoden zur Bestimmung des Strömungsfelds gegenüberzustellen und auszuwerten.

Anwendungsfall: DLR-UHBR-Fanstufe

Um die drei zuvor genannten Verfahren vergleichen zu können, werden die aerodynamischen und akustischen Berechnung an einer DLR-UHBR-Fanstufe (Ultra High Bypass Ratio) durchgeführt und gegenübergestellt. Diese Fanstufe wurde am Institut für Antriebstechnik (DLR) ausgelegt [8] und besitzt in etwa ein Größenverhältnis von 1:3 zu einer Fanstufe in einem realen Triebwerk mit einem Nebenstromverhältnis von etwa 12 im Auslegungspunkt. Der Fan ist somit repräsentativ für einen modernen, langsam drehenden Fan eines Triebwerks mit hohem Nebenstromverhältnis. Er wurde auch konstruiert und an einem Prüfstand beim DLR in Köln betrieben, sodass auch aerodynamische und akustische Messungen vorhanden sind. Insbesondere zum Approach-Betriebspunkt (Landeanflug) sind viele Studien sowie numerische Simulationen vorhanden.

Die wichtigsten Kenngrößen zur UHBR-Fanstufe sind in der Tabelle 1 aufgeführt. Die Stator-Blattzahl wurde so gewählt, dass die erste Harmonische der Blattfolgefrequenz in diesem Betriebspunkt nicht ausbreitungsfähig ist. Da der Rotor in diesem Betriebspunkt außerdem auf einer relativ niedrigen Drehzahl läuft, entstehen am Fan keine Überschallgebiete, die zu zusätzlicher Schallerzeugung führen könnten.

Tabelle 1: Kenngrößen der DLR-UHBR-Fanstufe zur Geometrie und zum Approach-Betriebspunkt.

Geometrie	
Rotordurchmesser d	0,8 m
Rotorblattzahl B	22
Statorblattzahl V	38
Approach-Betriebspunkt	
Relative Blattspitzenmachzahl $M_{\text{tip,rel}}$	0,4
Axiale Machzahl am Rotor M_x	0,26
Nebenstromverhältnis μ (Design)	ca. 12

Vergleich der drei aerodynamischen Verfahren

Die unterschiedliche Vorgehensweise dieser drei Verfahren zur Bestimmung der Strömungsakustik am Fan ist in einer Übersicht in Abbildung 1 dargestellt. Der 1D-Mittelschnittansatz benötigt eine radiale Extrapolation der stationären und instationären Strömungsgrößen für die analytische Modellierung der Fanakustik. Für den 2D-Mehrschnittansatz wird die Berechnung der stati-

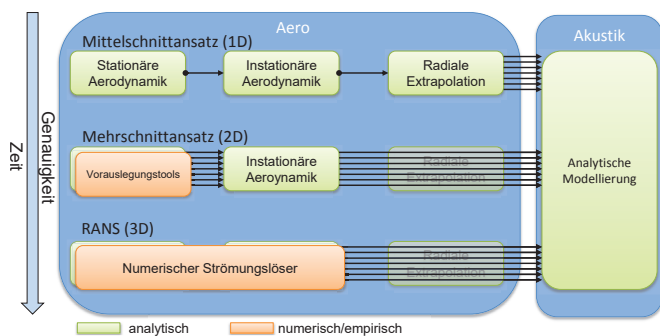


Abbildung 1: Vergleich der drei hybriden Verfahren zur Berechnung der Fan-Akustik, welche sich hauptsächlich in der Berechnung des Strömungsfelds unterscheiden.

onären Aerodynamik durch das in der Abteilung für Fan und Verdichter (DLR) entwickelte Tool ACDC [9] durchgeführt. Dieses ist wiederum im Vorauslegungstool GTlab der Abteilung für Triebwerke (DLR) implementiert, sodass auch Leistungsparameter über das Triebwerk bekannt sind. Beim 3D-RANS-basierten Ansatz werden Informationen über die instationäre 3D-Strömung, wie Turbulenz oder die Nachläufe des Rotors, direkt aus dem numerischen Strömungslöser TRACE gewonnen, welcher in der Abteilung für Numerische Methoden (DLR) entwickelt wird. Alle drei Verfahren beruhen auf der selben analytischen Modellierung der Akustik.

Im Folgenden werden die radial verteilten Strömungsgrößen näher untersucht, die aus den zuvor genannten, aerodynamischen Verfahren bestimmt werden konnten und insbesondere auf die Berechnung des Nachlauf-Interaktions-Lärms zwischen Rotor und Stator einen großen Einfluss haben. Dieser stellt im subsonischen Betrieb des Fans die dominante Schallquelle dar.

Die Abbildung 2 zeigt die Verteilung des Gesamtverlustkoeffizienten $\omega_{\text{tot}} = \Delta P_t / (P_{t1} - P_1)$ über die normierte Schaufelhöhe des Rotors. Der schwarze Punkt stellt die Lösung des 1D-Mittelschnittverfahrens auf 70% Kanalhöhe dar. Die rote und blaue Linie sind jeweils die Ergebnisse des 2D-Mehrschnitt- und 3D-RANS-Verfahrens. Es fällt auf, dass das 1D- und 2D-Ergebnis auf der entsprechenden Kanalhöhe eine gute Übereinstimmung aufweisen und das 2D- und 3D-Ergebnis eher auf 80% Schaufelhöhe. Im Bereich 20-60% und in den Randbereichen weichen die Ergebnisse stärker voneinander ab.

Für die genannte Rotor-Stator-Interaktions-Schallquelle ist der viskose Profilverlustkoeffizient für das 1D- und 2D-Verfahren maßgeblich. Über den Profilverlust werden zunächst die Grenzschichtdicken auf der Schaufel-Ober- und -Unterseite des Rotors bestimmt, woraus wiederum die Geschwindigkeitsdefizite im Nachlauf des Rotors modelliert werden. Diese Strömungsgeschwindigkeiten werden als instationäre Größen im Frequenzbereich berechnet und in einen mittleren und einen turbulenten Anteil unterteilt. Für das 3D-Verfahren werden die Nachläufe direkt aus der RANS-Mischungsebene zwischen Rotor und Stator extrahiert. Daher ist der Verlustkoeffizient hier von untergeordneter Relevanz.

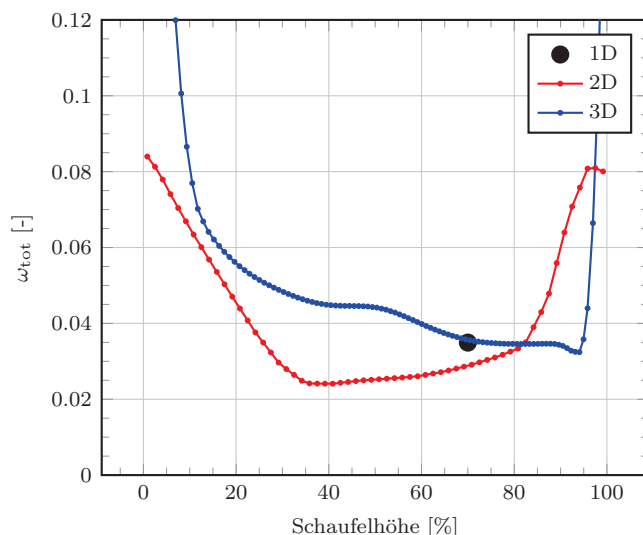


Abbildung 2: Gesamtverlustkoeffizient ω_{tot} für das 1D-Verfahren am Mittelschnitt (schwarz) sowie die radiale Verteilung des Koeffizienten über die Schaufelhöhe für das 2D-Mehrschnitt- (rot) und 3D-RANS-Verfahren (blau).

Das Strömungsverhalten an der Stator-Eintrittsebene wird in den Abbildungen 3 und 4 wiedergegeben. Hierzu sind die Strömungs-Geschwindigkeit und -Winkel über die normierte Schaufelhöhe aufgetragen. Für das 1D-Verfahren wurden die Größen zunächst im Mittelschnitt berechnet und dann radial extrapoliert. Beide Größen weisen ähnliche Ergebnisse für die drei Verfahren auf. Insbesondere am Mittelschnitt, der mit der gestrichelten Linie markiert ist, liegen die Werte sehr nah beieinander. Allerdings sind die Kanalwandeffekte beim 3D-Verfahren deutlich stärker ausgeprägt, sodass jeweils an der Blattspitze und an der Nabe die Strömungsgeschwindigkeit stark absinkt und der Strömungswinkel stark zunimmt. Die Abweichungen zu den RANS-Ergebnissen kommen teilweise auch dadurch zustande, dass der Strömungslöser für das Mehrschnittverfahren die Staffelungs- und Metallwinkel der Schaufelreihen leicht anpasst.

Vergleich der akustischen Ergebnisse

Nachfolgend werden, wie zuvor angekündigt, der breitbandige und der tonale Anteil der Nachlaufinteraktions-Schallquelle anhand der DLR-UHBR-Fanstufe untersucht. Es wird verglichen, wie sich die unterschiedlichen Berechnungen der Strömung auf die akustischen Ergebnisse des analytischen Verfahrens auswirken. Die Verbindung zwischen Aerodynamik und Schalleistung stellt jeweils die aerodynamische Anregung ζ dar, welche sich über den frequenzabhängigen, instationären Auftriebsbeiwert $c_L(f)$ bestimmen lässt:

$$\zeta = \frac{1}{2} \rho W^2 c_L(f) \quad [\text{Pa}] \quad (1)$$

Breitbandiger Anteil der Nachlaufinteraktion

Das Ergebnis des breitbandigen Schalleistungsdichte-Spektrums PSD für die Nachlaufinteraktions-Schallquelle

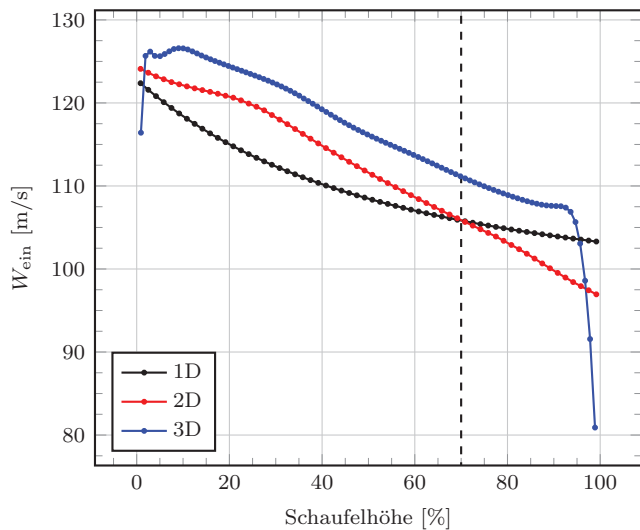


Abbildung 3: Radiale Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit W an der Stator-Eintrittsebene. Die Schaufelhöhe für den Mittelschnitt ist als gestrichelte Linie eingezeichnet.

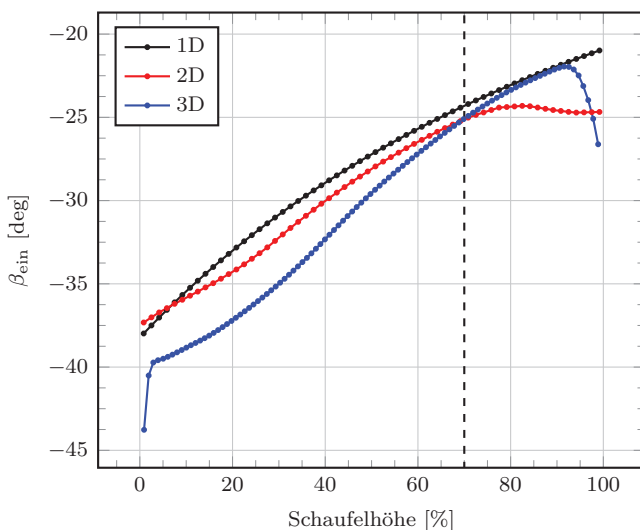


Abbildung 4: Radiale Verteilung des Strömungswinkels β an der Stator-Eintrittsebene. Die Schaufelhöhe für den Mittelschnitt ist als gestrichelte Linie eingezeichnet.

ist in Abbildung 5 dargestellt. Es wird deutlich, dass der qualitative Verlauf des Spektrums ähnlich ist, es aber gleichzeitig eine große Diskrepanz von bis zu 25 dB zwischen dem 1D- und 2D-Verfahren auf der einen Seite und dem 3D-Verfahren auf der anderen Seite gibt.

Die bereits in Gleichung 1 definierte und in Abbildung 6 dargestellte aerodynamische Anregung weist auch große Unterschiede zum RANS-basierten Verfahren auf. Diese Auffälligkeit wurde für den Breitbandlärm bereits in früheren Studien festgestellt [10]. Da im 3D-Verfahren die Turbulenzgrößen, wie die turbulente kinetische Energie und das turbulente Längenmaß, direkt aus der numerischen Simulation extrahiert werden, liegt die Vermutung nahe, dass die Modellierung dieser Größen in den anderen beiden Verfahren zu einer Unterschätzung der Anregung führt.

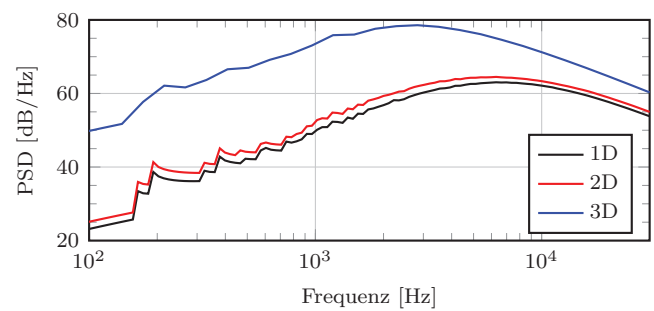


Abbildung 5: Breitbandige Schalleistungsichte als Frequenzspektrum für die Nachlaufinteraktions-Schallquelle.

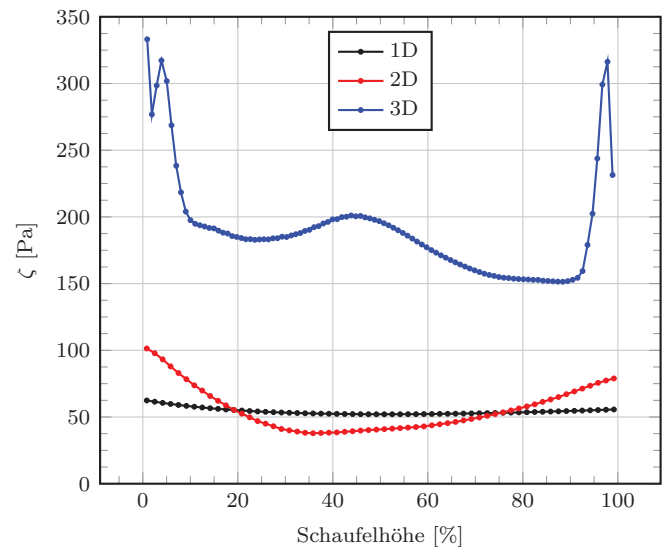


Abbildung 6: Radiale Verteilung der aerodynamischen Anregung ζ für den breitbandigen Anteil der Nachlaufinteraktions-Schallquelle.

Tonaler Anteil der Nachlaufinteraktion

In Abbildung 7 sind die Schalleistungspegel PWL stromauf und stromab von der Schallquelle für die zweite bis vierte Harmonische der Blattfolgefrequenz (engl. Blade Passing Frequency, BPF) dargestellt. Zusätzlich zu den drei verglichenen Verfahren liegen außerdem die Pegel einer instationären numerischen Simulation basierend auf dem Harmonic Balance (HB)-Verfahren (gelb) und der stromaufwärts gemessenen Akustik (grau) vor. Diese sollen zum derzeitigen Stand der Arbeiten lediglich als Richtwerte dienen.

Es ist zu erkennen, dass die PWL-Werte besser getroffen werden als dies beim breitbandigen Anteil der Fall ist. Insbesondere stromabwärts liefert das 3D-RANS-Verfahren zufriedenstellende Ergebnisse. Darauf folgen das 2D- und das 1D-Verfahren, was der zu erwartenden Abstufung in der Genauigkeit entspricht. Stromaufwärts überschätzen die drei Verfahren teilweise die Ergebnisse aus der instationären Simulation und den Messungen.

Ein Vergleich des Betrags der komplexwertigen, aerodynamischen Anregung für die zweite Blattfolgefrequenz in Abbildung 8 zeigt, dass die Ergebnisse näher beieinander liegen, als das in Abbildung 6 der Fall ist. Der Verlauf ist

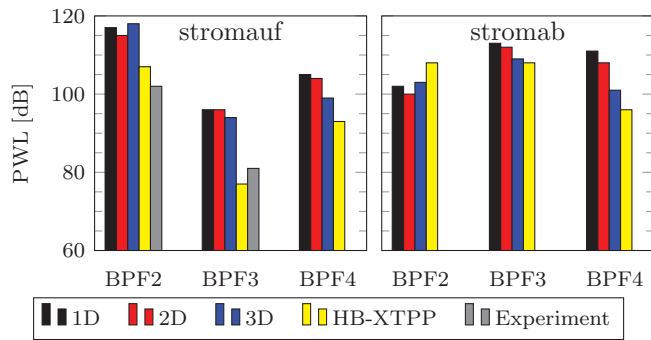


Abbildung 7: Tonaler Schalleistungspegel der zweiten bis vierten Harmonischen der Blattfolgefrequenz (BPF) stromauf und stromab der Nachlaufinteraktions-Schallquelle.

für alle drei Verfahren grundsätzlich ähnlich, wobei die Randbereiche beim 3D-Verfahren wieder stärker ausgeprägt sind.

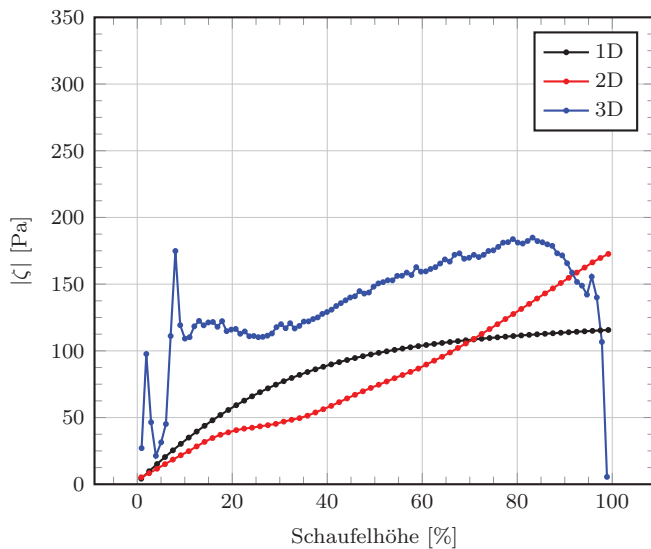


Abbildung 8: Radiale Verteilung der absoluten, aerodynamischen Anregung $|\zeta|$ für die zweite Harmonische der Blattfolgefrequenz des tonalen Anteils der Nachlaufinteraktions-Schallquelle.

Fazit

Es konnte anhand einer Anwendung an der DLR-UHBR-Fanstufe im Approach-Betriebspunkt für die drei verschiedenen Verfahren zur Bestimmung des Strömungsfelds am Fan gezeigt werden, dass das 2D-Mehrschnittverfahren als Grundlage für die analytische Fanakustik-Berechnung in der Vorauslegung eingesetzt werden kann. Es zeigten sich allerdings noch einige problematische Bereiche insbesondere im Zusammenhang mit der Vorhersage des breitbandigen Nachlaufinteraktionslärms. Hierbei wurden Defizite in der Turbulenzmodellierung des Mittelschnitt- und Mehrschnittverfahrens festgestellt. Daher wäre langfristig eine Überarbeitung dieser Modellierung sinnvoll, um die Abschätzung des Breitbandschallpegels zu verbessern.

Des Weiteren erscheint eine nähere Betrachtung der

Einflüsse von Randeffekten, wie Blattspitzenwirbel oder Kanalwandgrenzschichten, sinnvoll, da diese einen signifikanten Beitrag zu dem Gesamtverlust und somit zu den Störungen stromauf des Stators haben. Sollte sich herausstellen, dass diese Effekte einen großen Einfluss auf die akustischen Ergebnisse haben, wäre eine Berücksichtigung zu empfehlen. Insgesamt ist es erstrebenswert mehr Vergleichsstudien durchzuführen, um die Systematik in den festgestellten Diskrepanzen zwischen den drei Verfahren bestätigen zu können.

Literatur

- [1] Moreau, A.: A unified analytical approach for the acoustic conceptual design of fans of modern aeroplanes. Berlin, Technische Universität Berlin, Doctoral Thesis, 2016
- [2] Amiet, R. K.: High frequency thin-airfoil theory for subsonic flow. In: AIAA Journal Bd. 14 (1976), Nr. 8, S. 1076–1082
- [3] Moreau, A.; Guérin, S.: The impact of low-speed fan design on noise: An exploratory study. In: Journal of Turbomachinery Bd. 138 (2016), Nr. 8
- [4] Moreau, A.: Vergleichende Vorhersage von Propulsoren-Lärm, LuFo V LiST Projekt T2.3 (Abschlussbericht). Berlin : DLR Antriebstechnik, Triebwerksakustik, 2018
- [5] Jaron, R.: Aeroakustische Auslegung von Triebwerksfans mittels multidisziplinärer Optimierungen. Berlin, Technische Universität Berlin, Doctoral Thesis, 2018
- [6] Dunham, J.: Modelling of spanwise mixing in compressor through-flow computations. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy Bd. 211 (1997), Nr. 3, S. 243–251
- [7] Adkins, G. G.; Smith, L. H.: Spanwise mixing in axial-flow turbomachines. In: Journal of Engineering for Power. Bd. 104. Houston, Texas, USA : ASME, 1982, S. 97–110
- [8] Kaplan, B.; Nicke, E.; Voss, C.: Design of a highly efficient low-noise fan for ultra-high bypass engines. In: Volume 6: Turbomachinery, Parts A and B. Bd. 2006. Barcelona, Spain : ASME, 2006 — ISBN 978-0-7918-4241-6, S. 185–194
- [9] Schnoes, M.; Nicke, E.: Automated calibration of compressor loss and deviation correlations. In: Volume 2A: Turbomachinery. Montreal, Quebec, Canada : ASME, 2015 — ISBN 978-0-7918-5663-5
- [10] Matschke, A.: Vergleich zwischen Messung und Simulation an einem Triebwerksfan hinsichtlich seiner akustischen Abstrahlung. Berlin, Technische Universität Berlin, Masterarbeit, 2015