

AUTOREN



Felix Falke, M. Sc.
ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme (TME) an der RWTH Aachen University.



Dr.-Ing. Marco Günther
ist Oberingenieur am Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme (TME) an der RWTH Aachen University.



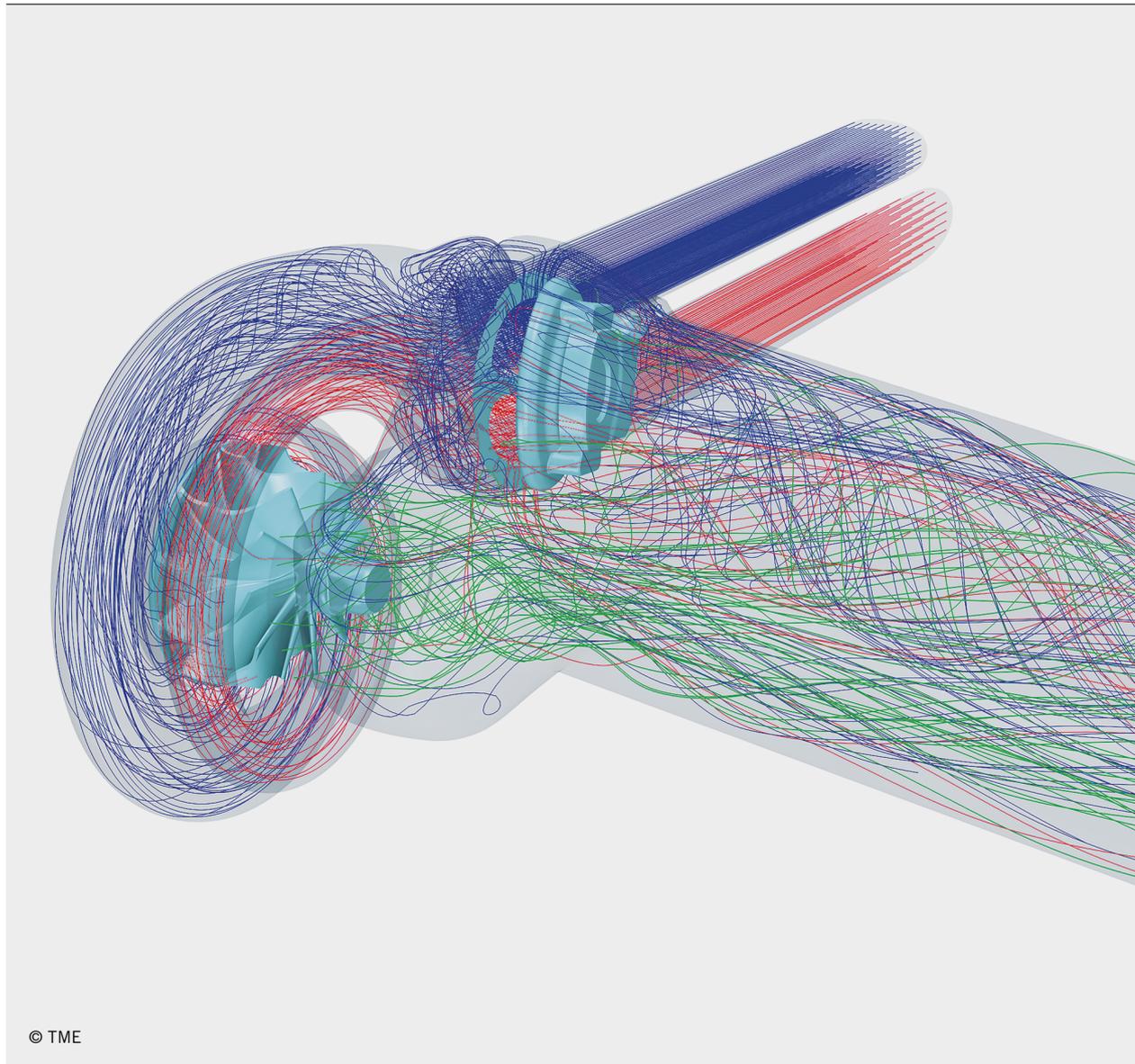
Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger
ist Leiter des Lehrstuhls für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme (TME) an der RWTH Aachen University.



Dr.-Ing. Helmut Kindl
ist Technischer Spezialist für Aufladesysteme im Bereich Powertrain Research und Advanced bei der Ford-Werke GmbH in Aachen.

Untersuchung der Wastegatekanalinteraktion zweiflutiger Turbinen

Eine optimale Modellierung von Abgasturboladern trägt zur Verbesserung der prädiktiven 1-D-Motorprozessrechnung bei. Um Strömungseinflüsse an zweiflutigen Wastegatekanälen berücksichtigen zu können, wurde das FVV-Forschungsvorhaben „Untersuchung zweiflutiger Turbinen“ (FVV-Nr. 1264) initiiert. Die Ergebnisse des an der RWTH Aachen University durchgeführten Projekts stellen eine wichtige Erweiterung für kennfeldbasierte Modellierungsansätze dar.



© TME

1	EINFLUSS DER WASTEGATE-ÖFFNUNG
2	ISENTROPER STRÖMUNGSQUERSCHNITT
3	MESSUNGEN AM ATL-PRÜFSTAND
4	DRUCKVERHÄLTNISABHÄNGIGKEIT
5	BEEINFLUSSUNG DER WG-ABSTRÖMUNG
6	ZUSAMMENFASSUNG

1 EINFLUSS DER WASTEGATE-ÖFFNUNG

Aktuelle Modellierungsansätze von Abgasturboladern (ATL) basieren auf Kennfeldern, die an einem Brennkammerprüfstand bei vollständig geschlossenem Wastegate (WG) gemessen werden. Das WG ist aber innerhalb des Motorkennfelds eines aufgeladenen Motors über einen weiten Bereich geöffnet, wie **BILD 1** schematisch darstellt. Welchen Einfluss die Öffnung auf die Leistungsumsetzung an der Turbine sowie auf die Modellierung in der 1-D-Motorprozessrechnung hat, bedarf einer allgemeingültigen Aussage.

Zweiflutige Turbinen verfügen über voneinander entkoppelte WG-Kanäle. In Abhängigkeit der Positionierung des WG-Deckels auf den Kanälen stellen sich für seinen Öffnungswinkel unterschiedliche geometrische Strömungsquerschnitte ein. Dies hat eine direkte Auswirkung auf den Abgasgedruck in den beiden Strängen des Abgaskrümmers und damit auch auf den Restgasgehalt der angeschlossenen Zylinder. Des Weiteren verändert die Öffnung des WGs den Strömungszustand am Eintritt des Turbinenlaufrads. Für die Modellierung zweiflutiger Turbinen ist eine genaue Kenntnis des Zustands Grundvoraussetzung [1]. Dafür soll eine Methode zur Erfassung einer WG-Charakteristik am Brennkammerprüfstand abgeleitet werden. Das Forschungsprojekt ist am Lehrstuhl für

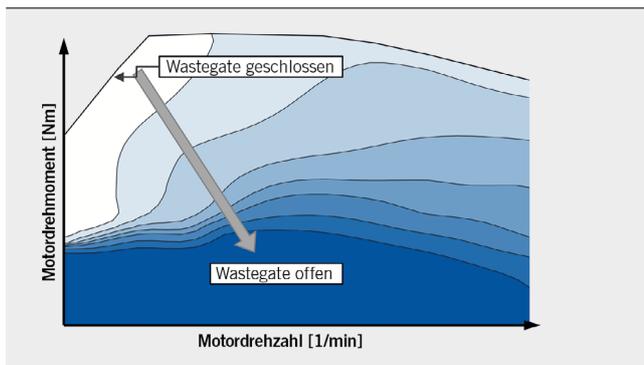


BILD 1 Schematische Darstellung der WG-Position in einem Motorkennfeld als Funktion der Motordrehzahl und Last (© TME)

Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme (TME) an der RWTH Aachen University durchgeführt worden.

2 ISENTROPER STRÖMUNGSQUERSCHNITT

Das WG einer Turbine lässt sich nicht vollständig durch eine Drosselgleichung abbilden, wie Voruntersuchungen zeigen. Vielmehr ist der isentrope Strömungsquerschnitt $A_{s, WG}$ insbesondere bei kleinen Öffnungswinkeln abhängig vom Turbinendruckverhältnis, sodass er zur Charakterisierung der WG-Durchströmung eingeführt wird. Er bezieht sich auf die Zustandsgrößen Druck p und Temperatur T in den Messrohren stromauf und stromab der Turbine. Wichtig ist, dass nur der Massenstrom \dot{m}_{WG} , der durch das WG strömt, in der Berechnung berücksichtigt wird. Bei einer einflutigen Turbine bestimmt sich $A_{s, WG}$ durch Gl. 1, wobei in den weiteren Gleichungen der Index 3 den Zustand vor und 4 nach der Turbine beschreibt:

$$\text{Gl. 1} \quad A_{s, WG} = \frac{\dot{m}_{WG}}{c_s \rho_s}$$

Dabei werden die Dichte ρ_s und die spezifische Wärmekapazität c_s mit Gl. 2 beziehungsweise Gl. 3 beschrieben, wobei sich das total-statische Druckverhältnis Π_{WG} und $\Pi_{kritisch}$ aus Gl. 4 ergeben; R steht für die Gaskonstante und k für die Kompressibilität:

$$\text{Gl. 2} \quad \rho_s = \rho_3 \cdot \max(\Pi_{WG}; \Pi_{kritisch})^{\frac{1}{k}}$$

$$\text{Gl. 3} \quad c_s = \sqrt{\left(\frac{2k}{k-1}\right) R T_3 \left(1 - \max(\Pi_{WG}, \Pi_{kritisch})^{\frac{k-1}{k}}\right)}$$

$$\text{Gl. 4} \quad \Pi_{WG} = \frac{p_4}{p_3} \text{ oder } \Pi_{kritisch} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

Bei zweiflutigen Turbinen muss zwischen den WG-Kanälen 1 und 2 differenziert werden. Zur Bewertung der Strömungsqualität wird $A_{s, WG}$ oftmals einem geometrischen Querschnitt gegenübergestellt. Letzterer wird insbesondere zur Berechnung des Durchflusskoeffizienten α_{WG} eines WG-Kanals benötigt. Sie erfolgt analog wie beim Einlass-/Auslassventil – **BILD 2** stellt beide Geometrien gegenüber. So lässt sich α_{WG} nach Gl. 5 bestimmen:

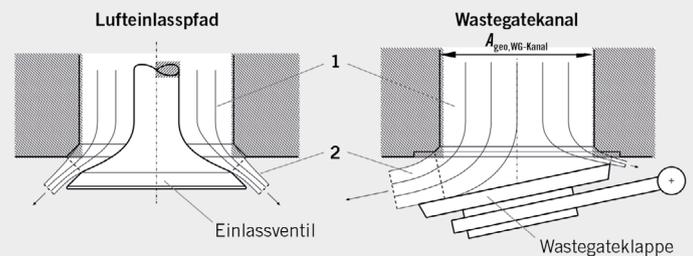


BILD 2 Analogie zwischen der Bestimmung des Durchflusskoeffizienten für Einlass-/Auslassventil (links) und WG-Kanal (rechts), Zustand vor (1) und nach (2) Drossel [2] (© TME)

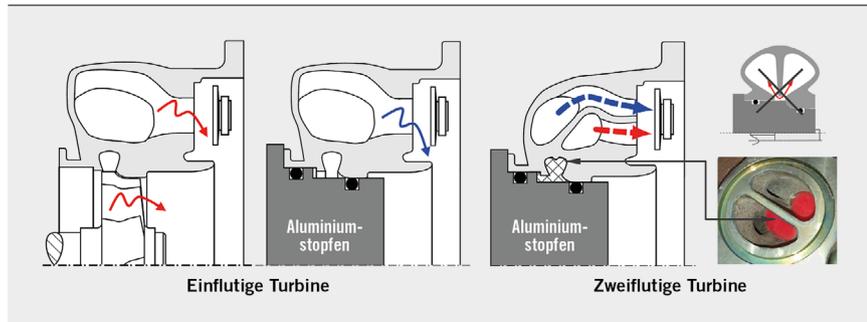


BILD 3 Abgaspfade im einflutigen (links) und zweiflutigen (rechts) Turbinengehäuse: einflutig mit Aluminiumstopfen; zweiflutig zusätzlich mit Silikon verblockt (© TME)

Gl. 5 $\alpha_{WG} = \frac{A_{s, WG}}{A_{geo, WG}}$

Bei der Geometrie des WG muss zwischen dem Querschnitt im Kanal $A_{geo, WG-Kanal}$ und dem Querschnitt zwischen WG-Klappe $A_{geo, WG-Klappe}$ und WG-Sitz unterschieden werden. Als Referenzquerschnitt wird abhängig vom WG-Öffnungswinkel der kleinere Querschnitt gewählt.

3 MESSUNGEN AM ATL-PRÜFSTAND

Da bei der konventionellen Messung eines einflutigen WG-ATL mit geöffnetem WG nicht unmittelbar die Aufteilung des Turbinenmassenstroms zwischen Laufrad und WG-Kanal bestimmt werden kann, **BILD 3** (links), wird der Versuchsträger ATL1 zusätzlich zur konventionellen Messung entsprechend modifiziert. Es wird ausschließlich das Turbinengehäuse durchströmt. Ein Aluminiumstopfen am Anschluss des Lagergehäuses blockiert den Bereich, in dem sonst das Turbinenlaufrad sitzt. Mit dem Stopfen wird auch der Luftpfad der Laufradabströmung blockiert, sodass die Luft nach Eintritt in die Turbinenvolute ausschließlich über den WG-Kanal abströmen kann. Da nun alle relevanten Drücke in den

Messrohren vor und nach Turbine sowie \dot{m}_{WG} durch den WG-Kanal bekannt sind, kann $A_{s, WG}$ nach Gl. 1 bestimmt werden.

Zur Messung der WG-Durchströmung zweiflutiger Turbinen werden vorab die Voluten mit Silikon ausgegossen, um zu verhindern, dass ein Massenstrom an der Trennwand übersprechen kann, **BILD 3** (rechts). Dadurch kann auch bei der Messung von Versuchsträger ATL2 direkt auf die WG-Massenströme geschlossen werden. So ist auch hier eine Berechnung von $A_{s, WG}$ pro Flut nach Gl. 1 möglich.

Um die Einzelmassenströme in den beiden Fluten quantifizieren zu können, wird ein spezieller Doppelbrenneraufbau eingesetzt, bei dem pro Flut eine separate Massenstromquelle angeschlossen ist. Dadurch ist \dot{m}_{WG} für jede Flut bekannt. Durch Verwendung eines zweiflutigen Messrohrs stromauf der Turbine sind p und T am WG-Kanaleintritt bestimmt. Der Zustand stromab des WGs wird analog zur einflutigen Turbine im Messrohr nach der Turbine gemessen. Um mögliche Prüfstandslimitationen (beispielsweise einen minimalen Massenstrom im Brenner) zu überwinden, wurden zusätzlich Untersuchungen einer zweiflutigen Turbine mit 3-D-Modellen mithilfe von Computational Fluid Dynamics (CFD) durchgeführt. Der Vergleich zwischen Messung und Simulation zeigt eine gute Übereinstimmung, daher werden hier nur die Simulationsergebnisse diskutiert.

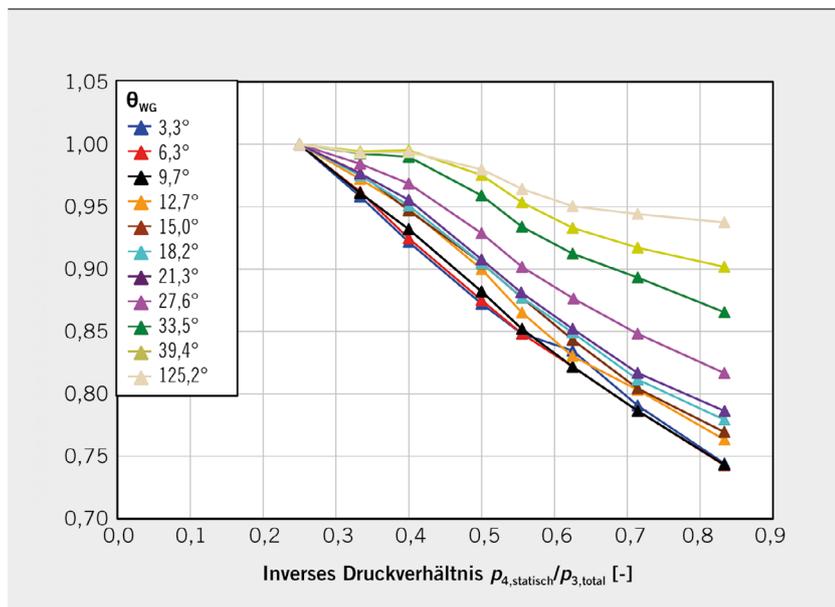


BILD 4 Druckabhängigkeit von $A_{s, WG}$ einer einflutigen Turbine bei jeweils konstantem Öffnungswinkel θ_{WG} (© TME)

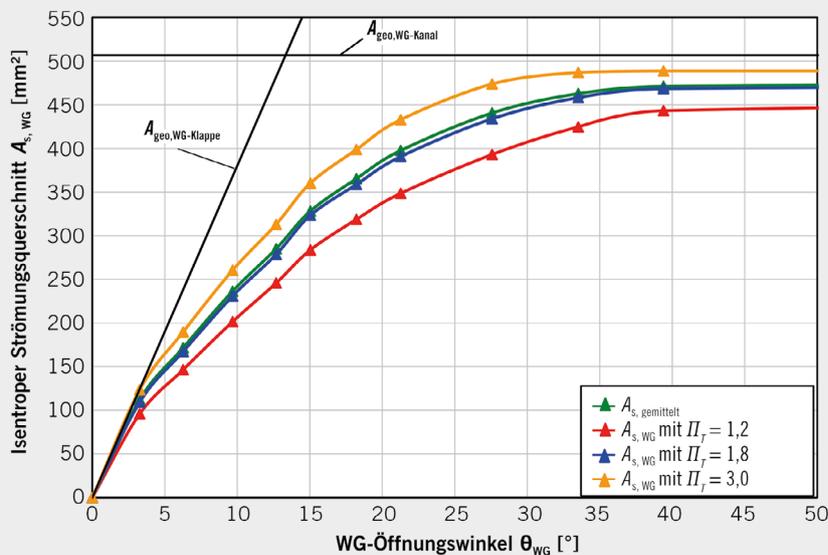


BILD 5 Geometrische und isentrope Strömungsquerschnitte aufgetragen über dem WG-Öffnungswinkel θ_{WG} (© TME)

4 DRUCKVERHÄLTNISABHÄNGIGKEIT

BILD 4 stellt die jeweils berechneten Werte für $A_{s, WG}$ über dem inversen Turbinendruckverhältnis einer einflutigen Turbine dar. Zur besseren Vergleichbarkeit ist jeder Wert auf den maximalen Querschnitt der entsprechenden WG-Position normiert. Erwartungsgemäß nimmt $A_{s, WG}$ bei konstantem Druckverhältnis und sich weiter öffnendem WG zu. Die relative Änderung zwischen zwei WG-Positionen wird mit weiter geöffnetem WG kleiner. Interessant ist, dass $A_{s, WG}$ für eine konstante WG-Position mit abnehmendem Druckverhältnis (und steigendem treibendem Druckgefälle über dem WG) zunimmt. Dementsprechend ist eine Druckabhängigkeit von $A_{s, WG}$ zu beobachten, die bei kleinen Öffnungswinkeln wesentlich stärker ausgeprägt ist. Rechnerisch ergibt hier die Druckabhängigkeit für den kleinsten Öffnungswinkel 25 % zwischen maximal und minimal gemessenem Druckverhältnis.

Ein wesentliches Ziel der neuen WG-Modellierung in der 1-D-Motorprozessrechnung ist, den WG-Öffnungswinkel als Ausgabegröße abgreifen zu können. Dazu sind in **BILD 5** für die drei Turbinendruckverhältnisse $\overline{\Pi}_T = 1,2; 1,8$ und 3 jeweils $A_{s, WG}$ über dem Öffnungswinkel θ_{WG} aufgetragen. Zusätzlich ist für jede gemessene WG-Position der Mittelwert über alle Druckverhältnisse aufgetragen, wobei eine maximale Abweichung von 10 % zum Mittelwert angegeben werden kann. Als maximale Begrenzung zeigen sich in **BILD 5** die geometrischen Querschnitte $A_{geo, WG-Kanal}$ und $A_{geo, WG-Deckel}$. Diese können in Anlehnung an Gl. 5 zur Berechnung des Durchflusskoeffizienten α_{WG} genutzt werden. Da stets mit dem kleineren geometrischen Querschnitt gerechnet werden muss, wird ab einem Öffnungswinkel von $\theta_{WG} = 13^\circ$ der Kanalquerschnitt als Referenz verwendet. Dies ergibt einen maximalen Durchflusskoeffizient für das weit geöffnete WG von $\alpha_{WG} = 0,93$.

5 BEEINFLUSSUNG DER WG-ABSTRÖMUNG

Um die experimentellen Ergebnisse der zweiflutigen WG-Untersuchung am Prüfstand detaillierter zu verstehen, wurde auf Basis

von CAD-Daten eine 3-D-CFD-Berechnung durchgeführt. Da in der Simulation alle physikalischen Größen an beliebiger Stelle bestimmbar sind, lassen sich trotz vorhandenem Laufrad und Fluteninteraktion an der Trennwand die Massenströme durch die WG-Kanäle eindeutig ermitteln. Daraus kann der isentrope Strömungsquerschnitt beider Fluten $A_{s, WG, i}$ abgeleitet werden.

Für die Analyse von zweiflutigen Turbinen wird im Folgenden eine andere Visualisierungsmethode verwendet: Sie soll zeigen, ob und wie die Abströmung aus einem WG-Kanal den Ausstoß aus dem Kanal der anderen Flut beeinflusst. Der Vorteil des Turbineninteraktionskennfelds ist, dass durch das Strangdruckverhältnis $\overline{\Pi}_{Strang}$ und dem mittleren Turbinendruckverhältnis $\overline{\Pi}_T$ gemittelt eine Fläche aufgespannt wird, in der $A_{s, WG, i}$ als weitere Größe auf einer dritten Achse aufgetragen werden kann.

In **BILD 6** ist $A_{s, WG, 1}$ der Flut 1 über dem gesamten Turbinenbetriebsbereich für einen konstanten Öffnungswinkel $\theta_{WG} = 8^\circ$ dargestellt (die hier nicht gezeigten Ergebnisse für Flut 2 sind analog). Zur Veranschaulichung ist ein Motorpuls in das Turbineninteraktionskennfeld aufgenommen. Erwartungsgemäß sind die Werte in der Einzelbeaufschlagung dieser Flut rechts im Diagramm mit $A_{s, WG, 1} = 234 \text{ mm}^2$ am größten. In diesem Zustand strömt das Fluid ausschließlich aus der Flut 1 in den Turbinenaustritt. In einem hypothetischen Fall, in dem die beiden Austritte der WG-Kanäle nicht nebeneinander liegen, sondern getrennt an die Umgebung geführt werden, sollte keine Beeinflussung stattfinden. Im realen Fall ist dem nicht so, und die WG-Abströmungen können interagieren und sich dadurch beeinflussen.

Dieses Verhalten wird deutlich, wenn man in die Ungleichbeaufschlagung wechselt. In Bereichen, in denen durch Flut 1 mehr Masse durchgesetzt wird als durch Flut 2, ist $A_{s, WG, 1}$ noch vergleichsweise hoch, eine Abnahme bei stärkerer Ungleichbeaufschlagung ist aber bereits erkennbar. Durch die näherungsweise vertikalen Isolinien wird deutlich, dass die Änderung von $A_{s, WG, 1}$ vom Strangdruckverhältnis $\overline{\Pi}_{Strang}$ dominiert wird und durch $\overline{\Pi}_T$ gemittelt klein ist. Bereits im Bereich der Gleichbeaufschlagung

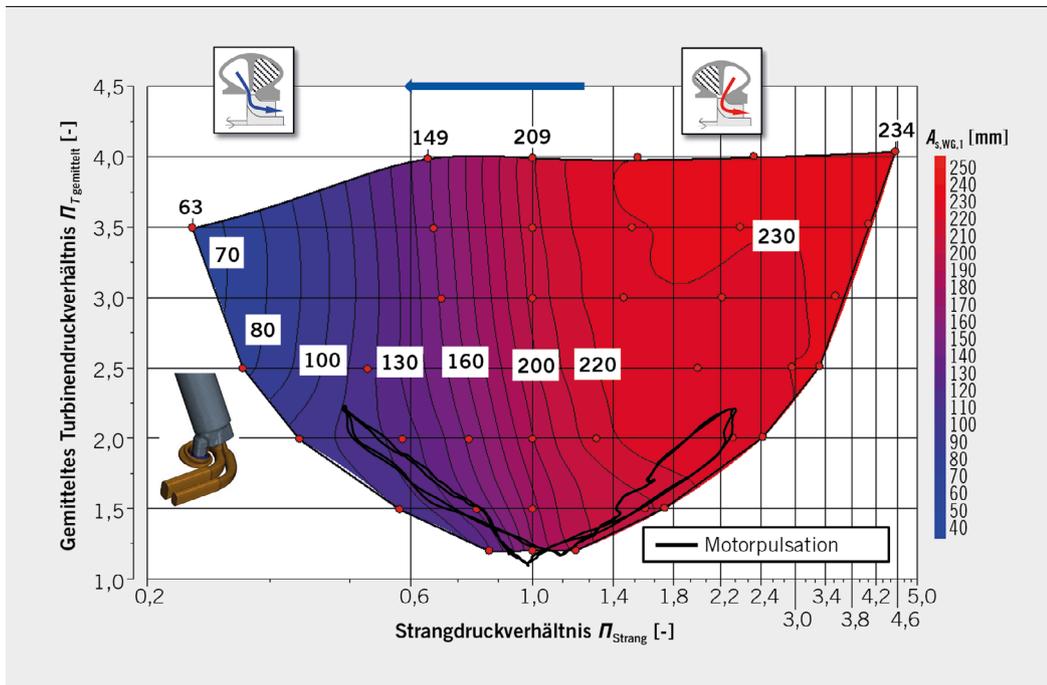


BILD 6 3-D-CFD-Modell mit Laufrad: $A_{s, \text{WG}, 1}$ der Flut 1 als Konturdiagramm im Turbineninteraktionskennfeld für $\theta_{\text{WG}} = 8^\circ$ (© TME)

gung ($\bar{\pi}_{\text{Strang}} = 1$) sinken die Werte für $A_{s, \text{WG}, 1}$ mit zunehmendem Durchsatz durch die zweite Flut deutlich. Sie fallen in Richtung Einzelbeaufschlagung der zweiten Flut auf $A_{s, \text{WG}, 1} = 63 \text{ mm}^2$ ab. Dadurch ist anzunehmen, dass eine Abströmung aus WG-Kanal 2 diejenige des WG-Kanals 1 behindert.

Grundsätzlich konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, mit dem hier vorgestellten Prüfstands Aufbau die isentropen Strömungsquerschnitte beider WG-Kanäle zu bestimmen. Diese können als Look-Up-Tabelle für die 3-D-CFD-Simulation zur Ladungswechselrechnung hinterlegt werden. So kann die WG-Durchströmung besser modelliert und damit ihr Einfluss auf den Motorbetrieb, zum Beispiel durch das Restgasverhalten, genauer abgebildet werden.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Für eine einflutige Turbine wurden zwei unterschiedliche Prüfstands aufbauten untersucht (mit und ohne Laufrad), um den isentropen Strömungsquerschnitt effizient und zerstörungsfrei zu bestimmen. Es konnte eine Druckverhältnisabhängigkeit von bis zu 25 % nachgewiesen werden, weshalb das Strömungsverhalten nicht durch eine einfache Drosselgleichung abgebildet werden kann.

Für einen zweiflutigen Versuchsträger wurde eine Mess- und Simulationsmethodik entwickelt, um den isentropen Strömungsquerschnitt beider WG-Kanäle zu berechnen. Eine starke Interaktion der WG-Abströmung zweiflutiger Turbinen durch Verblockung der Abströmung in der Ungleichbeaufschlagung wurde nachgewiesen. 1-D-Modellansätze zur Berücksichtigung dieser Effekte in der Ladungswechselrechnung wurden entwickelt und mit Messungen/3-D-CFD-Simulationen validiert. Als Ergebnis können die 1-D-Modelle nun zusätzlich den WG-Öffnungswinkel ausgeben, der zum Beispiel für schnelle Applikationsprozesse in der Motorkalibrierung wichtig ist.

LITERATURHINWEISE

- [1] Lückmann, D.: Interaktion zweiflutiger Turbinen mit dem Verbrennungsmotor. Aachen, Technische Hochschule, Dissertation, 2016
- [2] Stadermann, M.: Analyse und Modellierung zweiflutiger Turbinen unter Berücksichtigung der Fluteninteraktion am Wastegate. Aachen, Technische Hochschule, Dissertation, 2020

DANKE

Das Forschungsvorhaben (FVV-Projekt-Nr. 1264) wurde am Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme (TME) an der RWTH Aachen University unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger durchgeführt. Es wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (Aif) e.V. (IGF-Fördernr. 19380 N/1) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages finanziell gefördert und von einem Arbeitskreis unter der Leitung von Dr.-Ing. Helmut Kindl (Ford-Werke GmbH) begleitet. Die Autoren bedanken sich bei den Fördergebern, der FVV Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V. und allen Projektbeteiligten für die Unterstützung des Vorhabens.



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge: www.mtz-worldwide.com