

FVV PRIME MOVERS. TECHNOLOGIES.

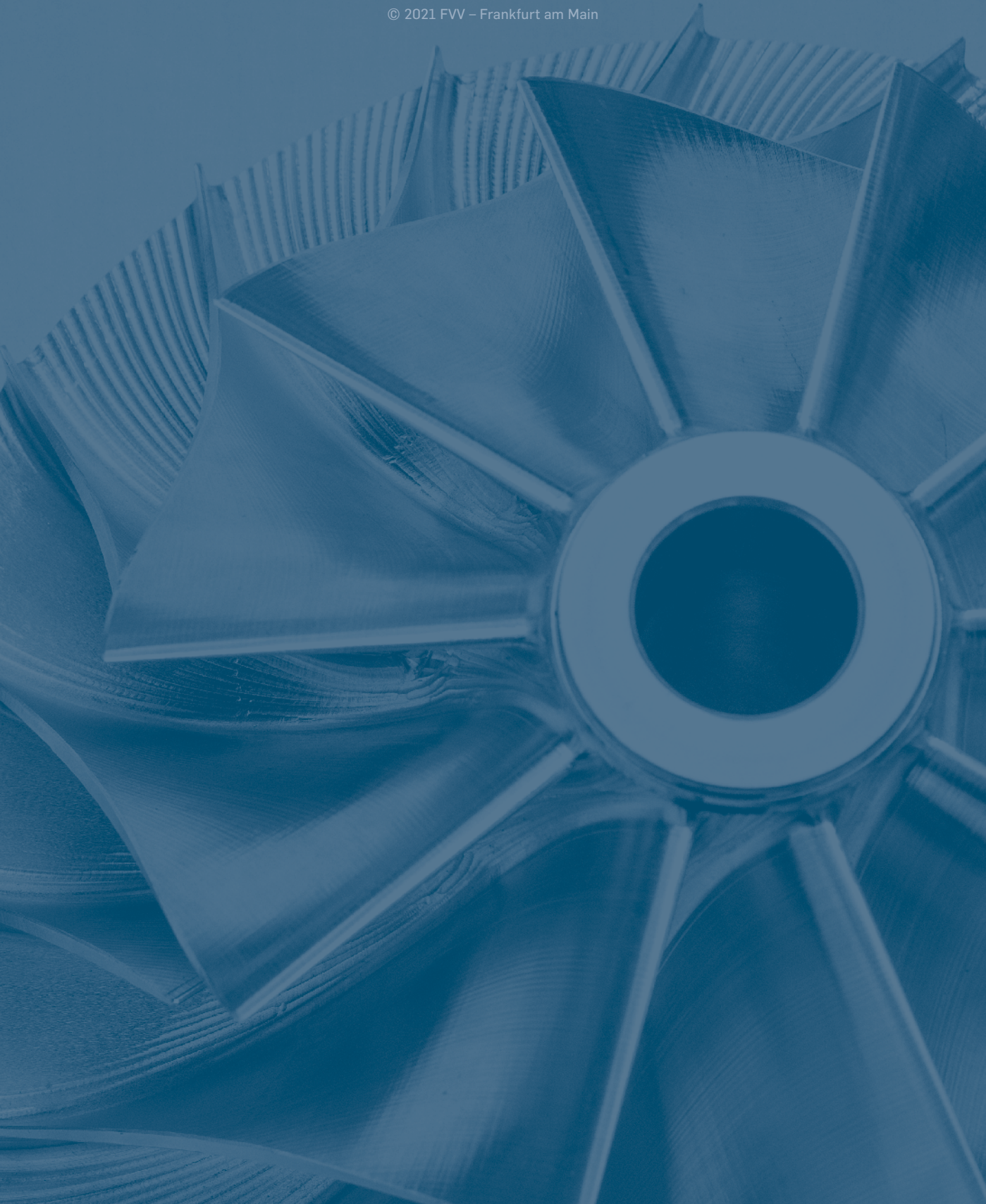
1968 – 2021

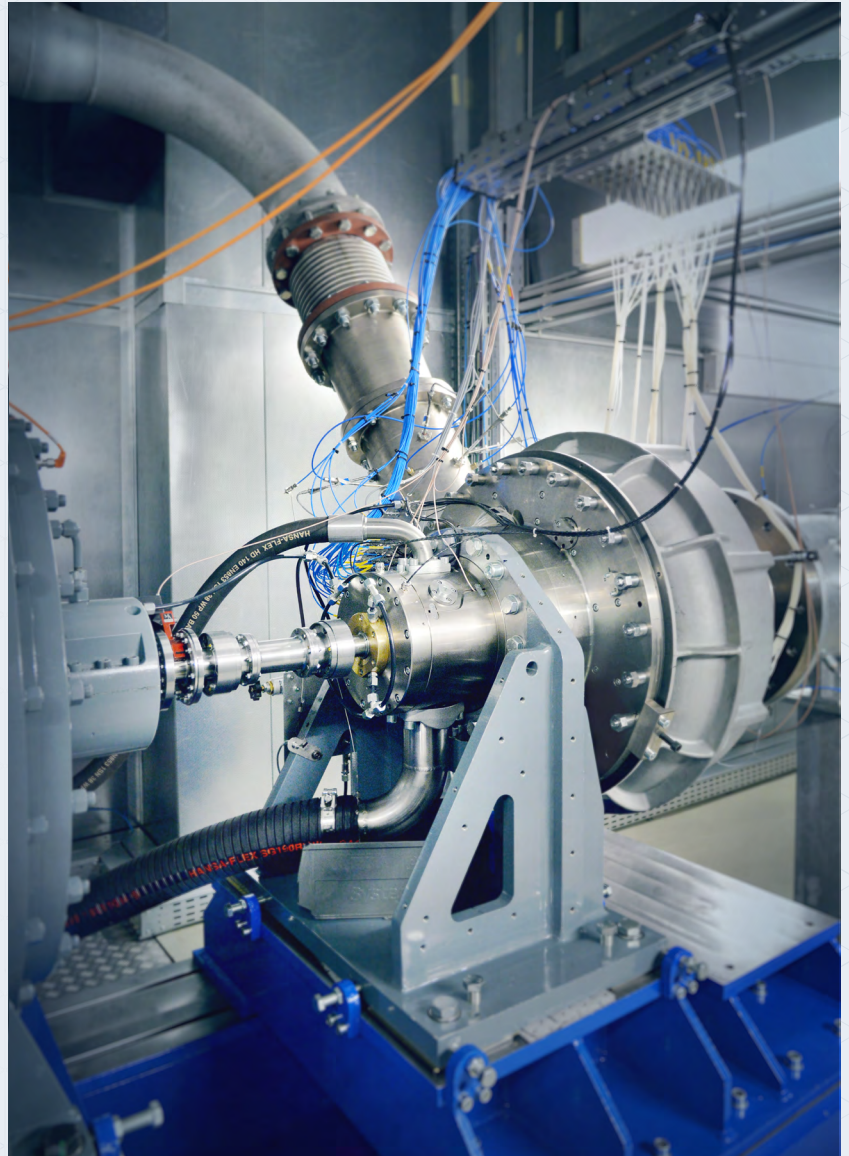
Radialverdichterforschung

Forschungsvorhaben der letzten 10 Jahre



© 2021 FVV – Frankfurt am Main





»Nur mit dem Experiment kann man die Berechnungen kalibrieren, trimmen und verifizieren.«

Prof. Peter Jeschke, Leiter des IST an der RWTH Aachen

SEITE 6-7
Vorwort

SEITE 8-11
Radialverdichterforschung
in der FVV

Wie in vielen anderen Bereichen des Maschinen- und Anlagenbaus steht Europa auch bei den industriellen Radialverdichtern technologisch an der Weltspitze.

6

Seit mehr als fünf Jahrzehnten widmen sich Industrie und Wissenschaft gemeinsam der Radialverdichterforschung. Im Interview berichten Dr. Matthias Schleer, Leiter des Arbeitskreises Radialverdichterforschung, und Dirk Bösel, Projektmanager der FVV, über die Bedeutung von Radialverdichtern sowie künftige Forschungsschwerpunkte.

8

Projektliste

10

SEITE 12-23
Forschungsthemen

Das Experiment bleibt unverzichtbar	12
Aerodynamik, Akustik	
Stabilität durch Variabilität	16
Strömungsinstabilität, Kennfeldbreite	
Schall bricht Stahl	20
Schallmessverfahren, Begleitforschung Normung	

SEITE 24-25
Geballte Kompetenz

Aktive Mitglieder im Fachkreis	24
---------------------------------------	----

»Wie in vielen anderen Bereichen des Maschinen- und Anlagenbaus steht Europa auch bei den industriellen Radialverdichtern technologisch an der Weltspitze.«

»Ein Turbo für den Fortschritt«

Manche Maschinen wirken so sehr im Verborgenen, dass sie in der Öffentlichkeit kaum wahrgenommen werden – und doch leisten sie Entscheidendes für den Fortschritt in einer Industriegesellschaft. So ergeht es dem Radialverdichter, zumindest wenn man nicht nur auf jene Verdichter schaut, die als »Turbo« an modernen Verbrennungskraftmaschinen ihren Dienst verrichten. Dabei ist es auch für den Laien sofort logisch, dass Gase häufig auf ein höheres Druckniveau gebracht werden müssen, wenn diese in industriellen Prozessen eingesetzt werden sollen – völlig unabhängig davon ob es sich um Chemieanlagen oder die Metallverarbeitung handelt. Gewisse Analogien zum Turbolader am Fahrzeugmotor sind dabei durchaus zulässig: Ein höheres Druckniveau sorgt für eine höhere Effizienz des Folgeprozesses, also weniger Energieeinsatz und eine geringere Umweltbelastung.

Wie in vielen anderen Bereichen des Maschinen- und Anlagenbaus steht Europa auch bei den industriellen Radialverdichtern technologisch an der Weltspitze. Europäische Hersteller und Zulieferer exportieren ihre Aggregate buchstäblich in die ganze Welt. Wenn in Chile auf Basis von Windstrom synthetische Kraftstoffe hergestellt werden, sind mit hoher Wahrscheinlichkeit Verdichter im Einsatz, die hierzulande entwickelt und vielleicht sogar hergestellt wurden. Allerdings muss eine solche Spitzenposition immer wieder neu erkämpft werden. Die Industrielle Gemeinschaftsforschung ist ein bewährtes Instrument, um dafür die Voraussetzungen zu schaffen. Der vor mehr als 50 Jahren innerhalb der FVV gegründete Arbeitskreis Radialverdicht erforschung koordiniert diese Gemeinschaftsforschung erfolgreich.



DR.-ING.

DIRK HILBERG

Stellvertretender Vorsitzender des
Wissenschaftlichen Beirats / Leiter des
Forschungsbereichs Turbomaschinen
FVV



DIPL.-ING.

DIETMAR GOERICKE

Geschäftsführer
FVV

Mit dem technischen Fortschritt haben sich die Schwerpunkte der Forschung immer wieder verschoben. Standen am Anfang sehr grundlegende Fragen zum Zusammenhang von Geometrie, Strömung und Wirkungsgrad im Vordergrund, so ist heute beispielsweise die Optimierung in einem weiten Arbeitsbereich und für einen intermittierenden Betrieb ein wichtiges Thema. Damit legt die vom Arbeitskreis initiierte Forschung einen wichtigen Grundstein für ein Industrieland, das seine Energieversorgung auf erneuerbare Quellen umstellt.

Mit dem 2016 in Betrieb genommenen FVV-Prüfstand an der RWTH Aachen steht der Gemeinschaftsforschung an industriellen Radialverdichtern ein geeignetes Instrument zur Verfügung. Der Nutzen ist insbesondere für die mittelständisch geprägte Zulieferindustrie kaum hoch genug einzuschätzen: Alleine könnten sich nur sehr wenige Großbetriebe vergleichbare Einrichtungen leisten. Zu den mit dem Prüfstand bislang erzielten Ergebnissen erfahren sie auf den folgenden Seiten mehr.

Herzlich danken wir an dieser Stelle allen ehemaligen und aktiven Mitgliedern des Arbeitskreises, insbesondere auch dessen Leitern, Dr. Karl-Heinz Rohne (bis Dezember 2015) und Dr. Matthias Schleer, sowie den beteiligten Forschungsstellen und unseren langjährigen Fördergebern. Ihre engagierte, gemeinsame Arbeit stellt einen Turbo für den Fortschritt dar!

So etwas hat man nicht im Keller

Seit mehr als fünf Jahrzehnten widmen sich Industrie und Wissenschaft gemeinsam der Radialverdichterforschung. Im Interview berichten Dr. Matthias Schleer, Leiter des Arbeitskreises Radialverdichterforschung und Forschungschef von Howden Turbo, sowie Dirk Bösel, Projektmanager der FVV, über die Bedeutung von Radialverdichtern sowie künftige Forschungsschwerpunkte.

Warum forscht die FVV überhaupt am Radialverdichter?

Bösel: Radialverdichter werden immer dann eingesetzt, wenn es darum geht, Gase zu fördern oder auf einen höheren Druck zu bringen. Notwendig ist das beispielsweise in chemischen Prozessen oder in Pipelines, in denen Gas über lange Strecken transportiert werden muss. Auch die Luftzufuhr zu Verbrennungsprozessen in Kesseln wird mit Radialverdichtern ermöglicht, ebenso die Gaszufuhr für Brennstoffzellen. Ein anderes Einsatzgebiet sind Turbolader, das reicht vom kleinen Pkw bis zum großen Schiffsmotor. Die Anwendungen werden sich künftig ändern, technisch wird man Radialverdichter nicht ersetzen können.

Schleer: Ebenso werden Verdichteranlagen für die Produktion regenerativer Kraftstoffe benötigt. Und wir sehen in der Rohstoffwirtschaft einen massiven Bedarf an Industrieverdichtern, sei es in Kupferhütten, die das Material für Elektromotoren herstellen oder bei der Gewinnung von Lithium, das für Batterien benötigt wird. Daher liegt ein Schwerpunkt des Arbeitskreises darin, die Forschung stärker auf die größeren Industrieverdichter zu verlagern und deren Wirkungsgrad weiter zu steigern.

Aber ist der Wirkungsgrad wirklich noch so wichtig, wenn Verdichter und Turbinen im künftigen Energiesystem teilweise mehrmals täglich hoch- und heruntergefahren werden?

Schleer: Man darf nicht vergessen, dass jede noch so geringe Wirkungsgradsteigerung über die gesamte Lebensdauer einer 5-Megawatt-Maschine sehr viel Energie und – sofern sie mit fossilen Brennstoffen betrieben wird – sehr viel CO₂ spart. Gleichzeitig wird der flexible Betrieb natürlich wichtiger. Dafür entwickelt man weniger auf Spitzenleistung, sondern auf die Breite des Kennfelds, damit der Energieverbrauch an möglichst vielen Betriebspunkten optimiert ist.

Abgesehen vom Wirkungsgrad, in welchen Bereichen sehen Sie noch Entwicklungspotenzial bei Radialverdichtern?

Schleer: In den nächsten zehn Jahren kommen zunehmend additive Fertigungsverfahren zum Einsatz, mit denen sehr komplexe Geometrien realisiert werden können. Das ist sicher ein neuer Forschungsschwerpunkt. Es wird zunehmend um Materialwissenschaften gehen, da die Verdichterräder häufig bis an die Streckgrenze belastet sind. Aber auch die Regelung wird wichtiger: Wie bringt man die Maschine in die Nebenbetriebspunkte, wie stellt man das optimal ein? Dies sind einige der Themen, die demnächst am Radialverdichterprüfstand in Aachen untersucht werden können.

Welchen Stellenwert hat der von der FVV finanzierte Prüfstand an der RWTH Aachen für die Radialverdichterforschung?

Schleer: Es gibt weltweit nicht viele dieser hochinstrumentierten Prüfstände mit großen Antriebsmotoren. Der Aachener Prüfstand ist sicher einer der größten, die mit rund einem Megawatt elektrischer Antriebsleistung betrieben werden können. Die Größe bietet den Vorteil, dass er mit vielen Messstellen und extrem vielen Sensoren bestückt werden kann.

Bösel: So einen Prüfstand hat man nicht einfach so im Keller. Es gibt zwar einige Großunternehmen, die sich diese Technik auch hinstellen könnten, aber für kleine und mittelständische Unternehmen, Zulieferer oder CFD-Tool-Entwickler ist das nicht zu realisieren. Mit dem Prüfstand ergeben sich Möglichkeiten, die die Partner im Arbeitskreis allein kaum hätten. Das ist auch Teil der Erfolgsgeschichte: Dass wir diese Kontinuität bieten können und die Möglichkeit besteht, Institute langfristig einzubinden. Wir haben etwas geschaffen, das wir weiterentwickeln können. Das ist ein Versprechen in die Zukunft.

Ist ein Prüfstand in Zeiten sehr präziser Simulationen noch relevant?

Schleer: Die Möglichkeiten der Simulation sind tatsächlich viel größer als noch vor zehn oder 20 Jahren. Heute erhält man mit relativ geringen Mitteln viel Rechenleistung. Der Knackpunkt ist nur: Weil man alles simulieren kann, weiß man noch nicht, wie die Ergebnisse zu bewerten sind. Wenn man 50 Geometrien simuliert und davon die zwei besten auswählt und im Versuch experimentell verifiziert, dann ist das sinnvoller, als wenn früher fünf Geometrien »aus dem Bauch heraus« designt und getestet worden wären. Die Anzahl an Simulationen wird zwar weiter zunehmen, dennoch behält das Experiment einen enorm wichtigen Stellenwert.

Was wurde denn bislang mit dem Prüfstand erreicht?

Schleer: Besonders wichtig waren zunächst der Aufbau und die Inbetriebnahme. Forschungsschwerpunkt war dann, die Radialverdichter mit numerischen Verfahren auszulegen und messtechnisch nachzuweisen, dass das Designziel erreicht wurde. Das hat zum transsonischen Radialverdichter mit dem Design 603 geführt, das war die 603. Geometrie des Verdichterrads, die im Rahmen der numerischen Optimierung gerechnet wurde. In den vergangenen zwei Jahren haben wir mit numerischen Designverfahren die Industrieverdichterstufe entwickelt und aufgebaut. Das Eigenmittelprojekt ist nun abgeschlossen und wir können in die AiF-geförderten Projekte einsteigen.

Wer wirkt im Arbeitskreis Radialverdichterforschung mit?

Bösel: 85 Experten aus mehr als 30 Unternehmen und vier Forschungseinrichtungen arbeiten hier zusammen. Dabei agiert der eine etwas offensiver, der andere etwas zurückhaltender, aber die Diskussionen sind immer sehr lebhaft und vielseitig. Auch das ist sicher ein Kern der FVV-Arbeit – wir müssen immer zu einem Interessenausgleich kommen, und das unter Unternehmen aller Größenordnungen, von Mittelständlern bis hin zu MAN und Siemens. Diese Bandbreite macht es so spannend.

Wie sieht der konkrete Nutzen für die Mitglieder aus?

Schleer: Die meisten Mitglieder im Arbeitskreis könnten solche Ergebnisse nicht selbst generieren. Durch die Industrielle Gemeinschaftsforschung können sie diese Ergebnisse bei sich im Unternehmen nutzen und so ihre eigene Wettbewerbsfähigkeit stärken.

Bösel: Die Plattform an sich, der vorwettbewerbliche Austausch über Firmengrenzen hinweg, ist ein Alleinstellungsmerkmal der Industriellen Gemeinschaftsforschung – und das sogar fast weltweit. Ein System mit ähnlicher Intensität und Kontinuität ist mir nicht bekannt. //

Radialverdichtorforschung

PROJEKTLISTE



NR. THEMA // FÖRDERGEBER // LAUFZEIT

PROJEKTKOORDINATION

Realisierte Projekte

83, 115	Radialverdichter // FVV-EM // 01-01-1969 bis 31-12-1972	E. Schnell, Klöckner-Humboldt-Deutz
148, 149	Radialverdichter I // FVV-EM // 01-01-1973 bis 31-12-1974	E. Schnell, Klöckner-Humboldt-Deutz
182	Radialverdichter III // FVV-EM // 01-01-1975 bis 31-12-1976	E. Schnell, Klöckner-Humboldt-Deutz G. Eisenlohr, KHD Luftfahrttechnik
233	Radialverdichter - Schaufelschwingungen // FVV-EM // 01-01-1979 bis 31-12-1981	Dr. B. Jäger, MTU
269	Radialverdichter - Wechselwirkung I // FVV-EM // 01-01-1981 bis 30-06-1983	G. Eisenlohr, KHD Luftfahrttechnik
306	Radialverdichter - Wechselwirkung II // FVV-EM // 01-07-1983 bis 31-12-1984	G. Eisenlohr, KHD Luftfahrttechnik
396	Radialverdichter - Schwingfestigkeit // BMWi/AiF // 01-01-1987 bis 31-12-1989	Dr. B. Jäger, MTU
397, 469	Nachleitschaufelregelung I // BMWi/AiF // 01-01-1990 bis 31-12-1991	Dr. R. Keiper, KK&K
493	Radialverdichter hoher Schluckfähigkeit I // BMWi/AiF // 01-01-1991 bis 31-12-1993	G. Eisenlohr, KHD Luftfahrttechnik
604	Radialverdichter hoher Schluckfähigkeit II // BMWi/AiF // 01-01-1994 bis 31-12-1995	G. Eisenlohr, KHD Luftfahrttechnik
606	Spiralenströmungen // FVV-EM // 01-06-1994 bis 31-05-1997	Dr. R. Keiper, KK&K
670	Transsonischer Radialverdichter I // BMWi/AiF // 01-01-1997 bis 31-12-1998	G. Eisenlohr, Rolls-Royce
729	Transsonischer Radialverdichter II // BMWi/AiF // 01-04-1999 bis 30-04-2020	G. Eisenlohr, Rolls-Royce
705	Vorleitradoptimierung // FVV-EM // 01-04-1998 bis 31-10-2000	W. Röpischer, Siemens
763	Spiralenströmungen II // BMWi/AiF // 01-06-2000 bis 30-04-2003	Dr. R. Keiper, KK&K
781	Radialverdichterlärm // BMWi/AiF // 01-09-2001 bis 29-02-2004	Dr. A. Rippl, MAN B & W Diesel
798	Homogene Lauf-/ Leitradströmung // BMWi/AiF // 01-08-2002 bis 30-04-2005	Dr. K.-H. Rohne, ABB
823	Radialverdichterkennfeld // FVV-EM // 01-04-2004 bis 31-01-2005	Dr. R. Keiper, KK&K
845	Dynamische Pumpgrenze // BMWi/AiF // 01-07-2004 bis 30-06-2006	Dr. J. Wolkerstorfer, AVL List
846	Vorleitradoptimierung II // BMWi/AiF // 01-07-2004 bis 30-06-2006	Dr. R. Keiper, KK&K
861	Radialverdichterlärm II (A) // FVV-EM // 01-02-2005 bis 31-01-2006	Dr. A. Rippl, MAN B & W Diesel
894	Kompaktdiffusor // FVV-EM // 01-09-2006 bis 28-02-2009	Dr. K.-H. Rohne, ABB
901	Radialverdichterlärm II (B) // BMWi/AiF // 01-03-2006 bis 28-02-2007	Dr. A. Rippl, MAN B & W Diesel
949	Radialverdichterlärm III // FVV-EM // 01-01-2008 bis 31-03-2009	Dr. A. Rippl, MAN B & W Diesel
2300	Radialverdichter-Prüfstand // FVV-EM // 15-09-2011 - 31-12-2015	Dr. K.-H. Rohne, ABB
1116	Validierung NUMECA-C // FVV-EM // 01-10-2012 bis 31-12-2017	Dr. T. Hildebrandt, NUMECA



NR.	THEMA // FÖRDERGEBER // LAUFZEIT	PROJEKTKOORDINATION
1196	Flexibler Radialverdichter // FVV-EM, BMWi/AiF // 01-06-2015 bis 31-05-2018	Dr. M. Schleer, Howden Turbo
1227	Akustik in Druckleitungen // DFG, FVV-EM // 01-11-2015 bis 31-10-2018	Dr. R. Büsow, Industrial Analytics Berlin
1279	Design und Aufbau des FVV Industrieverdichters // FVV-EM // 01-07-2017 bis 30-06-2021	Dr. M. Schleer, Howden Turbo
1337	Umfangsinhomogene Radialverdichterströmung // BMWi/AiF // 01-12-2018 bis 31-05-2021	Dr. T. Hildebrandt, NUMECA

Fachkreis Radialverdichter

FORSCHUNGSSCHWERPUNKTE

TURBOMASCHINEN



WIRKUNGSGRAD
UND EFFIZIENZ



ENTWICKLUNGS-
WERKZEUGE



MATERIAL- UND
WERKSTOFFE



KOMPONENTEN

Das Experiment bleibt unverzichtbar

Seit fünf Jahren betreiben Forscher der RWTH Aachen den Radialverdichterprüfstand der FVV. Prof. Dr.-Ing. Peter Jeschke hat den Aufbau und die Inbetriebnahme von Anfang an begleitet – mit kleinen Rückschlägen und großen Erfolgen.

Dutzende Kabel für die angeschlossenen Sensoren baumeln von der niedrigen, schallgedämmten Decke. Kaltes Neonlicht bestrahlt links einen zwei Megawatt starken Elektromotor samt angeflanschem Planetengetriebe, rechts ein mehrere Meter langes Ansaugrohr samt voluminösem Schalldämpfer. Dazwischen das Herzstück: Die Radialverdichterstufe, in der ein Impeller mit einer Drehzahl von mehr als 20.000 Umdrehungen pro Minute rotiert. Armdicke Schläuche versorgen die Maschine mit Kühl- und Schmieröl.

All das ist beeindruckend und teuer – aber braucht es solche Prüfstände heutzutage überhaupt noch, wenn Turbomaschinen mit immer leistungsfähigeren Rechnern entwickelt werden und Simulationsergebnisse extrem realitätsnah Realität sind? »Ja, denn die Numerik ist nur eine Seite der Medaille des Erkenntnisgewinns. Nur mit dem Experiment kann man die Berechnungen kalibrieren, trimmen und verifizieren«, sagt Professor Peter Jeschke, Leiter des Instituts für Strahltriebwerke und Turbomaschinen (IST) an der RWTH Aachen. Ohne Referenz würde die Numerik falsche Ergebnisse liefern, daher werden Prüfstände trotz immer besserer Simulationsmöglichkeiten noch auf Jahrzehnte ihre Berechtigung haben.

In Europa gibt es nur wenige Forschungsstandorte, an denen Radialverdichterprüfstände experimentell betrieben werden. Einer davon befindet sich am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

in Köln. 2011 fällt die Entscheidung, an der RWTH Aachen einen weiteren Prüfstand aufzubauen, an dem die Forschungsprojekte der FVV seither fortgeführt werden. Es folgen Jahre der Entwicklungs- und Aufbauarbeit, bei der Experten der FVV-Mitgliedsunternehmen im Forschungsbereich Turbomaschinen gemeinsam mit der RWTH Aachen die nötigen Bauteile konstruieren und fertigen sowie die Messtechnik installieren und kalibrieren – klassisches Ingenieurshandwerk. Wegen der extremen Lautstärke im späteren Betrieb wurde in der Maschinenhalle des IST eigens ein schallgedämmter Raum mit 30 Zentimeter dicken Stahlbetonwänden umgebaut.

Projektdaten

- »Radialverdichter-Prüfstand [2300]: Aufbau und Validierung eines FVV Radialverdichter Prüfstandes am IST, RWTH Aachen«
- **PROJEKTFÖRDERUNG**
€ 465.000 // FVV-EM
- **PROJEKTKOORDINATION**
Dr. Karl-Heinz Rohne, ABB Turbo Systems
- **FORSCHUNGSSTELLE**
Institut für Strahltriebwerke und Turbomaschinen (IST), RWTH Aachen University

Die Größe des Prüfstands hatte pragmatische Gründe, erklärt Jeschke: »Das Spiralgehäuse stammt aus dem Portfolio von ABB Turbo Systems, wir konnten also ein fertiges Produkt kaufen. Zudem gilt ein Impellerdurchmesser von circa 400 Millimeter als Industriestandard, mit dem auch ABB und MAN arbeiten.« Der größte Vorteil ist indes, dass die Forscher ausreichend Platz haben, um die nötige Messtechnik zu installieren. Kleinere Prüfstände sind dahingehend limitiert, bei größeren steigen die Kosten exorbitant mit dem Durchmesser. Es gibt weltweit nicht viele Prüfstände mit ähnlicher Leistung und messtechnischer Ausstattung. Je nach Projekt kommen bis zu 100 Druck- und Temperatursensoren zum Einsatz.

Fünf Jahre und drei Millionen Euro später ist der FVV-Prüfstand einsatzbereit. Im April 2016 sind die Probeläufe abgeschlossen. Im ersten Forschungsvorhaben soll das Teillastverhalten von Radialverdichtern für den flexiblen Kraftwerksbetrieb untersucht werden.

Ausgerechnet am Tag der offiziellen Inbetriebnahme entsteht der bislang einzige signifikante Schaden: »Wir hatten damals noch wenig Erfahrung mit dem Prüfstand und haben nach dem symbolischen Start viel schneller auf Volldrehzahl beschleunigt als in den vorherigen Tests«, erinnert sich Jeschke. Dadurch erwärmten und dehnten sich die Bauteile des Verdichters unterschiedlich schnell – und der Impeller lief unter Volldrehzahl ins Spiralgehäuse und wurde um einige Zehntelmillimeter gekürzt. »Das war natürlich ärgerlich, aber wir haben den Schaden auch erst bei der Demontage bemerkt«, sagt Jeschke. Seither blieben weitere technische Probleme aus. Dafür ist ein anderes allgegenwärtig: Der Zeitbedarf der einzelnen Forschungsvorhaben werde immer wieder aufs Neue unterschätzt.

So kann die Anpassung neuer Messstellen nicht wie geplant drei Monate dauern, sondern ein Jahr; hinzu kommen Revisionsphasen, in denen der Prüfstand stillsteht. Der Umbau auf die aktuelle Industrieverdichter-Konfiguration dauerte rund eineinhalb Jahre. Auch die Einarbeitung des Personals in die

komplizierte Hardware braucht Zeit. Nahezu alle wissenschaftlichen Mitarbeiter und Promovierenden haben Maschinenbau studiert, mit Vertiefungen im Bereich Turbomaschinen, Luft- und Raumfahrt oder Energietechnik. Kleine Teams von drei bis fünf Mitarbeitern betreuen die Forschungsvorhaben, die meisten von ihnen haben zeitlich überlappend angefangen und lernen den Umgang mit der komplexen Technik von ihren älteren Kollegen. Gelegentlich kommt es zu Kapazitätsengpässen, da der Prüfstand von drei festangestellten Mitarbeitern bedient wird, und für den Betrieb jeweils zwei von ihnen vor Ort sein müssen.

»Das Thema Akustik wird immer wichtiger, aber es ist sehr viel schwieriger zu erfassen als die Aerodynamik. Dafür ist der Erkenntnisgewinn größer.«

Nach etwa zehn Betriebstagen wird der Impeller ausgebaut und überprüft, bei dieser Gelegenheit ergänzen die Forscher Sensoren oder positionieren sie an andere Messstellen. Die für Akustikmessungen verwendeten Druckaufnehmer sind mit rund 1.000 Euro pro Stück nicht preiswert, daher sind nur etwa 20 dieser Sensoren am Prüfstand montiert. Sie werden unter anderem für das FVV-Projekt *Akustik in Druckleitungen II* benötigt, in dem noch bis Mitte 2022 ein zuvor entwickeltes Messverfahren angewendet wird. »Das Thema Akustik wird immer wichtiger, aber es ist sehr viel schwieriger zu erfassen als die Aerodynamik. Dafür ist der Erkenntnisgewinn größer«, erklärt Jeschke. Der Prüfstand bietet für akustische Messungen ideale Voraussetzungen, da er sehr nahe an der Geometrie realer Industrieverdichter ausgelegt ist. Seit der Inbetriebnahme gilt als Faustregel, nicht mehr als einen Betriebstag pro Woche zu absolvieren. Aus gutem Grund: »Wir müssen die Daten korrekt auswerten und das braucht Zeit. Man muss erkennen, was ein Rau-

schen oder ein Fehler ist. Auch kann eine falsche Kalibrierung vorab unbrauchbare Messdaten erzeugen«, sagt Jeschke. Langsam ist präzise, und präzise ist schnell.

Viele Forschungsvorhaben münden in konkrete Produkte oder Anwendungen. So ist das vollnumerisch ausgelegte und optimierte Laufrad 603 aus einem Forschungsprojekt heraus entstanden. »Die Methodik, mithilfe der Numerik vollautomatisiert zu opti-

mieren, ist ein echtes Erfolgserlebnis der Verbundforschung. Vor allem, weil die Methodik geometrieunabhängig funktioniert«, sagt Jeschke. Derzeit werden an einer Industrieverdichterstufe mit variablem Vorleitrad Strömungsinstabilitäten untersucht, die den Kennfeldbereich einschränken. Und da jedes Forschungsprojekt zahlreiche neue Fragestellungen aufwirft, wird der FVV-Radialverdichterprüfstand noch viele Jahre in Betrieb sein und wertvolle Forschungsergebnisse liefern. //

Forschungsschwerpunkte



ENTWICKLUNGS-
WERKZEUGE



KOMPONENTEN

Stabilität durch Variabilität

Am Radialverdichterprüfstand der FVV am Institut für Strahlantriebe und Turbomaschinen (IST) der RWTH Aachen, eine der leistungsstärksten Forschungsanlagen ihrer Art in Europa, wurde eine neue industriennahe Radialverdichterstufe mit variablem Vorleitrad ausgelegt und gefertigt. Mit ihr werden unter anderem instabile Strömungen im Teillastbereich untersucht.

Radialverdichter arbeiten im Verborgenen – und doch ist eine moderne Gesellschaft ohne sie nicht möglich: Im Transportsektor sorgen sie in Turboladern für effiziente Motoren, im kleinen Pkw-Motor ebenso wie im großen Schiffsdiesel; in Flugzeugen können sie als Hilfstriebwerk zur Energieerzeugung dienen. In deutlich größerem Maßstab kommen Radialverdichter in der Industrie zum Einsatz. »In Abgrenzung zu Turboladern oder Flugzeugtriebwerken werden Industrieverdichter vor allem zur Förderung von Prozessgasen in Industrieanlagen eingesetzt, etwa in der chemischen Industrie oder im Hüttenwesen«, berichtet Dr. Matthias Schleer, Obmann des FVV Arbeitskreises Radialverdicht erforschung. In den nächsten Jahren sei zudem ein gesteigerter Bedarf für die Produktion regenerativ erzeugter Kraftstoffe zu erwarten. Die Funktionsweise, mittels eines rotierenden Laufrads ein Fluid auf ein höheres Druckniveau zu bringen, ist jedoch bei allen Radialverdichtern identisch.

In einem Eigenmittelprojekt wurde im Auftrag der FVV seit Mitte 2017 am Institut für Strahlantriebe und Turbomaschinen (IST) an der RWTH Aachen eine Industrie-Radialverdichterstufe numerisch ausgelegt, konstruiert und gefertigt. Während das in einem Vorläuferprojekt ausgelegte Laufrad SRV4 und dessen Nachfolger 603 eine ähnliche Geometrie

aufweisen, unterscheidet sich das Industrieverdichterrad deutlich. Sowohl die Anzahl der Schaufeln als auch die Geometrie sind ausgelegt auf die speziellen Anforderungen in Industrieanwendungen. Mit dem Umbau wurde die Instrumentierung des Prüfstands überarbeitet, ergänzt und auf die neue Geometrie angepasst, so dass Instabilitäten im Strömungsverlauf zu erkennen sind. In einem nächsten Umbauschritt ist ein neues Spiralgehäuse vorgesehen. »Technisch hat alles gut funktioniert, aber das war zu erwarten. Mittlerweile hat das IST viel Erfahrung mit dem Prüfstand und der Aufbau war Handwerkszeug«, berichtet Schleer. Das Projektziel sieht der Arbeitskreisleiter erfüllt: »Wir haben die technischen Grundlagen gelegt, den Prüfstand umgebaut, mit Messtechnik ausgerüstet und eine Geometrie umgesetzt, die typisch ist für einen Industrieverdichter.«

Mit dem Aufbau ist nun die Basis geschaffen für das IGF-Projekt *Industrieverdichter mit breitem Kennfeld*¹. Denn bei der Optimierung von Radialverdichtern geht es oft nicht darum, einen höheren Druck oder Volumenstrom zu erreichen. »Je nach Einsatzzweck benötigt der Kunde vielmehr ein möglichst breites Kennfeld. Der Verdichter läuft dann im Teillastbereich mit dem halben Nennvolumenstrom bei dennoch gleichem Druckverhältnis«, erklärt

1 Das Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags (20494 N) gefördert

Matthias Schleer und ergänzt: »Problematisch sind dabei aber Strömungsinstabilitäten bei niedrigen Massenströmen, da sie die Ursache von gravierenden Schäden am Laufrad bis hin zu einem Schaufelabriss sein können.« Zum anderen ist der Durchsatz der Verdichter bei hohen Massenströmen durch die Schluckgrenze limitiert. Zwischen diesen beiden Grenzen befindet sich der Betriebsbereich der Verdichter.

Eines der Kernelemente des Industrieverdichters ist ein in den Strömungskanal unmittelbar vor dem Laufrad angeordneter Verstellapparat. »Dieses variable Vorleitrad kann den Anstellwinkel ändern und so einen gezielten Vordrall auf die Strömung geben, die dann mit dem Drall auf das Laufrad trifft«, erklärt Schleer. So lassen sich die Strömungsverhältnisse am Eintritt regulieren und somit auch ein breites Kennfeld darstellen, ohne dass die Strömung abreißt. Im Forschungsprojekt werden die dennoch weiter begrenzenden Strömungsinstabilitäten untersucht; dazu gehören die Auswahl geeigneter Vorhersagemodelle, Experimente am Radialverdichterprüfstand, numerische Strömungssimulationen sowie der Vergleich von Numerik und Experiment.

Projektdaten

→ »Design und Aufbau des FVV Industrieverdichters [1279]: Mit variablem Vorleitrad zur Untersuchung von Strömungsinstabilitäten, welche die nutzbare Kennfeldbreite einschränken«

→ PROJEKTFÖRDERUNG

€ 179.990 // FVV

→ »Industrieverdichter mit breitem Kennfeld [1354]: Untersuchung und Modellierung eines Radialverdichters mit dem Ziel, Methoden zur Vorhersage von Instabilitäten und Kennfeldbreite zu entwickeln, um somit ein Design eines verbesserten Industrieverdichters mit breitem Kennfeld zu ermöglichen«

→ PROJEKTFÖRDERUNG

€ 249.760 // BMWi/AiF

→ »Radialverdichter im flexiblen Betrieb [1443]: Aerodynamische und akustische Untersuchung der Interaktion zwischen Laufrad, Diffusor und Spiralgehäuse in auslegungsfernen Betriebspunkten an einem repräsentativen Radialverdichter«

→ PROJEKTFÖRDERUNG

€ 560.000 // BMWi/AiF | FVV

→ PROJEKTKOORDINATION

Dr. Matthias Schleer, Howden Turbo

→ FORSCHUNGSSTELLE

Institut für Strahlantriebe und Turbomaschinen (IST),
RWTH Aachen University

Vom Aufbau des Industrieverdichters und den mit ihm erzielten Ergebnissen profitieren alle Mitglieder des FVV-Arbeitskreises Radialverdichtersforschung. Zum einen die Hersteller, die im Kundenauftrag Radialverdichter und Laufräder fertigen, zum anderen auch die Anbieter von Berechnungssoftware, die auf neueste Forschungsergebnisse angewiesen sind. Anhand der gewonnenen Daten können sie ihre Entwicklungswerkzeuge und Berechnungsmodelle kalibrieren und verifizieren – und somit Kunden gegenüber nachweisen, dass das Produkt oder die Beratung dem neuesten Stand entspricht. Denn, so Schleer: »Der Wert eines Radialverdichters oder Laufrads liegen weniger in der Fertigung, sondern in der Auslegung, der Berechnung und dem Sicherheitsnachweis.«

Von der neuen Prüfstandskonfiguration am IST profitieren mehrere Forscherteams. Parallel zum *Industrieverdichter mit breitem Kennfeld* gibt es Untersuchungen zur Akustik. Dabei wird derzeit ein neu entwickeltes Messverfahren zur Bestimmung der in die Druckleitung abgestrahlten Schalleistung experimentell angewendet [→ Seite 20]. Ein weiterer Startschuss steht kurz bevor: Im Folgeprojekt *Radialverdichter im flexiblen Betrieb* werden Laufrad und Vorleitrad identisch zur aktuellen Konfi-

guration sein, zusätzlich montieren die Forscher jedoch einen neuen beschauften Diffusor zwischen Laufrad und Messstelle². Bis Anfang 2024 sollen aerodynamische und akustische Untersuchungen der Interaktion zwischen Laufrad, Diffusor und Spiralgehäuse in auslegungsfernen Betriebspunkten erfolgen. Die für die akustischen Messungen benötigte Instrumentierung ist bereits am Prüfstand verbaut.

Da die Schaufeln der Laufräder bei Höchstdrehzahl extrem hoch belastet sind, hat Arbeitskreisleiter Schleer bereits weiteren Forschungsbedarf ausgemacht: Welche Auswirkungen die Stabilitätsgrenzen auf sich bildende Schaufelschwingungen und damit auf das mechanische Design haben, ist möglicherweise ein künftiges Forschungsprojekt. //

Forschungsschwerpunkte



ENTWICKLUNGS-
WERKZEUGE



WIRKUNGSGRAD
UND EFFIZIENZ

² Das Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags (03EE5067) gefördert

Schall bricht Stahl

Forscher der TU Berlin und der RWTH Aachen haben zwei Schallmessverfahren entwickelt, die künftig die derzeit geltende DIN-Norm für akustische Messungen an Radialverdichtern ersetzen könnten. Erste Untersuchungen am Radialverdichterprüfstand der RWTH Aachen zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen den Simulationsergebnissen beider Partner und den Messergebnissen am Prüfstand.

»Es gibt hochfrequente Schwingungen, die sämtliche Komponenten wie die Rohrleitungen, den Kompensator oder die Schalldämpfer zerstören können. Da bricht Stahl wie Eiszapfen«, erklärt Dr. Irhad Buljina von MAN Energy Solutions und verdeutlicht damit die Relevanz des Themas Akustik. Denn die möglichen Auswirkungen werden oft unterschätzt, zugleich haben Industrieunternehmen Probleme, die Anforderungen an Schallschutzmaßnahmen umzusetzen. In Stahlwerken mit großen Getriebe-kompressoren bebt und vibriert manchmal die ganze Halle. Sogar der Kiefer werde angeregt, wenn man neben den Maschinen steht, berichtet Buljina. Er ist verantwortlich für das Forschungsvorhaben *Akustik in Druckleitungen II*, das zurzeit am Institut für Strahlantriebe und Turbomaschinen (IST) der RWTH Aachen und am Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik (ISTA) der TU Berlin bearbeitet wird.

Die primäre Lärmquelle eines Radialverdichters ist der Impeller, der bei bestimmten Frequenzen Töne erzeugt, die das abgestrahlte Schallfeld dominieren. Sie regen akustische Schallfeldstrukturen, die sogenannten Moden an, die wiederum Schallenergie durch die angeschlossenen Rohrleitungen transportieren. Die Moden verursachen akustische Druckschwankungen, die bei passenden Frequenzen die Außenwand der Rohrleitungen zu Strukturschwingungen anregen kann. Besonders störend wird es, wenn die Anregungsfrequenz zu den Resonanz-

frequenzen anderer Rohrleitungen passt. Diese Luft-Struktur-Luft-Kopplung ermöglicht die Abstrahlung von störendem Schall im Umfeld des Verdichters.

Um nun Schutzmaßnahmen wie Schallhauben oder Rohrisolierungen korrekt dimensionieren zu können, muss die innere Schallleistung des Verdichters bekannt sein – und die unterscheidet sich individuell. »Bei MAN bauen wir selten zweimal die gleiche Maschine, alles ist auf die Kundenbedürfnisse abgestimmt. Daher müssen wir die Schallschutzmaßnahmen immer wieder neu auslegen«, erklärt Buljina die Ursache für den Forschungsbedarf. Professor Lars Enghardt von der TU Berlin fügt an: »Grundsätzlich gilt: Was man durch eine lärmarme Auslegung vermeiden kann, muss man später nicht in teuren Schallschutz oder mehr Bauraum durch größere Schalldämpfer investieren.«

»Es gibt hochfrequente Schwingungen, die sämtliche Komponenten wie die Rohrleitungen, den Kompensator oder die Schalldämpfer zerstören können. **Da bricht Stahl wie Eiszapfen.**«

Mit Bezug auf die Arbeitsschutzrichtlinien ist es daher nötig, die Schallabstrahlung auf der Druckseite von Radialverdichtern exakt zu quantifizieren. Das aktuell genutzte Standardmessverfahren ist jedoch zu ungenau und zu teuer, da der Aufwand für den Einbau hitzebeständiger Sensoren auf der Druckseite enorm hoch ist. Eines der ersten Forschungsvorhaben am Radialverdichterprüfstand in Aachen befasste sich daher ab 2015 mit der Akustik in Druckleitungen, mit dem Ziel, ein neues Messverfahren zu entwickeln.

Forscher der RWTH Aachen führten CFD-Simulationen für vier Betriebspunkte auf einer Drezahl-Kennlinie durch, um die Schallanregung und Schallausbreitung bis zur angeschlossenen Druckleitung zu erfassen. »Wegen der komplexen Geometrie auf der Druckseite des Verdichters war eine Vollkranzsimulation notwendig. Zusätzlich musste das Rechengitter fein aufgelöst sein, um numerische Dissipationseffekte bei den relevanten hohen Frequenzen zu vermeiden«, erklärt Marius Geilich, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am IST der RWTH Aachen. Das daraus resultierende Rechengitter mit etwa 170 Millionen Knoten sowie die hohe Zeitauflösung mit bis zu 2.000 Zeitschritten pro Laufradumdrehung konnten nur mit Hochleistungsrechnern bewältigt werden. Die Forscher hatten daher Zugriff auf Europas schnellsten Computer am Forschungszentrum in Jülich. Anschließend erfassten Kollegen der TU Berlin die Schallausbreitung durch die angeschlossene Druckleitung mit Hilfe effizienter CAA-Simulationen. Mit den gewonnenen Erkenntnissen wurden zwei alternative Messverfahren entwickelt, mit denen sich die Schallleistung zuverlässig, genau und kostengünstig vorhersagen lässt.

Im Folgeprojekt *Akustik in Druckleitungen II* wird nun der Reifegrad für die Anwendung in einer industriellen Umgebung experimentell nachgewiesen. Das stellt die Forscher vor einige Herausforderungen. Denn Positionierung und Kalibrierung der Sensoren sind knifflig: Verteilt man mehrere Sensoren über den Umfang der Druckleitung, messen nicht alle das gleiche Ergebnis; auch in Längsrichtung unterscheiden sich die Messdaten aufgrund von Inter-

ferenzeffekten der sich ausbreitenden Schallmoden. Für die akustischen Messungen werden 16 piezoelektrische Sensoren eingesetzt, da diese die nötige Sensitivität aufweisen. Das Übertragungsverhalten der Sensoren war zuvor am Heiß-Akustik-Prüfstand der TU Berlin bei hohen Temperaturen und Drücken verifiziert worden. So war sichergestellt, dass alle Sensoren die gleichen Übertragungseigenschaften hinsichtlich Betrag und Phase der Schallsignale aufweisen.

Projektdaten

→ »Akustik in Druckleitungen I [1227]: Entwicklung und Validierung eines Messverfahrens zur Bestimmung der von einem Radialkompressor in die Druckleitung abgestrahlten Schallleistung«

→ **PROJEKTFÖRDERUNG**

€ 515.000 // DFG | FVV

→ **PROJEKTKOORDINATION**

Dr. Richard Büssow, Industrial Analytics

→ »Akustik in Druckleitungen II [1383]: Experimentelle Anwendung eines neu entwickelten Messverfahrens zur Bestimmung der von einem Radialkompressor in die Druckleitung abgestrahlten Schallleistung«

→ **PROJEKTFÖRDERUNG**

€ 491.950 // DFG | FVV

→ **PROJEKTKOORDINATION**

Dr. Irhad Buljina, MAN Energy Solutions

→ **FORSCHUNGSSTELLEN**

Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik (ISTA) TU Berlin | Institut für Strahlantriebe und Turbomaschinen (IST), RWTH Aachen University

Die Messtechnik wurde am Prüfstand der RWTH Aachen implementiert. Für drei Drehzahlkennlinien und eine Vielzahl von Betriebspunkten wurde die Schalleistung experimentell bestimmt. Das Forschungsvorhaben läuft noch bis Mitte 2022, doch bereits jetzt zeichnet sich ein Erfolg ab: »Bei einem Treffen des Arbeitskreises haben wir Zwischenergebnisse präsentiert und alle waren überrascht, wie gut die Ergebnisse aus der Simulation mit den Messungen am Prüfstand übereinstimmen«, sagt Irhad Buljina.

IST-Leiter Professor Peter Jeschke ist überzeugt: »Das Verfahren wird voraussichtlich für diese Art von Radialverdichtern die derzeit geltende DIN-Norm ersetzen, weil man nun den Lärm sehr viel genauer messen kann. Das ist ein sehr ordentliches und für die Industrie nutzbares Ergebnis.« Denn derzeit hindere mangelnde Erkenntnis die Ingenieure daran, leisere Maschinen zu entwickeln.

Anhand der Forschungsergebnisse wird man Rückschlüsse ziehen können, an welchen Stellen künftig optimiert werden kann. So könnte der Abstand zwischen rotierenden und statischen Teilen verändert werden, auch die Schaufelanzahl und Geometrie ließe sich mit nur geringen Effizienzeinbußen anpassen. Von den Forschungsergebnissen profitieren sollen die Hersteller von Radialverdichtern, aber auch Unternehmen, die Schallschutzprodukte entwickeln und fertigen. Die Forscher in Aachen und Berlin erweitern derweil den Einsatzbereich des Messverfahrens auf Industrieverdichter mit beschaukeltem Diffusor. //

Forschungsschwerpunkte



ENTWICKLUNGS-
WERKZEUGE



MATERIAL- UND
WERKSTOFFE

Geballte Kompetenz

AKTIVE MITGLIEDER IM FACHKREIS



SCANIA



A Rolls-Royce
solution



FEV



Johnson Matthey



Rolls-Royce



Kompressorenbau
Bannewitz GmbH

automotive
engineering

iauv

CFturbo



BorgWarner



BOSCH

Garrett
ADVANCING MOTION

SIEMENS

Howden

TENNECO

Turbo
Science



ABB



Wir leben Autos.

PILLER
Blowers & Compressors



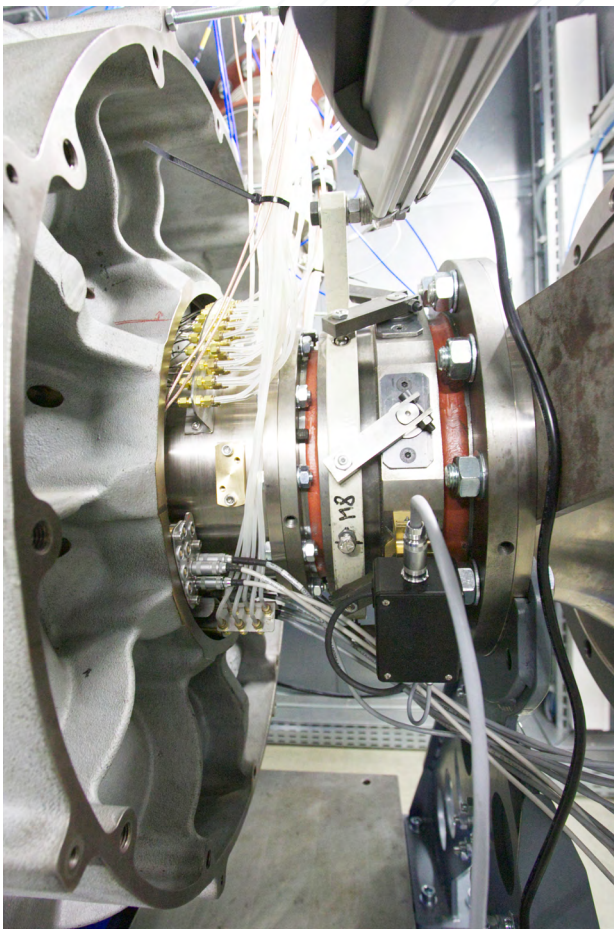
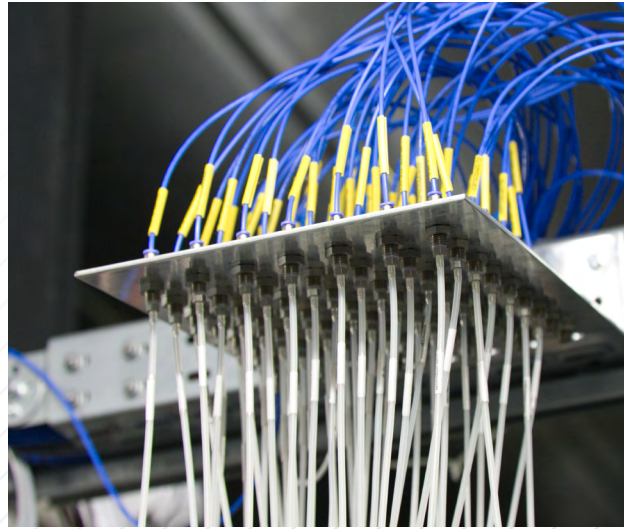
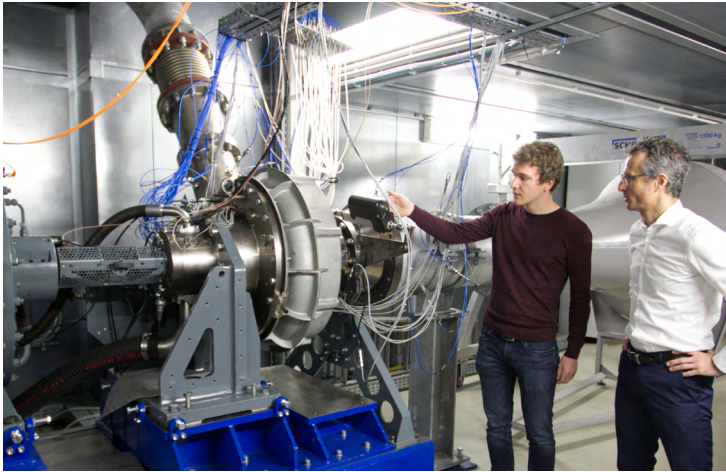
kratzer
AUTOMATION



ANSYS



50 Jahre Radialverdichterforschung in der FVV



Mit der Einweihung des neuen Radialverdichterprüfstandes 2016 an der RWTH Aachen wird die Forschung unter realen Bedingungen möglich. Das Spektrum erweitert sich damit um experimentelle Vorhaben, wie:

- » Design und Aufbau des FVV Industrieverdichters [1279]«
- » Umfangsinhomogene Radialverdichterströmung [1337]«
- » Industrieverdichter mit breitem Kennfeld [1354]«
- » Akustik in Druckleitungen II [1383]«
- » Radialverdichter im flexiblen Betrieb [1443]

BERICHT IM
JAHRESMAGAZIN



Die FVV dankt den Leitern des ›Fachkreises Radialverdichterforschung‹ Dr. Karl-Heinz Rohne (ABB Turbo Systems - bis Dezember 2015) und Dr. Matthias Schleer (Howden Turbo) für die gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit. Ein besonderer Dank geht an die Mitglieder des Fachkreises und die beteiligten Experten in den Forschungsstellen und weiteren Institutionen, die ihr Wissen zur Verfügung gestellt haben.

Innovative und nachhaltige Forschungsk Kooperationen benötigen einen stabilen Finanzierungsrahmen. Unsere Projekte werden aus den Beiträgen der Mitgliedsunternehmen, Kooperationen und aus Mitteln der öffentlichen Forschungsförderung finanziert. Wir bedanken uns bei allen Forschungspartnern für die langjährige, großzügige Unterstützung!

Die Publikation ist online abrufbar:

→ www.fvv-net.de | Medien

→ www.themis-wissen.de | Radialverdichter



HERAUSGEBER

Forschungsvereinigung
Verbrennungskraftmaschinen e.V.
Lyoner Strasse 18
60528 Frankfurt am Main
www.fvv-net.de
www.primemovers.de

AUSGABE

R601 | 2021

AUTOREN

Johannes Winterhagen
und Mathias Heerwagen

REDAKTION

Dirk Bösel, Stephanie Smieja
und Petra Tutsch, FVV

BILDNACHWEIS

Cover: Andreas Schmitter
Innenumschlag: Rui Camilo

Ein Turbo für den Fortschritt

Manche Maschinen wirken so sehr im Verborgenen, dass sie in der Öffentlichkeit kaum wahrgenommen werden – und doch leisten sie Entscheidendes für den Fortschritt in einer Industriegesellschaft. So ergeht es dem Radialverdichter. Dabei steht Europa bei den industriellen Radialverdichtern technologisch an der Weltspitze. Allerdings muss eine solche Spitzenposition immer wieder neu erkämpft werden. Die Industrielle Gemeinschaftsforschung ist ein bewährtes Instrument, um dafür die Voraussetzungen zu schaffen. In einem FVV-Arbeitskreis widmen sich seit mehr als 50 Jahren Industrie und Wissenschaft gemeinsam der Spitzenforschung und legen mit dem aktuellen Forschungsprogramm einen wichtigen Grundstein für ein Industrieland, das seine Energieversorgung auf erneuerbare Quellen umstellt.

Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V.
Research Association for Combustion Engines

Lyoner Strasse 18 | 60528 Frankfurt/M. | Germany
T +49 69 6603 1345 | F +49 69 6603 2345 | info@fvv-net.de

www.fvv-net.de | www.primemovers.de