

**REIHE 08**

MESS-,  
STEUERUNGS-  
UND REGELUNGS-  
TECHNIK



# Fortschritt- Berichte VDI

Dr.-Ing. Wieland Uffrecht,  
Dresden

**NR. 1273**

Meßtechnik für Messungen  
an Maschinenstrukturen in  
schneller Bewegung

BAND  
**1|1**

VOLUME  
**1|1**



# Meßtechnik für Messungen an Maschinenstrukturen in schneller Bewegung

Von der Fakultät Maschinenwesen  
der  
Technischen Universität Dresden

zur  
Erlangung des akademischen Grades eines  
habilitierten Doktors  
angenommene Habilitationsschrift

Dr.-Ing. Wieland Uffrecht  
geb. am 17.03.1972 in Dresden

Tag der Einreichung: 13.03.2019

Vollzug der Habilitation: 18.12.2019

Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Stefan Odenbach  
Prof. Dr.-Ing. Martin Böhle  
Dr.-Ing. habil. Alexander Wiedermann

Vorsitzender der Habilitationskommission: Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Wallmersperger





**REIHE 08**

MESS-,  
STEUERUNGS-  
UND REGELUNGS-  
TECHNIK



# Fortschritt- Berichte VDI

Dr.-Ing. Wieland Uffrecht,  
Dresden

**NR. 1273**

Meßtechnik für Messungen  
an Maschinenstrukturen in  
schneller Bewegung

BAND  
**1|1**

VOLUME  
**1|1**

VDI verlag

Uffrecht, Wieland

## Meßtechnik für Messungen an Maschinenstrukturen in schneller Bewegung

Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 08, Nr. 1273. Düsseldorf: VDI Verlag 2021.

138 Seiten, 119 Bilder, 6 Tabellen.

ISBN 978-3-18-527308-7, ISSN 0178-9546

52,00 EUR/VDI-Mitgliederpreis: 46,80 EUR

**Für die Dokumentation:** Meßtechnik – Telemetrie – Telemetry systems – Measurement on moving machine parts – Flow – Heat transfer – Thermal energy machines – Gas turbines

Die vorliegende Arbeit systematisiert den technischen Aufwand für telemetrische Messungen an bewegten Maschinenteilen. Schwerpunkt ist der Teil einer Meßkette, der wegen der Relativbewegung der Maschinenteile zueinander zusätzlich entsteht. Die technische Realisierung notwendiger Trennstellen muß den Hilfsenergietransport zur Meßstelle hin sowie den Meßwerttransfer in entgegengesetzte Richtung entlang der Meßkette gewährleisten. Dabei sind im Übertragungsbereich ablaufende Bewegungen, die Übertragung von Hilfsenergie und Meßdaten sowie Positionen erforderlicher Trennstellen in der Meßkette maßgebliche Kriterien für die Lösung der Meßaufgaben. Dieser Systematisierung folgend, präsentiert die Arbeit ausgewählte Ergebnisse von Meßaufbauten für Entwicklungsarbeiten an thermischen Energiemaschinen – vornehmlich für Sekundärluftsysteme von Gasturbinen. Die mit unterschiedlicher Auflösung telemetrisch bereitzustellenden Meßdaten werden für relevante Größen wie Druck, Schalldruck, Temperatur, Wärmeübergang nebst Strömungsgeschwindigkeiten und Stoffaustausch ausgewertet.

### Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

### Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek (German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at [www.dnb.de](http://www.dnb.de).

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner bis heute andauernden Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am *Maschinenlabor* der Technischen Universität Dresden, zunächst am Lehrstuhl für Meß- und Automatisierungstechnik unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. Erwin Kaiser, sowie nach Berufung seines Nachfolgers Herrn Prof. Dr. Stefan Odenbach am Lehrstuhl für Magnetofluiddynamik, Meß- und Automatisierungstechnik.

An dieser Stelle bedanke ich mich bei allen, die aktiv oder gewährend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Zuvor der steht hier Herr Prof. Erwin Kaiser – ist er doch mein Doktorvater und auch erster Motivationsgeber für eine Habilitationsschrift und damit ebenso Urheber maßgeblicher Voraussetzungen für ein derartiges Vorhaben. Sein Interesse für die bearbeiteten Inhalte reicht weit über seine Emeritierung bis in die Gegenwart und ist beständiges Reflexionsmedium sowie Rat zu allen aufkommenden Fragen. Dieser Position keinesfalls nachrangig, ist Herr Prof. Stefan Odenbach zu nennen, denn er ermöglichte und beförderte als langjähriger, aktueller Leiter der Struktureinheit das Gelingen dieser Schrift. Nur mit vereinten Motivationskräften generierten beide das für die Fertigstellung dieser Arbeit erforderliche Maß an Ermutigung zum Konzentrieren und Dokumentieren der Inhalte. Auch bei der Einwerbung notwendiger Drittmittel standen beide fachinhaltlich sowie motivierend Pate und sorgten somit für wesentliche Voraussetzungen des hiermit abgeschlossenen Vorhabens. Ein großes Dankeschön geht an beide.

Das in der Konstellation gebildete Spannungsfeld aus wichtiger Wahrung fachlicher Kontinuität einerseits und notwendiger endgültiger Ankunft in bundesrepublikanischer Drittmittelforschungswirklichkeit andererseits bot Bewährungsmomente, bei denen die Industriepartner *MAN*, *MTU*, *GE* sowie *Siemens* für die notwendige Bewegungsfreiheit sorgten, jene angespannte Situation aufzulösen. Die fachliche Forschungslinie konnte dadurch – mitgetragen von einer Gruppe emsiger Doktoranden – der Struktureinheit erhalten werden. Ein aufrichtiger Dank geht an die genannten Industriepartner für das Interesse an den Inhalten sowie für das Engagement in gemeinsamen interessanten Forschungsvorhaben.

Dankende Grüße sende ich von hier zudem an Herrn Prof. Dr. Alexander Wiedermann und an Herrn Prof. Dr. Martin Böhle für die freundliche Übernahme der notwendigen weiteren Gutachten zum Abschluß des Habilitationsverfahrens.

Meinen aktuellen sowie ehemaligen Kollegen vom Maschinenlabor und insbesondere den Doktoranden der Gruppe sei ebenfalls gedankt. Haben sie doch in Summe zur Bewerkstelligung aller experimentellen Arbeiten in maßgeblichem Umfang beigetragen. Schlußendlich sind nicht alle Inhalte, die Dank der Mithilfe zur Zeit der Einreichung vorlagen, in die Arbeit eingeflossen. Sie mögen mir die ungleiche Auswahl der Inhalte verzeihen. Hervorzuheben ist an dieser Stelle der über seine längst beendete Dienstzeit hinaus wirkende Fundus an Konstruktionen unseres letzten Konstrukteurs Herrn Heinz Kluttig, der für junge Kollegen immer wieder Ausgangspunkt und Anregung für aktuelle konstruktive Auslegungen ist.

Auch den Mitarbeitern vom Werkstattverbund der Technischen Universität Dresden möchte ich meinen Dank aussprechen. Sie haben in fundamental maßgeblicher Weise das Gelingen der experimentellen Arbeiten abgesichert bzw. ermöglicht. Ihre Erfahrung sowie Ihr konstruktiv fertigungstechnisches Mitdenken, sind Sicherheit sowie doppelter Boden für die Konstruktionen junger Aspiranten, auf denen die experimentelle Forschung im Maschinenbau in der aktuellen Hochschullandschaft infolge irriger Mittelbaupolitik nun allein beruhen muß.

Einen Gruß richte ich von hier aus an die Familie – hat sie doch die ursächlichen Voraussetzungen geschaffen. Ausgehend von den Eltern, die Elektrotechnik und Physik bzw. Ingenieurökonomie Maschinenbau studierten, sind zudem der Großvater mit dem Fach Maschinenbau sowie der Onkel

mit Experimentalphysik und seiner Tätigkeit im Fernmeldewesen als Einflüsse zu nennen. Möglicherweise hatte die Lage in der späten DDR zur Folge, daß diese Fachlichkeiten ausstrahlten beim Ausgleich der Mangelsituation und dem Sproß das Verständnis technischer Funktionalität nebst Selbsthilfebefähigung als zwingend erforderlich erscheinen mußte. Mindestens förderte die Familie mein technisches Interesse zeitig und interdisziplinär, was ganz sicher dieser Arbeit zugute kam – vielen Dank dafür.

Nun noch ein Wort an eventuelle Leser, wenngleich mir bewußt ist, daß deren Anzahl überschaubar bleibt, da Monographien im ingenieurwissenschaftlichen Bereich selten großes Publikum erzielen, und diese Arbeit ganz gewiß nicht davon abweicht. Sie berichtet überblicksartig und führt Ergebnisse einzelner Forschungsaktivitäten im Detail aus. Sie ist *keinesfalls* als *Nachbauanleitung* für Telemetriesysteme oder Teile davon gedacht. Eine Ausnahme davon bildet lediglich Bild 5 in Abschnitt 3.2.3 „Aktive analoge Technik“, das den bewegten Systemanteil eines zweikanaligen analogen Telemetriesystems zeigt und darüber hinaus geeignet ist, meinen Kindern Aila und Alrik Uffrecht erste prinzipielle Einblicke in die Meßtechnik zu geben. Die Tochter realisierte jene Schaltung, um eine Temperaturmessung an zwei Laufschaufern ihrer Weihnachtspyramide zu ermöglichen.

Freital, den 05.01. 2021

Wieland Uffrecht

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort .....</b>	<b>III</b>
<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>V</b>
<b>Kurzfassung .....</b>	<b>VII</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>VIII</b>
<b>1 Motivation und Abgrenzung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Einführung .....</b>	<b>2</b>
2.1 <i>Grundaufbau einer Meßkette.....</i>	<i>3</i>
2.2 <i>Übergang zur Messung an bewegten Maschinenteilen .....</i>	<i>4</i>
2.3 <i>Begriff Telemetrie.....</i>	<i>5</i>
<b>3 Systematisierung.....</b>	<b>7</b>
3.1 <i>Bewegung und Übertragung.....</i>	<i>9</i>
3.1.1 <i>Bewegung.....</i>	<i>9</i>
3.1.2 <i>Übertragung.....</i>	<i>12</i>
3.2 <i>Anordnung der Trennstelle .....</i>	<i>17</i>
3.2.1 <i>Meßeffekt im bewegten System .....</i>	<i>18</i>
3.2.2 <i>Passive Technik .....</i>	<i>19</i>
3.2.3 <i>Aktive analoge Technik .....</i>	<i>21</i>
3.2.4 <i>Digitalisierung in der Trennstelle .....</i>	<i>23</i>
3.2.5 <i>Aktive digitale Technik .....</i>	<i>24</i>
3.2.6 <i>Digitale Technik mit Zwischenspeicher .....</i>	<i>26</i>
3.3 <i>Weitere Aspekte .....</i>	<i>28</i>
3.3.1 <i>Meßaufgabe und -verfahren .....</i>	<i>28</i>
3.3.2 <i>Belastung .....</i>	<i>29</i>
3.3.3 <i>Aufbau .....</i>	<i>30</i>
3.4 <i>Realisierung von Meßaufbauten an bewegten Maschinenteilen .....</i>	<i>31</i>
3.5 <i>Zusammenfassung .....</i>	<i>34</i>
<b>4 Meßeffekt und passive Technik im bewegten System.....</b>	<b>35</b>
4.1 <i>Messungen mit 2D-LDA in einer rotierenden Kammer .....</i>	<i>37</i>
4.1.1 <i>Meßaufbau und Auswertung .....</i>	<i>37</i>
4.1.2 <i>Ergebnisse für drallarme axiale Zuströmung zu K2, radiale Ausströmung K1 .....</i>	<i>40</i>
4.1.3 <i>Ergebnisse für radiale Zuströmung Kammer 1 und axiale Ausströmung Kammer 2 .....</i>	<i>46</i>
4.1.4 <i>Zusammenfassung .....</i>	<i>48</i>
4.2 <i>Wandtemperatur einer rotierenden Kammer gemessen anhand der Farbreaktion von Flüssigkristallen..</i>	<i>49</i>
4.2.1 <i>Meßaufbau .....</i>	<i>49</i>
4.2.2 <i>Auswertung .....</i>	<i>50</i>
4.2.3 <i>Auswertung instationärer Effekte .....</i>	<i>54</i>
4.2.4 <i>Ergebnis und Zusammenfassung .....</i>	<i>56</i>
4.3 <i>Bestimmung der Luftwechselzahl in einer rotierenden Kammer unter Verwendung von Zigarettenrauch ..</i>	<i>57</i>
4.3.1 <i>Meßaufbau .....</i>	<i>58</i>

4.3.2	Luftwechselzahl.....	59
4.3.3	Auswertung.....	60
4.3.4	Ergebnis und Zusammenfassung.....	62
4.4	<i>Einordnung</i> .....	65
<b>5</b>	<b>Messungen mit Telemetriesystem.....</b>	<b>67</b>
5.1	<i>Prinzipieller Aufbau eines digitalen Telemetriesystems</i> .....	67
5.2	<i>Kalibrierung der Druckmeßtechnik</i> .....	69
5.2.1	Druckzuleitung zum Sensor unter Fliehkrafteinfluß.....	69
5.2.2	Drucksensormembran im Fliehkraftfeld.....	71
5.2.3	Rotierende Drucksensorkalibrierung.....	72
5.2.4	Zusammenfassung.....	73
5.3	<i>Strömung in rotierender radial durchströmter Kammer</i> .....	74
5.3.1	Kernrotationsverhältnis $\beta$ .....	74
5.3.2	Eindimensionales Modell.....	76
5.3.3	Experimentelle Untersuchungen zum Kernrotationsverhältnis $\beta$ .....	80
5.3.4	Ergebnis.....	82
5.3.5	Wertung.....	86
5.3.6	Zusammenfassung .....	86
5.4	<i>Einordnung</i> .....	87
<b>6</b>	<b>Messungen mit komplexem Telemetriesystem .....</b>	<b>88</b>
6.1	<i>Prinzipieller Aufbau eines digitalen Telemetriesystems mit Zwischenspeicher</i> .....	88
6.2	<i>Akustische Messungen im rotierenden Ringraum</i> .....	90
6.3	<i>Wärmeübergangskoeffizientensor für telemetrische Anwendungen</i> .....	96
6.3.1	Literatursicht.....	96
6.3.2	Anordnung zur Messung von Wärmeübergangskoeffizienten.....	99
6.3.3	Erprobung an längsangeströmter Platte .....	102
6.3.4	Auswertung.....	104
6.3.5	Ergebnis.....	106
6.4	<i>Rotierende Scheibe</i> .....	107
6.4.1	Instrumentierung.....	107
6.4.2	Kalibrierung in der Längsplatte .....	109
6.4.3	Messungen an der freien Scheibe .....	110
6.4.4	Messungen am offenen Rotor-Stator-System .....	114
6.4.5	Ergebnis.....	116
6.5	<i>Einordnung</i> .....	117
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>118</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>121</b>	
<b>Zitierte, vom Autor betreute akademische Abschlußarbeiten</b> .....	<b>126</b>	
<b>Zitierte Berichte</b> .....	<b>126</b>	
<b>Veröffentlichungen mit eigener Beteiligung</b> .....	<b>127</b>	

## Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit systematisiert den technischen Aufwand für telemetrische Messungen an bewegten Maschinenteilen. Schwerpunkt ist der Teil einer Meßkette, der wegen der Relativbewegung der Maschinenteile zueinander zusätzlich entsteht. Die technische Realisierung notwendiger Trennstellen muß den Hilfsenergetransport zur Meßstelle hin sowie den Meßwerttransfer in entgegengesetzte Richtung entlang der Meßkette gewährleisten. Dabei sind im Übertragungsbereich ablaufende Bewegungen, die Übertragung von Hilfsenergie und Meßdaten sowie Positionen erforderlicher Trennstellen in der Meßkette maßgebliche Kriterien für die Lösung der Meßaufgaben. Dieser Systematisierung folgend, präsentiert die Arbeit ausgewählte Ergebnisse von Meßaufbauten für Entwicklungsarbeiten an thermischen Energiemaschinen – vornehmlich für Sekundärluftsysteme von Gasturbinen. Die mit unterschiedlicher Auflösung telemetrisch bereitzustellenden Meßdaten werden für relevante Größen wie Druck, Schalldruck, Temperatur, Wärmeübergang nebst Strömungsgeschwindigkeiten und Stoffaustausch ausgewertet.

## Abstract

This thesis systematises the technical effort for telemetric measurements on moving machine parts. The focus is on the part of a measurement chain that is additionally created due to the relative movement of the machine parts to each other. The technical realisation of necessary separation points must guarantee the auxiliary energy transport to the measuring point as well as the measurement data transfer in the opposite direction along the measuring chain. Movements occurring in the transmission range, the transmission of auxiliary energy and measured data as well as the positions of necessary separation points in the measuring chain are decisive criteria for the solution of the measuring tasks. Following this systematisation, the thesis presents selected results of measurement set-ups for development work on thermal energy machines - primarily for secondary air systems of gas turbines. The measurement data to be provided telemetrically with different resolutions are evaluated for relevant variables such as pressure, sound pressure, temperature, heat transfer together with flow velocities and mass transfer.

# 1 Motivation und Abgrenzung

Der *Maschinenbau* – seit Generationen fundamentaler Wirtschaftsfaktor und Basis der technologischen und strukturellen Entwicklung führender Industrienationen sowie unverzichtbarer Wegbereiter anderer Technologiefelder – bezieht die Kraft für den eigenen ungebremsten Fortschritt einerseits aus der Paarung von Genialität und Befähigung seiner Ingenieure und andererseits aus der präzisen Kenntnis der Zusammenhänge für das spezielle Problem. Diese Kenntnis ermöglicht die Aufrechterhaltung des seit Anbeginn bestehenden Trends zur Steigerung der Intensitätskennwerte, welcher mit steigender Effizienz, verringertem Bauraum und reduziertem Leistungsgewicht oder allgemeiner mit gesteigertem Gebrauchswert und gesenkten Kosten der Maschinen einhergeht. Diese gesellschaftlich meist erwünschte Entwicklung hat eine verbesserte Energienutzung und gesteigerte Materialauslastung zum Ziel. Für das Auffinden von weiterem Verbesserungspotential ist die *Meßtechnik* ein unverzichtbares Instrument, das die spezifische Situation der zu verbesserten Baugruppe erkennen läßt. Leider sind die physikalischen Zusammenhänge zwar meist prinzipiell bekannt, aber wegen der Komplexität der Maschinen allein aus theoretischen Überlegungen bzw. aus der Kenntnis der Gesetzmäßigkeiten heraus nicht in hinreichender Genauigkeit zugänglich. Dank experimenteller Arbeit, die durch Fortschritte in der Meßtechnik immer schwierigere Probleme anzugehen vermag, gelingt es, die Weiterentwicklung des Maschinenbaus auch ohne geschlossene Lösungen im wissenschaftlichen Sinne aufrecht zu erhalten. Dieser Umstand begleitet den Ingenieur seit je her, so daß Empirie und Meßtechnik für die experimentelle Forschung im Maschinenbau unverzichtbar sind.

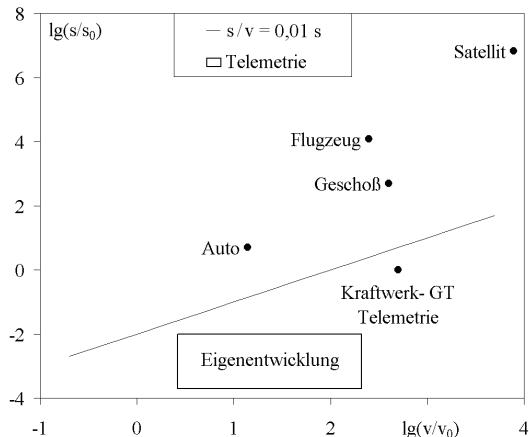
Maschinen bestehen aus zueinander bewegten Teilen, weshalb oft Situationen und unmittelbare Umgebungsbedingungen von bewegten Maschinenstrukturen interessieren. Nicht immer gelingt es, die zu beobachtende Szenerie im Experiment auf ruhende Systeme zu übertragen, ohne die Übereinstimmung mit dem Original zu verlieren. Prominente Beispiele dafür sind die Wärmeübergangs- und Strömungsbedingungen in den Baugruppen von Turbomaschinen. Diese erfordern die Messung im bewegten System, da hohe Radialbeschleunigungen nebst Feldgradienten im ruhenden Experiment nicht zu erzielen sind.

Der erhöhte Schwierigkeitsgrad von Messungen an in Bewegung befindlichen Maschinenstrukturen bedingt einen im Vergleich zu meßtechnisch leichter zugänglichen ruhenden Baugruppen geringeren Kenntnisstand für bewegte Maschinenteile. Dies läßt die Schlußfolgerung zu, daß gerade die bewegten Strukturen aktueller Maschinen noch Verbesserungspotential bieten, das es durch experimentelle Forschung und Meßtechnikeinsatz aufzufinden gilt.

Die vorliegende Arbeit systematisiert daher Messen und Meßtechnik für bewegte Maschinenstrukturen und ordnet experimentelle Aktivitäten des Autors und deren Ergebnisse in diese Systematik ein. Dabei sind besonders die Probleme Gegenstand der Betrachtung, die Messungen im bewegten System zusätzlich zur Problematik beim Messen der betreffenden Größen hervorrufen. Die präsentierten experimentellen Aktivitäten enthalten neben dem Ergebnis der jeweilig speziellen Untersuchung eine Darstellung der Lösung technischer Probleme für die Messung im bewegten System.

Bei den in der vorliegenden Arbeit betrachteten bewegten Maschinenstrukturen dominieren die Probleme hoher Bewegungsgeschwindigkeit die der Übertragungsentfernung vom bewegten zum ruhenden System. Für die Passage der genannten Übertragungsentfernung mit der Bewegungsgeschwindigkeit des Maschinenteils vergegne nur ein Bruchteil einer Sekunde für die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Meßprobleme. Diese Abgrenzung engt das Zielgebiet der Arbeit auf Bewegungen ein, die mit hoher Dreh- oder Wiederkehrfrequenz ablaufen und vorwiegend innerhalb von Verarbeitungs-, Kraft-, Arbeits- und speziell in Turbomaschinen vorzufinden sind. Die in dieser Arbeit präsentierten experimentellen Aktivitäten betreffen Baugruppen aus dem Sekundär-luftsystem von Gasturbinen sind aber prinzipiell übertragbar auf ähnliche Bewegungen.

Bild 1 illustriert diesen Gedanken, der Fernmeß- oder Fernerkundungsanwendungen von denen der Messung an bewegten Maschinenteilen im Sinne dieser Arbeit abgrenzt. Dabei erscheint das Auto, dessen Geschwindigkeit vom Straßenrand aus zu messen ist, neben dem Satellit im erdnahen Orbit, und beide sind jenseits der Linie  $s/v = 0,01$  s. Diese gewählte Linie entspricht dem Verhältnis aus Übertragungsentfernung und Bewegungsgeschwindigkeit des Objektes. Unterhalb dieser Linie sind der Erprobungsbereich der vom Autor entwickelten Telemetriesysteme neben einem hypothetischen Telemetriesystem, wie es die Anwendung in einer Kraftwerksgasturbine im Extremfall erfordern könnte, eingetragen.



**Bild 1** Übertragungsentfernung  $s$  aufgetragen über der Bewegungsgeschwindigkeit  $v$  eines Objektes von dem Meßdaten zu übertragen sind mit  $s_0 = 1$  m und  $v_0 = 1$  m/s. Abgrenzung  $s/v = 0,01$  s zur Fernmessung bzw. -erkundung, Erprobungsbereich des vom Autor entwickelten und im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Meßsystems „Telemetrie“, weitere Einzelanwendungen: „Satellit“ entsprechend niedrigem Erdorbit, „Auto“ als Geschwindigkeitsmessung im Stadtverkehr, „Kraftwerk- GT Telemetrie“ – Telemetrieanwendung z. B. in Kraftwerksgasturbine mit  $v = 500$  m/s und  $s = 1$  m

Obwohl Telemetriesysteme für Messungen an bewegten Maschinenteilen unverzichtbar sind und immer häufiger eingesetzt werden, umfaßt die Systematisierung dieser Arbeit auch Aufbauten zur Messung an bewegten Maschinenteilen, die nicht unbedingt als Telemetriesystem zu bezeichnen sind.

## 2 Einführung

Der Wunsch, an oder in bewegten Bauteilen zu messen, erfordert eine Reihe von Aktivitäten, die wesentlich höhere Aufwendungen und Anstrengungen bedingen als Messungen an ruhenden Aufbauten. Ausgangspunkt ist daher der im anschließenden Abschnitt kurz beschriebene Grundaufbau einer Meßkette, wie er im Rahmen der Arbeit Verwendung findet. Dieser Grundaufbau unterscheidet sich prinzipiell nicht von dem einer Meßkette für den ruhenden Aufbau, wobei für die Messung im bewegten System die Trennstelle zwischen bewegtem und ruhendem System an technologisch vorteilhafter Position zu implementieren ist. Der daran anschließende Abschnitt nennt eine Reihe von Überlegungen und Sachverhalten, die diese zusätzliche Schwierigkeit hervorruft.

Zur Messung an oder in bewegten Bauteilen zählen im Sinne dieser Arbeit einerseits Messungen an oder in bewegten Maschinenteilen, die Festkörper sind, und andererseits Messungen in von bewegten Bauteilen abgegrenzten Räumen. Dies betrifft beispielsweise Räume in Maschinenstrukturen, deren Durchströmung und Temperatursituation von den sie begrenzenden und in Bewegung befindlichen Maschinenstrukturen maßgeblich beeinflußt sind.

Die Einstufung als Messung an oder in bewegten Maschinenteilen erfolgt dann, wenn einerseits der Transportweg der Informationen, die den Meßwert ergeben, auf oder in dem bewegten Bauteil

beginnt oder wenn andererseits die Informationen aus den vom bewegten Bauteil begrenzten Räumen stammen.

## 2.1 Grundaufbau einer Meßkette

Eine Meßkette ist der Signalpfad vom Ort der Nutzung des Meßeffektes bis zur abschließenden Speicherung der Meßdaten. Dieser Weg der Information von der Meßstelle bis zum Massenspeicher umfaßt verschiedene Stationen, die nicht in allen Meßeinrichtungen getrennt oder vereinzelt anzutreffen sind.

Die *Meßkette* vereinigt im einfachen Fall die nachstehenden *Stationen*:

1. Meßeffekt,
2. Aufnahme bzw. Übertragung ins z. B. Elektrische,
3. Pegelanpassung, Behandlung im Analogen,
4. Digitalisierung,
5. Zwischenspeicherung,
6. Verarbeitung, ggf. Kompression und
7. abschließende Speicherung.

Dies trifft für einfache Meßstellen zu, bei denen das Meßergebnis nicht aus der Kombination zweier oder mehrerer Einzelmeßwerte besteht. Ist das hingegen der Fall, dann sind Teile der Meßkette doppelt bis zur Vereinigungsstelle ausgeführt, die als zusätzliche Station hinzukommt. Eine aus zwei Drucksensoren bestehende Meßstelle zur Bestimmung der Druckdifferenz ist ein Beispiel dafür.

Diese Fälle haben für die Betrachtung der Messung an bewegten Maschinenteilen keinen signifikant anderen Charakter, da lediglich ein Verarbeitungsschritt entlang der Meßkette in Richtung Meßeffekt verschoben ist. Für das Beispiel Differenzmeßstelle bestehend aus zwei Drucksensoren kann die Differenzbildung auch nach abschließender Speicherung rechnerisch als Auswertungsmaßnahme erfolgen. Wenn tatsächlich nur die Differenz interessiert, so erhält die Differenzmessung Vorrang, da sie hinsichtlich Meßunsicherheit, Speicher- und Rechenaufwand Vorteile aufweist.

Diese Meßstellen, die vom einfachen Muster zuvor aufgezählter Stationen entlang des Informati onspfades abweichen, erfordern für die Implementierung ins Meßsystem zwar gesonderte Behandlung, aber sie belegen keine Extrapolation im Sinne einer Systematisierung. Sie benötigen – wie andere Meßstellen auch – Hilfsenergie, Beteiligung an der Signalübertragung und eine Trennstelle für den Informationsübergang vom bewegten ins ruhende System.

Der *Meßeffekt* ist jener Zusammenhang von der Meßgröße mit einem *registrierbaren Merkmal* der Meßstelle, der den Meßwert als Information über die Meßgröße zu gewinnen gestattet.

Die Qualität der Meßeinrichtung hängt einerseits von der Eindeutigkeit des Zusammenhangs von Meßgröße mit dem registrierbaren Merkmal und andererseits von der Stärke des Zusammenhangs ab. Während Querempfindlichkeiten zu anderen Größen die Eindeutigkeit beeinträchtigen und damit zu Interpretationsproblemen führen, erfordert ein schwacher Meßeffekt nachfolgende Verstärkung, die technologischen Begrenzungen unterliegt. Konstruktive Maßnahmen an der Meßstelle können die Querempfindlichkeit reduzieren, oder es erfolgt eine Kompensation im nachfolgenden Teil der Meßkette. Eine andere Möglichkeit diesem Problem zu begegnen besteht in der getrennten Messung der unerwünscht wirkenden Größe und der nachträglichen rechnerischen Korrektur.

Die *Aufnahme* des registrierbaren Merkmals und die *Übertragung bzw. Aufprägung* auf ein *Trägersignal* findet im Bauteil *Sensor* statt. Dabei erfolgt die Übertragung meist ins Elektrische, aber auch andere Systeme wie z. B. pneumatische oder mechanische sind bekannt.

Nach der Gewinnung eines Signals erfolgt dessen *Pegelanpassung und Behandlung im Analogen*. Dies hängt oft mit den Anforderungen des entlang des Informationspfades nachfolgenden Analog-Digital-Umsetzers zusammen. Zudem kann ein in analoger Technologie ausgeführter Verarbeitungsschritt implementiert sein. Der Einsatz eines zeitlich diskret arbeitenden Analog-Digital-Umsetzers mit vorgegebener Datenrate erfordert beispielsweise immer einen Tiefpaß vor dem Eingang, der die Verletzung des Abtasttheorems verhindert, wenn nicht andere Randbedingungen dessen Einhaltung absichern oder die gezielte Verletzung zu behandeln erlauben.

Die *Digitalisierung* als anschließende Station, die die Information auf ihrem Weg entlang der Meßkette passiert, ist eine Diskretisierung der Signalamplitude und des zeitlichen Verlaufs. Die Feinheit der Diskretisierungen hinsichtlich von Zeit und Amplitude legen gemeinsam multiplikativ die Datenrate fest. Die Digitalisierung ermöglicht eine weitere Verarbeitung und Übertragung ohne zusätzliche Fehler, weshalb sie im Verlauf der Jahrzehnte örtlich näher an die Position des Meßeffektes in der Meßkette heranrückt. So erfolgte die Diskretisierung früher beim Ablesen und notieren des Meßwertes etwa in Form der Stellenanzahl, während ein in aktueller Halbleitertechnik realisierter Temperatursensor die gesamte Meßkette bis zur Digitalisierung in sich vereint.

Die Notwendigkeit einer *Zwischenspeicherung* bestimmen Umfang und Art anschließender Übertragung und Verarbeitung im Digitalen. Eine Zusammenfassung mehrerer Meßwerte zu Datenpaketen und deren Erweiterung um eine Prüfsumme zur Überwachung einer fehlerfreien Übertragung sowie eine rechnerische Datenreduktion bedingen eine Zwischenspeicherung. Eine rechnerische Verknüpfung von Meßwerten zu einer kombinierten Ergebnisgröße erfordert ebenfalls eine Zwischenspeicherung.

Die genannten Aktivitäten Datenreduktion, Zusammenfassung, Prüfsummenbildung, Berechnung statistischer Kennwerte oder andere Datenumformungen, die nicht bis zur abschließend gespeicherten Form führen, erhalten im Sinne der Systematisierung der Arbeit die Bezeichnung *Vorverarbeitung*. Den Zweck dieser Gliederung verdeutlicht das Beispiel eines Telemetriesystems, das diese Vorverarbeitung im bewegten Teil der Meßkette vollzieht und damit Übertragungsfehler anhand einer Prüfsummenbildung erkennen lässt oder Übertragungszeiten durch Datenreduktion verringert.

Die *abschließende Speicherung* in einem Massenspeicher findet heute fast immer auf dem Rechner statt, der auch Auswertungen erstellt. In jenem Rechner endet die Meßkette im Sinne dieser Darstellung.

## 2.2 Übergang zur Messung an bewegten Maschinenteilen

Die Meßkette für die Messung an bewegten Maschinenteilen beginnt auf dem bewegten Maschinenteil und endet im Auswertungsrechner, der im Sinne dieser Darstellung keiner Bewegung unterliegt. Daraus erwächst die Notwendigkeit, an mindestens einer Stelle entlang der Meßkette den Übergang vom bewegten Teil des Systems auf den ruhenden Teil zu realisieren. Dieser Umstand und die Tatsache, daß für den Betrieb einer Meßstelle einerseits Information in Richtung des ruhenden Systemteils und andererseits für Verstärkung und Meßbetrieb benötigte Hilfsenergie in Richtung des bewegten Systemteils fließen muß, birgt eine Reihe von Problemen. Diese variieren je nach Meßgröße, Situation der Meßstelle im bewegten Systemteil und Bewegung des Maschinenteils.

Der Ingenieur ist daher mit einer Reihe von Kriterien konfrontiert, die je nach den Randbedingungen einerseits fest vorgegeben oder andererseits in konstruktiv technologischer Hinsicht frei wählbar sind.

Es ist die Frage zu stellen, an welcher Position in der Meßkette der durch die Bewegung bedingte konstruktive Spalt zwischen ruhendem und bewegtem Teil des Systems liegt. So kann beispielsweise nur der Meßeffekt im bewegten Systemteil mitfahren, während der ganze Rest der Meßkette ruht.

Als Beispiel hierfür dient die Temperaturmessung an einem bewegten Maschinenteil mit einem Pyrometer. Das zu *registrierende Merkmal* ist z. B. die von der Temperatur abhängige Strahlungsintensität. Die Registrierung erfolgt vom ruhenden Systemteil aus mit Einzelsensor oder Sensorfeld. Alle Stationen entlang der Meßkette ab der *Aufnahme*, die der Ablesung des zu *registrierenden Merkmals* gleichkommt, ruhen. Eine Hilfsenergieübertragung ist nicht erforderlich, da der strahlende Körper für die Messung keine Hilfsenergie benötigt.

Ein hinsichtlich der Anordnung der Trennstelle zwischen ruhendem und bewegtem Teil der Meßkette deutlich anderer Fall liegt vor, wenn ein Telemetriesystem mit Rechner und Zwischenspeicher Meßdaten von z. B. Druck- und Temperaturmeßstellen erfaßt, verarbeitet, speichert und versendet. Dieser Fall ist dadurch gekennzeichnet, daß nur die letzte Station – die *abschließende Speicherung* – zum ruhenden Teil der Meßkette gehört. Das erfordert, den maßgeblichen bewegten Anteil der Meßkette so zu ertüchtigen, daß er den Betrieb am bewegten Maschinenteil erträgt. Vor diesem Hintergrund ist der Ingenieur einerseits bestrebt, das Meßsystem auf möglichst einfache Art zu realisieren. Andererseits kann bei reduzierter Komplexität, die beispielsweise Aufwendungen hinsichtlich von Meßverstärker, Spannungsregler, Auflösung und Kabelbaum einspart, die Funktionalität leiden. Die genaue Kenntnis des realisierten Meßsystems mag einige der dadurch hervorgerufenen Nachteile ausgleichen, indem Einflüsse durch Kalibrierung berücksichtigt oder durch die Ablaufsteuerung unterdrückt sind.

Wenn das Meßsystem überwiegend auf dem bewegten Maschinenteil mitfährt, erlangt die Hilfsenergieversorgung einen maßgeblichen Stellenwert. Es umfaßt einerseits die Bereitstellung in ausreichender Menge und andererseits die Sicherstellung der Qualität der Hilfsenergie unter diesen Bedingungen. So erfordert ein meßtechnischer Aufbau mit reduzierter Komplexität eine hinreichend determinierte Betriebsspannung, die unter zuvor genannten Bedingungen nicht immer so gelingt, wie es für stationäre Elektronik problemlos ist.

Diese und weitere prinzipielle Fragen, die unmittelbar aus der anteiligen Anordnung der Meßkette am bewegten Maschinenteil resultieren, werden im Hauptabschnitt 3 zusammengetragen, systematisiert und nach Möglichkeit von Beispielen und Erfahrungen aus der eigenen Arbeit gestützt.

### 2.3 Begriff Telemetrie

Der Begriff *Telemetrie* ist kurz – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – zu beleuchten, da er für diese Arbeit wichtig ist und im Verlauf der technischen Entwicklung uneinheitlich verwendet wurde.

Ein Blick in den Duden [1] enthält einen Untereintrag zum Begriff Telemeter als Entfernungsmesser mit dem Begriff Telemetrie als Entfernungsmessung. Während ein früheres naturwissenschaftlich-technisches Brockhaus-Nachschlagewerk [2] noch keinen Eintrag enthält, liefert das sehr umfassende „Handbuch für elektrisches Messen mechanischer Größen“ [3] von 1967 detailreiche Angaben zur Funktion damaliger Telemetriesysteme. Das im Vergleich zum Duden [1] nur 3 Jahre neuere Fremdwörterbuch [4] aus dem Jahr 1993 nennt in erster Bedeutung: „drahtlose (automatische) Übertragung von verschlüsselten Meßwerten über große Strecken“. Die Entfernungsmessung ist in zweiter Bedeutung vermerkt. Ein zweibändiges Lexikon aus dem Jahr 1986 [5] führt den Begriff Telemetrie unter dem Eintrag Fernmeßtechnik mit „Verfahren und Einrichtungen zur Umwandlung ... und Übertragung von Meßwertsignalen zwecks zentraler Überwachung räumlich dezentralisierter Meßstellen“. Das deutlich (2005) später erschienene Brockhaus-Lexikon [6] enthält einen wortreicheren und daher nicht umfassend wörtlich zitierten Eintrag „... (Fernmessung, Messwertübertragung), die Übertragung von Messwerten über größere räuml. Entfernungen, ...“, welcher Hinweise zur technischen Realisierung gibt. Der Autor des Eintrags hatte angesichts die-

ser Hinweise nur analoge Systeme im Sinn. Die Übertragung hat dabei „meist drahtlos“ sowie unter Verwendung von „Sender“ und „Empfangsteil“ zu erfolgen. Die Entfernungsmessung wird in den beiden letztgenannten Werken nicht erwähnt.

Ausgehend von dem Wort Telemetrie und seiner deutschen Transkription Fernmessung erscheinen die o. g. Angaben zweckmäßig. Die unsinnige Forderung nach Verschlüsselung resultiert vermutlich aus einer inhaltlichen Vermengung mit der Semantik des Begriffes Modulation. Auch die implizite Beschränkung auf analoge Systeme ist vermutlich unabsichtlich auf ähnlicher Basis entstanden.

Ein etwas weiterer Blick zeigt, daß auch schon im 19. Jahrhundert „Telemetry“ bzw. „Telemetric Aid...“ von Edgecomb [7] und Alvord [8] in den Jahren 1884 und 1885 thematisiert wurden, wobei aktuelle Veröffentlichungen z. B. von Long u. a. [9] diese Arbeiten zitieren.

In Anlehnung an [3] soll im Rahmen dieser Arbeit, unter dem Begriff Telemetrie die *Messung einschließlich Meßdatenerfassung und drahtloser, berührungsfreier Meßwertübertragung* zu verstehen sein.

Weitere Einschränkungen oder technische Realisierungsvorgaben sind unzweckmäßig. Eine Aussage zur *Verschlüsselung* ist nicht erforderlich, wenngleich sie für manche Anwendung aus Datensicherheitsgründen erforderlich sein mag. Das Vorschreiben „großer“ *Übertragungsentfernung* würde dem aktuellen Sprachgebrauch widersprechen. Eine Übertragungsentfernung ist außerdem nicht die einzige Art zu überwindender Hindernisse, die nach Telemetrie verlangen könnten. Eine schnelle Bewegung ist in dem Zusammenhang die größere Herausforderung, da eine bloße Entfernung auch per Kabel überbrückbar ist.

Das Festschreiben der *drahtlosen* bzw. *berührungsfreien* Übertragung ist jedoch eine sinnvolle Abgrenzung, da anderenfalls jede Messung via Datenerfassungssystem mit Kabel dem Begriff Telemetrie zuzuordnen wäre. Eine begriffliche Unterscheidung von Datenerfassungssystem und Telemetrie verlöre ihren Sinn.

Im Sprachgebrauch bezeichnet der Begriff Telemetrie auch die Summe aller Geräte und Installationen, die zur Realisierung von *Messung einschließlich Meßdatenerfassung und drahtloser, berührungsfreier Meßwertübertragung* erforderlich sind. Diese synonome Verwendung eines Begriffes für sowohl Tätigkeit als auch dafür erforderlicher Gegenständlichkeit ist im Sprachgebrauch nicht ungewöhnlich. In dieser Arbeit wird für Ausrüstung und Geräte zur Realisierung von Telemetrie der Begriff *Telemetriesystem* verwendet.

### 3 Systematisierung

Die folgende Systematisierung ist an der Vorgehensweise orientiert, die ein Ingenieur bei der Lösung der Aufgabe „Messung an einem bewegten Maschinenteil“ wählen würde.

Zunächst erfolgt eine allgemeine Formulierung der Aufgabe „Messung an einem bewegten Maschinenteil“ frei von technischer oder technologischer Voreingenommenheit hinsichtlich spezifischer Lösungswege.

In *allgemeiner* und kurzer *Formulierung* besteht die Aufgabe darin,

Meßwerte vom Meßort am bewegten Maschinenteil ins ruhende System und Hilfsenergie zur Versorgung der Meßkette in entgegengesetzter Richtung zu übertragen.

Die Lösung der Aufgabe ist

die Verteilung der Stationen der Meßkette mit Informations- und Hilfsenergiepfad auf die Struktur bzw. die Bauteile der Maschine zwischen Meßort und ruhendem System.

Der Raum für Lösungen ist groß und für die Meßaufgabe sind – triviale Fälle ausgeklammert – gewöhnlich mehrere Varianten denkbar. Ein einfaches *Beispiel*, das nicht mit *einer* Rotations- oder Translationsbewegung auskommt, zeigt maßgebliche Kriterien für die Systematisierung auf.

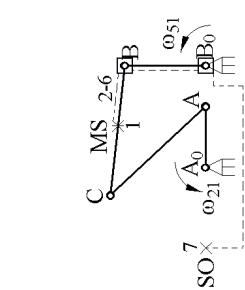
Als Beispiel dient ein fünfgliedriges Koppelgetriebe, das zur Erzielung des Zwangslaufs zwei gekoppelte, gleichsinnig umlaufende Antriebe aufweist. Diese Struktur wird auch als Zweischlag mit zwei Antrieben bezeichnet [10].

Bild 2 auf S. 8 zeigt eine derartige Getriebestruktur mit den Gelenkpunkten  $A_0, A, C, B, B_0$  schematisch in einer Stellung. Der Einfachheit halber ist nur eine Meßstelle (MS) am Getriebeglied 4 dargestellt. Die Lage des Getriebegliedes beschreiben die Gelenkpunkte C und B. Die Meßstelle soll Meßwerte an den ruhenden Speicherort (SO) liefern. Bild 2 enthält dafür acht verschiedene Lösungsvarianten. Sie unterscheidet einerseits eine Variation im Zusammenhang mit an den Trennstellen vorliegenden Relativbewegungen bzw. zugehöriger Übertragung, dargestellt in horizontaler Richtung, und andererseits hinsichtlich einer verschiedenen Anordnung der Trennstelle in der Meßkette, aufgezeigt in vertikaler Richtung.

Ausgehend von den auf Basis von *Bewegung* und *Übertragung* unterschiedenen Varianten (Bild 2) ist zunächst festzuhalten, daß die Meßstelle (MS) einer komplexen ebenen Bewegung folgt, die z. B. durch Passage zweier Drehpunkte (*linke Spalte*) zu erreichen ist. Vorteilhaft ist die vergleichsweise einfach zu realisierende kontinuierliche Übertragung, da der Drehpunkt in den Koordinatensystemen beider jeweils beteiligter Getriebeglieder in Ruhe ist. Zudem benötigt dieser Aufbau jenseits der Übertragung an den Gelenken keine zusätzlichen Veränderungen an der Maschinenstruktur, nur um die Übertragung zu ermöglichen. Nachteilig ist das Erfordernis zweier Übertragungssysteme.

Die in horizontaler Richtung *zweite Variante* (Bild 2) erscheint besonders elegant, da dort eine Direktübertragung zwischen Meßstelle und Speicherort vorliegt. Jedoch benötigt sie für jede Meßstelle einen gesonderten Übertragungskanal, dessen Funktion in jeder möglichen Stellung der Getriebestruktur zu prüfen ist. Die Übertragungsentfernung ist zudem vergleichsweise groß.

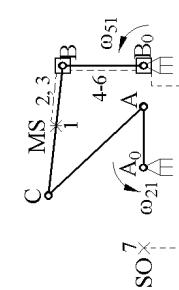
Einfluß von Bewegung und Übertragung  $\rightleftharpoons$



$\times$  MS Meßstelle  
 $\times$  SO Speicherort

$\square$  Übertragungsstrecke  
 $\square$  längere ÜJ.-Strecke

$\cdots \cdots$  Kabelverbindung



$\rightleftarrows$  Anordnung der Trennstelle(n) im Signal- & Hilfsenergiepfad

Bild 2

zwei Übertragungs- bzw. Trennstellen an den Gelenken B und B<sub>0</sub> kompakte Anordnung ohne zusätzliche Koppelpunkte für Übertragungszwecke, kontinuierliche Übertragung an den Drehgelenken

eine diskontinuierliche Übertragung (punktierte Linie) von der Meßstelle (MS) zum Speicherort (SO), Freiraum in der Maschine erforderlich zur Sicherung der Verbindung in jeder Quadrat gelangt, eine Übertragung je Lage, für jede Meßstelle ein Extraübertragungskanal erforderlich

eine diskontinuierliche Übertragung, wenn eine diskontinuierliche Übertragung, wenn Koppelknoten K<sub>3</sub> entlang der Koppelkurve im Übertragungsbereich (stationäres Rechteck) ist, zwei Übertragungszeiten je Arbeitsspiel, Schwingbewegung der Gleiter AC, CB zueinander ermöglicht Kabel 24,5 bis 64,5°

Ausschnitt des Lösungsratums der Aufgabe Messen an bewegten Maschinenteil mit den Einflüssen Bewegung und Übertragung kombiniert mit der Anordnung der Trennstelle am Beispiel einer Meßkette mit immer gleicher Meßstelle- (MS) bzw. Speicherortposition (SO) und eines jeweils gleichen Gelenklinfecks A<sub>0</sub>, A, C, B, B<sub>0</sub> mit zwei gekoppelt angeriebenen Karabin A<sub>0</sub>, A und B<sub>0</sub>, B mit Übersetzungsverhältnis der Kopplung  $\omega_{21}/\omega_{51} = 2$ , Anfang der Meßkette an der Meßstelle (MS), Ende der Meßkette im stationären Speicherort (SO), drahtlose Übertragungsstrecken durch Quadrate und Rechtecke gekennzeichnet, Meßkette mit Informations- und Hilfsenergiepfad gestrichelt, Meßkette jeweils beginnend am Glied 4 (CB), Verteilung der Meßkette entsprechend den Stationen 1 bis 7 siehe S. 3) oben anders als unten (s. Text)

Die *dritte Variante* (Spalte 3 in Bild 2) kommt ebenfalls mit einem Übertragungssystem aus, wobei zur Realisierung der Übertragung ein Koppelpunkt K<sub>4</sub> gewählt ist, der zusätzlichen Bauaufwand bedeutet. Dieser Koppelpunkt beschreibt die angegebene Koppelkurve mit deutlich erkennbarer Umkehrschleife. Dort ist der ruhende Teil des Übertragungssystems positioniert, wodurch der Koppelpunkt K<sub>4</sub>, der den bewegten Teil des Übertragungssystems trägt, für die Dauer einer Antriebsbewegung (Glied 2 A<sub>0</sub>A) von 24,5 bis 64,5° im Übertragungsbereich verweilt. Dies ermöglicht eine mit jedem Arbeitsspiel wiederkehrende Übertragungszeit.

Die *vierte Variante* (Spalte 4 in Bild 2) kommt auch mit einem Übertragungssystem aus, wobei zur Realisierung der Übertragung ein Koppelpunkt K<sub>3</sub> am Glied 3 (AC) gewählt ist. Dieser Koppelpunkt beschreibt im Vergleich eine deutlich andere Koppelkurve, die ebenfalls wiederkehrend diskontinuierliche Übertragung erlaubt. Der ruhende Teil des Übertragungssystems ist entlang einer Strecke anzutragen (Rechteck, Bild 2 rechts), während der bewegte Teil im Koppelpunkt K<sub>3</sub> liegt. Die Übertragung kommt je Arbeitsspiel in zwei Zeiträumen zustande, da hin- und rücklaufender Teil der Koppelkurve einander nahe liegen.

Diese Nennung der vier Varianten zeigt, daß die Fragen von *Bewegung und Übertragung* (Abschnitt 3.1) einerseits als maßgebliche Systematisierungskriterien taugen und andererseits in enger gegenseitiger Abhängigkeit zu behandeln sind. Dabei beeinflußt die Ausprägung der Bewegung unmittelbar die Anforderungen an die Ausmaße von Übertragungsbereichen und -zeiten, wovon die Auswahl des Übertragungsprinzips direkt betroffen ist. Diese Fragen sind für Hilfsenergie- und Informationspfad ggf. getrennt zu beantworten.

Einen weiteren Aspekt verdeutlicht die Variation in vertikaler Richtung in Bild 2. Sie betrifft die *Verteilung der Stationen einer Meßkette* (Abschnitt 2.1, S. 3, nummeriert 1 bis 7) auf die *Maschinenstruktur*. Die zugehörige Verteilung der Nummern 1 bis 7 ist in Bild 2 eingetragen. Die Variation dieser Verteilung der Funktionalität einer Meßkette auf die Maschinenstruktur hat einen fundamentalen Einfluß auf die schlüsselnde Lösung der Meßaufgabe. Eine Änderung der Verteilung hat eine Trenn- bzw. Übertragungsstelle vom bewegten ins ruhende System an anderer Position im Informations- bzw. Hilfsenergiepfad zur Folge. Dieser starke Einfluß auf das Ergebnis bei gleichzeitig geringer Variation der Maschinenstruktur (in vertikaler Richtung in Bild 2) weist die *Anordnung der Trennstelle im Signal- und Hilfsenergiepfad* als maßgebliches Systematisierungskriterium aus (Abschnitt 3.2).

Schlußendlich muß die *Meßgröße* bei der Realisierung von Messungen am bewegten Maschinenteil Berücksichtigung finden. Bei der Aushandlung einer Forschungsaktivität stehen die meisten Meßgrößen anfangs schon fest, weshalb die Gestaltungsfreiheit des Ingenieurs in dieser Frage im Vergleich zu vorher angeführten Kriterien begrenzt ist. Dennoch gilt es, geeignete Meßverfahren auszuwählen, um die Meßkette und deren Verteilung auf die Maschinenbauteile konstruktiv festlegen zu können. Dabei in Betracht zu ziehende Belange und Aspekte sind im Abschnitt 3.3.1 kurz notiert. Der übergeordnete Abschnitt 3.3 enthält Ausführungen hinsichtlich der Berücksichtigung von Bauteilbelastungen und zum konstruktiven Aufbau von Bestandteilen der Meßkette am bewegten Maschinenteil.

### 3.1 Bewegung und Übertragung

#### 3.1.1 Bewegung

Bei der Realisierung einer Meßaufgabe an einem bewegten Maschinenteil bekommt der Ingenieur die Bewegung gewöhnlich vorgegeben, ohne daß Gestaltungsspielraum besteht. Eine Änderung der Bewegung der Baugruppe zu Untersuchungszwecken bleibt akademischen Modelluntersuchungen vorbehalten, wobei die Äquivalenz des Ergebnisses zu einer Untersuchung mit Originalkennwerten nachzuweisen ist.

Die Schwierigkeit, die aus der Messung an der bewegten Baugruppe erwächst, hängt direkt mit der **Bewegung** zusammen. Daher gilt es, die gegebene Bewegung hinsichtlich einer im Sinne des Aufwandes und der zu erzielenden Funktionalität günstigen Lösung der Meßaufgabe zu untersuchen.

Zuerst wird die gegebene **Bewegung** in

- Rotation,
- Translation oder
- Kombination aus Rotation und Translation

klassifiziert. Die Bewegung kann zudem

- wiederkehrend bzw. umlaufend oder
- fortlaufend

ablaufen. Die Geometrie- und Antriebskennwerte liefern analytisch die Bahnkurven und daraus abgeleitete weitere Daten. Zudem können zu berücksichtigende Fertigungs- und Montagetoleranzen die tatsächlich zu erwartenden Bewegungen genauer spezifizieren helfen. Eventuell stehen Meß-, Erfahrungs- oder Beobachtungsdaten zur Verfügung.

Aus Sicht der Bewegungsanalyse sind letztlich die

- Relativbewegung als Funktion von
- Zeit und
- Position auf dem Bauteil sowie die
- Toleranz der Relativbewegung

als nicht determinierter bzw. stochastischer Anteil maßgeblich für die Lösung der Meßaufgabe am bewegten Maschinenteil. Zu formulieren ist die Relativbewegung der Bauteile zueinander, zwischen denen eine Meßdatenübertragung zu realisieren ist.

Diese Anfangsbetrachtungen geben jedoch keine Auskunft hinsichtlich Eignung oder Möglichkeit der einen oder anderen Übertragungsmethode. Dafür sind die Anforderungen seitens der Meßaufgabe an die **Übertragung** und die Bedingungen in Betracht gezogener Übertragungsmöglichkeiten heranzuziehen. Es ist somit zu klären, ob eine

- kontinuierliche Übertragung nötig ist, oder ob
- diskontinuierliche oder
- gar keine Übertragung (Speicher)

ausreichen. Dabei sind die möglichen

- Übertragungszeiten hinsichtlich
- Datenrate und
- transferierbarer Hilfsenergiemenge

abzuschätzen bzw. zu kalkulieren.

Die Suche nach einer geeigneten Positionierung einer **Übertragungsstelle** ist keine triviale Aufgabe, da Bauraumvorgaben, Meßaufgabe, Maschinenstruktur bzw. Kinematik und verfügbare Übertragungsmethode oder -technik das Ergebnis bestimmen.

Die umrissene Strukturierung soll kurz anhand eines Beispiels mit einfacher und einem weiteren mit etwas komplexerer Bewegung zur Anwendung kommen. Als einfache Variante dient dabei die reine Drehbewegung, die für alle im Rahmen der Arbeit realisierten Meßaufbauten vorliegt. Als zweites Beispiel kommt das Gelenkfünfeck (Bild 2) zum Einsatz.

### Beispiel Rotation

Ausgehend von einer *exakten* Rotationsbewegung, wie sie in realen Maschinen selten vorkommt, kann die Rotationsachse zunächst als stationär angesehen werden. Für eine kontinuierliche Übertragung bietet sich in diesem Fall der Wellenmittelpunkt an einem freien Wellenende an.

Besteht diese Möglichkeit nicht, und die Übertragung muß auf eine radiale Position ausweichen, dann ist die Relativbewegung aus Rotation und Tangentialgeschwindigkeit kombiniert. Soll die Übertragung an *einer* radialen Position erfolgen, dann liegt eine wiederkehrende oder umlaufende Bewegung vor. Der Kontakt zwischen den zueinander bewegten Teilen kann einmal je Umlauf aufgebaut werden – theoretisch nur für einen Zeitpunkt, der keine Übertragungsdauer ermöglicht.

Dies verdeutlicht, daß ein Übertragungssystem immer einen Bereich im Sinne von geometrischen Abmessungen, entsprechend einer Fläche bei ebener oder gemäß eines Raumes bei dreidimensionaler Betrachtung bzw. Bewegung, aufweisen muß, in dem eine Übertragung funktioniert. Dieser Bereich soll in dieser Arbeit *Übertragungsbereich* heißen.

Dies unterstreicht die enge Verknüpfung von *Bewegung und Übertragung*, weshalb diese als ein Systematisierungskriterium zusammengeführt sind.

Ausgehend vom im Vorgriff auf Abschnitt 3.1.2 (Übertragung) eingeführten Übertragungsbereich, entsteht immer eine Dauer, für die Übertragung möglich ist, wenn zueinander bewegte Teile des Übertragungssystems einander passieren. Ist der Übertragungsbereich groß genug, so kann eine kontinuierliche Übertragung auch dann realisiert werden, wenn das Übertragungssystem nicht zentral am Wellenende – im Sinne einer Rückkehr zum Beispiel – angebracht ist.

Ebenso der Übergang zur realen Welle, die nicht exakt einer Rotation folgt, sondern zudem überlagerten Schwingungen unterliegt – üblicherweise gemessen als Wellenmittelpunktsbahn, verlangt dem Übertragungssystem einen Übertragungsbereich im Sinne zu tolerierender Abweichungen ab.

### Beispiel Gelenkfünfeck

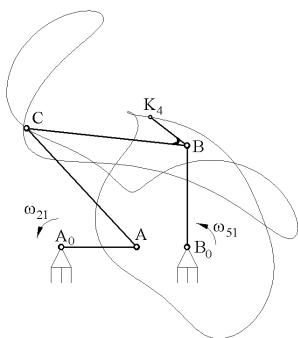
Für das schon verwendete Beispiel des Gelenkfünfecks mit zwei gekoppelten Antrieben (Bild 2) liegt eine ebene Bewegung bestehend aus Rotation und Translation vor. Dabei rotiert das angetriebene Glied  $A_0A$  um seinen Drehpunkt  $A_0$  im Gestell mit  $\omega_{21}$ , während das zweite angetriebene Glied  $B_0B$  um seinen Gestelldrehpunkt  $B_0$  mit halber Drehfrequenz umläuft, was  $\omega_{21}/\omega_5 = 2$  kennzeichnet. Die Kopplung könnte durch einen Zahriementrieb mit diesem Übersetzungsverhältnis, der die Kurbeln  $A_0A$  und  $B_0B$  verbindet, realisiert sein.

Der o. g. Systematik folgend, besteht eine wiederkehrende Bewegung mit einer Periode von zwei Umläufen am Glied  $A_0A$ . Die beiden Kurbeln  $A_0A$  und  $B_0B$  rotieren, so daß die Punkte A und B jeweils eine Kreisbahn um  $A_0$  bzw.  $B_0$  beschreiben, während der Punkt C des Zweischlags ACB einer komplexen ebenen Bewegung folgt, dessen Bahnkurve Bild 3 zeigt. Damit sind die Ebenenlagen der Glieder AC und CB als Funktion des Antriebswinkels und so die gesamte Kinematik prinzipiell bestimmt.

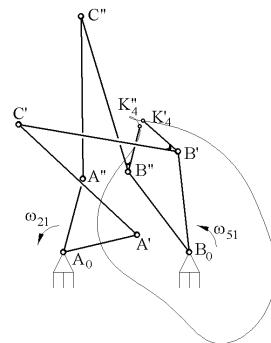
Soll ein Übertragungssystem mit kleinem Übertragungsbereich eine kontinuierliche Meßdatenübertragung von Glied CB realisieren, so ist der Weg über die zwei Drehgelenke  $B_0$  und B die einfachste Variante mit zwei Übertragungssystemen (Bild 2, linke Spalte).

In Anbetracht der komplexen Bewegung des Gliedes CB erscheint eine Datenübertragung von dort ins ruhende System mit nur einem Übertragungssystem mit kleinem Übertragungsbereich kaum denkbar. Die systematische Suche nach einer Position im Koordinatensystem des Gliedes CB, die wenigstens für eine Zeitspanne nahezu ruht, um eine diskontinuierliche Übertragung zu ermöglichen, liefert Punkt  $K_4$  (Bild 2, dritte Spalte bzw. Bild 3). Die Bahnkurve von  $K_4$  weist eine Schleife auf, deren Schnittpunkt bei den Antriebswinkeln an Kurbel  $A_0A$  von  $24,5$  und  $64,5^\circ$  passiert wird. Demnach kann ein System mit einem Übertragungsbereich in den Ausmaßen der Schleife für die Dauer der genannten Veränderung des Antriebswinkels eine Datenverbindung herstellen, wenn der ruhende Teil des Übertragungssystems etwa im Zentrum der Schleife der Kurve von  $K_4$  und

der bewegte Teil des Systems am Glied CB im Punkt K<sub>4</sub> positioniert sind. Bild 4 zeigt die Stellung des Gelenkfünfecks kurz vor und kurz nach Passage des Schleifenschnittpunkts der Bahnkurve von Punkt K<sub>4</sub>.



**Bild 3** Gelenkfünfeck A<sub>0</sub>, A, C, B, B<sub>0</sub> in Ausgangsstellung ( $A_0A$  bei  $0^\circ$ ) mit zwei gekoppelten angetriebenen Kurbeln A<sub>0</sub>, A und B<sub>0</sub>, B mit Übersetzungsverhältnis der Kopplung  $\omega_{21}/\omega_{51} = 2$ , Bahnkurven der Punkte C, K<sub>4</sub> eingetragen



**Bild 4** Gelenkfünfeck A<sub>0</sub>, A, C, B, B<sub>0</sub> analog Bild 3 in zwei verschiedenen Stellungen indiziert mit ' oder '' entsprechend Antriebswinkel  $13^\circ$  ( $A_0A'$ ) und  $75^\circ$  ( $A_0A''$ ), K<sub>4</sub>' kurz vor und K<sub>4</sub>'' kurz nach der Schleife der Bahnkurve von Punkt K<sub>4</sub>

Diese Betrachtung hebt die maßgebende Relativbewegung als Funktion der Zeit – bzw. hier Antriebswinkel – und insbesondere der Position auf dem Bauteil hervor.

Die systematische Suche gelang nach rechentechnischer Erfassung der Kinematik [10] durch Freigabe des Punktes K<sub>4</sub> im Koordinatensystem des Gliedes CB und Minimierung des Abstandes der Bahnpunkte von K<sub>4</sub> für zwei um  $30^\circ$  verschiedene Antriebswinkel der Kurbel A<sub>0</sub>A. Zudem wurde der Antriebswinkel freigegeben, fest war nur die  $30^\circ$ -Differenz beider Positionen.

Je nach Anforderungen aus der Meßaufgabe können die Randbedingungen einer Optimierung anders gewählt sein. Die Entscheidung für eine spezielle Lösung der Meßaufgabe am bewegten Maschinenteil (Bild 2) kann nur im Gesamtkontext unter Berücksichtigung aller Randbedingungen fallen. Die Betrachtung der Bewegung ist eine erste Annäherung.

### 3.1.2 Übertragung

Die Bewegung ist entscheidend für die Übertragungsmöglichkeiten. Zunächst sollen naheliegende Übertragungsprinzipien ohne Anspruch auf Vollständigkeit aufgezählt und eingeordnet werden. Grundlegende Eigenschaften oder zu berücksichtigende Einflüsse oder Erschwernisse sind zu benennen.

Aufgabe eines auszuwählenden Übertragungssystems ist einerseits der Transfer der *Hilfsenergie* und andererseits die Weiterleitung der Meßwerte über eine Trennstelle hinweg, die eine Relativbewegung der Bauteile zueinander bedingt. Dabei erfolgt der Hilfsenergietransport in Richtung der Meßstelle, während die Information in Richtung des Endes der Meßkette zum Speicherort gelangen muß. *Hilfsenergie* und *Information* verlaufen also in *entgegengesetzter Richtung*. Eine Ausnahme bilden Steuerbefehle, die zur Kontrolle des Meßablaufs erforderlich sein können, aber um mehrere Größenordnungen geringeres Datenvolumen aufweisen.

Aufgrund der verschiedenen Transportrichtungen von Information und Hilfsenergie ist es meist zweckmäßig die Übertragungssysteme getrennt zu entwerfen, wobei das einer konstruktiven Integration beider Systeme nicht prinzipiell widerspricht.

Bei der Klassifizierung der Übertragungsprinzipien ist die Unterscheidung von Hilfsenergie- und Informationstransport trotz entgegengesetzter Transportrichtung nicht erforderlich, da in jedem Falle ein Energietransport stattfindet, wenngleich einerseits die Energie selbst und andererseits die aufmodulierte Information interessiert.

### **Übertragungsprinzip**

Die Übertragungsprinzipien sind meist nicht auf eine physikalische Größe zum Energietransport beschränkt. Für eine ganze Reihe der Beispiele gibt Rohrbach [3] Funktionsskizzen und Prinzipschaltbilder an.

#### **Festkörperkontakt**

Ein bewährtes klassisches Übertragungsprinzip basiert auf ständigem oder vorübergehendem *Festkörperkontakt* der zueinander bewegten Bauteile, zwischen denen eine Übertragung zu realisieren ist. Dabei können beispielsweise elektrische Verbindungen unter Verwendung von Schleifringen – analog dem Kollektor einer Elektromaschine, mechanische Verbindungen, wie sie am Fliehkraftregler zur Übertragung der Stellung Verwendung finden, oder auch pneumatische oder hydraulische Verbindungen auf Basis von Wellendichtringen realisiert werden.

Zu realisierende *Übertragungsentfernung* sind wegen des erforderlichen Festkörperkontakte konstruktiv durch Spielausgleich oder elastische Elemente auf *null* zu bringen. Das ist eine wesentliche Schwierigkeit des Prinzips. Eine weitere Problematik resultiert aus der Reibung, die neben dem Verschleiß ggf. maßgeblichen Wärmeeintrag zur Folge hat. Unabhängig von der Ursache von Wärmeeinträgen verursacht der Seebeck- Effekt im Falle von Temperaturdifferenzen an Kontaktstellen Thermospannungen, die das Signal überlagern. Bei kleinen Signalen z. B. von Thermoelementen oder DMS- Brücken kann dadurch die Meßunsicherheit maßgeblich ansteigen.

#### **Leitung**

Ein bewährtes Übertragungsprinzip basiert auf der *Leitung* elektrischer Ladungsträger, wobei das die zueinander bewegten Bauteile umgebende Fluid entweder leitfähig ist oder zur Übertragung diskontinuierlich in den leitfähigen Zustand versetzt wird. Als Übertragungssystem für die Meßwerterfassung aus schnell rotierenden Systemen sind Quecksilberdrehübertrager bekannt, bei denen das flüssige Metall rotierendes und nicht rotierendes Bauteil elektrisch verbindet. Ähnlich kann eine z. B. ionenhaltige Lösung als leitfähiges Fluid dienen. Diskontinuierlich funktioniert im Gegensatz dazu die Gasentladung, wie sie etwa vom Zündfunk im Ottomotor bekannt ist. Der Vorteil gegenüber den beiden vorangegangenen Beispielen besteht darin, daß eine Luftatmosphäre genügt. Die zu erreichende Durchschlagsspannung hängt dann mindestens von Druck und Übertragungsentfernung ab und liegt für einen Millimeter bei Atmosphärendruck im kV- Bereich. Daher ist diese Variante eher für diskontinuierliche Hilfsenergieübertragung zu erwarten und erfordert eine Empfangsschaltung, die Hochspannungsimpulse verträgt.

Die zu realisierenden *Übertragungsentfernung* unterliegen bei den leitfähigen Fluiden hauptsächlich konstruktiven und strömungsmechanischen Beschränkungen. Obwohl die Leitfähigkeit der Fluide hinsichtlich des elektrischen Widerstands maßgebliche Übertragungsentfernung zu ließe, behindert der Strömungswiderstand des dichten Fluids (z. B. Quecksilber) den Einsatz. Die praktische Verwendung ist damit vorrangig auf Drehübertrager mit kleinem Radius an der Übertragungsstelle begrenzt.

Eine Ausnahme mit genannten Nachteilen bildet die Gasentladung, die von der komplexen Bewegung derart gesteuert sein kann, daß die gegenseitige Annäherung der Übertragungselektroden durch Unterschreiten der entfernungsabhängigen Durchschlagsspannung die Entladung auslöst. Die Bewegung steuert so die Entladung, ohne zusätzliche Ansteuerungstechnik zu benötigen.

#### **Feld**

Die Nutzung von *Feldern* zur Übertragung gehört zu den gängigen Übertragungsprinzipien, wobei vorrangig elektrische, magnetische aber auch z. B. Temperatur- oder Druckfelder Verwendung

finden können. Wegen vergleichsweise hoher zeitlicher Trägheit der Druck- und Temperaturfelder sowie deren *Überschneidung mit gängigen Untersuchungsinhalten* kommen vorrangig elektrische und magnetische Felder zum Einsatz. Dies gilt insbesondere für die Realisierung komplexer Telemetriesysteme auf Basis elektronischer Datenerfassung.

Klassifizierende Charakteristik der Nutzung von Feldern oder Wechselfeldern ist deren Verteilung über das bewegte Bauteil hinaus, an dem eine Messung zu realisieren ist. So kann das genutzte Feld die Übertragungsentfernung überbrücken. Es besteht eine Abgrenzung zur Wellenausbreitung (s. u.), die mit dem Übertragungsprinzip Feld nicht gemeint ist.

Die zu realisierenden *Übertragungsentfernungen* bei der Nutzung von Feldern sind abhängig von der Feldstärke und der zu übertragenden Energiemenge bzw. Leistung. Geht es um Informationsübertragung, sind bei Verwendung empfindlicher Empfangstechnik deutlich größere Abstände möglich als für die Hilfsenergieübertragung, für die auch der Wirkungsgrad maßgeblich ist. Im Vergleich zu den vorstehend genannten Übertragungsprinzipien sind bei der Feldnutzung meist größere Entfernungen erreichbar.

### *Wellenausbreitung*

Zur Überbrückung noch größerer Übertragungsentfernungen ist der Energietransport sich ausbreitenden Wellen nutzbar. Als Beispiel seien hier Schallwellen oder elektromagnetische Wellen genannt. Beide Arten bieten in Abhängigkeit vom jeweils genutzten Frequenzbereich insbesondere aus Sicht der damit verbundenen Aufbauten bzw. Technologien ganz unterschiedliche Möglichkeiten. Die Übertragung signifikanter Leistungen über Meterdistanzen erfordert ausgefeilte Übertragungssysteme, die eine Integration in einen Meßaufbau in einer Maschine u. U. erschweren. Zudem besteht die Gefahr, daß leistungsstarke elektromagnetische Wellen in die Meßsignale einstreuern und somit die Funktion des Gesamtsystems behindern.

### *keine Übertragung*

Das einfachste Prinzip der Realisierung einer Messung am bewegten Maschinenteil besteht hinsichtlich der Übertragungsaufwendungen in der Verwendung von Hilfsenergie- und Datenspeichern, wodurch *keine Übertragung* erforderlich ist.

Je nach Meßverfahren und Ausprägung der Meßkette kann das z. B. ein komplexes batteriebetriebenes System mit Halbleiterdatenspeicher sein, der nach der Versuchsfahrt auszubauen und auszulesen ist. Ein anderes Beispiel ist eine Bauteilbeschichtung mit Farbumschlag oder –variation, das nach der Belastung anhand der Farbreaktion die Maximaltemperatur liefert. Hilfsenergiebedarf besteht nicht, und die erfahrene Maximaltemperatur ist als Färbung der Beschichtung gespeichert.

Vorteilhaft ist der Wegfall einer begrenzenden Übertragungsentfernung, wodurch auch die Betriebskontinuität nicht mehr von der Übertragung abhängt. Ein ausschließlich speicherbasiertes System ist allerdings nur dann vorteilhaft, wenn der Erhalt des Datenspeichers unter allen Umständen gesichert ist. Gelegentlich lösen sich Meßaufbauten vom bewegten Bauteil, was die Meßtätigkeit zunächst beendet. Wenn der Datenspeicher dabei Schaden nahm, sind u. U. keine Meßdaten erhalten. Für die Kontrolle komplexer Versuche sind Meßwerte aus dem bewegten System zur Einstellung der Bedingungen zudem unerlässlich, wodurch ausschließlich speicherbasierte Systeme dann nicht in Betracht kommen.

Die *Hilfsenergie* kann auch aus der unmittelbaren Umgebung des Systems durch geeignete Umwandlung abgegriffen werden. Dies könnten z. B. eine ins Licht gebrachte Solarzelle, eine am Magneten vorbeibewegte Induktionswicklung oder ein piezoelektrisches Element mit seismischer Masse am schwingenden Bauteil sein. Solche Prinzipien haben in jüngerer Vergangenheit im Zusammenhang mit der Ausweitung des Internets auf Gegenstände (Internet of Things) wieder an Aufmerksamkeit gewonnen, da die Elektronik in den letzten Jahren ihren Strombedarf spezifisch reduzierte.

Dieser Hilfsenergieabgriff ist aus Sicht der Realisierung von Meßaufbauten an bewegten Maschi-nenteilen durchaus eine interessante Variante, wobei es abzusichern gilt, daß die Hilfsenergiever-sorgung für alle vorgesehenen Betriebszustände ausreicht. Ein Aussetzen des Systems z. B. unterhalb einer Arbeitsspiel- bzw. Drehfrequenz ist fast immer nachteilig, da Kalibrierungen oder Sy-temtests gewöhnlich den unbewegten bzw. stationären Betrieb erfordern. Wenn Zeiten zu über-brücken sind, in denen keine Hilfsenergie abzugreifen ist, so ist zusätzlich ein Hilfsenergiezu-schenspeicher vorzusehen.

### **Übertragungsbereich**

Der Übertragungsbereich benennt im Sinne dieser Arbeit die Maximalabmessungen einer örtlichen Positions-differenz zwischen Sender- und Empfänger, für die jene eine Daten- und Hilfsenergie-übertragung gewährleisten.

Dies ist bei Festlegung auf eine Richtung der Abstand. Bei ebener Bewegung beträgt der Frei-heitsgrad maximal drei und bei räumlicher Bewegung maximal sechs. Dies entspricht der maxima-ler Anzahl von Koordinaten, die den Übertragungsbereich im einfachen Fall jeweils mit oberer und unterer Grenze eingrenzen.

Den Begriff des *Bereiches* verdeutlicht, ausgehend von der rechten Spalte in Bild 2, eine Übertra-gung ins ruhende System für ebene Bauteilbewegung. Dabei kann in anschaulicher Weise die ma-thematische Bereichsdefinition übernommen werden, wobei für das o. g. Beispiel (Bild 2, rechts) eine zusammenhängende als Rechteck gekennzeichnete Fläche genügt.

Schon auf Grundlage der Bewegung, die vielgestaltig sein kann [10], sind nicht zusammenhän-gende mehrteilige Bereiche zu erklären. Ein Übertragungsbereich für eine ebene Bewegung erfor-derst für den allgemeinen Fall eine Angabe in Abhängigkeit von zwei Längen und einer Winkelko-ordinate. Im Gegensatz dazu ist zum Beispiel (Bild 2, rechts) nur eine einfache Fläche angegeben. D. h., eine Bereichseinschränkung durch Rotation bzw. Verdrehung von Sender und Empfänger zueinander liegt nicht vor. Eine Eingrenzung des Übertragungsbereichs in allen möglichen Koor-dinatenachsen ist nicht notwendig und zudem aus Sicht des Ingenieurs meist nicht wünschenswert, da er ein System bevorzugt, das ohne Beschränkungen funktioniert bzw. überträgt.

Trotzdem ist eine Begrenzung des Übertragungsbereiches hinsichtlich der Rotationsachsen zu erwarten. Bei z. B. induktiver Realisierung der Übertragung kommt ein Vektorfeld zum Einsatz, wodurch die gegenseitige Ausrichtung von Sender und Empfänger zur Einschränkung des Über-traugungsbereichs in der Winkeldimension wird. Dies ist u. U. wünschenswert, wenn die Winkel-ausrichtung bei mehrkanaliger Übertragung zur Kanaltrennung dient. Eine Verletzung der Begren-zung des Übertragungsbereichs hat dann ein Übersprechen zwischen den zu trennenden Übertra-gungskanälen oder gar eine Kanalvertauschung zur Folge.

Die o. g. Betrachtung anhand (Bild 2, rechts) benutzt als Beispiel eine Übertragung vom bewegten ins ruhende System. Dabei wird der Übertragungsbereich im ruhenden Koordinatensystem einge-tragen. Dies genügt für viele Fälle, da oft eine Übertragung ausreicht, und das Zielsystem der ru-hende Speicherort (SO, Bild 2) ist. Der allgemeine Fall löst sich von dieser Festlegung. Jedes Bau-teil mit separater Bewegung erhält ein Koordinatensystem, in das der Übertragungsbereich einer Verbindung zu einem relativbewegten Bauteil notierbar ist. Der Übertragungsbereich eines Daten- oder Hilfsenergieübertragungssystems kann daher immer in zwei Koordinatensystemen betrachtet werden je nach Auswahl des einen oder anderen Endes der Übertragungsstelle als maßgebliches Koordinatensystem zur Untersuchung des Übertragungsbereiches.

Die praktische Realisierung einer Meßaufgabe bemüht den Übertragungsbereich möglichst nicht zu eng. Eine Analyse von Kinematik und Dynamik aller beteiligten Baugruppen liegt aus anderen Beweggründen meist ohnehin vor, so daß die Aufgabe der Auswahl einer geeigneten Position für Sende- und Empfangsbaugruppen im jeweiligen Koordinatensystem analog dem Beispiel in Bild 2 entspricht.

Zusätzlich zur Bewegung und zur technologischen Realisierung des Übertragungssystems beeinflussen auch die Bedingungen entlang des Übertragungsweges die Abmessungen des Übertragungsbereiches. So können Medien oder Einbauten zur Medientrennung die Übertragung zusätzlich erschweren oder die Anwendung einzelner Übertragungsprinzipien ganz verhindern.

### **Übertragungs- und Betriebsmodus**

Der Modus, in dem das Meßsystem betrieben wird, hängt von mehreren Randbedingungen ab. So kann Bewegung, gewähltes Übertragungsprinzip und daraus resultierende Realisierung des Übertragungssystems *kontinuierliche* oder *diskontinuierliche* Übertragungs- oder Betriebsweise bedingen. Je nach dem, ob die Unterbrechung nur den Datenkanal oder auch die Hilfsenergieversorgung betreffen, wird das Meßsystem zwischenzeitlich ausgeschaltet oder nur der Datenstrom unterbrochen. Zwischenspeicher für Daten oder Hilfsenergie bieten die Möglichkeit einer Überbrückung.

Neben dieser von der Maschinenstruktur bedingten unterbrochenen Übertragungs- oder Betriebsweise, hat auch die Meßaufgabe einen fundamentalen Einfluß auf die Entscheidung für eine Betriebsweise.

Je nach Meßaufgabe sind Meßstellen mit höherer oder niedrigerer Abtastrate erforderlich. Auch der Hilfsenergiebedarf hängt von der Meßaufgabe ab. So kann z. B. eine Spannungsmessung an einer Halbbrücke mit höherem Innenwiderstand mit geringem Hilfsenergiebedarf erfolgen, während eine Hitzdraht- oder Hitzfilmmessung die meisten kommerziellen Telemetriesysteme hinsichtlich der Hilfsenergie überfordert.

Nach der Kombinatorik ist die Anzahl der Möglichkeiten hinsichtlich der Betriebsweise recht hoch, wenn verschiedene Varianten mit oder ohne Daten- bzw. Energiespeicher mit oder ohne Unterbrechung für Daten- und Energieübertragung und ggf. Datenrückkanal in Betracht kommen. Einen wesentlichen Einfluß hat auch die Position der Trenn- bzw. Übertragungsstelle in der Meßkette (Abschnitt 3.2).

Die Praxis zeigt, daß für die Mehrheit der Möglichkeiten auch passende Konstellationen von Meßaufgaben vorkommen. Eine Beschränkung auf eine Universalvariante macht solche Meßsysteme komplexer und damit unzuverlässiger. Die im Einzelfall als günstig erachtete Lösung der Meßaufgabe ist somit ein Kompromiß aus mehr oder weniger maßgeblichen Anforderungen und vorliegenden technologischen Möglichkeiten oder Erfahrungen bzw. Vorarbeiten.

### **Übertragungssicherheit**

Für die Nutzung eines Meßsystems ist die Übertragungssicherheit von maßgeblicher Relevanz, weshalb eine gute Übertragungssicherheit einerseits und eine sichere *Erkennbarkeit von Übertragungsfehlern* andererseits im Pflichtenheft eines modernen Telemetriesystems stehen.

Die Erfahrung zeigt, daß *Übertragungsfehler* selbst bei besten Voraussetzungen mindestens bei der Inbetriebnahme entstehen. Auch im Meßbetrieb sind Übertragungsfehler nie gänzlich auszuschließen. Dies ist insbesondere dann zu erwarten, wenn infolge der Bewegung ein Verlassen des Übertragungsbereiches von Sender und Empfänger regelmäßiges Betriebsszenario ist. Bei diskontinuierlicher Betriebsweise kommt der Erkennbarkeit und Tolerierbarkeit von Übertragungsfehlern eine daher gestiegerte Bedeutung zu.

Bei analogen Telemetriesystemen ist das Erkennen von Übertragungsfehlern schwierig. Grobe Fehler entlarvt die Plausibilität, welche der erfahrene Experimentator stets prüft. Dem Betrage nach kleinere Fehler sind kaum als solche zu erkennen. Abhilfe schafft ggf. eine *redundante mehrfache Übertragung* derselben Meßwerte. Noch sicherer aber im Aufwand kaum vertretbar ist eine *redundante Übertragung mit separatem Übertragungskanal*. Einen maßgeblichen Einfluß auf die Übertragungssicherheit bzw. Übertragungsqualität von Analogsystemen hat das Modulationsverfahren [3].

Digitale Telemetriesysteme bieten die Möglichkeit, vor der Übertragung *Prüfsummen* auszurechnen und mitzuversenden, die der gleiche Algorithmus im ruhenden System wiederholt berechnet, um auf Basis des Vergleiches beider Prüfsummen die korrekte Übertragung bestätigt zu haben.

### 3.2 Anordnung der Trennstelle

Die Anordnung der Trennstelle zwischen bewegtem und ruhendem Teil der Meßkette ist das Hauptkriterium der Systematisierung. Dies liegt einerseits an der Gestaltungsfreiheit, die dieser Aspekt birgt, und andererseits an dem maßgeblichen Einfluß der Anordnung der Trennstelle auf die Lösung des Meßproblems.

Anhand des in Abschnitt 2.1 beschriebenen Aufbaus einer *Meßkette* und der dort vorgenommenen Unterteilung in *Stationen*, die Information auf ihrem Weg von der Meßstelle zum finalen Speicherort passiert, erfolgt die Variation der Lage der Trennstelle (Tabelle 1). Je nach Position der Trennstelle entlang des *Informationspfades* resultiert ein anderes Lösungsgebiet für die angestrebte Behandlung des Problems. Jedem der anhand dieser Systematik unterschiedenen Lösungsgebiete ist im Anschluß ein Abschnitt gewidmet.

**Tabelle 1** Position der Trennstelle im Signalpfad orientiert am Grundaufbau der Meßkette gemäß Abschnitt 2.1

Gliederung der Meßkette	Anordnung der Trennstelle und zugeordneter Abschnitt	
Meßeffekt	Informationspfad	◀ 3.2.1 Meßeffekt im bewegten System
Aufnahme durch Sensor		◀ 3.2.2 Passive Technik
Pegelanpassung und Behandlung im Analogen		◀ 3.2.3 Aktive analoge Technik
Digitalisierung		◀ 3.2.4 Digitalisierung in der Trennstelle
Zwischenspeicherung mit Vorverarbeitung		◀ 3.2.5 Aktive digitale Technik
Auswertung und abschließende Speicherung		◀ 3.2.6 Digitale Technik mit Zwischenspeicher

Häufig fallen Abschnitte der Meßkette baulich zusammen, so daß die Anzahl der physisch zu trennenden Stationen entlang des *Informationspfades* geringer ausfällt als in Abschnitt 2.1 bzw. in Tabelle 1 aufgeführt. Da die Trennstelle, die durch die Bewegung eines Teils der Meßkette bedingt ist, in jedem Falle existiert, stellt das Zusammenfallen einiger Stationen nur eine Reduktion der Variantenanzahl für die spezielle Meßkette dar.

Da der Betrieb eines Meßsystems oft *Hilfsenergie* zur Verstärkung des Signals oder zum Betrieb eines Prozeßrechners erfordert, kann es auch aus Sicht der Hilfsenergie eine Übergangsstelle vom ruhenden zum bewegten System geben. Unabhängig von der Tatsache, daß der Transfer der Hilfsenergie in entgegengesetzter Richtung im Vergleich zu dem der Meßdaten verläuft, fällt deren Übertragungsweg nicht zwangsläufig mit dem der Information zusammen. Da die Information das vorrangige Ziel von Messungen ist, und der Hilfsenergiebedarf nicht in jedem Fall besteht, erfolgt die Systematisierung entlang des Weges der Information, und nicht dem Pfad der Hilfsenergie folgend.

Manche Maschinenbauanwendungen erfordern Messungen an schwer zugänglichen Teilen. Ist beispielsweise eine Meßstelle mit maßgeblicher Datenrate auf dem Planetenrad eines Getriebes zu realisieren, so darf die Fahrt des bewegten Teilsystems entlang einer Zykloide keine Übertragungsschwierigkeiten bereiten. Gelingt die Direktübertragung daher nicht, so bleibt die Möglichkeit des Umwegs über je eine Trennstelle zwischen Planetenrad und Planetenträger sowie zwi-

ischen Planetenträger und dem ruhenden Gestell. Die im Falle der Direktübertragung komplizierte Relativbewegung beider Teilsysteme zueinander lösen damit zwei Übertragungen mit jeweils einfacher Drehung der Teilsysteme zueinander ab.

Dieser Fall einer doppelten oder mehrfachen Trennstelle erfährt im Sinne der Systematisierung keine gesonderte Behandlung, da einerseits weitere Trennstellen einer Kombination von Varianten (Tabelle 1) gleichkommen, und andererseits die gesteigerte Komplexität einer Meßkette mit mehreren Trennstellen nicht zwangsläufig effektiv und robust ist. In anschließenden Abschnitten wird daher immer vom Übergang vom bewegten zum ruhenden System gesprochen ohne den allgemeinen Fall mit mehreren Trennstellen auszuschließen. Die Formulierung ist dann als Relativbetrachtung aus Sicht des datenempfangenden Bauteils zu verstehen.

Eine stärkere Differenzierung je nach Umfang der Datenverarbeitung im bewegten Teilsystem entsprechend Abschnitt 3.2.6 kommt nicht in Betracht, da diese Unterscheidung von Verarbeitungskapazität und Speicherumfang des bewegten Teilsystems abhängt. Der Unterschied ist gradueller und nicht prinzipieller Natur, weshalb das zu wählende Unterscheidungsmerkmal willkürlich erscheint. Zudem könnte ein physisch äquivalentes System durch geänderte Programmierung die Unterscheidungsschwelle überschreiten, ohne im Aufbau anders zu sein als vorher. Generell ist eine absolute Trennschärfe zwischen den einzelnen hier angegebenen Differenzierungen nicht immer gegeben.

### 3.2.1 Meßeffekt im bewegten System

Ein häufig beschritter Weg der Realisierung einer Meßaufgabe im bewegten System ist die Anordnung der Trennung zwischen bewegtem und ruhendem Teil der Meßkette unmittelbar nach dem Meßeffekt. In dieser Anordnung folgt ausschließlich der Meßeffekt der Bewegung des Maschinenteils oder seiner ebenfalls bewegten unmittelbaren Umgebung, wenn diese das Ziel der Messung ist.

Die Abgrenzung zum anschließenden Abschnitt 3.2.2 besteht in der Begrenzung auf den Meßeffekt beim bewegten Teil der Meßkette. Demnach findet nur der Meßeffekt mit zu registrierendem Merkmal, das die Information über den Meßwert enthält, im bewegten System statt. Der Sensor, der das Merkmal in ein zur Weiterleitung bestimmtes Signal umwandelt, gehört nicht zum bewegten Teil der Meßkette.

Als erstes Beispiel dient ein *Pyrometer*, welches auf Grundlage des Strahlungsgesetzes die Bestimmung von Temperaturen ermöglicht [11] und die Oberflächentemperatur am Rotormantel mißt, wobei die Abschnitte 4 bzw. 5 diese Meßwerte nicht thematisieren.

Auch die *Partikelmeßtechnik*, die Strömungskennwerte auf Basis der Bewegung mitgeführter Partikel bestimmt, bietet die Möglichkeit, Meßwerte aus dem bewegten System zu erlangen. Abschnitt 4.1 beschreibt Messungen, die ein 2D-LDA (Laser-Doppler-Anemometer) lieferte. Dabei kommen kleine Flüssigkeitstropfen als Partikel zum Einsatz, die das Laser-Licht zurückstreuhen. Sende- und Empfangsoptik verweilen dabei stationär, während die Partikel der Strömung in der rotierenden Kavität folgen.

Eine andere Variante, die kleinere Partikel in Gestalt von Zigarettenrauch nutzt, beschreibt Abschnitt 4.3. Dabei wird die Luftwechselzahl bestimmt, indem ein Lichtschnitt in der rotierenden Kammer den durchströmungsbedingten Rauchaustrag beleuchtet. Lichtquelle und die durch die Fenster der Rotorkammer blickende Kamera sind stationär außerhalb der Maschine angeordnet.

Ein weiteres Beispiel, das zwischenzeitlich zur Anwendung für die Messung der mittleren Temperatur in der Rotorkammer in Erwägung gezogen wurde, aber nicht rechtzeitig sicher funktionierte, nutzt die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Temperatur. Für eine Strecke bekannter Länge kann aus der Schallaufzeit die über diese Laufstrecke gemittelte Temperatur bestimmt werden [11], wobei die Querempfindlichkeit zur Strömungsgeschwindigkeit in der Schallstrecke zu

berücksichtigen ist. Der Wandler sollte von der nicht rotierenden Innenwelle radial durch die Rotorkammer schallen, um das Echo vom Rotormantel zu empfangen.

Die angeführten Beispiele haben gemeinsam, daß jeweils der Meßeffekt im bewegten System Wellen moduliert, die im ruhenden System empfangen werden. Aus den Kennwerten der Wellen liest der Auswertungsalgorithmus den Meßwert ab. Zudem wirkt der Meßeffekt im bewegten System jeweils modulierend. Im ruhenden System angeordnete Empfänger registrieren die modulierte Größe, von denen die Auswertung die Meßwerte bestimmt.

*Vorteilhaft* ist bei dieser Strategie der geringe oder nicht vorhandene meßtechnisch bedingte Installationsaufwand am bewegten Maschinenteil.

Prinzipielle *Nachteile* gibt es zunächst nicht. Eventuell notwendige direkte z. B. optische Zugänglichkeiten können konstruktive Probleme bereiten. Lokale Meßwerte sind für über Lauflängen integrierende Verfahren (z. B. Schalllaufzeit, Brechungsindex von Licht) schwer zugänglich, da die Modulationstiefe bzw. die Wirksamkeit des meßtechnisch nutzbaren Merkmals der Lauflänge meist proportional sind, wodurch kurze Lauflängen mit dem Zweck lokaler Messung unzureichende Empfindlichkeit zur Folge haben.

Generell sind Meßaufbauten, bei denen Sensoren und weitere Teile der Meßkette im ruhenden System verharren, zu bevorzugen, da eine ganze Reihe von Schwierigkeiten, die in der Instrumentierung von bewegten Maschinenteilen ihre Ursache haben, nicht auftreten.

### 3.2.2 Passive Technik

Zu passiver Technik zählen im Sinne dieser Systematisierung alle die Realisierungen der Meßaufgabe im bewegten System, bei denen der Meßeffekt und der Sensor der Bewegung des interessierenden Maschinenteils folgen. Der übrige Teil der Meßkette (Tabelle 1), beginnend bei Pegelangpassung, Behandlung des Analogsignals und endend mit abschließender Speicherung, ruht.

Die Abgrenzung der passiven Technik zu den von den benachbarten Abschnitten 3.2.1 und 3.2.3 beschriebenen Realisierungen einer Meßaufgabe im bewegten System besteht einerseits in der Präsenz eines Sensors im oder am bewegten Teil der Meßkette und andererseits im Fehlen verstärkender oder das Meßsignal formender Bestandteile der Meßkette am oder im bewegten Teilsystem. Das vom Sensor gelieferte Signal gelangt direkt zur Übertragung. Eine Verstärkung erfolgt nach Überwindung der Trennstelle im ruhenden Teil der Meßkette.

Diese Variante der Messung im bewegten System ist schon länger etabliert und wird von Rohrbach [3] mit Beispielen für rotierende Anwendungen beschrieben. Im Falle des „Transformator-drehübertragers“ wird im rotierenden System eine Vollbrücke mit vier aktiven Meßwiderständen von der Sekundärwicklung eines Transfomators mit Brückenbetriebsspannung versorgt. Die Differenzspannung gelangt auf die Primärwicklung eines zweiten Transfomators, die ebenfalls mittisiert. An der ruhenden Sekundärwicklung des zweiten Transfomators wird im ruhenden System das Meßsignal zur weiteren Verwendung bereitgestellt, während die Primärwicklung des ersten Transfomators ebenfalls ruht und die Hilfsenergie ins rotierende System überträgt.

Untersuchungen an einem Abgasturbolader beschreibt E. Kaiser [12], wobei ein vierkanaliger Quecksilberdrehübertrager zur Messung von Schaufelschwingungen mit applizierten Dehmmeßstreifen (DMS) zum Einsatz kommt. Dabei ist die DMS- Meßbrücke auf dem Rotor bzw. den Laufschaufeln installiert, während die gesamte Erfassungstechnik im Signalpfad nach dem Drehübertrager im ruhenden Systemteil folgt.

In der jüngeren Vergangenheit wird die Hochfrequenztechnik zur Übertragung genutzt. Dies ermöglicht die Leistungsverbesserung rechentechnischer Signalverarbeitung. Dabei ist z. B. auf dem Maschinenteil je Meßstelle ein elektrischer Schwingkreis angebracht, dessen Resonanzfrequenz abhängig von der gewünschten Meßgröße variiert. Die stationäre Sendeeinrichtung überträgt per *Feld* (z. B. induktiv) oder per *Wellenausbreitung* (Funk) Hilfsenergie an den Schwingkreis wo-

durch dieser in seiner meßgrößenabhängigen Resonanzfrequenz anschwingt. Um die Resonanzfrequenz zu treffen, fährt der Sender wiederholte Frequenzrampen. Der stationäre Empfänger registriert die Resonanzüberhöhung, wobei die Signalverarbeitung die Frequenz des Maximums liefert. Liegt eine enge z. B. induktive Kopplung vor, so kann die Resonanzüberhöhung unmittelbar aus der Rückwirkung auf die Sendeeinrichtung bestimmt werden [13]. Andernfalls (Wellenausbreitung, z. B. Funk) sind zusätzliche Maßnahmen erforderlich, die eine Kanaltrennung von Anregung (Hilfsenergie) und Meßwertübertragung bewirken. Die Ergänzung einer Halbleiterdiode nahe dem Schwingkreis fügt dem Signal Oberwellen hinzu, die empfängerseitig zu registrieren sind [14]. Diese Frequenzverdoppelung bzw. -vervielfachung bewirkt eine Kanaltrennung, da das Meßsignal so z. B. auf der doppelten Frequenz zu empfangen ist. Beide Arbeiten verwenden temperaturveränderliche Kapazitäten als Meßeffekt, wobei [14, 15] die Messung von Temperaturen ( $> 1000^{\circ}\text{C}$ ) auf Basis der Änderung der Dielektrizität einer Wärmeschutzkeramikschicht auf Turbinenteilen ermöglicht, nutzt der Aufbau gemäß [13] einen Kondensator in Form eines SMD Elektronikbauteils. Wenn nur eine kurzzeitige Übertragung möglich ist (Abschnitt 3.1), kann die Anregung auch durch ein Hochfrequenzgemisch (z. B. Rauschen) erfolgen. Die Frequenzanalyse des Antwortsignals zeigt das Maximum analog der o. g. Resonanzüberhöhung bei der Frequenz, die letztlich den Meßwert liefert [15].

Während beide zuvor genannten Arbeiten [13, 14] Temperaturmessungen realisieren, thematisieren Hudak u. a. [16] eine Technik zur Rißerkennung in Metallteilen, wobei ein Wandler auf dem zu untersuchenden Metallteil sitzt und induktiv berührungslos angesteuert wird. Grund des drahtlosen Betriebes sind in dem Fall keine Bewegungen, sondern die Entkopplung von hohen Ofentemperaturen.

Anders geartet ist die im Abschnitt 4.2 beschriebene Messung der adiabaten Wandtemperatur unter Verwendung von thermochromen Flüssigkristallen. Dabei werden gekapselte thermochromen Flüssigkristalle auf die Oberfläche aufgebracht und vom ruhenden System aus beleuchtet. Die Flüssigkristalle funktionieren dabei als mitbewegter Temperatursensor, der die Beleuchtung temperatur-abhängig farbselektiv reflektiert. Eine Farbkamera im ruhenden System nimmt diese Farbreaktion auf und ermöglicht die Auswertung der Temperatur.

Hinsichtlich der Überwindung der Trennstelle zwischen bewegtem und ruhendem System ähnlich funktionieren Meßtechniken, die unter der Bezeichnung TSP (Temperature Sensitive Paint) und PSP (Pressure Sensitive Paint) zu finden sind z. B. [17]. Dabei werden temperatur- oder druckempfindliche Anstriche auf das interessierende Bauteil appliziert und per Beleuchtung und Kamera mit nachträglichem Bildverarbeitungseinsatz registriert bzw. ausgewertet. Der Übergang zur Anwendung im bewegten System erfolgt analog der zuvor beschriebenen Variante auf Basis von Flüssigkristallen. Eine Anwendung am Rotor eines Verdichters beschreiben Navarra u. a. [18].

Maßgeblicher *Vorteil* der passiven Technik ist die Vermeidung umfangreicher mitbewegter Installationen. Für Messungen an Gasturbinenschaufeln ist die damit mögliche Beschränkung der Installation auf das Bauteil von großem Vorteil, da verzweigte Instrumentierung in realen Maschinen Montage- und Wartungsarbeiten behindert.

Dieser Vorteil wird durch *Nachteile* an anderer Stelle erkauft. Zunächst ist der analoge Teil der Meßkette im Vergleich zur digitalen Technik (Abschnitte 3.2.5 und 3.2.6) um die Trennstelle erweitert. Somit mindern Einstreuungen bei der Übertragung die Qualität des Meßsignals, wodurch die verwertbare Auflösung abnimmt und die Streuung der Meßwerte steigt. Diesen Aspekt verdeutlicht besonders der Aufbau zur Messung von Temperaturen auf Turbinenschaufeln [15], bei dem erst eine Frequenzanalyse vieler Einzelmeßwerte ein Ergebnis liefert.

*Nachteilig* ist die begrenzte Meßstellenanzahl. Die o. g. klassische Vollbrücke auf Basis zweier Transformatoren [3] benötigt in der angegebenen Konstruktion ein freies Wellenende und ermöglicht eine Meßstelle. Dies gilt prinzipiell auch für die Varianten aus jüngerer Vergangenheit, bei denen in [15] eine Meßstelle je Bauteil, in [13] zwei realisierbar sind. Dies resultiert u. a. aus der erforderlichen Kanaltrennung. Wenn mehrere Meßstellen zu realisieren sind, müssen deren Reso-

nanzfrequenzen entlang der Frequenzachse unterscheidbar sein, was insbesondere für die Technologie gemäß [15] schwierig sein dürfte. Zudem benötigen Anregungs- und Empfangstechnik nebst Auswertung dafür erweiterte Bandbreite.

Es ist *einzuschätzen*, daß die Anwendung passiver Analogtechnik im bewegten System für einzelne Meßstellen mit moderater Anforderung an Auflösung und Meßunsicherheit von Relevanz ist, wobei z. B. mit Transformatordrehübertrager der Mehraufwand eines einfachen aktiven Analogsystems gering ist, aber die Verstärkung vor der Übertragung bessere Ergebnisse hinsichtlich Auflösung und Meßunsicherheit ermöglicht.

Eine maßgebliche Stellung nehmen passive Analogsysteme für einzelne Meßstellen ein, bei denen geringer Installationsaufwand, Robustheit, Temperaturbeständigkeit vorrangige Kriterien sind. Die Schwierigkeit, größere Meßstellenanzahlen zu realisieren, überwindet die Kombination mit einem zusätzlichen aktiven System mit dann insgesamt zwei Trennstellen in der Meßkette (Abschnitt 3.2.5).

Noch mehr Bedeutung haben Feldmeßverfahren, meist realisiert durch sensitive Anstriche für die interessierende Bauteiloberfläche, da diese Vorteile hinsichtlich Installationsaufwand, Beständigkeit und zudem hinsichtlich der Effizienz aufweisen. Diese Effizienz resultiert aus der Ergiebigkeit der Feldmessung, erfordert aber gewöhnlich einen optischen Zugang und Auswertung per Bildverarbeitung. Zur Kalibrierung der Bilder in Originalsituation sind einzelne Kontrollmeßstellen mit guter Auflösung und geringer Meßunsicherheit unerlässlich (z. B. via Telemetriesystem).

### 3.2.3 Aktive analoge Technik

Zu aktiver analoger Technik zählen im Sinne dieser Systematisierung alle die Realisierungen der Meßaufgabe im bewegten System, bei denen der Meßeffekt, der Sensor und der Verstärker nebst analoger Signalbehandlung der Bewegung des Maschinenteils folgen. Der übrige Teil der Meßkette (Tabelle 1), beginnend beim Empfang des analogen Signals mit anschließender Digitalisierung und endend mit der abschließenden Speicherung, ruht.

Die Abgrenzung aktiver analoger Technik zu den in benachbarten Abschnitten 3.2.2 und 3.2.4 beschriebenen Realisierungen einer Meßaufgabe im bewegten System besteht einerseits in der Präsenz des Sensors nebst analoger Verstärkung und Signalbehandlung im oder am bewegten Teil der Meßkette und andererseits in dem Fehlen aller digitalen Bestandteile der Meßkette am oder im bewegten Teilsystem. Das Signal des Sensors gelangt im Anschluß an eine Verstärkung und Formung durch analoge Technik zur Übertragung. Die Digitalisierung erfolgt nach Überwindung der Trennstelle im ruhenden Teil der Meßkette.

Den prinzipiellen Aufbau aktiver analoger Technik schildert Rohrbach [3] (1967) im Abschnitt E4 mit zahlreichen Details, wobei eine Beschränkung auf Maschinenbauanwendungen im Sinne kurzer Übertragungswege nebst Hilfsenergieübertragung nicht gesondert thematisiert ist. Vielmehr werden gängige Modulationsverfahren mit Vor- und Nachteilen verschiedener, auch kombinierter Konzepte unter der Überschrift „drahtlose Fernmeßverfahren“ beschrieben. Als Unsicherheit der Übertragung ist „bei hochwertigen Anlagen  $\pm 1\%$ “ genannt. Die Registrierung erfolgt im Gegensatz zur hier vorausgesetzten Digitalisierung (Abschnitt 2.1) meist analog. Auf Arbeiten aus jener Zeit z. B. von Adler [19] wird auch aktuell noch Bezug genommen z. B. von Habib u. a. [20].

Die Bestandsaufnahme von DeAnna [21] aus dem Jahre 2000 legt Notwendigkeiten und Wünsche an ein Telemetriesystem zur Nutzung in Flugtriebwerken aus Sicht eines NASA- Forschungszentrums dar. Neben einem historischen Überblick zu dort (einst) verfügbaren Analogsystemen wird der Bedarf an digitaler Telemetrie festgestellt. Eine Recherche zu Bauteilen und Technologien für Resonatoren und Daten- bzw. Hilfsenergieübertragungseinrichtungen bereichert die Ausarbeitung.

Analoge Systeme für komplexe Instrumentierungen waren auch im neuen Jahrtausend noch im Einsatz, wie es der Beitrag von Zeisberger u. a. [22] aus dem Jahre 2002 erwähnt. Für geringe Meßstellenanzahl und mäßige Anforderungen an die Meßunsicherheit bzw. Auflösung wurden

solche Systeme auch in jüngerer Vergangenheit (2006) von z. B. Heuer u. a. [23] genutzt, wobei als abschließende Registrierung sicher ein Speicherolzograph zum Einsatz kam. Der beschriebene rotierende Teil der Meßkette zur Untersuchung eines Turboladers funktioniert analog, wobei das Telemetriesystem nebst Batterie zentral in der hohlgebohrten Welle sitzt. Verblüffend ist, daß zur Funktionsbeschreibung ein Verweis auf zwei ältere (1968 bzw. 1969) Publikationen seitens Ludewig [24, 25] dient. Ein einfaches einkanaliges Analogsystem mit kapazitiver Übertragung publizieren Gyekenyesi und Haase [26] im Jahr 2010. Ambitioniert ist die 2013 publizierte Arbeit von Yang [27], die über thermoelementbasierte Meßtechnik mit der Zielanwendung Turbineschaukel berichtet. Dabei wirkt eine Analogelektronik auf SiC- Basis als Meßverstärker und Hochfrequenzmodulator, deren Applikation später im Schaufelfuß 450 °C überstehen soll.

Auch die in den Abschnitten 4 und 5 (Bild 6, Bild 67) thematisierte Versuchsanlage wurde zunächst mit zwei Analogsystemen ausgestattet, die in Summe etwa 40 Meßstellen im rotierenden System abfragten. Dieses kommerzielle System arbeitete mit einem 13,56 MHz HF- Generator, um die Übertragung zu realisieren. Eine komplexe Elektronik realisierte per Frequenzmodulation im Zeitmultiplex die Konzentration auf einen Übertragungskanal. Die Demodulation im ruhenden System lieferte eine der Kanalzahl entsprechende Anzahl von Gleichspannungen, die den Meßstellen zugeordnet, via Digitalvoltmeter die Meßwerte zu registrieren ermöglichte. Die Genauigkeitsanforderungen entsprachen denen der im Abschnitt 5 beschriebenen Ergebnisse, wobei die ange strebten  $\pm 0,1$  K per Typ K Thermoelement entsprechend ca.  $\pm 4$   $\mu$ V hervorzuheben sind.

*Vorteile* bringt der Einsatz aktiver analoger Technik im Vergleich zu passiver Technik hinsichtlich erweiterter Komplexität und gesteigerter Empfindlichkeit. So ermöglicht die aktive Technik die Realisierung eines Meßstellenumschalters im bewegten System. Dadurch genügt ein Übertragungskanal für Hilfsenergie und Information, um die Abfrage mehrerer Meßstellen z. B. im Zeitmultiplexverfahren zu realisieren. Zudem kommen Meßverstärker hinzu, die hinsichtlich der Empfindlichkeit Anpassungen für verschiedenste Meßgrößen mit unterschiedlichsten Anforderungen z. B. Thermoelemente, Dehnmeßstreifen, Drucksensoren ermöglichen.

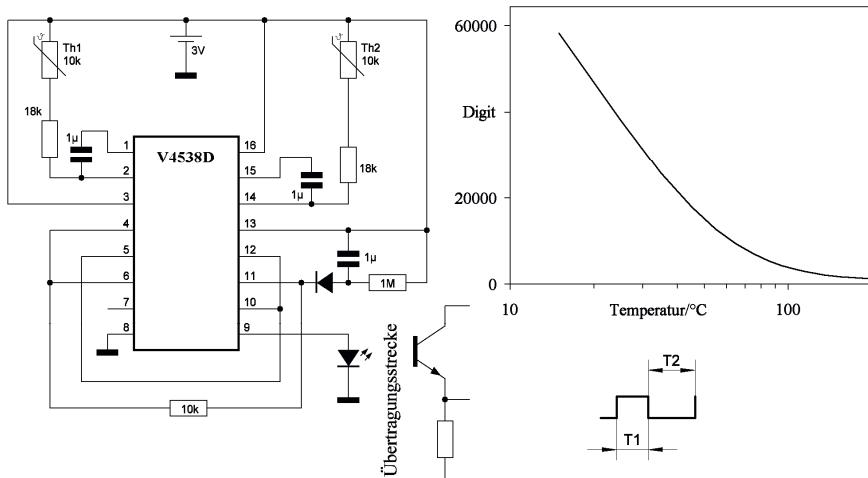
Die *Nachteile* der aktiven analogen Technik liefert der Vergleich mit digitalen Systemen. So ist die Auflösung durch die Übertragung prinzipiell begrenzt. Ein analoges System ist selten feiner aufgelöst als 0,1 %, wobei ein digitales System je nach Datenmodus beliebige Auflösung bei der Übertragung ermöglicht. Aktuelle eigene Systeme nutzen häufig das 16-Bit- Format (entsprechend 0,0015 % Auflösung). Diese prinzipielle Freiheit auszureißen ist nur insofern sinnvoll, wie es die angeschlossene Meßtechnik auszufüllen vermag. Ein im Vergleich noch wesentlicherer Nachteil der analogen Technik besteht in der mangelnden Erkennbarkeit von Übertragungsfehlern. Grobe Übertragungsfehler erkennt der erfahrene Experimentator auf Grundlage der Plausibilität. Be tragsmäßig kleine Abweichungen sind meist nicht als solche erkennbar, während der aktuell allgegenwärtige Einsatz von Frequenzumrichtern z. B. für Antriebe viele Probleme in dieser Richtung verursacht. In gleicher Weise sind funktionale Defekte in einem Analogsystem schwieriger wahrzunehmen als in einem Digitalsystem. Die Analogübertragung ist insgesamt weniger robust.

Das o. g. Analogsystem wies u. a. einen besonderen Effekt auf, der Sprünge im Meßsignal immer dann hervorrief, wenn das rotierende System über das Maschinenfundament Erdkontakt bekam. Dies fiel zunächst nicht auf, da die am Rotor verwendete Bürstendichtung im Neuzustand einen permanenten Erdkontakt gewährleistete. Nach einigen Betriebsstunden erreicht die Bürstendichtung den eingefahrenen Zustand, wodurch das Problem offenbar wurde. Diese eine Schwierigkeit wurde dadurch umgangen, daß eine Schleifkohle aus einem Kommutatormotor die permanente Erdung des Rotors realisierte, wobei dieses Vorgehen dem Sinn eines Telemetriesystems widerspricht. Diese u. a. Schwierigkeiten mit diesem System hatten letztlich die Installation einer digital arbeitenden Eigenentwicklung des Autors (Abschnitt 5.1) zur Folge.

Aktive analoge Technik ist hinsichtlich der technologischen Realisierung heute nicht als einfacher *einzuschätzen* als eine digitale Technik mit gleicher Kanalanzahl. Daher werden komplexe Systeme mit hoher Anforderung an die Meßunsicherheit vorzugsweise digital ausgeführt. Die Nutzung

aktiver Analogtechnik behält die Relevanz vor allem für weniger komplexe Aufbauten mit geringer Meßstellenanzahl.

Eine besonders einfache Realisierung eines analogen Telemetriesystems zeigt die in Bild 5 angegebene Schaltung, welche zwei Meßwiderstände (z. B. Thermistoren) abfragt. Deren Widerstandswerte bestimmen direkt die Impulsdauern beider binärer Signalpegel, so daß ein im ruhenden System angeordneter optischer Empfänger z. B. mit Fototransistor anhand vorher kalibrierter Übertragungsfunktion die Meßgrößen durch Impulsdauermessungen registrieren kann.



**Bild 5** Schaltung eines analogen Telemetriesystems für zwei Meßstellen (Thermistoren 10 k $\Omega$  bei 25°C) auf Basis eines gebräuchlichen Doppel- Monoflop- Bausteins [28] (Katalog VEB Mikroelektronik 1988), Impulsdauer T1 für Thermistor Th1 und T2 für Th2, kleiner Übertragungsbereich daher Anordnung der Übertragungsstrecke zweckmäßig an freiem Wellenende für kontinuierliche Übertragung, Übertragungsverhalten entsprechend überschlägiger Auslegung für o. g. Thermistoren bei Verwendung eines 3,7 MHz 16- Bit- Zählers für die Impulsdauerbestimmung mit 1x Überrollen tatsächliche Digit- Anzahl um  $2^{16}$  höher

### 3.2.4 Digitalisierung in der Trennstelle

Dieser seltene Fall einer Realisierung der Meßaufgabe im bewegten System ist dadurch gekennzeichnet, daß die Digitalisierung unter Mitwirkung und Einfluß von Trennstelle und Relativbewegung zwischen bewegtem und ruhendem Teilsystem erfolgt.

Die Abgrenzung der Variante mit der Digitalisierung in der Trennstelle zu den von den benachbarten Abschnitten 3.2.3 und 3.2.5 beschriebenen Realisierungen einer Meßaufgabe im bewegten System besteht in der Besonderheit, daß der bewegte Teil der Meßkette vor der Trennstelle die Digitalisierung vorbereitet, um dem ruhenden Teilsystem den Empfang des diskretisierten Ergebnisses zu überlassen. Somit besteht zu dem in den benachbarten Abschnitten Beschriebenen der Unterschied, daß das bewegte Teilsystem ein analoges Signal aussendet, welches das ruhende Teilsystem digital zur Weiterverarbeitung aufnimmt. In den anderen Abschnitten sind Versand und Empfang jeweils gleich - entweder analog oder digital - ausgeführt.

Dieser Grenzfall ist wohl von geringer praktischer Bedeutung und somit eher akademisch, wenngleich er durchaus leicht zu realisieren ist.

Dazu sei von einem Sensor im wiederkehrend bzw. periodisch bewegten System ausgegangen, dessen Analogsignal die Frequenz eines Generators bestimmt. Diese Frequenz ist dabei deutlich niedriger als die Frequenz der periodischen bzw. umlaufenden Bewegung und wird z. B. optisch

übertragen, wobei der Sender einmal je Umlauf einen Übertragungsbereich passiert (Rotation mit einer Übertragung außerhalb des Drehpunktes oder komplexer gemäß Bild 3 und Bild 4). Somit erfolgt die Quantisierung oder Diskretisierung der Impulsdauer des Generators im bewegten System im Raster der Bewegungsfrequenz.

### 3.2.5 Aktive digitale Technik

Zu aktiver digitaler Technik zählen im Sinne dieser Systematisierung alle die Realisierungen der Meßaufgabe im bewegten System, bei denen der Meßeffekt, der Sensor und der Verstärker nebst analoger Signalbehandlung und Digitalisierung der Bewegung eines Maschinenteils folgen. Der übrige Teil der Meßkette (Tabelle 1), beginnend beim Empfang des digitalen Signals mit anschließender Zwischenspeicherung und Verarbeitung und endend mit abschließender Speicherung, ruht.

Die Abgrenzung der aktiven digitalen Technik zu den von den benachbarten Abschnitten 3.2.4 und 3.2.6 beschriebenen Realisierungen einer Meßaufgabe im bewegten System besteht einerseits in der Mitfahrt aller der Teile der Meßkette, die die Gewinnung eines digitalen Signals erfordert, und andererseits darin, daß der ruhende Teil der Meßkette jegliche Zwischenspeicherung mit dem Zweck einer Vorverarbeitung übernimmt. Ein im Sinne der Systematisierung gänzlicher Ausschluß der Zwischenspeicherung im bewegten Teilsystem, das einen Analog-Digital-Umsetzer umfaßt, ist nicht zweckmäßig, da die meisten Analog-Digital-Umsetzer über wenigstens ein Register oder Schieberegister mit speichernder Wirkung verfügen. Dies erfordert die Beschränkung des Trennungskriteriums auf die Zwischenspeicherung mit dem Zweck einer Verarbeitung, zu der eine einfache Wandlung von einem parallel vorliegenden Bitmuster in ein serielles Muster nicht zählen soll.

Integrierte ADU (Analog-Digital-Umsetzer) waren in den 80iger Jahren des vergangenen Jahrhunderts schon in guter Auswahl verfügbar. Die Frage eines Einsatzes für Telemetriesysteme unterlag somit eher den Randbedingungen der Anwendung. Der Beitrag von Zeisberger u. a. [22] (Fa. MTU Aero Engines) aus dem Jahre 2002 illustriert den Übergang eines Herstellers komplexer Telemetriesysteme (Fa. Manner) für den Einsatz u. a. in Gasturbinen hin zu digitalen Systemen.

Es war demnach naheliegend, bei den ersten eigenen Arbeiten, die mit der Entwicklung eines 8-kanaligen Moduls zur Abfrage von Typ-K Thermoelementen im Jahr 2003 begannen, gleich digitale Technik zu verwenden (Abschnitt 5).

Die Arbeiten von Mitchell u. a. [29, 30] aus den Jahren 2008/9 zeigen einerseits die Anstrengungen, Sensoren für die harschen Bedingungen in Industriegasturbinen tauglich zu machen, und andererseits die Anwendung aktiver digitaler Technik. Hervorzuheben ist dabei, daß die beschriebene Systemarchitektur für Montage- und Wartungsarbeiten zwei Trennstellen vorsieht. Die Meßstelle auf der Turbinenschaufel liest ein vermutlich passives System im Schaufelfuß aus. Die Verbindung realisieren per Plasma- oder Flammspritzen auf die Schaufel aufgetragene Leiterbahnen. Das passive System im Schaufelfuß wird von einem aktiven digitalen System ausgelesen, das seinerseits eine gesammelte Übertragung der Daten von mehreren Schaufeln bzw. Meßstellen ins ruhende System bewerkstellt. Ob die Autoren die formulierten beachtlichen Ziele erreichen, geht aus den Publikationen nicht hervor.

In einem Beitrag aus dem Jahr 2011 von Long u. a. [9], allesamt Mitarbeiter der Fa. Rolls-Royce, wird die Notwendigkeit maßgeschneideter Telemetriesysteme proklamiert, da anderenfalls die komplexen Anforderungen nicht zu erfüllen sind. Dazu wird eine Rolls-Royce Firmenschrift des Jahres 2003 [31] zitiert und anschließend ein hinsichtlich des modularen Aufbaus prinzipiell ähnliches System vorgestellt wie in der o. g. Publikation [22] aus dem Hause MTU. Dabei sind die schematischen Darstellungen zu innerer Struktur und Funktion grob gehalten [22] oder zudem vermutlich stark von der Realität abweichend [31] und somit nicht als Anleitung zum Nachbau zu verstehen.

Einen anderen Blickwinkel haben Habib u. a. [20] (2014) bei der Ausrüstung eines komplexen universitären Versuchstandes. Der Vergleich kommerziell verfügbarer Telemetriesysteme lässt auch diese Autoren zu einer Eigenentwicklung übergehen, wobei z. B. für die drahtlose Datenübertragung kommerzielle WLAN-Module bzw. Rechner zum Einsatz kommen. Vergleichsweise niedrige Drehfrequenzen von max.  $2500 \text{ min}^{-1}$  ermöglichen einerseits recht große Elektronikaufbauten und andererseits die Verwendung von 22 Akkumulatoren mit zusammen 1 kWh zur Versorgung von Elektronik und elektrischer Heizung für Wärmeübergangsuntersuchungen.

Im *Vergleich* sind die technischen Lösungen – soweit publiziert – einerseits ähnlich und andererseits systematisch verschieden. Kommerzielle Systeme verfügen über Bussysteme, die mehrere und verschiedene Module abzufragen gestatten. Hersteller von Fluggastturbinen stellen hohe Anforderungen hinsichtlich Drehfrequenz mit deutlich über  $10000 \text{ min}^{-1}$ , wodurch die Telemetriesysteme sehr kompakt ausfallen und nach Möglichkeit auf kleinem Radius angeordnet sind. Niedrigere Anforderungen hinsichtlich der Belastung ermöglichen größere Installationen und ggf. sogar mitfahrende Batterien zur Bereitstellung der Hilfsenergie. Die Realisierung der Ablaufsteuerung übernehmen Prozessrechner oder programmierbare Gatterfelder (FPGA), wenn zahlreiche Meßstellen abzufragen sind.

Die vom Autor entwickelten Systeme nutzen drahtlose Daten- und Hilfsenergieübertragung, jeweils einen Prozessrechner und sind modular aufgebaut. Die Module kommunizieren via Bussystem und absolvierten Drehfrequenzen von über  $11000 \text{ min}^{-1}$ , die je nach Installationsradius einige tausend Radialbeschleunigung aushalten müssten (Abschnitte 5 und 6).

Die *Vorteile* aktiver digitaler Technik sind groß, weshalb die Digitaltechnik – wie auch in fast allen sonstigen Technologiebereichen – beinahe ausschließlich geworden ist. Aus Sicht der Realisierung der Meßaufgabe im bewegten System sind mehrere Vorteile maßgeblich. Im Vergleich zu aktiver analoger Technik (Abschnitt 3.2.3), ist die Möglichkeit fehlerfreier Übertragung mit unbegrenzter Auflösung zu nennen. Natürlich können bei der Übertragung durchaus Fehler entstehen, wenn z. B. der Empfänger den Übertragungsbereich (Abschnitt 3.1) verläßt, aber in jedem Falle kann die Steuereinheit (Prozessrechner oder FPGA) eine Prüfsumme berechnen und dem zu versendenden Datensatz hinzufügen. Die Empfängerseite rechnet mit selbem Algorithmus ebenfalls die Prüfsumme aus, wonach eine Ungleichheit einen Übertragungsfehler im Datensatz signalisiert. Schon dieser Vorteil allein genügt, aus Sicht des Experimentators die Entscheidung für ein digitales System zu rechtfertigen.

Die aktive Digitaltechnik bietet durch Nutzung standardisierter Bussysteme die Möglichkeit, auf effiziente Weise eine modulare Bauweise zu realisieren, die mehrere verschiedene Module z. B. für verschiedene Meßgrößen, in ein komplexes Gesamtsystem zu integrieren erlauben.

Die bei komplexen Systemen immer vorhandene Steuereinheit – nicht unbedingt ein separates Modul – ermöglicht darüber hinaus den Wechsel der Betriebsart und somit verschiedene Meßprogramme mit bedarfsgerechter Abtast- bzw. Datenrate. So gelingt auch die Steuerung komplexer Meßabläufe (Abschnitt 6).

Maßgebliche *Nachteile* der komplexen digitalen Technik sind nicht offensichtlich. Lediglich die gebotene Mindestkomplexität könnte als Nachteil angeführt werden. Um von den zuvor genannten Vorteilen zu profitieren, muß das System über eine zentrale Steuereinheit mit Rechentauglichkeit verfügen. Diese Mindest- bzw. Einstiegskomplexität ist nicht zu umgehen, aber bereitet Dank hohen Integrationsgrades aktueller Bauteile keine maßgeblichen Implementierungsprobleme.

Ein sparsames Digitalsystem, das ggf. nur eine Meßstelle abfragt und auf eine Steuereinheit mit Prüfsummenalgorithmus verzichtet, kann u. U. schwieriger nutzbar sein als ein Analogsystem. Treten Übertragungsfehler auf, die z. B. bei der Inbetriebnahme nie gänzlich vermeidbar sind, beeinflussen sie mit gleicher Wahrscheinlichkeit höher- oder niederwertige Bits, wodurch das digitale Meßsystem schlechter abschneidet als das analoge. Beim Analogsystem wirken die Fehler

zunächst meist auf dem Betrage nach niedriger Skale, wodurch das einfache Analogsystem nützlicher als das sparsame Digitalsystem erscheint.

Der *Einschätzung* zufolge, ist zu erwarten, daß aktuell und zukünftig vorrangig digitale Systeme zur Meßwertübertragung von komplex instrumentierten Bauteilen dienen. Die Schwelle zur Entscheidung zwischen aktivem Analogsystem oder Digitalsystem bestimmen die Anforderungen an die Übertragungssicherheit bzw. Meßunsicherheit sowie die Aufwendungen für die Realisierung eines Digitalsystems mit Mindestkomplexität. Demnach erlangt die analoge Lösung den Vorzug, wenn wenige Meßstellen mit mäßiger Meßunsicherheitsanforderung bei wenig anfälliger Übertragung einen hinsichtlich der Installation im bewegten System geringeren Aufwand verursacht als die Mindestkomplexität eines funktional vergleichbaren Digitalsystems.

Grundsätzlich sind Fehler in komplexen Systemen schwieriger zu lokalisieren als in einfachen, wobei kein prinzipieller Unterschied zwischen analogen und digitalen Varianten besteht. Digitale Systeme sind in der Strukturierung im Vergleich zur Analogvariante meist komplexer, da einerseits verzweigte Installationen Dank Digitalisierung störfreier arbeiten und daher komplexer möglich sind sowie andererseits zur Schaltungsstruktur zusätzlich eine Programmstruktur mit variabler Funktionalität hinzukommen kann. Für eine Fehlersuche bei der Inbetriebnahme ist daher fast immer der Entwickler hinzuzuziehen, da nur er fehlerhafte Systemreaktion und Ursache in der funktionalen Verkettung einander zuordnen kann. Mindestanforderung für eine Fehlersuche ist ein guter Überblick über alle Details der Systemfunktionalität im Zusammenwirken (Versuchsanlage, physikalische Situation, Meßverfahren, Schaltung, Programm).

Die Erfahrung zeigt, daß selbst unter besten Bedingungen, wenn Entwickler und Anwender eine Person oder präsent sind, einzelne Fehlerursachen unerkannt bleiben. So konnte das Aussetzen einer zentralen Steuereinheit eines in Abschnitt 6 thematisierten Telemetriesystems nicht aufgeklärt werden, da der Fehler erst bei Drehfrequenzen oberhalb  $6000 \text{ min}^{-1}$  aufrat und mit geringer Hysterese nach Abnahme der Drehfrequenz immer wieder verschwand. Die Baugruppe kam daraufhin in einem stationären Gerät zum Einsatz und funktioniert seither.

### 3.2.6 Digitale Technik mit Zwischenspeicher

Zur digitalen Technik mit Zwischenspeicher zählen im Sinne dieser Systematisierung alle die Realisierungen der Meßaufgabe im bewegten System, bei denen die ganze Meßkette (Tabelle 1) mit Ausnahme der Auswertung und abschließenden Speicherung Bestandteil des bewegten Teilsystems ist.

Die Abgrenzung der digitalen Technik mit Zwischenspeicher zu den zuvor im Abschnitt 3.2.5 beschriebenen Realisierungen einer Meßaufgabe im bewegten System besteht darin, daß alle Teile der Meßkette, die der Gewinnung, Digitalisierung und Vorverarbeitung dienen, auf dem Maschinen Teil mitfahren, während nur Auswertung und abschließende Speicherung im ruhenden System erfolgen.

Die Abgrenzung zum Abschnitt 3.2.5 ist aus Anwendersicht nur für einzelne Aspekte maßgeblich. Die angegebenen Einschätzungen gelten prinzipiell in gleicher Weise und werden nicht wiederholt. Daher enthält dieser Abschnitt nur Zwischenspeicherung oder Vorverarbeitung betreffende und erwähnenswerte Unterschiede.

Hinsichtlich der technischen Realisierung von Zwischenspeicherung mit der Möglichkeit der Vorverarbeitung bestehen verschiedene Möglichkeiten. Ein System auf Basis eines *Prozeßrechners* benötigt dann einen per Bus zu implementierenden Erweiterungsspeicher (RAM), der am besten mit Rechnertaktfrequenz beschreibbar ist. Diese Maßnahme bedeutet erhöhten Installationsaufwand im rotierenden System, bzw. der Prozeßrechner des Telemetriesystems ist komplexer, aufwendiger und ggf. baulich größer und störanfälliger. In jüngerer Vergangenheit bieten integrierte Schaltungen (IS) teils hinreichende Mengen an RAM auf einer IS an, um ganze Meßdatenfelder zwischenzuspeichern, meist zum Preis des Übergangs auf 32 Bit Breite und nicht manuell zu ver-

arbeitender Strukturabmessungen. Große Anzahlen von Anschlüssen bei gleichzeitig stark reduzierten Strukturbreiten tragen neben der erschwerten Verarbeitung nicht zur Zuverlässigkeit unter den Bedingungen eines Einsatzes im Telemetriesystem bei. Die erhöhte Komplexität potenziert nach der Erfahrung zudem die Aufwendungen bei der Fehlersuche. Ein anteiliger Verlust der Integrität des Prozeßrechners nebst Speicher, z. B. hervorgerufen durch Leitungsbrüche in der Verbindung von Prozessor und Speicher, ist für den Meßbetrieb fatal und darüber hinaus kaum detektierbar. Zusätzliche Prüfsummenalgorithmen zur Kontrolle der korrekten Speicherfunktion sind möglich, aber reduzieren die Datenrate und steigern die Programmkomplexität.

*Programmierbare Gatterfelder* (FPGA) verfügen zunehmend über hinreichende Speichermengen für Meßdatenfelder. Die Schwierigkeit großer Anschlußanzahl bei gleichzeitig stark reduzierter Strukturbreite besteht in gleicher Weise wie vorstehend hinsichtlich der Auswirkung auf das Gesamtsystem angemerkt.

Die auch im Abschnitt 3.2.5 zitierte Arbeit von Habib u. a. [20] aus dem Jahre 2014 enthält einen Vergleich kommerzieller digitaler Systeme mit und ohne Speicher. Dabei kommen Prozeßrechner in Form von 16-, 32- und mehrheitlich 8 Bit-Systemen vor. Taktfrequenzen, Kanalanzahlen und Speicherausstattung sind unterschiedlich. Im Vergleich zum eigenen System (Abschnitt 6) und zu anderen Telemetriesystemen, deren Einsatz im Bereich der Turbomaschinenentwicklung publiziert ist, können die angegebenen Prozeßrechner oder Funkmodule nicht auf gleicher Skala bewertet werden. Deren Einsatzzweck ist universeller, die Übertragungsreichweite größer, z. T. auf WLAN-Standard beruhend, möglicherweise nicht für höhere Drehfrequenzen geeignet und ohne spezifische z. B. für Thermoelemente geeignete Analogeingänge mit zudem teils geringer Auflösung.

Die Frage nach *Nutzen oder Rechtfertigung* des zusätzlichen Aufwands einer *Zwischenspeicherung* großer Meßdatenfelder im bewegten System kann je nach Anwendung unterschiedlich ausfallen. Allgemein gilt, daß Telemetriesysteme, die maßgeblichen z. B. mechanischen, thermischen Belastungen ausgesetzt sind, um so betriebssicherer und nutzbarer sind je geringer deren Komplexität ist. Neben der Versagenswahrscheinlichkeit sind auch Aufwendungen für Fehlfunktionserkennung, Fehlersuche und Reparatur maßgeblich.

Vor diesem Hintergrund muß es eine konkrete Notwendigkeit für den Einsatz eines Zwischenspeichers geben. So kann eine *ungenügende Übertragungsdatenrate* einen Zwischenspeicher erfordern, um kurzzeitig hohe Abtastraten zu erreichen. Die im Abschnitt 6 thematisierte Entwicklung kann auf Basis einer Übertragungsrate von 38,4 kBit/s (effektiv < 3 kB/s) für fast 6 s Dauer knapp 90000 Werte/s registrieren. Die Übertragung erfolgt zeitlich nach der Registrierung. Diese Betriebsweise ermöglicht kurzzeitig für viele Anwendungen genügende Abtastraten, aber verhindert während der Übertragung des vergleichsweise großen, schnell registrierten Datensatzes die Bereitstellung aktueller Meßwerte.

Ein anderer maßgeblicher Grund für den Zwischenspeichereinsatz kann eine *Vorverarbeitung* ggf. mit Datendeduktion sein. Das wäre z. B. für eine Hitzdrahtmessung mit Berechnung von Turbulenzgrad und mittlerer Geschwindigkeit ohne Übertragung der Einzelwerte möglich.

Diese spezifische Vorgehensweise erfordert entweder eine maßgebliche Betriebsflexibilität des verwendeten Telemetriesystems oder die Einbeziehung der vorgesehenen Meßaufgabe bei Entwicklung und Auslegung des Telemetriesystems.

Vermutlich vermeiden kommerzielle Telemetriesysteme deshalb die Zwischenspeicherung großer Datensätze (Abschnitt 3.2.5). Eine pauschal hoch gewählte Übertragungsdatenrate umgeht diese Probleme und überläßt dem Anwender die Entscheidung über die zu speichernde Datenfülle als Aufgabe für das ruhende System. Dies ermöglicht einerseits, die Verarbeitung auf Basis der Einzelmeßwerte zu wiederholen und zu korrigieren, und bedingt andererseits ggf. übermäßige Abtastraten für z. B. Bauteiltemperaturen, die der anschließenden Auswertung mehr Datenlogistik abverlangen.

Ein weiterer wesentlicher Grund für Zwischenspeicherung resultiert aus der Bewegung, wenn der Sender den Übertragungsbereich in Relation zum Empfänger z. B. periodisch verläßt. Die Hilfsenergierversorgung sollte dann kontinuierlich abgesichert sein.

Ein Grenzfall zum *Übertragungsprinzip „keine Übertragung“* liegt dann vor, wenn aus zuvor genannten Beweggründen ein maßgeblicher oder hauptsächlicher Anteil der Meßdaten nur gespeichert und nicht übertragen wird.

Diese Version wurde im Vorfeld der Entwicklung in Erwägung gezogen und die Integration einer MMC- oder SD- Karte in das Prozeßrechnersystem erprobt, für das im Abschnitt 6 thematisierte System als Erweiterungsmöglichkeit vorgesehen, aber dann mangels Notwendigkeit nicht verwendet. Abgesehen vom Risiko des Datenverlustes im Falle eines Schadens des Telemetriesystems hätte das Auslesen der Meßdaten zusätzliche Komplexität des Programms im Telemetriesystem erfordert. Ein häufiger Ausbau der MMC- oder SD- Karte zur Auslesung am PC kam wegen Be- schädigungsrisiko am Telemetriesystem nicht in Betracht.

Als *Einschätzung* folgt, daß die Zwischenspeicherung von maßgeblichen Meßdatenmengen im bewegten System wegen erhöhter Systemkomplexität dann keine zu bevorzugende Variante ist, wenn genügend Übertragungsdatenrate bei kontinuierlicher Übertragung vorliegt. Bestehen hierbei Einschränkungen, so kann ein Betrieb mit Zwischenspeicherung zum Preis einer maßgeschneiderten Lösung mit höherer Komplexität nützlich sein.

### 3.3 Weitere Aspekte

Im Folgenden werden Aspekte, Hinweise und Erfahrungen aufgeführt, die für alle bisher genannten technischen Lösungen Relevanz haben.

#### 3.3.1 Meßaufgabe und -verfahren

Ausschlaggebend für eine Messung am bewegten Maschinenteil sind die vorgegebenen Meßgrößen. Die Gestaltungsfreiheit des Ingenieurs beginnt bei der Auswahl eines Meßverfahrens. Im Rahmen der Formulierung der Anforderungen an die Messung ist festzulegen, ob der Einsatz von

- Feldmeßverfahren (1D bis 3D-Felder) nötig ist, bzw.
- mehrere punktuelle Messungen (Interpolation) oder
- einzelne punktuelle Messungen

genügen. Einen Einfluß auf die Auswahl von Meßverfahren und -technik hat zudem die Frage, ob

- vektorielle Größen oder,
- Skalare
- absolut bzw. nur deren
- Differenzen oder
- Kombinationen mehrerer Meßgrößen

interessieren. Je nach Anwendungen könnten z. B. thermisch stationäre oder transiente, hydraulisch stationäre oder transiente oder gasdynamische oder akustische Vorgänge maßgeblich sein, die Einfluß auf die wünschenswerte

- zeitliche und
- örtliche Auflösung

der geplanten Messungen haben. Meßverfahren mitteln bzw. integrieren sowohl örtlich als auch zeitlich unterschiedlich. Dieser Aspekt ist entscheidend für die Auswahl des Verfahrens und damit

die Gestaltung der Meßkette. Diese Festlegungen ergeben die Anforderungen an die weitere analoge Meßkette hinsichtlich

- zeitlicher und
- betragsmäßiger Auflösung bzw. Signal-Rausch-Verhältnis

und finden ihre digitalen Entsprechungen in der

- Abtastrate und der
- Digitalisierungstiefe.

Für den weiteren Transport und die weitere Verarbeitung erwachsen daraus im Sinne des Gesamtsystems Kennwerte wie

- Kanalanzahl und
- Datenrate,

die je nach Ausgestaltung

- zeitlich kontinuierlichen oder
- sequentiellen Betrieb in
- einer einheitlichen oder in
- mehreren verschiedenen Betriebsarten

ermöglichen. Letztlich ist die favorisierte Lösung der Meßaufgabe die summarisch über alle Disziplinen günstigste, betriebs- und funktionssicherste Variante mit der besten Aussicht auf die gesuchte Erkenntnis.

### 3.3.2 Belastung

Für die konstruktive Ausgestaltung auf verschiedene Baugruppen der Maschine verteilter Meßketten ist die *Belastung* der Einzelteile der applizierten Meßtechnik maßgeblich, wobei die Belastung der meßtechnischen Aufbauten z. B.

- mechanisch,
- thermisch,
- chemisch oder
- strahlungsbedingt

sein kann. Die in Abschnitt 3.1.1 thematisierte Bewegung verursacht mechanische Belastungen. Die Fliehkräftebelastung von Drucksensormembranen im rotierenden System und den daraus resultierende Einfluß auf deren Meßergebnis illustriert Abschnitt 5.2. Auch das Aussetzen der zentralen Steuereinheit eines Telemetriesystems (Abschnitt 6) ist vermutlich auf die mechanische Belastung zurückzuführen, da der Fehler bei Drehfrequenzen oberhalb  $6000 \text{ min}^{-1}$  auftrat und mit geringer Hysterese nach Abnahme der Drehfrequenz wieder verschwand.

Für die erwähnten temperaturkompensierten integrierten Drucksensoren konnte nach Steigerung der Digitalisierungstiefe eine verbleibende Temperaturabhängigkeit registriert werden. Sowohl diese thermische als auch die o. g. mechanische Belastung dieses Drucksensors konnte durch *Kalibrierung* Berücksichtigung finden, während gegen das Aussetzen der zentralen Steuereinheit nur deren Ersatz half, da eine nähere Bestimmung der Fehlerursache nicht gelang.

Zur Vermeidung beeinträchtigter Meßergebnisse infolge Belastung der Bestandteile der Meßkette sind weitere Strategien möglich. So ist neben der o. g. Kalibrierung die *Belastungskompensation* eine übliche Vorgehensweise, bei der z. B. Kühlung oder Temperierung eine thermische Belastung

kompensiert. Darüber hinaus kann bei komplexen Bewegungen (Bild 2) ggf. die Registrierung zeitlich bzw. im Ablauf dann erfolgen, wenn die Belastung z. B. infolge Beschleunigung minimal ist oder verschwindet. Dafür ist eine Bewegungsanalyse [10] und aus meßtechnischer Sicht eine Synchronisierung der Registrierung mit der Bewegung erforderlich, die für zeitaufgelöste Messungen (Abschnitt 6.2) ohnehin zur Aufgabenstellung zählt.

Auch chemische Belastungen, die vom Fluid oder anderen Materialien in der Meßumgebung ausgehen, sind zu berücksichtigen. Verdichterluft ist oft ölhaltig, die Instrumentierung sollte dem standhalten. Darüber hinaus ist energiereiche Strahlung ggf. nicht vermeidbar. Signale sollten davon nicht beeinträchtigt und die Instrumentierung nicht beschädigt werden.

### 3.3.3 Aufbau

Der Aufbau hat maßgeblichen Einfluß auf Aufwand, Robustheit bzw. Praktikabilität, und ist gemäß maschinenbaulicher Anwendung, Belastung und Meßaufgabe zu gestalten.

Auf der Grundlage von Meßgröße und –verfahren entsteht ein Konzept für die konkrete Meßkette, für die mit Rücksicht auf Bewegung und Übertragung die Verteilung der Meßkette auf die Maschinenstruktur erfolgt. Diese Verteilung ist eng mit der Anordnung der Trennstelle in der Meßkette verknüpft und findet seine abschließende konstruktive Lösung im *Aufbau* von Meßeinrichtung bzw. Telemetriesystem.

Der Weg zu dieser Lösung ist ein interdisziplinärer Konstruktions- und Iterationsprozeß, dessen Ergebnis als Mosaik aus erfahrungsisierten Lösungsdetails gesehen werden kann. Um effizient zu einer funktionalen Lösung zu gelangen, ist die Berücksichtigung einer Reihe von konstruktiven, technologischen und betriebsrelevanten Aspekten möglichst von Beginn des Konstruktions- und Auslegungsprozesses an zu empfehlen.

In nahezu jedem Fall, bei dem eine funktionale Strukturierung sinnvoll ist, und damit die Möglichkeit einer *Modularisierung* in z. B. elektronische Baugruppen besteht, ist es nützlich, diese auch anzustreben. Bei Entwicklung und Konstruktion dieser Module ist dann eine *belastungsgerechte Anordnung* der Einzelteile zweckmäßig, um die z. B. mechanische Belastung infolge Radialbeschleunigung so auszurichten, daß die Einzelteile gute Überlebenswahrscheinlichkeiten erzielen. Sind Bauteilsensitivitäten hinsichtlich zu erwartender Belastungen unklar, so können *systematische Bauteiltests* Klarheit schaffen (s. Abschnitt 5.2 Anordnung, Test v. Drucksensoren).

Bei der Entwicklung von Elektronikmodulen ist auch deren *Befestigung* am bewegten Maschinen teil ein maßgeblicher Aspekt. Die Erfahrung zeigt, daß dies ggf. die Verwendung höherfester Verbindungselemente erfordert. Generell ist die oft mangelhafte Ausführung von Konsumelektronikaufbauten ein schlechtes Vorbild für erfolgversprechende Meßaufbauten im Sinne dieser Arbeit. Daher ist es zielführend, jedes Detail gängiger Elektroniktechnologie vor dem Hintergrund von Anwendung und Belastung zu hinterfragen und ggf. einer zusätzlichen z. B. mechanischen Auslegung zu unterwerfen.

Elektrische *Verbindungen* sind ein wichtiger Bestandteil von Meß- und Elektronikaufbauten und neigen bei hohen mechanischen Belastungen dazu, Funktionalität zu verlieren. Besondere Aufmerksamkeit verdienen in diesem Zusammenhang *Steckverbinder*, deren Federanpreßkraft elektrischen Kontakt gewährleistet. Diese Kraft könnte bei Schwingungen und stationären Beschleunigungen unzureichend sein.

Kritisch sind in dieser Hinsicht auch *Durchkontaktierungen* von *Zwei- und Mehrbenenleiterplatten*. Während die Elektroniktechnologie gewalztes Kupfer für Leiterplattenbasismaterial verwendet, werden Durchkontaktierungen nach dem Bohren der Leiterplatte und vor dem Ätzen des Leiterbildes galvanisch eingebracht. Galvanisch abgeschiedenes Kupfer bringt ggf. einen deutlich geringeren Widerstand gegen mechanische Schwell- und Wechselbelastungen auf als gewalztes, wodurch Verbindungsverluste infolge Belastung wahrscheinlich sind.

Auch die Bonddrähte, welche den Halbleiterchip mit den Anschlüssen im Inneren des Bauteilgehäuses verbinden, sind bei hoher Belastung gefährdet [27, 30], wobei neben der Temperatur die Beschleunigungsrichtung maßgeblich ist [30].

Vor dem Hintergrund dieser Aspekte beim Aufbau von Telemetriesystemen ist eine Konstruktion anzustreben, die *Reparaturmöglichkeiten* vorsieht. Dies wurde beim zunächst eingesetzten kommerziellen System deutlich. Nach einem Schaden mußte das System nach Trennen aller Meßleitungen eingeschickt werden. Nach einigen Monaten kam es zurück, ohne am Ende gut zu funktionieren. Die eigenen Systeme konnten zeigen, daß *modularer Aufbau* und vorrätige Ersatzmodule Reparaturen vergleichsweise schnell ermöglichen, ohne *alle* Meßleitungen abtrennen zu müssen.

### 3.4 Realisierung von Meßaufbauten an bewegten Maschinenteilen

Dieser Abschnitt strukturiert das Vorgehen bei der Realisierung von Meßaufbauten an bewegten Maschinenteilen. Tabelle 2 zeigt eine allgemeine Abfolge von Aktivitäten und Iterationsschritten, die den Weg von der Zielstellung bis zum Meßbetrieb aufgeteilt in die drei Phasen *Konzeption und Auslegung, Realisierung* sowie *Betrieb* darlegt.

Eine Meßaktivität beginnt mit der Erstellung des Pflichtenheftes entsprechend *Position 0* (Tabelle 2), wobei die Anforderungen hinsichtlich Maschinenstruktur, Bewegung, Betriebsbedingungen, Belastungen, Meßgrößen und Auflösung in örtlichem, zeitlichem sowie betragsmäßigem Sinne formuliert werden.

Die strukturbestimmende Aktivität (*Position 1*, Tabelle 2) basiert auf den Systematisierungskriterien bzw. Inhalten der Abschnitte 3.1 und 3.2. Nach der *Bewegungsanalyse* können mögliche *Trennstellen* anhand der *Übertragungsprinzipien*, davon bestimmten *Übertragungsbereichen* und dazu in Relation stehenden *Übertragungs- und Betriebsmodi* ausgewählt werden. Die gewählten Trennstellen kennzeichnen die infolge der Bewegung erforderlichen Unterbrechungen bzw. Übertragungsstrecken in Hilfsenergie- und Informationspfad. Im nächsten eng verknüpften Schritt gilt es, diese aus Maschinenstruktur und Übertragungsmöglichkeiten resultierenden Übertragungsstrecken (Abschnitt 3.1) mit Trennstellen in der Meßkette (Abschnitt 3.2) zu verknüpfen (z. B. Bild 2).

Darauf aufbauend kann der *Entwurf einer Systemarchitektur* erfolgen (*Position 2*, Tabelle 2). Je nach Erfahrung sind ggf. Iterationen oder Variationen im Bereich der Positionen 1 und 2 erforderlich bis ein Lösungsansatz vorliegt.

Der anschließende Schritt ergänzt die Systemarchitektur um Baugruppenkonzeptionen (*Position 3*, Tabelle 2). Je nach Erfolg dieser Konzeptionen für alle Baugruppen können Modifikationen im Bereich der Schritte (Pos. 1 bis 3) notwendig sein.

Die nachfolgenden Schritte (*Position 4-8*, Tabelle 2) dienen der Prüfung der bis dahin erarbeiteten Konzeption hinsichtlich wichtiger Anforderungen. Im Erfolgsfalle empfiehlt die Tabelle (rechte Spalten) den nachfolgenden Arbeitsschritt und anderenfalls einen Rücksprung zur Nachiteration zu vorherigen Arbeitsschritten bzw. Tabellenpositionen.

Zuerst (*Position 4*, Tabelle 2) erfolgt die Prüfung nach den Vorgaben des Pflichtenhefts, gefolgt von der wichtigen Frage nach den Kalibriermöglichkeiten des Systems. Dies betrifft insbesondere auch den Kalibrieraufbau für das in Bewegung befindliche System.

*Position 5*, (Tabelle 2) beleuchtet Details, die Eigenschaften von Einzelteilen bzw. Baugruppen sowie Fragen der Instrumentierung betreffen. So können z. B. Einzelteile der Belastung nur dann gewachsen sein, wenn die Belastungsrichtung für sie günstig liegt. Das erfordert, die betreffende Baugruppe in dieser Orientierung einzubauen zu können. Andererseits können Temperaturfeldorientierungen eine Thermoelemente- Leitungsapplikation in belastungsgünstiger Richtung wegen zu erwartender thermischer Ableitfehler fragwürdig erscheinen lassen.

Die Kontrollen gemäß *Position 4* und *5* (Tabelle 2) können Schwierigkeiten offenbaren, die eine Anpassung des Pflichtenheftes oder maßgebliche Änderungen in der Konzeption erfordern.

Die *Positionen 6-8* (Tabelle 2) hinterfragen Eigenschaften des konzipierten Systems, die im Verlauf dessen späterer Nutzung Aufwendungen zur Folge haben. Die aufeinander abgestimmte Konzeption von Versuchsanlage und Meßsystem erlaubt es häufig, mit geringem Mehraufwand maßgebliche Aufwendungen an anderer Stelle zu vermeiden. Eine geeignete Zusammenschaltung der Baugruppen hat gut strukturierte Datensätze zur Folge, die anschließende Auswertungen vereinfachen. Das Vorsehen von Diagnose- oder Erweiterungs- bzw. Modifikationsmöglichkeiten erleichtert die Fehlersuche. Ein modularer Aufbau verkürzt erforderliche Reparaturen.

*Position 9*, (Tabelle 2) enthält die ersten Schritte, die zur Realisierungsphase gehören. Diese Realisierungsstudien prüfen kritische Einzelheiten hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit für den konzipierten Fall. Dies betrifft die Übertragung, die Baugruppenfunktionalität bzw. deren Zusammenspiel und insbesondere die erreichbare meßtechnische Qualität, welche ein anforderungsgerechter meist nicht automatisierter Kalibrierversuch aufzeigt. Je nach Erfolg sind auch hier Änderungen der Konzeption bzw. Rücksprünge in Tabelle 2 erforderlich. Je nach Erfordernis kommen erste ggf. anteilige Erprobungsmuster der konzipierten Baugruppen zum Test. Sollen neue Instrumentierungstechniken eingesetzt werden, so sind hier Tests zu deren Widerstandsfähigkeit z. B. als Klebefproben oder Probeschweißungen ratsam, da Instrumentierungsreparaturen oft unmöglich sind bzw. der Neuinstrumentierung im Nachfolgevorhaben entsprechen.

*Position 10*, (Tabelle 2) beinhaltet die Fertigung der Baugruppen und gleichzeitig Konzeption und Fertigung der Kalibrierereinrichtungen. Umfangreiche Systeme mit vielen Meßstellen machen automatisierte (Phantom-) Kalibrierungen wirtschaftlich. Kalibrierungen in Bewegung sind als gesonderte Aufbauten zu planen und zu realisieren.

Zunächst (*Position 11*, Tabelle 2) erfolgen die stationäre Erprobung und die stationäre Kalibrierung. Dieser Schritt erfordert auch, die beteiligte Programmierung der Komponenten und des Empfangs- und Auswertungssystems zu testen. Auftretende Funktionsmängel sind oft im Bereich der Fertigung zu suchen, wobei unzureichend genaue Kommunikation des Ingenieurs als Hauptursache für Fertigungsmängel hervorzuheben ist. Gelegentlich werden noch Änderungen von Konzeption bzw. Schaltung erforderlich.

Nach der Implementierung einer Testmaschine (*Position 12*, Tabelle 2) erfolgen Erprobung und Kalibrierung des Systems (*Position 13*, Tabelle 2) in Bewegung bzw. unter Belastung, wobei eine separate einfache Testmaschine mit reduzierter maschinenbaulicher Komplexität im Vergleich zur eigentlichen Versuchsanlage vorteilhaft (Abschnitt 6.4), aber nicht Bedingung ist. Eine Erprobung in Bewegung bzw. unter Belastung ist in jedem Falle ratsam, da eine direkte Montage an der Versuchsanlage mit hohem Aufwand für den ggf. irreversiblen Anschluß an die instrumentierte Meßzelle verbunden ist. Die Erfahrung zeigt (Abschnitt 5.1), daß auch dieser letzte Erprobungsschritt grundlegende Änderungen an der Konzeption zum Ergebnis haben kann.

Treten beim anschließenden Meßbetrieb (*Position 14*, Tabelle 2) Probleme auf, können diese in den Baugruppen des Meßsystems oder in der Instrumentierung bzw. Meßleitungsverlegung in der Maschine zu finden sein. Eine modulare Konzeption ermöglicht Tausch und Reparatur von Baugruppen innerhalb von wenigen Tagen, während ein Instrumentierungsverlust für den Meßaufbau eher endgültig ist.

*Zusammengefaßt* verdeutlicht dieser Abschnitt, daß die Neuentwicklung eines Telemetriesystems gewöhnlich den Rahmen eines einzelnen Forschungsvorhabens sprengt. Mit Erfahrung können die meisten der konzeptionellen Arbeitsschritte aber stark abgekürzt werden. Häufig ist die Veränderung der Anforderungen hinsichtlich *Bewegung*, *Übertragung*, *Trennstelle in der Meßkette* von einem Forschungsvorhaben zum nächsten desselben Auftraggebers nicht groß, wodurch bewährte Konzepte weiterverfolgt und ggf. angepaßt werden können. Änderungen der Anforderungen an die Meßfunktionalität erfordern in jedem Falle Entwicklungsaufwendungen. Eine umfassende Erpro-

bung von Applikationstechnik und Belastungsfestigkeit einzelner neu entwickelter Baugruppen ist trotz Erfahrung dennoch immer empfehlenswert.

**Tabelle 2** Algorithmus für die Realisierung von Meßtechnik und Messungen an bewegten Maschinenteilen

Phase	Pos.	Aktivität oder Frage	Entscheidung ja   nein	
Konzeption, Auslegung	0	Pflichtenheft, Formulieren der Anforderungen zu Maschinenstruktur, Bewegung, Belastungen, Meßgrößen und Auflösung	weiter mit Position	
	1	Bewegung und Übertragung, Anordnung der Trennstelle, siehe Abschnitte 3.1 und 3.2		
	2	Entwurf bzw. Modifikation der Systemarchitektur		
	3	Baugruppenkonzeption		
	4	Erfüllt die Konzeption die Anforderungen hinsichtlich - Kompatibilität von Betriebsweise zu Bewegung & Übertragung, - Meßgrößen und deren Auflösung, - Kalibriermöglichkeit stationär, in Bewegung, unter Belastung?	5	0/1
	5	Ist eine belastungsgerechte Realisierung möglich hinsichtlich - Montier- bzw. Applizierbarkeit, - Verbindungstechnik und - Kompatibilität der Einzelteile und Baugruppen?		0/3
	6	Ist der Programmieraufwand vertretbar für - das System selbst und - den Empfang nebst Datenlogistik?		2
	7	Sind die Diagnosemöglichkeit hinsichtlich Fehler- und Fehlerursachenerkennbarkeit ausreichend?	6	0/1
	8	Ist das System flexibel genug hinsichtlich - Reparaturaufwand & Ausfallzeit, - Modifizier- & Erweiterbarkeit?		1/2
	9	Sind stationäre Realisierungsstudien erfolgreich hinsichtlich - Übertragung sowie Zusammenspiel der Baugruppen, - meßtechnischer Funktionalität und Kalibrierversuch?	10	2/3
	10	Konzeption und Fertigung Kalibrieraufbauten, Fertigung der Baugruppen		3
Realisierung	11	Gelingt die stationäre - Erprobung von Komponenten und Gesamtsystem sowie - die Kalibrierung?	12	10
	12	Montage oder Implementierung an einer Testmaschine		3/10
	13	Gelingen Test & Kalibrierung in Bewegung bzw. unter Belastung?	14	0/1/3/10
Betrieb	14	Meßbetrieb in Versuchsanlage bzw. Zielanwendung erfolgreich?	10	

### 3.5 Zusammenfassung

Diese Systematisierung zeigt, daß die Lösung der Aufgabe, an bewegten Maschinenteilen Messungen zu realisieren, komplex ist und große Variantenvielfalt zuläßt. Dies liegt an der interdisziplinären Aufgabe einerseits und an der hohen Anzahl von konstruktiven Variablen andererseits. Dem Bearbeiter obliegt es, eine funktionale und effiziente Festlegung der genannten Variablen vorzunehmen.

Zur Unterstützung dieser Auslegungstätigkeit analysiert Abschnitt 3 dieses meßtechnische Betätigungsfeld hinsichtlich von Variationsmöglichkeiten und nennt Systematisierungskriterien, die den Lösungsraum für das Messen an bewegten Maschinenteilen aufspannen. Die Kriterien *Bewegung und Übertragung* sowie *Anordnung der Trennstelle* in der Meßkette werden als vorrangig für die Lösung der Meßaufgabe erkannt. Dies und die weitgehende Gestaltungsfreiheit des Bearbeiters im Bereich dieser Kriterien erhebt sie zu den Hauptkriterien der Systematisierung.

Die Einordnung der *Meßgröße* als nachrangigen Aspekt, obwohl deren Einfluß auf das Ergebnis ebenso signifikant ist, liegt in der Gestaltungsfreiheit in diesem Punkt und in der eingangs formulierten Ausrichtung der Arbeit begründet. So ist die vom Auftraggeber gewünschte Meßgröße festgelegt, wodurch in dieser Frage weniger Gestaltungsfreiheit verbleibt als bei den zuvor genannten Hauptkriterien.

Insgesamt werden Einflußgrößen und Entscheidungsmöglichkeiten identifiziert und in die Systematisierung eingeordnet sowie Auswirkungen einzelner Entscheidungen diskutiert. Einschätzungen mit Erfahrungsberichten ergänzen die Betrachtungen. Anhand des Systematisierungskriteriums *Anordnung der Trennstelle* in der Meßkette erfolgt eine beispielhafte Darstellung eigener und zitiert Realisierungen von unterschiedlichen Aufbauten zur Messung an bewegten Maschinenteilen. Die Einflüsse der Aspekte *Meßaufgabe und -verfahren, Belastung und Aufbau* greift ein weiterer Abschnitt auf.

Auf Basis von Systematisierung, Literatursicht und Erfahrung entsteht eine Abfolge von Aktivitäten (Abschnitt 3.4) bzw. ein Algorithmus zur Lösung der Meßaufgabe an bewegten Maschinenteilen. Anhand dieser Abfolge können Aufwendungen und Risiken einer maßgeschneiderten Entwicklung eines Systems zur Messung an bewegten Maschinenteilen abgeschätzt werden. Die maßgebliche kreative Arbeit im Sinne der Verteilung der Funktionalitäten auf die Maschinenteile nebst der Entwicklung von Lösungsgedanken zu allen Details wird dem Ingenieur dadurch nicht abgenommen, aber für die Planung der Arbeit bzw. zur Berücksichtigung der maßgeblichen Aktivitäten ist der Abschnitt hilfreich.

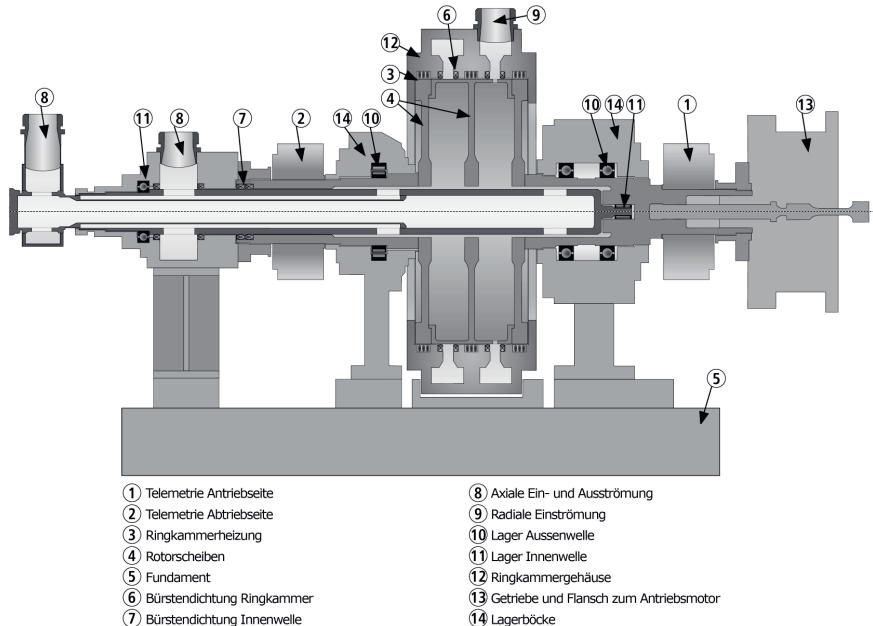
Die anschließenden Abschnitte berichten von Forschungsaktivitäten, für die Aufbauten für Messungen an bewegten Maschinenteilen realisiert wurden, und die der eigenen Arbeit bzw. dem unmittelbaren Umfeld zuzurechnen sind.

## 4 Meßeffekt und passive Technik im bewegten System

Dieser Abschnitt beinhaltet Messungen, die im Sinne der Systematisierung des Abschnitts 3.2 „Anordnung der Trennstelle in der Meßkette“ die Trennung von bewegtem und ruhendem Teil der Meßkette unmittelbar nach dem Meßeffekt bzw. Sensor haben (Abschnitte 3.2.1 und 3.2.2).

Die Abschnitte 4 und 5 beschreiben Ergebnisse, die am Zweikammer- Modellrotor durchgeführt worden sind. Dieser Versuchsstand entstand in Zusammenarbeit mit MTU Aero Engines GmbH München im Rahmen des „Engine 3E 2010 Programm“ Luftfahrtforschung und –technologie für zivile MTU- Antriebsprojekte [100]. Die Arbeiten wurden dann im Auftrag von MTU Aero Engines GmbH fortgeführt [101, 102]. Weitere Untersuchungen konnten im Rahmen des geförderten AG Turbo Vorhabens COOREFF-T 1.3.6 „Strömung und Wärmeübergang in rotierenden Kavitäten“ stattfinden [103].

Der Zweikammer- Modellrotor ist in Bild 6 [103] dargestellt und wird hinsichtlich seiner Grundfunktionalitäten beschrieben, die für mehrere Teile der Abschnitte 4 und 5 eine Rolle spielen. Er besteht aus dem mehrteiligen Rotorkörper, der die zwei Kammern die Welle mit den Lagern und die beiden in Abschnitt 5.1 beschriebenen Telemetriesysteme sowie die Verbindung zum Getriebe des Hauptantriebs umfaßt.



**Bild 6** Zweikammer-Modellrotor im Aufbau für axiale Durchströmung ohne Innenwellenrotation [103]

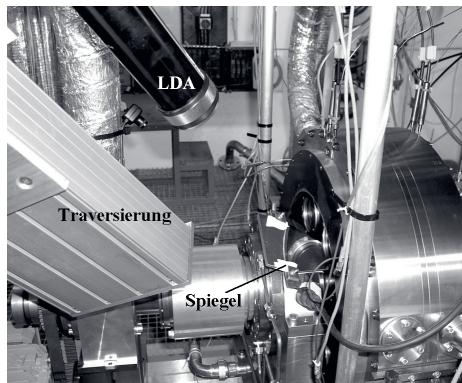
Der **Hauptantrieb** ist ein 200 kW Gleichstrommotor mit Stromrichter, der die Regelung der Drehfrequenz ermöglicht, und ein Planetengetriebe, das in Richtung Rotor ein Übersetzungsverhältnis von 21,5 ins Schnelle aufweist. Eine von den Planetenrädern des Getriebes und vom Rotor getragene, nicht zusätzlich gelagerte Ritzelwelle stellt die antreibende Verbindung vom Getriebe zum Versuchsstand her.

Der *Stator* besteht aus einem Betonfundament, welches das Maschinenbett trägt, auf dem die in axialer Richtung zu Montage- und Justagezwecken verschiebbaren Lagerböcke stehen, den nicht rotierenden Lagerteilen, dem Ölsystem, das die Ölnebelschmierung versorgt, dem Sperrluftsystem, das den Austritt des Ölnebels mindert, den Luftzu- und -abstromkammern und dem im Maschinenbett eingebrachten Ölreservoir mit zugehöriger drehzahlgesteuerter Zahnradpumpe nebst Filter und Drosselventilen für die spezifisch für das Getriebe und die Lager einzeln dosierbaren Frischölmengen. Die Ventile und die Kontrollmanometer für die einzelnen Öldrücke sind in der Meßkammer installiert. Das zum Stator zählende *Ringkammergehäuse* trägt vier Bürstdichtungen und drei aus jeweils drei Segmenten bestehende, einzeln steuerbare Heizringe, welche die Temperatur des Rotormantels zu verändern gestatten.

Die *Luftversorgung* gewährleisten fünf ölfüllte Schraubenverdichter, die im umlaufenden Betrieb einer Zweipunktregelung folgen. Vor der Versuchsanlage passiert die Luft den Luftfilter, den Druckregler und den Luftvorheizer mit maximal 120 kW geregelter elektrischer Leistung, der die Lufttemperatur nach Bedarf erhöht. Normblendenstrecken erfassen mit Hilfe von Motorstellventilen gewählte Luftmasseströme.

**Tabelle 3** Daten zum 2D-LDA [100]

optische Daten (Dantec)	grüne Linie	blaue Linie
Wellenlänge/nm	514	488
Brennweite/mm		200
Streifenanzahl		21
Streifenabstand/ $\mu\text{m}$	2,720	2,580
Halber Schnittwinkel/ $^\circ$		5,427
Meßvolumen – x/mm	0,060	0,057
Meßvolumen – y/mm	0,060	0,056
Meßvolumen – z/mm	0,630	0,597



**Bild 7** Aufbau zur Messung von radialer und tangentialer Strömungsgeschwindigkeit mit 2D-LDA an einer rotierenden Kammer, Bild seitenverkehrt

Ein Motor mit Kurzschlußläufer und einer Nennleistung von 2,2 kW, angesteuert von einem Frequenzumrichter, treibt die *Innenwelle* nach Bedarf co- oder kontrarotierend zu den Kammern durch ein Zahnriemengetriebe mit Übersetzungsverhältnis eins an. Die Abdichtung realisieren Wellendichtringe. Je nach Aufbau können verschiedene axiale, radiale oder kombiniert axiale und radiale Durchströmungsvarianten realisiert werden, wofür verschiedene Innenwellenvarianten zum Einsatz kommen.

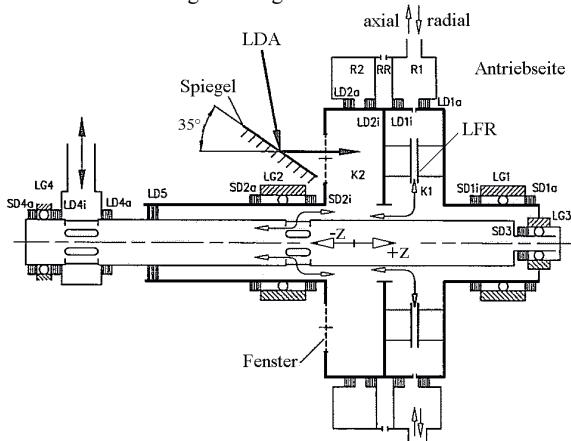
Das *Stationäre Meßsystem*, realisiert mit Multimetern mit Rechneranbindung, erfaßt alle benötigten Drücke, Temperaturen und Drehfrequenzen. Sicherheitsrelevante Betriebsmeßtechnik funktioniert redundant bzw. ohne Abhängigkeit vom Meßrechner.

Die nachstehenden Teile des Abschnitts 4 enthalten Ergebnisse eines Aufbaus des Zweikammer-Modellrotors, der in der antriebsabgewandten Rotorscheibe Polycarbonatfenster (UVP Resart) trägt. Diese gestatten je nach Aufgabenstellung den Blick in die rotierende Kammer oder sind von innen mit thermochromen Flüssigkristallen beschichtet, um die Fensterinnentemperatur meßtechnisch zugänglich zu machen. Die Fenster mit 66 mm Durchmesser und 15 mm Dicke sind auf der Rotorinnenseite wandbüding und von außen demontierbar. Dieser Fensteraufbau gestattet nach Festigkeitsrechnung Drehfrequenzen bis  $6000 \text{ min}^{-1}$ . Trotz dieser Beschränkung weisen die Fenster nach erfolgreichem Versuchsbetrieb Risse im Randbereich auf.

## 4.1 Messungen mit 2D-LDA in einer rotierenden Kammer

### 4.1.1 Meßaufbau und Auswertung

Für die Untersuchung der Strömungsverhältnisse in der antriebsabgewandten Rotorkammer (linke Kammer in Bild 6) wurde auf dem linken Lagerbock ein Oberflächenpiegel angebracht (Bild 7, Bild 8), der die 4 Laserlichtbündel eines 2D-LDA (Laser-Doppler-Anemometer, Fa. Dantec mit Bragg-Zelle, Eckdaten s. Tabelle 3 [100]) in die rotierende Kammer ablenkt. Die Sonde mit der Meßoptik, via Lichtwellenleiter mit einem 10 W Gaslaser verbunden, trägt ein Gestell mit Linear-einheit der Fa. Isel zur Traversierung. Die Lineareinheit ist dabei so justiert, daß das LDA- Meßvolumen auf einem Radius von ca. 116 mm in der rotierenden Kammer in axialer Richtung traversiert werden kann. Ziel der Justierung war dabei, daß eine Komponente des LDA in radialer und die zweite in Umfangsrichtung mißt.

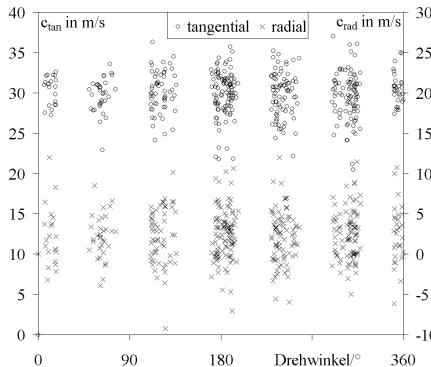


**Bild 8** Aufbau [100] mit 2D-LDA im Schnitt schematisch, Zweikammer-Modellrotor im Aufbau mit Polycarbonat-Fenstern, Luftführungsrohren LFR [U6], Rotorkammern K, Ringkammern R, Lagen LG, Luftdichtungen LD und Schmierstoffdichtungen SD, Luft-Partikel-Gemisch in *axialer* (axial zu, radial ab) und *radialer* (radial zu, axial ab) Strömungsvariante, Positionierungsradius des LDA- Meßvolumens bei  $r = 116$  mm bzw.  $x = r / b \approx 0,6$ ; mit  $b = r_{\max}$  in der Kammer

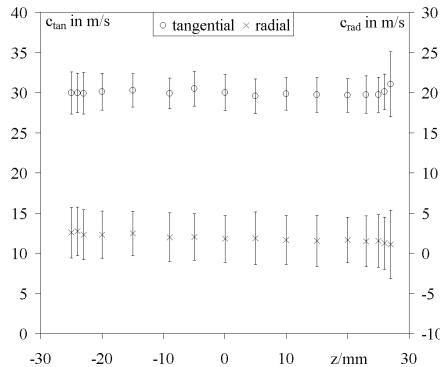
Das Meßverfahren verlangt die Gegenwart von *Streuteilchen*, die der Strömung im Idealfall verzögerungs- und schlupffrei folgen. Oft genügt es, ohnehin vorhandene Schmutzpartikel dafür zu nutzen. Hier besteht die Notwendigkeit, Partikel hinzuzufügen, wofür ein Flüssigkeitszerstäuber AGF 5,0 D der Fa. Palas zum Einsatz kommt. Ein homogenisiertes und auf 30 °C thermostatisiertes 1/1 Glyzerin-Wasser-Gemisch ist gemäß bei der Durchführung gewonnener Erfahrungen hinsichtlich Materialverträglichkeit mit den Polycarbonat-Fenstern und hinsichtlich der Bedingungen (ca. 3 bar, 20 bis 100 °C) eine günstige Wahl [100].

Die Partikel werden der Luft im Strömungsweg unmittelbar vor der Versuchsanlage beigemischt, um vorzeitige Abscheidung zu reduzieren. Dabei erweist sich die axiale Strömungsvariante (axiale Zuströmung, Bild 8) günstiger als die radiale, da mehr Partikel die Kammer K2 erreichen und im LDA meßbare Signale erzeugen.

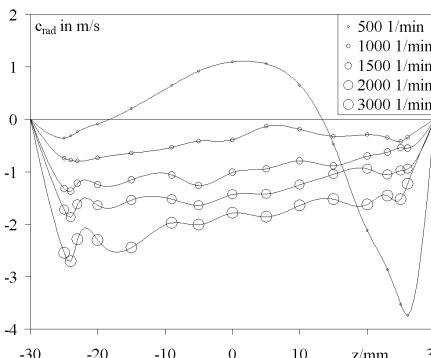
Nachdem am Rotorversuchsstand der Betriebspunkt stationär eingestellt ist, nimmt das LDA für verschiedene axiale Kammerpositionen  $z$  für jeweils 10 s Dauer Geschwindigkeitssignale der das Meßvolumen (Tabelle 3) passierenden Partikel auf. Die nach einer ersten Überprüfung durch das LDA- Betriebsprogramm als gültig erkannten Geschwindigkeitsmeßwerte der radialen und tangentialen Komponente zeigt Bild 9 in einer Auftragung über dem Rotordrehwinkel. Die Anordnung der Meßwerte lässt die Fensterpositionen in Umfangsrichtung erkennen. Bild 10 gibt die Mittelwerte über alle Fenster für variierte axiale Kammerposition an. Die eingetragenen Balken markieren die Streuung der Meßwerte ( $\pm 1 \sigma$ ).



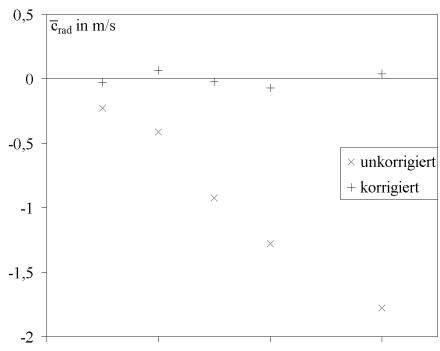
**Bild 9** tangentielle und radiale Strömungsgeschwindigkeitskomponenten über Rotordrehwinkel, 2D-LDA-Messung für axiale Strömungsvariante (Bild 8) bei  $3000 \text{ min}^{-1}$  Drehfrequenz, axialer K2-Kammerposition  $z = -23 \text{ mm}$  (nah am Fenster) und  $0,058 \text{ kg/s}$  Luftdurchsatz, ein Datenpunkt je validiertem Partikelsignal, Umfangsverteilung der 6 Rotorfenster erkennbar (Bild 7, Bild 8)



**Bild 10** Mittelwerte und Streuungen der tangentiellen und radialem Strömungsgeschwindigkeitskomponenten über axialer K2-Kammerposition  $z$ , 2D-LDA-Messung für axiale Strömungsvariante (Bild 8) bei  $3000 \text{ min}^{-1}$  Drehfrequenz und  $0,058 \text{ kg/s}$  Luftdurchsatz, Rotormantel  $105$  bis  $108^\circ\text{C}$ , Lufteintrittstemperatur  $35^\circ\text{C}$



**Bild 11** radiale Strömungsgeschwindigkeitskomponenten über axialer K2-Kammerposition  $z$ , 2D-LDA-Messung für axiale Strömungsvariante (Bild 8) bei varierter Drehfrequenz und  $0,058$  bis  $0,059 \text{ kg/s}$  Luftdurchsatz, Rotormantel  $105$  bis  $108^\circ\text{C}$ , Lufteintrittstemperatur  $35^\circ\text{C}$ , n-Splines durch die Meßwerte für Integrationszwecke



**Bild 12** Mittelwerte (1) der radialem Strömungsgeschwindigkeitskomponenten über der Rotordrehfrequenz, 2D-LDA-Messungen für axiale Strömungsvariante (Bild 8) bei  $0,058$  bis  $0,059 \text{ kg/s}$  Luftdurchsatz, Rotormantel  $105$  bis  $108^\circ\text{C}$ , Lufteintrittstemperatur  $35^\circ\text{C}$

Vor dem Hintergrund einer ausschließlich in axialer Richtung durchströmten Rotorkammer (K2 in Bild 8) erscheinen die Meßwerte (Bild 11) der radialen Geschwindigkeitskomponente besonders für die höheren der dargestellten Drehfrequenzen unrealistisch. Die Kontinuität verlangt eine in radialer Richtung ausgeglichene Bilanz

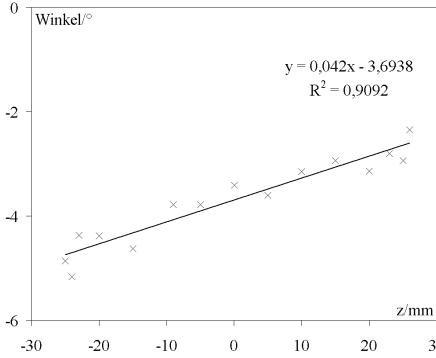
$$\bar{c}_{rad} = \frac{1}{\Delta z} \int c_{rad}(z) dz = 0 \quad (1)$$

der radialen Geschwindigkeitskomponente  $c_{rad}$ , da die Kavität mantelseitig verschlossen ist. Dieser Mittelwert der radialen Geschwindigkeitskomponente wird durch Verbinden der Meßwerte mit

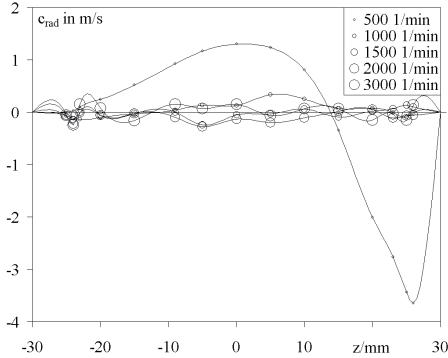
einem in der zweiten Ableitung stetigen Spline (Bild 11) mit dem Vorgabewert  $c_{rad} = 0$  für die Kammerwände ( $z = -30$  mm,  $z = 30$  mm) abgeschätzt. Ohne Korrektur entsteht ein etwa linearer Verlauf über der Drehfrequenz (Bild 12).

Bei der Suche nach der Ursache dieses systematischen Meßfehlers deutet dieser etwa lineare Zusammenhang – eine turbulenzbedingte Streuung ist überlagert - auf eine Justageabweichung des LDA- Kopfes hin, der die vom Betrage her viel größere Tangentialkomponente der gemessenen Geschwindigkeit anteilig der betrachteten Radialkomponente zuschlägt. Dieser Justagefehler entspricht einer Verdrehung des LDA- Kopfes, der durch eine Koordinatentransformation der gemessenen Geschwindigkeiten um einen Korrekturwinkel zu beheben ist.

Zur Bestimmung des Korrekturwinkels sind die Meßwerte (Bild 11) für eine Drehfrequenz von  $3000 \text{ min}^{-1}$  geeignet, da die Drehfrequenz hoch genug ist, um einerseits die charakteristische Kammerströmung [96] sicher einzustellen und andererseits hinreichend hohe Geschwindigkeiten zu messen. Die bestimmten Winkel (Bild 13) folgen einer etwa linearen Abhängigkeit von der axialen Kammerposition  $z$ . Dies ist damit zu begründen, daß der am abtriebsseitigen Lagerbock (Bild 6, Bild 8) angebrachte ebene Oberflächenspiegel in mehreren Raumrichtungen geneigt sein muß (Bild 7), um das LDA- Meßvolumen in die rotierende Kammer zu bringen. Auch dabei sind Justagefehler zu erwarten, die wegen der Ebenheit des Spiegels lineare Abhängigkeiten von linearen Traversierbewegungen erzeugen. Die Korrektur erfolgt anhand der Ausgleichsgeraden (Bild 13) und liefert Bild 14 analog Bild 11.



**Bild 13** (Korrektur-)Winkel der Strömungsgeschwindigkeit über axialer K2-Kammerposition  $z$ , 2D-LDA-Messung für axiale Strömungsvariante (Bild 8) bei  $3000 \text{ min}^{-1}$  Drehfrequenz und  $0,058 \text{ kg/s}$  Luftdurchsatz, Rotormantel  $108^\circ\text{C}$ , Lufteintrittstemperatur  $35^\circ\text{C}$ , Ausgleichsgerade zur Korrektur



**Bild 14** korrigierte radiale Strömungsgeschwindigkeitskomponenten über axialer K2-Kammerposition  $z$ , 2D-LDA-Messung für axiale Strömungsvariante (Bild 8) bei varierter Drehfrequenz und  $0,058$  bis  $0,059 \text{ kg/s}$  Luftdurchsatz, Rotormantel  $105$  bis  $108^\circ\text{C}$ , Lufteintrittstemperatur  $35^\circ\text{C}$ , n-Splines durch die Meßwerte für Integrationszwecke

Eine derartige Korrektur erfolgte in der Erstauswertung [100] nicht. Offensichtlich ist der zugrundeliegende Gedankengang dem Autor dieser Arbeit näher, da er seinerzeit mit Aufbau, Justage und Durchführung der Messungen betraut war. Die Justage des LDA- Meßvolumens in der Rotorkammer erfolgte in Ermanglung anderer Möglichkeiten nach gutem Augenmaß. Der nach über 12 Jahren abgeschätzte Justagefehler (Bild 13) ist vor dem Hintergrund der schwierigen Aufgabe und der verwendeten Prüfmittel ein gutes Ergebnis.

Eine Betrachtung zum *Teilchenfolgevermögen im Fliehkräftefeld* hinsichtlich der Tropfengröße und Flüssigkeitseigenschaften [100] ergibt, daß bei einer Rotordrehfrequenz von  $3000 \text{ min}^{-1}$  und  $0,5 \mu\text{m}$  Partikeldurchmesser eine radiale Sinkgeschwindigkeit von  $6,3 \text{ mm/s}$  als systematischer Fehler zu erwarten ist. Dabei wurde im Vergleich zu [100] nicht die Rotortangentialgeschwindigkeit, sondern die mit dem LDA gemessene Tangentialgeschwindigkeit  $c_{tan}$  verwendet. Da die

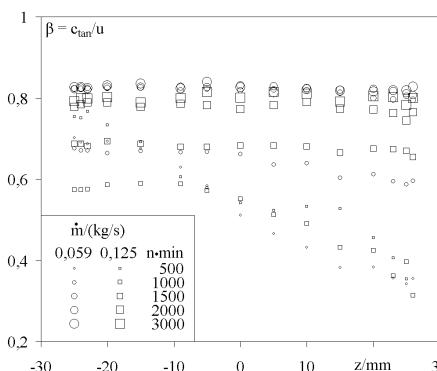
Sinkgeschwindigkeit klein ist gegen die verbleibende Streuung, erübrigt sich eine Berücksichtigung bei der beschriebenen Korrektur.

Die analog [100] resultierende Mindestluftgeschwindigkeit beträgt 0,76 m/s. Diese Bedingung basiert auf der Zeit, die das Streuteilchen für die Passage des LDA- Meßvolumens benötigt, und der Länge in Teilchendurchmessern, die es in radialer Richtung infolge Fliehkräftewirkung in dieser Zeit zurücklegt. Als Grenze wurde ein Teilchendurchmesser radiale Drift zur Berechnung der Mindestluftgeschwindigkeit verwendet. Diese Bedingung ist für alle Meßwerte erfüllt. Trotzdem nimmt die Anzahl der verwertbaren Streusignale im LDA- Empfänger bei über  $3000 \text{ min}^{-1}$  Rotor-drehfrequenz stark ab. Dies liegt offensichtlich daran, daß nicht genügend Partikel das Meßvolumen erreichen, wobei die Charakteristik der Strömungssituation maßgeblich ist. Eine einfache Begründung im Sinne des schnellen Ausschleuderns der Partikel infolge Fliehkräftewirkung genügt nicht, da die Sinkgeschwindigkeit auch bei einer Rotordrehfrequenz von  $6000 \text{ min}^{-1}$  40 mm/s nicht übersteigt.

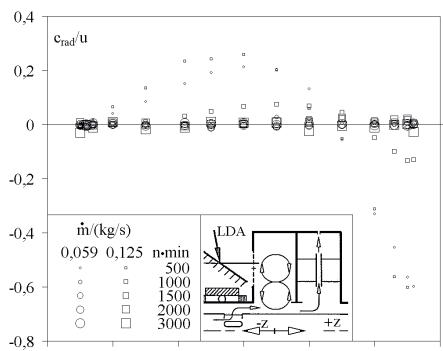
Das *Meßprogramm* enthält für die *axiale Zuströmung* (Bild 8) verschiedene Meßreihen, die Einflüsse von Drehfrequenz, Massestrom, Temperatursituation sowie Innenwellendrehfrequenz und deren Drehrichtung zu beobachten erlauben.

#### 4.1.2 Ergebnisse für drallarme axiale Zuströmung zu K2, radiale Ausströmung K1

Den Einfluß des varierten Massestroms auf die Tangentialkomponente der gemessenen Strömungsgeschwindigkeit  $c_{\tan}$  in K2 (Bild 8) zeigt Bild 15. Darin ist das **Kernrotationsverhältnis**  $\beta = c_{\tan} / u$  (s. Abschnitt 5.3.1), berechnet mit der Tangentialgeschwindigkeit des Rotors  $u$  am Meßradius  $r = 116 \text{ mm}$  des LDA ( $r/b = 0,6$ ), über der axialen Kammerposition  $z$  für verschiedene Rotordrehfrequenzen und zwei axiale Masseströme aufgetragen. Während drehfrequenzproportionales Verhalten der Tangentialgeschwindigkeit  $c_{\tan}$  eine Konzentration der Meßwerte bei  $\beta \approx 0,8$  verursacht, hebt diese Auftragung nicht drehfrequenzproportionale Verläufe deutlich hervor (Bild 15). Bild 16 ergänzt die radiale Geschwindigkeitskomponente in gleicher Normierung.



**Bild 15** Kernrotationsverhältnis  $\beta$  über axiale K2-Kammerposition  $z$ , 2D-LDA-Messung für axiale Strömungsvariante (Bild 8) mit zwei verschiedenen Luftdurchsätzen bei variierter Rotordrehfrequenz  $n$ , Rotormantel 105 bis  $108^\circ\text{C}$ , Lufteintrittstemperatur  $35^\circ\text{C}$



**Bild 16** Radialkomponente  $c_{\text{rad}}$  der Strömungsgeschwindigkeit auf die Rotortangentialgeschwindigkeit  $u$  bezogen und aufgetragen über axiale Kammerposition  $z$ , 2D-LDA-Messung für axiale Strömungsvariante (Bild 8), gleiche Betriebspunkte wie Bild 15, Skizze vermuteter toroidaler Wirbel für niedrige Drehfrequenzen  $n$

Erwartungsgemäß ist der Impulsaustrag aus der rotierenden Kammer durch die drallarme axiale Einströmung für höheren Massestrom stärker ausgeprägt als für niedrigen Massestrom. Dies stützt der entgegengesetzte Zusammenhang zwischen Kernrotationsverhältnis  $\beta$  und Massestrom  $\dot{m}$ .

(Bild 15), der für alle Meßwerte mit Ausnahme derer für eine Rotordrehfrequenz von  $500 \text{ min}^{-1}$  besteht.

Die **Strömungsstruktur** (Bild 15, Bild 16) zeigt, daß die axiale Durchströmung der Kammer nur bei niedrigen Drehfrequenzen ein toroidales Doppel- Mehrfachwirbelsystem verursacht, deren in radialer Richtung zweiter Wirbel im Blick des LDA liegt. Sobald die Rotation der Kammer wandreibungsbedingt genügend Drall in die Strömung einträgt ändert das toroidale Wirbelsystem (vergl. [96] Abschnitt 2.6) Gestalt und Kennwerte. Dies zeigen die mit zunehmender Drehfrequenz abnehmenden radialen Strömungsgeschwindigkeiten (Bild 16, Skizze Wirbel). Es ist anzunehmen, daß neben der Verringerung der Intensität der Wirbel auch deren radiale Ausdehnung in die Kammer abnimmt.

Die untersuchten Betriebspunkte liegen zwischen den beiden **Grenzfällen I und II** hinsichtlich Drehfrequenz und axialem Durchsatz.

I.) Wenn der axiale Durchsatz bzw. der Massestrom  $\dot{m} = 0$  sind und alle Kammerwände mit der gleichen Drehfrequenz rotieren, so stellt sich in der rotierenden Kammer Festkörperrotation - gleichbedeutend mit  $\beta = 1$  an jeder Kammerposition oder auch  $Ro \rightarrow 0$  (2) – ein. Voraussetzung ist ein genügend andauernder stationärer Betrieb. Die Reibungskräfte sorgen für einen Ausgleich. Die Abwesenheit anderer Kräfte wie z. B. Auftrieb ist dabei vorausgesetzt.

II.) Mit abnehmender Drehfrequenz wird der ins System zu übertragende Drehimpuls immer kleiner während die turbulente axiale Einströmung für intensiven Kontakt zur Kammerwand sorgt, so daß ebenfalls eine Annäherung an  $\beta = 1$  erfolgt mit  $Ro \rightarrow \infty$  (2).

Da sowohl der Durchsatz als auch die Drehfrequenz des Rotors für die Ausprägung der Strömung maßgeblich sind, wird das Verhältnis beider Kennwerte mit der Benennung **Rossbyzahl**

$$Ro = \frac{\bar{c}_{ax}}{\Omega a}, \quad (2)$$

verwendet z. B. [32, 96, 100], die als Quotient aus mittlerer axialer Einströmgeschwindigkeit und Umfangsgeschwindigkeit am inneren Kammer- und Einströmradius a angegeben wird.  $\Omega$  symbolisiert die Winkelgeschwindigkeit des Rotors. Ein Nachteil dieser Kennzahl ist die mangelnde Unterscheidbarkeit hinsichtlich der verwendeten Betriebspunkte. So kann eine sehr kleine Rossbyzahl daraus resultieren, daß einerseits bei moderaten Drehfrequenzen der axiale Durchsatz beinahe null wird oder andererseits bei mittleren Durchsätzen sehr hohe Drehfrequenzen anliegen. Beide Situationen sind verschieden, da in einer Gasströmung in dem Fall mit den hohen Drehfrequenzen starke radiale Druck- und Dichtegradienten auftreten. Ähnliche Nachteile weisen auch andere intensiv genutzte Ähnlichkeitskennzahlen wie z. B. die Umfangs-Reynoldszahl  $Re_\phi$  (61) auf. Für die hier vorgestellten Meßergebnisse ist anzunehmen, daß die Kompressibilitäteinflüsse gering sind (vergl. Abschnitt 5), da LDA- Messungen nur für niedrige Drehfrequenzen vorliegen.

Die Integration der Tangentialkomponente der gemessenen Strömungsgeschwindigkeit über die axiale Kammerposition z unter Verwendung von Splines (analog Bild 11)

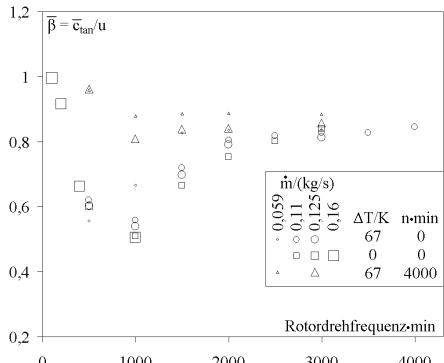
$$\bar{c}_{\tan} = \frac{1}{\Delta z} \int_z c_{\tan}(z) dz \quad \text{mit} \quad \bar{\beta} = \bar{c}_{\tan} / u \quad (3)$$

liefert die mittlere Tangentialgeschwindigkeit und das mittlere Kernrotationsverhältnis  $\bar{\beta}$  am Meßradius des LDA. Dessen Auftragung über der Drehfrequenz Bild 17 für variierte Temperaturdifferenz  $\Delta T = T_M - T_E$  und Innenwellendrehfrequenz wiedergibt. Bild 18 enthält die Auftragung derselben Meßwerte über der Rossbyzahl. Dabei symbolisiert  $T_M$  die Temperatur am Rotormantel und  $T_E$  die Eintrittstemperatur.

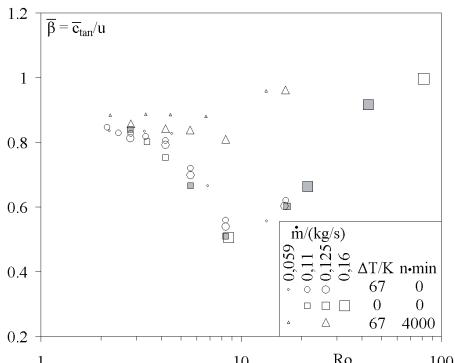
Der Blick auf die mit Quadraten symbolisierten Meßwerte, aufgenommen ohne Temperaturunterschied zwischen Rotormantel und Nabe, zeigt signifikante Veränderungen der Strömungsstruktur

zwischen den o. g. beiden Grenzfällen **I** und **II**. Die Annäherung an  $\beta = 1$  für große Rossbyzahlen ist deutlich, während der Verlauf für die niedrigsten Rossbyzahlen eher  $\beta \rightarrow 0,9$  anvisiert.

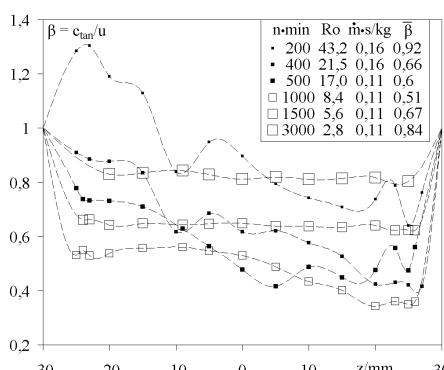
Der Vergleich mit den Arbeiten von Farthing u. a. [32], welche u. a. die Strömungsstrukturen in der rotierenden Kavität für verschiedene Rossbyzahlen thematisieren, zeigt Übereinstimmung darin, daß eine signifikante **Veränderung der Strömungsstruktur** im Bereich mittlerer Rossbyzahlen zu beobachten ist. Die Veröffentlichung berichtet über einen Übergang von „Mode Ia“ zu „Mode IIa“ für Rossbyzahlen im Bereich von 21 bis 23. Die Meßwerte gemäß Bild 18 haben das niedrigste Kernrotationsverhältnis  $\beta \approx 0,5$  bei  $Ro \approx 8,7$ .



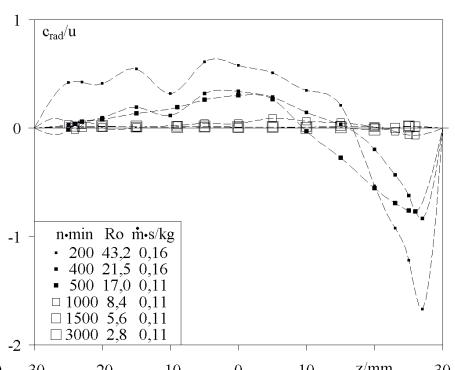
**Bild 17** Kernrotationsverhältnis  $\bar{\beta}$  gemittelt über axiale Kammerposition  $z$  (3), aufgetragen über der Rotordrehfrequenz, 2D-LDA-Messung axiale Strömungsvariante (Bild 8) für varierte Kennwerte: Innenwellendrehfrequenz  $n$ , Luftdurchsatz und Rotormanteltemperatur  $T_M$  mit  $\Delta T = T_M - T_E$ , Lufteintrittstemperatur  $T_E$  an der Nabe ca. 35°C



**Bild 18** Kernrotationsverhältnis  $\bar{\beta}$  gemittelt über axiale Kammerposition  $z$  (3), aufgetragen über der Rossbyzahl (2), 2D-LDA-Messung zur axialen Strömungsvariante (Bild 8), Betriebspunktvariation gemäß Bild 17, Positionierungsradius des LDA-Meßvolumens bei  $r = 116$  mm bzw.  $x = r / b \approx 0,6$ ; Auswahl Betriebspunkte für Bild 19 und Bild 20 mit grauen Symbolen



**Bild 19** Kernrotationsverhältnis  $\beta$  über axiale Kammerposition  $z$ , 2D-LDA-Messung für axiale Strömungsvariante (Bild 8), ausgewählte Betriebspunkte für varierte Rossbyzahlen, keine Temperaturdifferenz zwischen Rotormantel und Nabe, n-Splines für Integrationszwecke

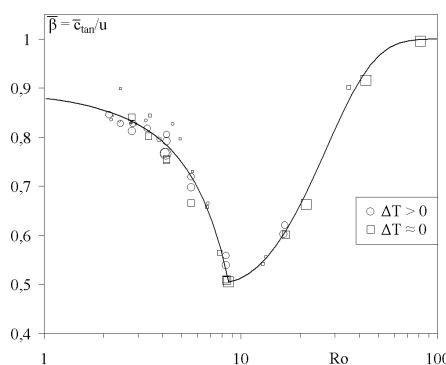


**Bild 20** Radialkomponente  $c_{rad}$  der Strömungsgeschwindigkeit auf die Rotortangentialgeschwindigkeit  $u$  bezogen und aufgetragen über axiale Kammerposition  $z$ , Betriebspunkte wie Bild 19, Positionierungsradius des LDA-Meßvolumens bei  $r = 116$  mm bzw.  $x = r / b \approx 0,6$

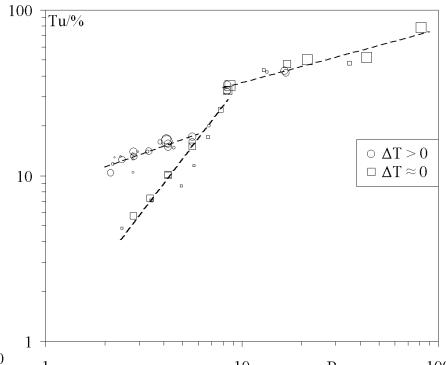
Eine Betrachtung der mit grauen Quadraten symbolisierten Meßwerte aus Bild 18 verdeutlicht die genannte Veränderung der Strömungssituation, wobei die Rossbyzahlen so liegen, daß sowohl ein Wert  $Ro = 8,4$  im Bereich des  $\bar{\beta}$  - Minimums als auch Werte für  $Ro \approx 20$  dabei sind. Für diese Meßwerte zeigen Bild 19 und Bild 20 die Verläufe von  $\beta$  und  $c_{rad}/u$  in der Auftragung über der axialen Kammerposition z. Die n-Splines zur Berechnung von  $\bar{\beta}$  und  $\bar{c}_{rad}$  sind eingezeichnet.

Beginnend bei hoher Rossbyzahl ( $Ro = 43$  in Bild 19) stellt sich hinsichtlich der Ebene  $z = 0$  ein stark asymmetrischer Verlauf des Kernrotationsverhältnisses ein. Die axiale Durchströmungsgeschwindigkeit ist wesentlich größer als alle anderen Geschwindigkeiten im System. Die toroidale Wirbelstruktur (Bild 20) ist dominant, und das mittlere Kernrotationsverhältnis ist hoch. Mit abnehmender Rossbyzahl sinkt das mittlere Kernrotationsverhältnis  $\bar{\beta}$  und die toroidale Wirbelstruktur sowie die radialen Geschwindigkeitskomponenten verschwinden im dargestellten zeitlichen Mittelwert. Das Strömungsprofil wird mit abnehmender Rossbyzahl immer flacher und das Kernrotationsverhältnis ist für alle axialen Kammerpositionen z etwa gleich.

Die Änderung der Strömungsstruktur ist mit Blick auf die hier gezeigten Meßwerte eher ein Verlauf als ein Umschlag im Bereich von  $Ro = 21$  bis  $23$ , wie er in [32] beschrieben ist. Trotzdem enthalten die Meßwerte ein ausgeprägtes Minimum für  $\bar{\beta}$  im Intervall  $Ro = 8,4$  bis  $17$ , das ebenfalls als Umschlagskriterium geeignet erscheint und zudem signifikante Kenngröße für die radiale Verteilung des statischen Drucks in der rotierenden Kammer ist.



**Bild 21** Kernrotationsverhältnis  $\bar{\beta}$  gemittelt über axiale Kammerposition z (3), aufgetragen über der Rossbyzahl, 2D-LDA-Messung axiale Strömungsvariante (Bild 8) für varierten Luftdurchsatz und zwei Temperatursituationen, Symbolgröße skaliert linear mit dem Durchsatz, Lufteintrittstemperatur an der Nabe ca.  $35^{\circ}\text{C}$ , ohne Innenwellenrotation, Approximation gemäß (4) bis (6), ausgeprägtes Minimum (vgl. Bild 19)



**Bild 22** Turbulenzgrad gemittelt über axiale Kammerposition z, aufgetragen über der Rossbyzahl, 2D-LDA-Messung axiale Strömungsvariante (Bild 8) für varierten Luftdurchsatz und zwei Temperatursituationen, Symbolgröße skaliert linear mit dem Durchsatz, Lufteintrittstemperatur an der Nabe ca.  $35^{\circ}\text{C}$ , ohne Innenwellenrotation

Die Darstellung von Meßwerten ohne Innenwellenrotation (vgl. Bild 17) zeigt Bild 21. Es sind Kernrotationsverhältnisse  $\bar{\beta}$  für varierte Drehfrequenz und varierten Massestrom für zwei Temperatursituationen über der Rossbyzahl aufgetragen. Die eingetragene empirische Approximation gelingt, indem das Wertepaar ( $Ro_0$ ,  $\bar{\beta}_m$ ) für das niedrigste mittlere Kernrotationsverhältnis  $\bar{\beta}_m$  in die Funktion

$$\beta = 1 - (1 - \beta_m) e^A \quad \text{mit} \quad (4)$$

$$A = 0,184 (Ro - Ro_0) \quad \text{für} \quad Ro < Ro_0 \quad \text{und} \quad (5)$$

$$A = -0,01 (Ro - Ro_0)^{3/2} \quad \text{für} \quad Ro > Ro_0 \quad (6)$$

eingetragen wird. Der linke Teil der Kurve (Bild 21) benötigt einen Koeffizienten (0,184) und der rechte Teil einen Koeffizienten (-0,01) und einen Exponenten (1,5). Während die Approximation für große Rossbyzahlen  $\bar{\beta} \rightarrow 1$  liefert, trifft  $\bar{\beta} \rightarrow 0,9$  für  $Ro = 0$  zu. Demnach bildet die Approximation den o. g. Grenzfall I, der hinsichtlich der Geschwindigkeitsverteilung einer Festkörperrotation entspricht, nicht ab. Da die angegebene Funktion die Anordnung der Meßwerte im Diagramm gut wiedergibt und Meßwerte für noch niedrigere Rossbyzahlen zur Bestimmung des Verlaufs nicht vorliegen, wird auf den Einbau eines weiteren Wendepunkts zur paßgerechten Annäherung an  $\bar{\beta} = 1$  für  $Ro = 0$  verzichtet. In den schon angeführten Arbeiten [32] sind zwei weitere Übergänge des Strömungsmodus für  $Ro = 2,6$  und  $Ro = 1,5$  angegeben. Die niedrigste Rossbyzahl in Bild 21 beträgt 2,1. Der eine besonders nach oben abweichende Meßwert (2,44; 0,9) mit quadratischem Symbol könnte zu einem Abzweig nach oben in der Kurve gehören, der einen anderen Strömungsmodus beschreibt. Dann wäre nicht nur ein Modus für die gleiche Rossbyzahl zu beobachten. Vor dem Hintergrund der Meßdatendichte in dem Bereich bleibt dies hypothetisch.

Die LDA- Meßdaten bestehen aus vielen Einzelmeßwerten (Bild 9), deren Mittelwerte die Geschwindigkeiten liefern. Die Streuung der Meßwerte (Bild 10) kann mit dem jeweiligen Mittelwert der Geschwindigkeit ins Verhältnis gesetzt werden und entspricht damit dem Turbulenzgrad

$$Tu = \frac{\sqrt{c'^2}}{\bar{c}} = \frac{\sigma_n(c)}{\bar{c}} = \sqrt{n \cdot \sum_{i=1}^n c_i^2 / \left( \left( \sum_{i=1}^n c_i \right)^2 - 1 \right)} \quad \text{mit } c = \bar{c} + c' \text{ und } \bar{c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i, \quad (7)$$

wie er auch bei Prandtl oder Schlichting/Gersten [33, 34] Verwendung findet. Dabei symbolisiert  $c$  den Betrag der Strömungsgeschwindigkeit bestehend aus dem Mittelwert  $\bar{c}$  und dem Schwankungsanteil  $c'$ . Da die Strömungsgeschwindigkeit ein Vektor ist, besteht der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit aus drei Richtungskomponenten (z. B.  $c^2 = c_r^2 + c_t^2 + c_z^2$ ), die am 2D- LDA meßtechnisch nicht zugänglich sind. Daher müssen hier Radialkomponente  $c_r$  und Tangentialkomponente  $c_t$  zur Berechnung des Turbulenzgrades

$$Tu_z = \sqrt{\sigma_n^2(c_r) + \sigma_n^2(c_t)} / \sqrt{c_r^2 + c_t^2} \quad (8)$$

an der jeweiligen axialen Position mit Index  $z$  genügen. Diese Zusammenführung der Komponenten birgt eine kleine Abweichung bzw. Vereinfachung, die hinsichtlich von Meßunsicherheit und nicht bekannter Axialkomponente  $c_z$  keine zusätzlich aussagegefährdende Wirkung entfaltet. Für die Auswertung wird analog (1) ein über axialer Kammerposition  $z$  gemittelter Turbulenzgrad

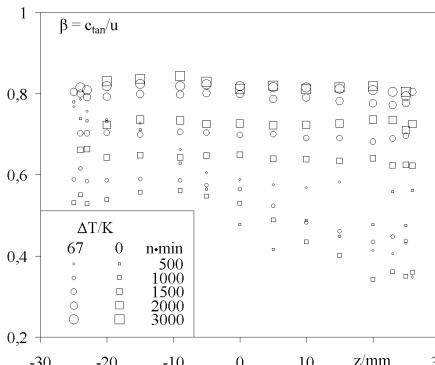
$$Tu = \frac{1}{\Delta z} \int Tu_z(z) dz \quad (9)$$

anhand eines n-Splines berechnet. Bild 22 enthält die Auftragung dieses **mittleren Turbulenzgrades** über der Rossbyzahl, wonach generell mit zunehmender Rossbyzahl entsprechend einer immer dominanteren axialen Durchströmung der mittlere Turbulenzgrad steigt. Die o. g. toroidale Wirbelstruktur mit großen Abmessungen begründet diesen hohen Schwankungsanteil, wenn sie instationär ist. Für kleinere Rossbyzahlen stabilisiert die Rotordrehung die Strömung und bewirkt eine Turbulenz auf kleinerer Skale.

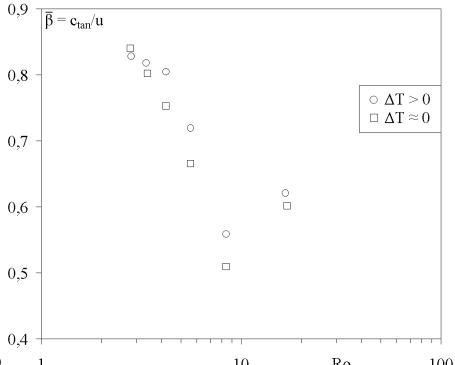
Die in Bild 22 eingezeichneten Linien sind Potenzfunktionen, die für die zugeordneten Meßwerte die geringste Abweichung erzielen. Sie verdeutlichen eine signifikante Änderung des Anstiegs im Bereich  $Ro \approx 9$ , bei dem auch das Minimum des mittleren Kernrotationsverhältnisses  $\bar{\beta}$  (Bild 21) auftritt. Dies stützt die Annahme der Änderung des Strömungsmodus in diesem Bereich.

Im Bereich niedriger Rossbyzahlen ( $Ro < 6$ ) gehen die Meßwerte für unterschiedliche Temperatursituationen getrennte Wege (Bild 22). Mit abnehmender Rossbyzahl bzw. steigender Drehfrequenz und zudem im gleichen Bereich stark steigendem mittleren Kernrotationsverhältnis (Bild 21) steigt die Zentrifugalbeschleunigung in der Strömung stark an. Das zunehmende Kraft-

feld verstkt die Auswirkungen der Dichteunterschiede, die der radiale Temperaturunterschied zwischen Rotormantel und Nabe verursacht. Dabei sind die Temperaturen am Rotormantel höher als an der Nabe. Kraftfeldgradient und Dichtegradient sind entgegengesetzt, was eine auftriebsbedingte Intensivierung des turbulenten Austauschs zur Folge hat. Dies wirkt der o. g. Strmungsstabilisierung durch die Drehbewegung entgegen, so df die Abnahme des mittleren Turbulenzgrades mit sinkender Rossbyzahl schwächer ausflt als für die Betriebspunkte ohne radialen Temperaturunterschied in der Rotorkammer. Die Anstiege der beiden Potenzfunktionen (Bild 22) für den Bereich niedriger Rossbyzahlen sind daher verschieden.



**Bild 23** Kernrotationsverhältnis  $\beta$  über axiale Kammerposition  $z$ , 2D-LDA-Messung für axiale Strömungsvariante (Bild 8) und variierte Rotordrehfrequenz  $n$ , Vergleich zweier Temperaturdifferenzen  $\Delta T$ , Rotormanteltemperatur  $T_M$  mit  $\Delta T = T_M - T_E$ , Lufteintrittstemperatur  $T_E$  ca.  $35^\circ\text{C}$ , axialer Durchsatz  $0,11 \text{ kg/s}$



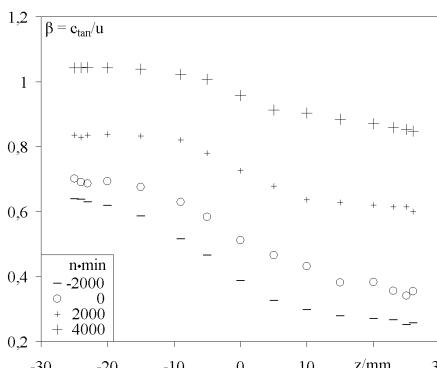
**Bild 24** Kernrotationsverhältnis  $\bar{\beta}$  gemittelt über axiale Kammerposition  $z$  (3), aufgetragen über der Rossbyzahl, 2D-LDA-Messung für axiale Strömungsvariante (Bild 8), gleiche Betriebspunkte wie Bild 23 ergänzt um  $2500 \text{ min}^{-1}, 0,11 \text{ kg/s}$

Der Einfluf der **Temperatursituation** auf das mittlere Kernrotationsverhältnis  $\bar{\beta}$  ist bei Betrachtung vieler verschiedener Betriebspunkte (Bild 21) nicht deutlich. Die separaten Darstellungen der Betriebspunkte eines Durchsatzes ( $0,11 \text{ kg/s}$ ) zeigen den Einfluf für verschiedene Drehfrequenzen bzw. Rossbyzahlen an der jeweiligen axialen Kammerposition (Bild 23) und integral (Bild 24). Besonders für mittlere Rossbyzahlen liefern die Messungen mit Temperaturdifferenz ( $\Delta T = T_M - T_E$ , Rotormanteltemperatur  $T_M$ , Lufteintrittstemperatur  $T_E \approx 35^\circ\text{C}$ ) bzw. mit Auftriebseinfluf höhere Kernrotationsverhältnisse. Die radialen Geschwindigkeitskomponenten  $c_{\text{rad}}$  weisen keine signifikanten Unterschiede auf.

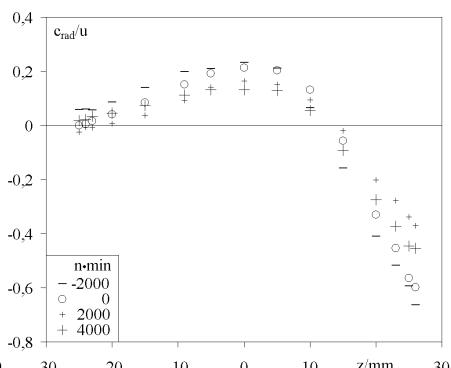
Um die festgestellten Unterschiede infolge der unterschiedlichen Temperatursituation, die in Bild 21 nicht deutlich sind, begrünen zu können, wären weitere Meßreihen für andere Kammerradien und Temperaturdifferenzen erforderlich.

Zugänglicher ist der Einfluf der **Innenwellendrehfrequenz**, den die Auftragungen von Bild 25 für die tangentialen und von Bild 26 für die radalen Geschwindigkeitskomponenten in der rotierenden Kammer verglichen. Dabei wurde die Innenwelle sowohl in entgegengesetzter (-) als auch in gleicher Drehrichtung (+) im Vergleich zur rotierenden Kammer betrieben. Eine Rotation der Innenwelle verursacht eine maßgebliche Änderung des Dralls in der Strömung, bevor sie die Rotorkammer passiert. Dies bedingt die Zuführung der Luft durch die Schlitze in der Innenwelle (Bild 8). Somit entsteht eine Verschiebung des Kernrotationsverhältnisses (Bild 25) in Richtung der Modifikation des Vordralls infolge Innenwellenrotation. Der Einfluf auf die bei  $500 \text{ min}^{-1}$  Rotordrehfrequenz noch erkennbare o. g. toroidale Wirbelstruktur in der Kammer, erkennbar an den radalen Geschwindigkeitskomponenten in Bild 26, zeigt keinen monotonen Verlauf in Abhangigkeit von der Innenwellendrehfrequenz.

Weitere Messungen für  $4000 \text{ min}^{-1}$  Innwellendrehfrequenz und varierte Rotordrehfrequenz sowie zwei verschiedene Durchsätze enthalten Bild 17 und Bild 18. Sowohl die Darstellung des mittleren Kernrotationsverhältnisses über der Rotordrehfrequenz als auch die über der Rossbyzahl zeigen das prinzipiell ähnliche Verhalten im Vergleich zu den Messungen ohne Innenwellenrotation. Der Unterschied besteht in der Verschiebung zu höheren Kernrotationsverhältnissen, wobei kleine Durchsätze  $\dot{m}$  eine größere Verschiebung erlauben als große Durchsätze. Das Minimum des Kernrotationsverhältnisses bleibt bei der gleichen Rossbyzahl, wenn es auch für kleine Durchsätze fast verschwindet. Demnach hängt möglicherweise der Umschlag des Strömungsmodus bzw. die zugehörige Rossbyzahl wenig von dem Vordrall ab, wobei dessen Auswirkungen auf das Kernrotationsverhältnis mit zunehmendem Vordrall in Rotordrehrichtung abnehmen. Das übermächtige Wirken der Rotordrehung im Vergleich zur Innenwellenrotation verwundert nicht, da die Umfangsgeschwindigkeit der Innenwelle bei gleicher Größenordnung der Drehfrequenzen wegen der deutlich geringeren Radien viel kleiner ist. Der von der Innenwelle der Strömung übertragene Impuls bzw. Drall ist daher vergleichsweise klein. Ein deutlicher Effekt entsteht bei Messungen mit niedrigen Rotor- und hohen Innwellendrehfrequenzen (Bild 25, Bild 26).



**Bild 25** Kernrotationsverhältnis  $\beta$  über axiale Kammerposition  $z$ , 2D-LDA-Messung für axiale Strömungsvariante (Bild 8) und varierte Drehfrequenz der Innenwelle  $n$ , Rotordrehfrequenz  $500 \text{ min}^{-1}$ , Luftdurchsatz  $0,059 \text{ kg/s}$ , Rotormantelttemperatur ca.  $107^\circ\text{C}$ , Lufteintrittstemperatur an der Nabe ca.  $35^\circ\text{C}$



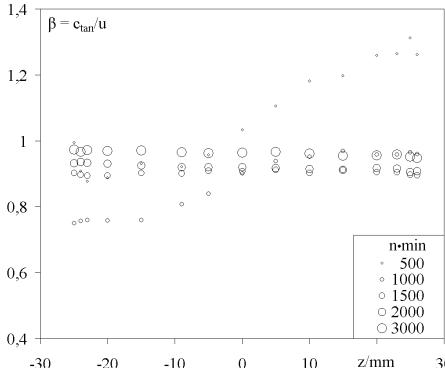
**Bild 26** Radialkomponente  $c_{rad}$  der Strömungsgeschwindigkeit auf die Rotortangentialgeschwindigkeit  $u$  bezogen und aufgetragen über axiale Kammerposition  $z$ , 2D-LDA-Messung für axiale Strömungsvariante (Bild 8), gleiche Betriebspunkte wie Bild 25

#### 4.1.3 Ergebnisse für radiale Zuströmung Kammer 1 und axiale Ausströmung Kammer 2

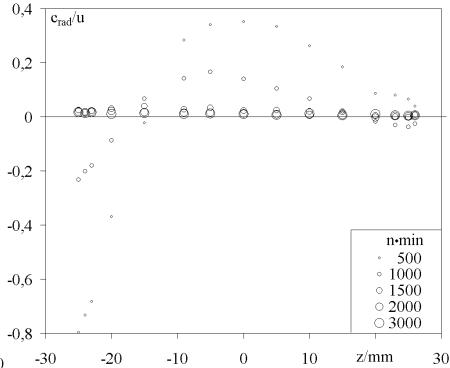
Das *Meßprogramm* für die *radiale Zuströmung* (Bild 8) ist weniger umfangreich als das für die axiale Zuströmung, da dieselbe Rotorkammer untersucht wird, und ebenfalls eine axiale Durchströmung mit geänderter Strömungsrichtung vorliegt. Die Strömung passiert bei radialem Zuströmung zuerst Kammer K1 in radialem Richtung (Bild 8), um im Anschluß K2 zu erreichen. Bei der Passage von K1 in radiale Richtung überträgt der Rotor Impuls bzw. Drall auf die strömende Luft. Dazu tragen die 13 Einströmbohrungen im Rotormantel mit Durchmesser 5 mm wegen hoher Tangentialgeschwindigkeit signifikant bei (vergl. Abschnitt 5.3). Die Luftführungsrohre (Bild 8) geben für ihre radiale Ausdehnung ein Kernrotationsverhältnis  $\beta = 1$  vor. Mit in Strömungsrichtung abnehmendem Radius sind  $\beta > 1$  zu erwarten, so daß die in Kammer K2 ankommende Strömung deutlich höhere Kernrotationsverhältnisse aufweist als für die zuvor betrachtete axiale Zuströmvariante.

Bild 27 und Bild 28 zeigen **Kernrotationsverhältnis** und **Radialkomponente** der Strömungsgeschwindigkeit für radiale Zuströmung aufgetragen über der axialen Kammerposition  $z$  für varierte

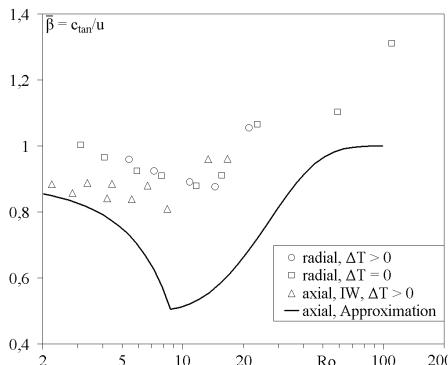
Rotordrehfrequenzen und ohne Innenwellenrotation bei einem Luftdurchsatz von 0,1 kg/s. Deutlich ist der Einfluß der geänderten Strömungsrichtung, der im Vergleich zu Bild 15 bzw. Bild 16 eine horizontal gespiegelte Anordnung hervorruft. Zudem sind die gemessenen Kernrotationsverhältnisse wegen dem höheren Vordrall für die radiale Zuströmung erwartungsgemäß höher als für die axiale Zuströmung.



**Bild 27** Kernrotationsverhältnis  $\beta$  über axialer Kammerposition  $z$ , 2D-LDA-Messung für radiale Strömungsvariante (Bild 8) und varierte Rotordrehfrequenz  $n$ , ohne Innenwellenrotation, Luftdurchsatz 0,1 kg/s, keine Temperaturdifferenz zwischen Rotormantel und Nabe



**Bild 28** Radialkomponente  $c_{rad}$  der Strömungsgeschwindigkeit auf die Rotortangentialgeschwindigkeit  $u$  bezogen und aufgetragen über axialer Kammerposition  $z$ , 2D-LDA-Messung für radiale Strömungsvariante (Bild 8), gleiche Betriebspunkte wie Bild 27



**Bild 29** Kernrotationsverhältnis  $\bar{\beta}$  gemittelt über axialer Kammerposition  $z$  (3), aufgetragen über der Rossbyzahl, 2D-LDA-Messung für radiale und axiale Strömungsvariante (Bild 8), Einfluß des Kernrotationsverhältnisses modifiziert durch Innenwellenrotation (axial, IW mit  $4000 \text{ min}^{-1}$  Innenwellendrehfrequenz) und Zustrom via K1 (radial) im Vergleich zur drallarmen Zustrom (Approximation) gemäß (4) bis (6) bzw. Bild 21, für radiale Strömungsvariante Vergleich zweier Temperatursituationen mit  $\Delta T$  zwischen Rotormantel und Luftteintritt an der Nabe ( $\Delta T \approx 40 \text{ K}$  für  $\Delta T > 0$ )

Einen Vergleich des **mittleren Kernrotationsverhältnisses** für axiale und radiale Zuströmung enthält Bild 29. Dabei wurde für die axiale Zuströmung ohne Innenwellenrotation die Approximation gemäß Bild 21 als Referenz eingetragen. Die Meßwerte für axiale Zuströmung bei  $4000 \text{ min}^{-1}$  Innenwellendrehfrequenz weichen erheblich von der Approximation ab, da die Innenwellenrotation den Vordrall der Zuströmung maßgeblich erhöht. Dies trifft in ähnlicher Weise für die radiale Zuströmung unabhängig von der varierten radialen Temperaturdifferenz zu. Dabei ist die Steigerung des Dralls in der Kammer K2 durch die radiale Zuströmung stärker als für die axiale Zuströmung mit Innenwellenrotation ( $4000 \text{ min}^{-1}$ ). Die Abhängigkeit von der Rotordrehfrequenz ist für die radiale Zuströmung auch stärker als für die axiale Zuströmung mit konstanter von der Rotordrehfrequenz unabhängiger Innenwellenrotation. Dies bedingt der starke Einfluß der Rotordrehfrequenz auf eine radiale Kammerdurchströmung bei radialer Zuströmung durch Kammer K1 (Bild 8).

Zudem ist das Minimum des mittleren Kernrotationsverhältnisses für die radiale Zuströmung zu höheren Rossbyzahlen verschoben im Vergleich zur axialen Zuströmung. Die Änderung des Strömungsmodus kann durch die modifizierte Zuströmung offensichtlich schon bei niedrigeren Rotordrehfrequenzen erfolgen, wobei anhand der Meßdaten nicht endgültig zu klären ist, ob es derselbe Modus ist wie bei axialer Zuströmung mit niedrigen Rossbyzahlen bzw. hohen Rotordrehfrequenzen. Signifikant unterschiedlich ist mindestens das Kernrotationsverhältnis, das für die radiale Zuströmung sehr nahe bei  $\beta = 1$  liegt, wodurch der Schlupf zwischen Rotor und Strömung sehr gering wird. Gleich ist der sehr flache Verlauf des Kernrotationsverhältnisses über der axialen Kammerposition (vergl. Bild 15, Bild 27) für niedrige Rossbyzahlen.

#### 4.1.4 Zusammenfassung

2D-LDA- Messungen der tangentialen und radialen Strömungsgeschwindigkeitskomponenten für varierte axiale Kammerposition in einer axial durchströmten rotierenden Kammer geben Auskunft über die Einflüsse der Betriebskennwerte Rotordrehfrequenz, Innenwellendrehfrequenz, Durchsatz und Temperatursituation.

In prinzipieller Übereinstimmung mit der Arbeit anderer Experimentatoren sind unterschiedliche innere *Strömungssituationen* als Reaktion auf Betriebskennwertvariationen erkennbar.

Dabei bewirkt zunehmender *Durchsatz* abnehmendes Kernrotationsverhältnis (Bild 18). Letzteres hängt entgegen intuitiver Erwartung kaum von der *axialen Kammerposition* ab. Beides trifft zu, wenn am benutzten Versuchsstand Rotordrehfrequenzen  $\geq 1000 \text{ min}^{-1}$  eingestellt sind.

Die Auftragung der Meßwerte über der Rossbyzahl  $Ro$ , welche die Betriebskennwerte Rotordrehfrequenz und Durchsatz enthält, bestätigt die in der Literatur beschriebene Veränderung des Strömungsmodus prinzipiell. Abweichend von der zitierten Arbeit liegt der Umschlag bei  $Ro \approx 9$  anstelle von  $Ro \approx 21$  bis 23, wobei als geeignetes Kennzeichen des Umschlags das Minimum des mittleren Kernrotationsverhältnisses erkannt wurde. Der untersuchte Bereich für  $Ro < 9$  weist das genannte flache Strömungsprofil auf, bei dem das Kernrotationsverhältnis kaum von der axialen Kammerposition abhängt. Im Bereich für  $Ro > 9$  verschwindet mit abnehmender Rossbyzahl die toroidale Wirbelstruktur, die von dominierender axialer Kammerdurchströmung herrührt. Das Minimum des mittleren Kernrotationsverhältnisses wird dann erreicht, wenn bei höchst möglicher Rossbyzahl das flache Strömungsprofil aufrecht erhalten wird. Für axiale Zuströmung mit geringem Vordrall wird ein minimales Kernrotationsverhältnis von  $\beta_m = 0,5$  bestimmt.

Zunehmender *Vordrall*, der durch Innenwellenrotation einerseits oder durch Zuströmung aus der radial durchströmten zweiten Rotorkammer andererseits eingestellt ist, bewirkt eine Abschwächung des Minimums und einen Anstieg der mittleren Kernrotationsverhältnisse.

Ein anhand der Streuung der LDA- Meßwerte bestimmter mittlerer Turbulenzgrad steigt mit zunehmender Rossbyzahl im ganzen untersuchten Bereich (Bild 22). Die doppelt logarithmische Auftragung des Turbulenzgrades über der Rossbyzahl bestätigt den Übergang zwischen den beiden Strömungsmodi in Form einer Diskontinuität im Anstieg bei  $Ro \approx 9$ . Zudem bewirkt eine im Vergleich zur Rotornabe gesteigerte Temperatur am Rotormantel eine Verzweigung der Meßwerte in der genannten Auftragung ab  $Ro < 6$ . In diesem Bereich bewirken die Temperaturdifferenzen bedingt durch signifikant werdende Radialbeschleunigungen Auftrieb. Der mindert für diese Richtung des Temperaturgradienten die stabilisierende Wirkung der Rotordrehung, die für eine globale Verringerung des Turbulenzgrades mit abnehmender Rossbyzahl sowie für die Unabhängigkeit des Strömungsprofils von der axialen Kammerposition bei niedrigen Rossbyzahlen maßgeblich ist.

Die an einer radialen Kammerposition ( $x = 0,6$ ) durchgeführten Messungen begrenzen die Aussage, da Abhängigkeiten von der radialen Meßposition bzw. vom Kammerradius dadurch nicht erkennbar sind.

Bei der für das Meßverfahren erforderlichen Bereitstellung von Streuteilchen im Meßvolumen gab es Schwierigkeiten bei Drehfrequenzen oberhalb von  $3000 \text{ min}^{-1}$ . Dies hat eine abnehmende An-

zahl von Einzelmeßwerten beginnend im Kammerrandbereich nahe den Scheiben zur Folge, so daß Meßergebnisse für höhere Drehfrequenzen nicht anzugeben sind.

Die Drehbewegung verursacht eine stabilisierte Strömungssituation, die den Transport von Streuteilchen zum Meßvolumen behindert. Turbulenz auf kleiner Skale (Bild 22) und die geringe Abhängigkeit des Kernrotationsverhältnisses (Bild 19, Bild 20) von der axialen Kammerposition bewirken vermutlich eine lange Verweilzeit in der Kammer für den Teil der Luft, der bis auf äußere Radien vordringt. Dies im Vergleich zu der Luft, die nur geringen Kammerradius erreicht (vergl. Abschnitt 4.3). Daß es auf den äußeren Kammerradien noch Impulsaustausch mit der drallarmen Zuströmung geben muß, belegen gemessene Kernrotationsverhältnisse deutlich unter eins.

Wegen des längeren Strömungsweges von Partikelzugabe bis zum LDA- Meßvolumen bei radialer Zuströmung durch Kammer K1 (Bild 8) erwies sich diese Strömungsvariante hinsichtlich der Streuteilchenversorgung als schwieriger im Vergleich zur axialen Zuströmung.

Aus Sicht der Anwendung interessiert den auslegenden Ingenieur, welcher Austausch in einer axial durchströmten Kammer in Abhängigkeit von Kammergeometrie, Strömungskennwerten und Kammerposition besteht. Dies ist wesentlich für den Wärmeübergang und damit für die Scheiben-temperaturen und die Aufrechterhaltung des Kühlpotentials der transportierten Kühlluft. Eine erweiterte Untersuchung mit gleicher Meßtechnik könnte zusätzlich an verschiedenen radialen Positionen messen, um ein zu entwickelndes Modell verifizieren zu können.

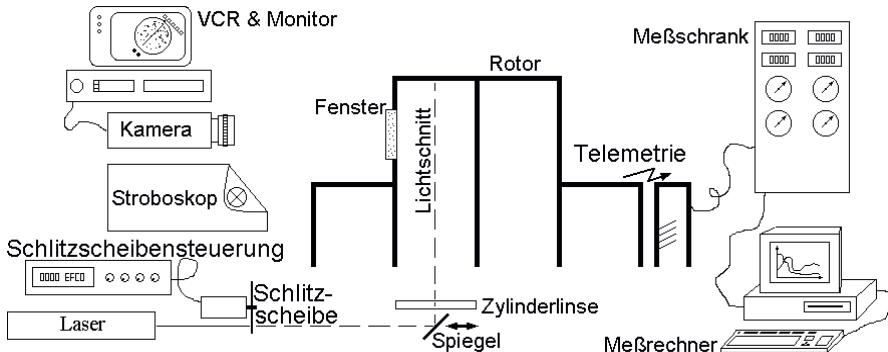
## 4.2 Wandtemperatur einer rotierenden Kammer gemessen anhand der Farbreaktion von Flüssigkristallen

Der prinzipielle Aufbau des Zweikammer-Modellrotors (Abschnitt 4.1) kommt für die in diesem Abschnitt beschriebenen Messungen mit thermochromen Flüssigkristallen ebenfalls zum Einsatz. Diese Methode der Temperaturmessung, welche die Temperaturabhängigkeit des Reflektionsspektrums von Flüssigkristallen als Meßeffekt nutzt, wurde zuvor hinsichtlich Kalibrierung gegen Temperatur und Betrachtungswinkel sowie hinsichtlich zeitlicher Auflösung für verschiedene Trägermaterialien untersucht [35]. Dabei kamen die gleichen Flüssigkristallfabrikate und Mischungen wie für hier beschriebene Messungen am Zweikammer-Modellrotor zum Einsatz.

Die Untersuchung soll aus Sicht der Anwendung die Frage klären, ob instationäre thermische Effekte signifikante Wärmespannungen in den mechanisch hochbelasteten Rotorscheiben infolge nicht rotationssymmetrischer thermischer Belastung hervorrufen. Dabei erreicht der Fensteraufbau mit seiner Drehfrequenzbegrenzung auf  $6000 \text{ min}^{-1}$  nur das untere Ende des aus Sicht der Anwendung interessanten Bereiches.

### 4.2.1 Meßaufbau

Maßgeblicher Unterschied im *Aufbau* (Bild 30 und [101]) - verglichen mit den Ausführungen zu Abschnitt 4.1 - ist der, daß die LDA- Komponenten (Bild 8) entfernt und dafür einige der 6 Fenster (66 mm Durchmesser, 15 mm dick) mit Flüssigkristallbeschichtung versehen sind, die eine Blitzlampe von außen bzw. vom nicht rotierenden System aus stroboskopisch beleuchtet. Eine Suspension der gekapselten Flüssigkristalle in einer Bindemittellosung ist auf der Kammerinnenseite der Fenster aufgesprührt und für besseren Kontrast mit einer schwarzen Beschichtung abgedeckt. Dadurch kann eine im nicht rotierenden System angeordnete Kamera das Farbspiel eines ausgewählten Fensters erfassen, wenn die stroboskopische Beleuchtung mit Rotordrehfrequenz und phasenrichtig für das Ausgewählte der 6 Fenster erfolgt. Die Messungen geschehen parallel bzw. für jeden angefahrenen Betriebspunkt abwechselnd mit den im Abschnitt 4.3 beschriebenen Visualisierungen mit Rauch. Daher müssen einige Fenster durchsichtig bzw. unbeschichtet bleiben. Bild 30 zeigt den experimentellen Aufbau beider Meßtechniken schematisch. Es kommt eine nicht rotierende Innenwelle zum Einsatz.



**Bild 30** Zweikammer-Modellrotor [101] im Aufbau zur Strömungsvisualisierung mit Rauch und zur Messung der adiabaten Wandtemperatur an den mit thermochromen Flüssigkristallen beschichteten Fensterinnenseiten, jeweils ohne Innenwellenrotation, Fensteraufbau konstruktiv gleich wie in Abschnitt 4.1

Für die Registrierung der Videosequenzen kam eine PAL- Farbkamera nebst VHS- Magnetbandrecorder zur Anwendung. Eine simultane Digitalisierung aller Videodaten in voller Auflösung und ohne Kompression lag seinerzeit jenseits der Möglichkeiten verfügbarer Technik.

Eine rechnerische Kompression der Bilddaten, wie sie die Unterhaltungsbranche bevorzugt, erwies sich als fatal unbrauchbar, da signifikante Einsparungen beim Datenvolumen vorrangig zu Lasten der Farbinformation gehen. Dies betrifft sowohl die Diskretisierung des Farbwertes als auch die seiner örtlichen Verteilung. Daraus resultiert eine stark eingeschränkte Auflösung von zu messender Temperatur und deren örtlicher Auflösung, weshalb eine unmittelbare Datenreduktion bei der Aufzeichnung keine Option ist.

Daher erfolgte der Transfer der Videosequenzen in den Bildverarbeitungsrechner nachträglich für die auszuwertenden Sequenzen mit der für die Auswertung erforderlichen Datenrate bzw. Auflösung [101] unter Verzicht auf rechnerische Datenreduktion. Die Wahl einer reduzierten Auflösung der Bilder hinsichtlich der Pixelanzahl ist für längere Sequenzen ein geeigneter Kompromiß, wodurch ausschließlich die örtliche Auflösung der Temperaturmessung abnimmt.

Bild 31 zeigt den Blick auf die linke Rotorscheibe, die Fenster mit Flüssigkristallbeschichtung trägt. Dabei sind auf den Polycarbonatscheiben verschiedene Temperaturmeßbereiche in Form radial ausgerichteter Flüssigkristallstreifen appliziert (Bild 32).

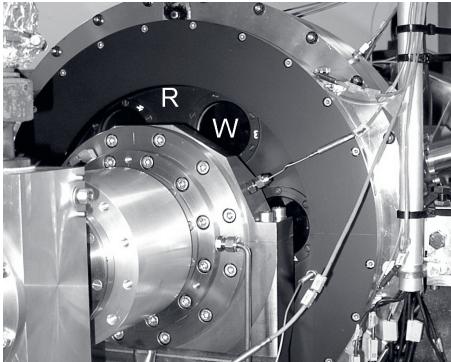
#### 4.2.2 Auswertung

Die von der Kamera erhaltenen und vom VHS- Recorder zwischengespeicherten Sequenzen werden in der Pixelauflösung 384 x 288 mit der zeitlichen Auflösung 20 Bilder pro Minute digitalisiert. Dies genügt für thermische Messungen, bei denen keine hohen Frequenzanteile auftreten. Die digitalisierten Videosequenzen werden in Einzelbilddateien zerlegt.<sup>1</sup> Ein vom Autor entwickeltes Bildverarbeitungsprogramm liest aus den Einzelbildern (Bild 32) die radialen Farbverläufe ab. Dabei erfolgt für jeden der drei Meßbereiche R50, R60, R70 mit den entsprechenden Starttemperaturen in °C (Bild 35) eine Mittelung über 20 Pixel in tangentialer Richtung, die wegen des etwa rotationssymmetrischen Temperaturprofils die gleiche Temperatur bzw. Flüssigkristallfarbe aufweisen.<sup>2</sup>

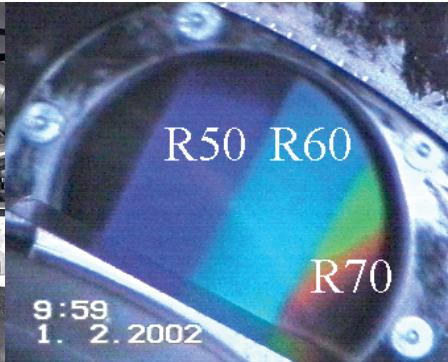
<sup>1</sup> Der Autor dankt Herrn Jens Mokronowski für die Erstellung des Programms zur Zerlegung der \*.avi – Videosequenzen in Einzelbilddateien.

<sup>2</sup> Jeder Meßbereich beginnt rotbraun verläuft über gelb, grün und endet blau. Die Kalibrierkurve ist nichtlinear (Bild 35).

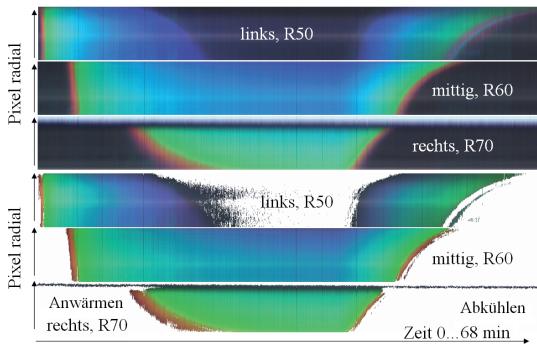
Bild 33 zeigt im oberen Teil die aus den Einzelbildern der Videosequenz entnommenen Rohdaten, wovon je Bild bzw. Zeitpunkt und Meßbereich eine vertikale Pixelreihe entstand. Die Farbe eines Pixels ist der Mittelwert aus den 20 im Originalbild in tangentialer Richtung abgelesenen Pixelfarben. Diese radialen Farbverläufe über der Zeit sind anhand der Kalibrierdaten der verwendeten Flüssigkristallmischungen in Temperaturverläufe zu übertragen.



**Bild 31** Blick auf die Rotorscheibe R mit Fenstern W des Zweikammer-Modellrotors im Aufbau zur Strömungsvisualisierung mit Rauch und zur Messung der Wandtemperatur an mit thermochromen Flüssigkristallen beschichteten Fensterinnenseiten



**Bild 32** Bild der Videokamera in der halben Auflösung (384 x 288) digitalisiert zur Messung langsam veränderlicher Verläufe (20 Bilder/min) mit 3 Flüssigkristallmischungen R50, R60, R70 entsprechend unterschiedlicher Temperaturmeßbereiche



**Bild 33** Radiale Farbverläufe über der Zeit von 0 bis 68 Minuten entnommen aus der Videosequenz (Bild 32) vom Zweikammer-Modellrotor zur Messung der Temperatur an der Fensterinnenfläche, jeweils 3 verschiedene Flüssigkristallmischungen bzw. Temperaturmeßbereiche; oben Rohdaten, unten korrigiert bzw. Blaukanal reduziert auf 76,2 % und wegen geringer Farbsättigung nicht nutzbare Bereiche ausgeblendet, Betriebspunkt  $6000 \text{ min}^{-1}$  etwa  $0,1 \text{ kg/s}$

Die Kamera liefert Daten im 3x8 Bit RGB-Farbsystem. Dabei sind die 3 Werte R, G, B jeweils proportional zur über der Lichtwellenlänge und der Belichtungszeit integrierten Lichtmenge, die den Pixel des CCD-Chips der Kamera erreicht. Die Transmissionsspektren der Farbfilter [36] in der Kamera bestimmen die Verteilung auf die drei Farbkanäle.

In dem RGB-Farbsystem verursacht die Farbreaktion der thermochromen Flüssigkristalle eine Änderung aller drei der RGB-Werte. Daher hat sich die Umrechnung in das HSI-Farbsystem bewährt [z. B.: 35, 36, 37, 101], bei dem die dominante Lichtfarbe den Farbwert H bestimmt. Mit der Normierung der Farbwerte R, G, B der Kamera

$$r = \frac{R}{R+G+B}, \quad g = \frac{G}{R+G+B}, \quad b = \frac{B}{R+G+B}. \quad (10)$$

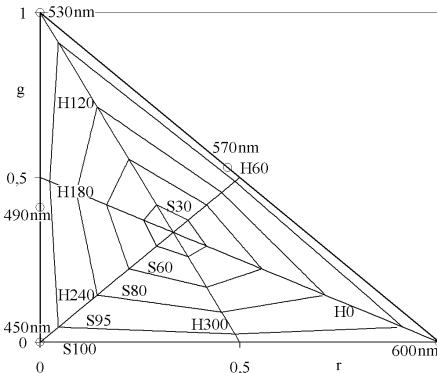
ist die verwendete Koordinatentransformation (11) bis (13) in Bild 34 dargestellt. Die Formulierung

$$H = \begin{cases} 180, & \text{if } G = B \text{ and } G > R \\ 0, & \text{if } G = B \text{ and } G \leq R \\ 90 - K, & \text{if } G > B \\ 270 - K, & \text{if } G \leq B \end{cases} \in [0, 360], \quad K = \frac{180}{\pi} \arctan \left( \frac{2R - G - B}{(G - B)\sqrt{3}} \right) \quad (11)$$

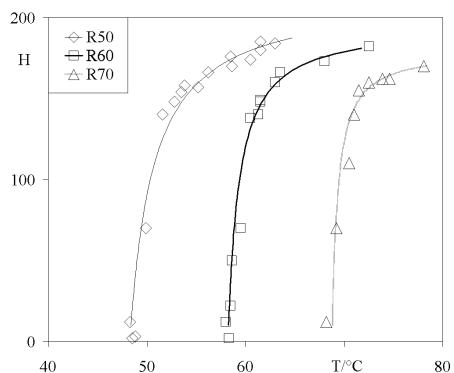
$$S = 100 \cdot \frac{\text{Max}(R, G, B) - \text{Min}(R, G, B)}{\text{Max}(R, G, B)} \in [0, 100], \quad (12)$$

$$I = \frac{100}{255} \cdot \text{Max}(R, G, B) \in [0, 100], \quad R, G, B \in [0, 255], \quad (13)$$

ist im seinerzeitigen Corel®-Programm enthalten und wird aus Kompatibilitätsgründen für eigene Auswertungen übernommen.



**Bild 34** Farbraum in der Projektion auf die r (rot) – g (grün) – Ebene mit eingetragenen HSI- Farbkoordinaten für den Farbwert H und der Sättigung S, einige Lichtwellenlängen entlang des Farbwertes eingetragen



**Bild 35** Farbwert H des HSI-Systems über der Temperatur, Kalibrierung [35, 101] der drei Flüssigkristallmischungen bzw. Temperaturmeßbereiche R50 – R70 (Bild 32, Bild 33)

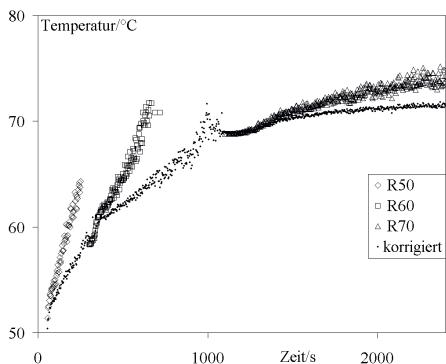
Bild 36 zeigt den *Anwärmvorgang* (Bild 33 links) bzw. den zeitlichen Verlauf der Temperatur an der Fensterinnenseite. Dafür wurden die RGB- Farbwerte des 20. Pixel, vertikal in Bild 33 bzw. am Rotor radial im Fenster (Bild 32) angeordnet, mit (11) bis (13) in das HSI- Farbsystem mit dem Farbwert H übertragen und unter Verwendung der Kalibrierfunktionen

$$T = \frac{a_1 H + b_1}{a_2 H + b_2} \quad (14)$$

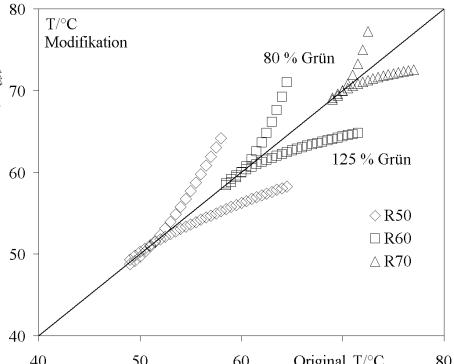
mit den Koeffizienten  $a_1, a_2, b_1, b_2$  (Bild 35) in Temperaturen T umgerechnet. Die Kalibrierdaten entstanden in Vorbereitung der experimentellen Untersuchungen [35, 101]. Um glatte monotone Verläufe der Kalibrierfunktionen zu erhalten, welche die starke Änderung des Übertragungsfaktors entlang des Meßbereichs abbilden, wurde zugunsten der Approximation (14) von einem Polynom höherer Ordnung abgesehen.

Die Betrachtung des Verlaufs der unkorrigierten Temperaturen der Meßbereiche R50 – R70 (Bild 36) weist signifikante Sprünge an den Meßbereichsgrenzen auf. Diese sind nicht real, da auf dem Fenster in tangentialer Richtung von einheitlicher Temperatur bzw. etwa rotationssymmetrischer Temperaturverteilung auszugehen ist. Mindestens sind keine Temperatursprünge gemäß

unkorrigierter Ergebnisse zu erwarten. Hingegen weichen die oberen Enden der Meßbereiche signifikant zu höheren Temperaturen im Vergleich zur Fortsetzung im nächst höheren Meßbereich ab.



**Bild 36** Temperaturverlauf über der Zeit (Bild 31 - Bild 33, nur Erwärmung, radialer Pixel 20 von Bild 33) vom Zweikammer-Modellrotor im Aufbau mit flüssigkristallbeschichteten Polycarbonat-Fenstern zur Messung an der Fensterinnenfläche, 3 verschiedene Flüssigkristallmischungen (R50 – R70) bzw. Meßbereiche; korrigiert durch Blaukanalreduktion auf 76,2 %, Betriebspunkt  $6000 \text{ min}^{-1}$  etwa  $0,1 \text{ kg/s}$ , radiale Zuströmung, Luftvärmer zugeschalten für  $105^\circ \text{C}$  am Rotormantel Kammer K1 (Bild 8)



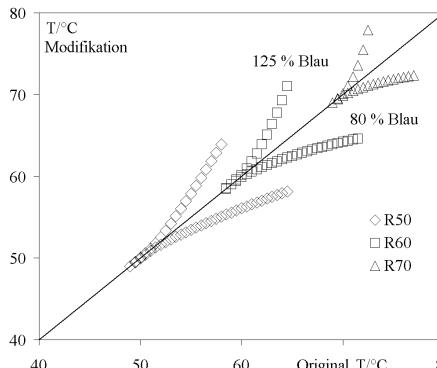
**Bild 37** Auswirkungen einer Modifikation des Grüns der RGB- Kanäle auf eine flüssigkristallbasierte Temperaturmessung unter Verwendung der Kalibrierdaten (Bild 35) gemäß (14) und der Farbkoordinatentransformation (Bild 34) gemäß (11) bis (13) für drei Flüssigkristallmischungen bzw. Temperaturmeßbereiche R50 – R70 (Bild 32, Bild 33)

Obwohl die Kalibrierung [35, 101] unter Verwendung derselben Materialien und Geräte hinsichtlich Flüssigkristallmischungen, Beleuchtung als auch Kamera usw. geschah, erfolgt eine Überprüfung hinsichtlich der Auswirkung eines Weißabgleichs, der einer Verschiebung des Punktes für neutrale Beleuchtung „= weiß“ (Bild 34,  $r = g = \frac{1}{3}$ ) entspricht [36]. Jeglicher hinsichtlich der Farbe wirksame Einfluß auf die Meßkette bewirkt in dem Pixelbild eine Verschiebung der Relationen zwischen den drei RGB- Farbkanälen und kann demnach durch Änderung des Übertragungsfaktors zweier Farbkanäle wieder korrigiert werden. Am Ende der Korrektur ist der Zusammenhang (Bild 34) „weiß“ oder „grau“ bzw. farbneutral entspricht  $r = g = \frac{1}{3}$  wiederhergestellt. Diese Korrektur kann auch nachträglich bei der Umrechnung der Flüssigkristallfarbe in die gemessene Temperatur erfolgen.

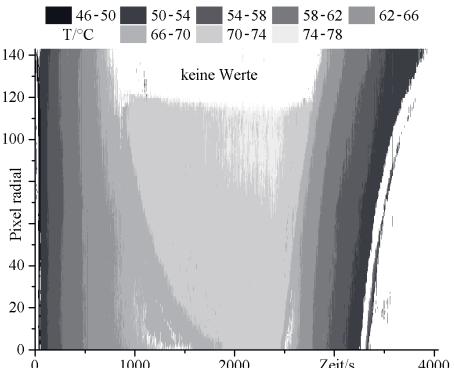
Bild 37 und Bild 38 zeigen die Auswirkungen derartiger Farbkanaljustierungen. Beginnend bei der Originaltemperatur, die anhand der Kalibrierung (14) bzw. (Bild 35) über den Farbwert H des HSI- Systems und anschließend gemäß (11) bis (13) in den RGB- Farbraum gelangt, erfolgt eine Abschwächung bzw. Verstärkung der jeweiligen Farbkanäle RGB. Anschließend geschieht die Umrechnung in umgekehrte Richtung zur modifizierten Temperatur. Hinsichtlich der Temperaturmessung signifikante Veränderungen bewirken eine Abweichung von der Diagonale (Bild 37, Bild 38).

Für diese Rechnung wurden eine Sättigung  $S = 80$  (12) und eine Intensität  $I = 30$  (13) gewählt, um eine Umrechnung zu ermöglichen. Beide Werte haben theoretisch keinen Einfluß auf das Ergebnis. Bei der praktischen Messung sind hohe Sättigungswerte und hinreichende Intensitäten wünschenswert, da anderenfalls hohe Streuungen bzw. allgemein schlechte Signal-/ Rauschverhältnisse im Meßergebnis zu verzeichnen sind.

Im Gegensatz zu den Kanälen Grün, Blau (Bild 37, Bild 38) hat die Modifikation des roten Kanals im RGB- System keinen signifikanten Einfluß auf die Temperaturmessung. Dies liegt an dem geringen Gradienten  $dT/dH$  (Bild 35) im Rot-Grün-Bereich  $H \in [0; 120]$  im Vergleich zu Grün-Blau  $H \in [120; 240]$ . Zudem wirken Modifikationen an den Kanälen Grün und Blau (Bild 37, Bild 38) im Vergleich miteinander komplementär bzw. reziprok, wonach die Modifikationen 125 % Grün und 80 % Blau äquivalent sind. Für die Korrektur der Temperaturmessung genügt daher die ausschließliche Modifikation des grünen oder des blauen Farbkanals im RGB- System.



**Bild 38** Auswirkungen einer Modifikation des Blauen der RGB- Kanäle auf eine flüssigkristallbasierte Temperaturmessung unter Verwendung der Kalibrierdaten (Bild 35) gemäß (14) und der Farbkoordinatentransformation (Bild 34) gemäß (11) bis (13) für drei Flüssigkristallmischungen bzw. Temperaturmeßbereiche R50 – R70 (Bild 32, Bild 33)



**Bild 39** Temperatur im radialen (4,1 Pixel/mm) und zeitlichen Verlauf (Bild 31, Bild 32) bestimmt anhand der Farbverläufe (Bild 33) am Zweikammer-Modellrotor im Aufbau mit flüssigkristallbeschichteten Fenstern zur Messung an der Fensterinnenfläche, korrigiert durch Blaukanalreduktion auf 76,2 %, Betriebspunkt  $6000 \text{ min}^{-1}$  etwa  $0,1 \text{ kg/s}$ , radiale Zuströmung,  $105^\circ \text{C}$  am Rotormantel Kammer K1 (Bild 8) während der Erwärmung

Eine Korrektur der Temperatursprünge an den Meßbereichsgrenzen (Bild 36) erfolgt durch Variation des blauen Farbkanals des RGB- Systems mit dem Ziel der Minimierung eben jener Temperaturdifferenzen bzw. –sprünge. Ergebnis ist eine Reduktion des blauen Kanals auf 76,2 %.

Bild 39 zeigt den radialen (4,1 Pixel/mm) und zeitlichen Temperaturverlauf von der Fensterinnenseite, des mit  $6000 \text{ min}^{-1}$  rotierenden Rotors bei einer axialen Durchströmung der Kammer K2 mit radialem Zuströmung durch K1 (Bild 8). Die aus den Farbwerten von drei Flüssigkristallmischungen (Bild 33) bzw. Temperaturmeßbereichen bestimmten Temperaturwerte sind durch Wichtungsfunktionen für den jeweiligen Übergang zusammengesetzt, so daß ein zusammenhängender Verlauf entsteht.

#### 4.2.3 Auswertung instationärer Effekte

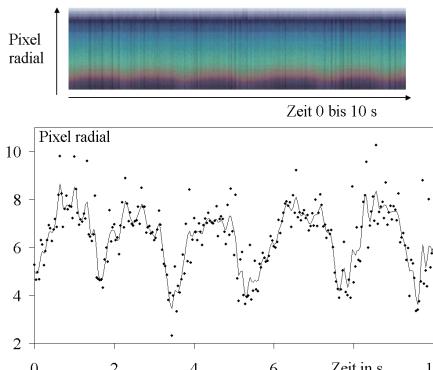
Neben langsamem Veränderungen infolge Betriebspunktverstellung sind instationäre Effekte in rotierenden Kammern sowohl ohne Temperaturgradient in experimentellen [32] als auch mit Temperaturgradienten in numerischen [38] Arbeiten beobachtet worden. Weitere Quellen zur Thematik enthält [96]. Eine systematische experimentelle Untersuchung transienter thermischer Effekte in schnell rotierenden Kavitäten ist dem Autor nicht bekannt.

Bei den beschriebenen Messungen mit Flüssigkristallen konnten instationäre Effekte beobachtet werden. Die meßtechnische Zugänglichkeit zeitlicher Temperaturänderungen hängt von den thermischen Eigenschaften des Flüssigkristalle tragenden Materials und vom Wärmeübergang, weni-

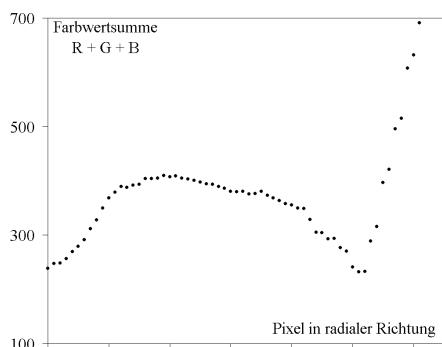
ger von den verwendeten gekapselten Flüssigkristallen selbst ab [11, 35].<sup>3</sup> Für den hier verwendeten Aufbau (Bild 30 - Bild 32) werden nachweisbare Frequenzen bis zu einigen Hz bestimmt.

Daher genügt die Bildfrequenz (25 Hz) der verwendeten PAL- Videokamera hinsichtlich der Einhaltung des Abtasttheorems. Eine Auswertung auf Basis der vollen Bildfrequenz erforderte, die Auflösung der Digitalisierung auf 192 x 144 Pixel zu reduzieren, um die Datenrate des seinerzeit verfügbaren Verarbeitungssystems nicht zu überschreiten.

Bild 40 zeigt die zeitaufgelösten Farbdaten des Meßbereiches R70 (Bild 32) mit jeweils einer vertikalen Pixelreihe je Bild der Videosequenz. Der Abgriff der Daten erfolgt mit dem in Abschnitt 0 erwähnten Auswertungsprogramm. Um die im Farbbild am Schwarz- Rot- Übergang erkennbaren Isothermenwanderungen zu quantifizieren, wird im Gegensatz zu Abschnitt 0 statt der Farbinformation die Farbwertsumme  $R + G + B$  benutzt, die der Helligkeit etwa proportional ist. Die automatisierte Suche nach dem stärksten Gradienten detektiert den Schwarz- Rot- Übergang bei Begrenzung auf den relevanten inneren Bereich des zeitlich gemittelten radialen Verlaufs (Bild 41). Dieser programmierte Algorithmus nutzt die höchste thermische Empfindlichkeit der Flüssigkristalle, die jeweils am unteren Meßbereichsende bzw. am Schwarz- Rot- Übergang vorliegt (Bild 35).



**Bild 40** Farbfrontwanderung in radialer Richtung über der Zeit, oben Farbdaten analog Bild 33 des Meßbereichs R70 (Bild 32) aufgezeichnet mit 25 Hz, unten radiale Position der Farbwertsumme  $R + G + B = 306$  (Punkte) mit Glättung durch gleitenden Mittelwert (Linie), Betriebspunkt  $6000 \text{ min}^{-1}$ ,  $0,017 \text{ kg/s}$ , radiale Zuströmung (ca.  $40 \text{ °C}$ ) durch K1 und LFR und axial durch K2 (Bild 8), ca.  $110 \text{ °C}$  am Rotormantel



**Bild 41** Farbwertsumme im zeitlichen Mittel über radiale Pixelposition (Farbdaten und Betriebspunkt s. Bild 40) zur Bestimmung der Farbwertsumme bzw. Helligkeit mit dem steilsten radialen Gradienten entsprechend des Schwarz- Rot- Übergangs mit  $R + G + B = 306$  für anschließende Bestimmung deren radialer Wanderung über der Zeit (Bild 40 unten)

Die bestimmte Farbwertsumme mit dem stärksten radialen Gradienten variiert mit der Beleuchtung und erfordert daher eine individuelle Bestimmung für jede Videosequenz. Anschließend sucht das Programm die radiale Position eben jener Farbwertsumme in den zeitaufgelösten Daten auf (Bild 41).

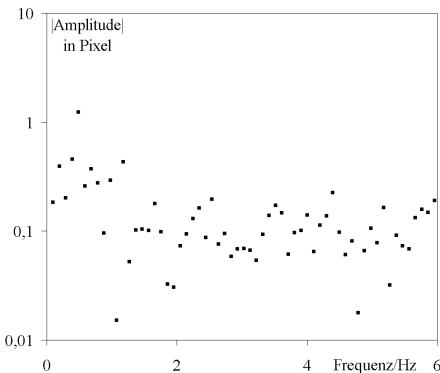
Das Ergebnis weist Periodizitäten auf, deren Bestandteile die Frequenzzerlegung (Bild 42) aufzeigt. Der Anteil mit einer Frequenz von  $0,49 \text{ Hz}$  erreicht die höchste Amplitude =  $1,23 \text{ Pixel}$  und ist um Faktor 10,1 stärker als der nächst schwächere Anteil. Wegen des hohen Anteils weiterer

<sup>3</sup> Wenn das Polycarbonatfenster mit der Wärmeleitfähigkeit  $0,2 \text{ W/(m K)}$  adiabat angenommen wird, folgt die Farbreaktionen geänderter Temperatur mit zeitlicher Auflösung von ca.  $0,1 \text{ s}$ . Die Umorientierung cholesterischer Flüssigkristalle erfolgt nach ca.  $50 - 100 \text{ ms}$  [11, Abschnitt 4db].

Frequenzen bringt die Nutzung einer Fensterfunktion zur Unterdrückung des Abbruchfehlers bei der Frequenzanalyse keine signifikante Verbesserung.

Für die Einordnung der gemessenen Frequenzen ist zu berücksichtigen, daß diese wegen der stroboskopischen Beleuchtung mit Rotordrehfrequenz als *Differenzfrequenz zur Rotordrehfrequenz* aufzufassen sind. Hinsichtlich der anfänglichen Frage nach zusätzlichen Wärmespannungen in den Rotorschiben infolge von Temperaturdifferenzen in Umfangsrichtung sind besonders niedrige Differenzfrequenzen mit signifikanten Temperatur- und Radienamplituden maßgeblich.

Der Quervergleich der gemessenen geringen Differenzdrehfrequenz entsprechen einem Kernrotationsverhältnis nahe 1 erscheint im Vergleich mit Bild 29 (LDA- Messungen) für niedrige Rossbyzahlen und radiale Zuströmung (Bild 8) plausibel. Die Frage, ob die Inseln unterschiedlicher Temperatur im Rotor schneller oder langsamer als der Rotor selbst rotieren, ist in Ermangelung eines Vorzeichens im Meßergebnis nicht zu beantworten. Dafür müßte an zwei benachbarten Winkelpositionen z. B. auf einem zweiten Fenster gleichzeitig gemessen und der zeitliche Versatz per Kreuzkorrelation bestimmt werden.



**Bild 42** Amplitudenspektrum der radialen Farbfront- bzw. Isothermenwanderung (Farbdaten, Isothermenwanderung im Zeitbereich und Betriebspunkt s. Bild 40) mit maximaler Amplitude von 1,23 Pixel bei 0,49 Hz, Frequenzzerlegung basierend auf 256 zeitlich äquidistanten Werten (25 Hz) Rechnung ohne Fensterfunktion

#### 4.2.4 Ergebnis und Zusammenfassung

Die Messung der Oberflächentemperatur auf der Fensterinnenseite einer Kammer des Zweikammer-Modellrotors gibt Auskunft einerseits über das radiale Temperaturprofil im zeitlichen Verlauf und andererseits über transiente periodische Temperaturverläufe.

Außer der Bewältigung der komplexen Meßaufgabe nebst Korrektur unvorhergesehener systematischer Fehler auf Basis der Meßdaten ist der meßtechnische Nachweis von zeitlich periodischen Oberflächentemperaturfluktuationen an der inneren Kammerwand als Ergebnis zu nennen. Eine andere Quelle zum experimentellen Nachweis in vergleichbar komplexem Aufbau ist dem Autor nicht bekannt. Die prinzipielle Existenz derartiger Effekte war anhand von publizierten Visualisierungen und numerischen Strömungsuntersuchungen, die auf vergleichsweise einfachen oder langsamer rotierenden Aufbauten beruhen, zu erwarten.

Hinsichtlich der Anwendung im Verdichter einer Fluggasturbine ist zu schlußfolgern, daß für die untersuchten Betriebspunkte keine signifikanten thermischen Zusatzspannungen infolge transienter thermischer Effekte zu erwarten sind, da die bestimmten Temperatur- und Radienamplituden der nachgewiesenen periodischen Effekte zu klein sind.

Hinsichtlich der registrierten sehr niedrigen Differenzdrehfrequenzen zur Rotordrehfrequenz bestünde bei höheren Temperatur- und Radienamplituden die Möglichkeit zusätzlicher Wärmespannungen.

Interessant ist in diesem Zusammenhang die Beobachtung, daß die registrierten Periodizitäten in keiner systematischen Relation zu den Betriebskennwerten stehen und im stationären Betrieb auf-

tauchen, kurze Zeit mit geringer Frequenzänderung zu sehen sind, um hernach mit deutlicher Frequenzänderung zu verschwinden. Dieses regellose chaotische Verhalten belegt den instationären und instabilen Charakter derartiger Strömungssituationen.

Daher kann nicht mit Sicherheit behauptet werden, daß nicht doch bei einem Betriebspunkt Situationen auftreten, die signifikante zusätzliche Wärmespannungen verursachen. Dafür wäre der interessierende Betriebskennwertbereich in einem für die Anwendung zutreffenden Aufbau lückenlos experimentell zu untersuchen.

Aus meßtechnischer Sicht erweist sich die simultane Nutzung mehrerer Flüssigkristallmischungen für unterschiedliche Meßbereiche als vorteilhaft, da die starke Nichtlinearität der Kennlinien (Bild 35) Erkennung und Korrektur systematischer Fehler ermöglichen. Wegen der Vielzahl der Einflüsse auf den zur Messung genutzten Zusammenhang zwischen registrierter Farbe und Temperatur der Flüssigkristalle kann es bei komplexen Aufbauten zu Abweichungen kommen. Die Ursache der korrigierten Abweichungen konnte nicht abschließend gefunden werden. Unter der Annahme, daß die Flüssigkristalle und die Kamera nebst Erfassungssystem sowie Betrachtungswinkel unverändert bleiben und damit als Ursache ausscheiden, könnten darüber hinaus eine Änderung des Transmissionsspektrums der Fenster unter thermischer sowie mechanischer Last oder auch eine Änderung des Lichtspektrums des Stroboskops Gründe für die Abweichung sein. Bei dem Stroboskop ist die Blitzenergie von der Blitzfrequenz abhängig, wodurch eine Änderung des Lichtspektrums möglich wäre.

#### **4.3 Bestimmung der Luftwechselzahl in einer rotierenden Kammer unter Verwendung von Zigarettenrauch**

Eine weitere Realisierung einer Messung im rotierenden System [U4], bei der im Sinne der Systematisierung nur der Meßeffekt im bewegten System mitfährt (Abschnitt 3.2.1), erfolgt ebenfalls im in Abschnitt 4.2 (Bild 30, [101]) beschriebenen Aufbau. Während im Abschnitt 4.1 anhand von partikelbasierten Geschwindigkeitsmessungen die Strömungssituation innerhalb einer Rotorkammer untersucht wurde, liefert die hier beschriebene Strömungsvisualisierung mit Zigarettenrauch die örtliche Luftwechselzahl. Dieser Kennwert ist weniger anschaulich als eine lokale Strömungsgeschwindigkeit, kann aber nach Auskunft des Auftraggebers gleichermaßen zum Abgleich mit numerischen Strömungsberechnungen dienen.

Während Meßverfahren wie z. B. LDA, Laser-2-Fokus (L2F), Pattern- Image- Velocimetry (PIV) oder Global LDA die Bewegung genügend großer, optisch einzeln aufzulösender Partikel bestimmen, gelingen Visualisierungen mit vergleichsweise kleinen Aerosolpartikeln. Die genannten partikelbasierten Verfahren nutzen zur Messung in Gasströmungen Flüssigkeitstropfen oder Pulver mit kleinen Abmessungen (0,5; 1 bis 10  $\mu\text{m}$  [39, 40]) als Streuteilchen, wobei für die Interpretation der Teilchengeschwindigkeit als Strömungsgeschwindigkeit hinreichendes Folgevermögen gewährleistet sein muß. Hohe Zentrifugalbeschleunigungen in rotierenden Systemen begrenzen die Nutzbarkeit der Partikelmeßtechnik, da hohe Dichteunterschiede von Gas und Partikeln (Abschnitt 4.1) maßgebliche Volumenkraftdifferenzen verursachen, wodurch die verfahrensinhärerente Annahme gleicher Geschwindigkeit von Partikeln und Gas (Folgevermögen) unzulässig wird. Das Folgevermögen ist um so besser, je kleiner die Teilchen sind, wobei die genutzte Lichtwellenlänge partikelbasierter optischer Meßaufbauten die untere Grenze der Partikelgröße bestimmt [39, 40].

Einen Ausweg aus dieser Begrenzung bieten Visualisierungsverfahren auf Basis von Aerosolen, die eine optische Auflösung der Einzelpartikel nicht erfordern. Für die hier beschriebene Meßtechnik anwendung kommt Zigarettenrauch (0,01 bis 1  $\mu\text{m}$  Partikeldurchmesser [40]) zum Einsatz. Die zugängliche Information ist dann nicht die Partikelgeschwindigkeit, sondern die Änderung der örtlichen Streulichtverteilung vieler Partikel. Die Auswertung der Änderungen lokaler Streulichtintensitäten liefert Luftwechselzahlen, die einen Abgleich mit Strömungsnumerik (CFD) erlauben.

#### 4.3.1 Meßaufbau

Ausgehend von der schematischen Darstellung von Abschnitt 4.2 (Bild 30, [101]) kommt der gleiche Fensterotor, der schon Gegenstand der Abschnitte 4.1 (Bild 8) und 4.2 ist, zum Einsatz. Die Messungen erfolgen abwechselnd mit den in Abschnitt 4.2 beschriebenen Flüssigkristalluntersuchungen. Die installierte Videokamera registriert abwechselnd das Farbspiel der Flüssigkristalle und die Zigarettenrauchausmischung. Die Umschaltung erfolgt durch Einschalten der jeweiligen Lichtquelle.

Für die hier beschriebene Strömungsvisualisierung mit Zigarettenrauch wird ein stroboskopisch unterbrochener Argon-Dauerstrich-Laser mit ca. 1 W Lichtleistung bei 488 nm Lichtwellenlänge (blau) eingesetzt. Das Lichtbündel des Lasers unterbricht eine geschwärzte Aluminiumschlitzscheibe mit einem Durchmesser von ca. 30 mm und ca. 2 mm Schlitzbreite, die auf der Welle eines Gleichstrommotors montiert ist. Der Schlitz gibt jeweils kurzzeitig den Weg für das Lichtbündel frei, das axial entlang der Rotationsachse des Rotorversuchsstandes durch eine nicht rotierende Innenwelle geführt ist bis in die Rotorkammer (Bild 30). Dort lenkt ein Spiegel das Laserlicht in radiale Richtung. Auf dem nach außen gerichteten Weg passiert das Licht eine Zylinderlinse, die der Mantel der Innenwelle trägt. Diese Zylinderlinse formt aus dem radial gerichteten Lichtbündel einen in der Drehebene liegenden etwa 1 mm starken Lichtschnittsektor.

In der Rotorkammer strömende rauchbeladene Luft streut das Laserlicht in Richtung Fenster. Die stationäre Videokamera registriert das Streulicht, wenn der Rotor mit zum Kameratakt kompatibler Drehfrequenz läuft, und wenn die Schlitzscheibe das Laserlicht phasensynchron zur Rotorrotation passieren lässt.

Zur Realisierung des stroboskopischen Laserlichtschnitts kommt ein Vorsatzgerät für den Laser zur Anwendung, das einen Motor mit Schlitzscheibe und einen Prozeßrechner enthält, der die Schlitzscheibenrotation phasensynchron zur Rotorrotation ausregelt. Der Prozeßrechner bezieht je ein Drehfrequenzsignal von Rotor und Schlitzscheibe. Beide Apparate sind Entwicklungen des Autors.

Aus Regelungstechnischer Sicht handelt es sich um eine Kaskadenregelung, bei der ein im Vergleich langsamer Phasenregelkreis einen Drehfrequenzregelkreis bedient. Wegen des annähernden I-Verhaltens der Schlitzscheibe und den ebenfalls mit I-Verhalten zu programmierenden Regelkreisen für Drehfrequenz und Phase ist ein stabiler Betrieb nicht immer gesichert. Dank der stationären Rotordrehfrequenz und diverser Einstellmöglichkeiten an der Kaskadenregelung gelingt mit Ausnahme besonders niedriger Drehfrequenzen trotzdem eine hinreichend stabile Arbeitsweise.

Im Rückblick ist ein Schrittmotor – also eine Synchronmaschine – anstelle des Gleichstrommotors als Schlitzscheibenmotor zu bevorzugen, da der den Drehfrequenzregelkreis einspart. Der Schrittmotor benötigt dann nur noch eine Phasenregelung, wenn das Drehfrequenzsignal vom Rotor direkt zur Drehfrequenzsteuerung des Schrittmotors dient. Seinerzeit erschien die einfachere Elektronik für die Gleichstrommotorvariante als größerer Vorteil.

Zur Raucherzeugung werden im diskontinuierlichen Betrieb 7 Zigaretten gleichzeitig im druckfesten Behälter elektrisch glühgezündet und verbrannt. Der Druckluftdurchsatz des Raucherzeugers wird am Stellventil mit Blick auf einen Schwebekörperdurchflussmesser vorher dosiert und von einem Magnetventil im gewünschten Augenblick zur Markierung der Strömung zugeschaltet.

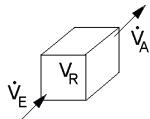
Die Verwendung von Zigarettenrauch ist trotz des häufigen Nachladens der Zigaretten ein guter Kompromiß, da einerseits kommerzielle Bühnennebelapparate auf Kohlenwasserstoffbasis wegen sofortigem Kondensieren des Aerosols bei Überdruck nicht funktionieren und andererseits aus dem alternativ üblichen Ammoniumchlorid Salzsäure entsteht.

Aus strömungsmechanischer Sicht erweist sich das Einbringen hinreichender Rauchkonzentrationen in den Fensterebereich des Rotors mit zunehmender Drehfrequenz als schwierig. Dies ist analog der Problematik ausreichende Anzahl von Streuteilchen für die LDA- Messung einzubringen

(Abschnitt 4.1 bzw. 4.1.4), wobei die Strömungssituation einen schnellen intensiven Austausch mit den in der Rotorkammer weiter außen liegenden Regionen verhindert. Daher erfolgt die Rauchzugabe anders als die der Streuteilchen (Abschnitt 4.1) direkt in die Fenster-Rotorkammer (Bild 30). Eine radial ausgerichtete aus der nicht rotierenden Innenwelle mündende Düse stellt genügend Impuls bereit, mit konzentriertem Rauch-Luft-Gemisch die Rotorkammer zu füllen. Diese Vorgehensweise stört die zu untersuchende Strömungssituation, weshalb die Messung zeitlich nach dem Eindüsorgang und nach Wiederherstellung der ursprünglichen Strömung stattfindet. Die Bestimmung des Strömungskennwerts *Luftwechselzahl* kann so anhand des Ausmischvorgangs für abnehmende Rauchkonzentration erfolgen.

#### 4.3.2 Luftwechselzahl

Die im Lichtschnitt registrierten Videosequenzen enthalten den zeitlichen Verlauf der Streulichtverteilung. Wenn nach der Eindüsung eine gleichmäßige Rauchverteilung vorliegt, die zu untersuchende Strömung wiederhergestellt ist und das Ausmischen mit dem Hauptstrom reiner Luft beginnt, macht die Auswertung mit digitaler Bildverarbeitung die *Luftwechselzahl* zugänglich. Dafür wird angenommen, daß der örtliche densiometrische Grauwert der Rauchkonzentration proportional ist, und daß der Vorgang isotherm sowie isobar abläuft ( $dV_E = dV_A$ ).



**Bild 43** Fluidelement mit Volumen  $V_R$ , Zustrom  $\dot{V}_E$ , Abstrom  $\dot{V}_A$  mit den zugehörigen Rauchkonzentrationen  $C_R$ ,  $C_E$ ,  $C_A$  zur Modellierung des Ausmischvorgangs

Die Frischluft verdünnt die Rauchkonzentration  $C_R$  im Volumenelement ( $C_A > C_E$ ). Die Annahme  $C_A = C_R$  gestattet die Bilanz [41]

$$-V_R \frac{dC_R}{dt} = C_A \cdot \dot{V}_A - C_E \cdot \dot{V}_E \quad (15)$$

mit der Zeit  $t$ . Die Annahmen

$$\dot{V}_E = \dot{V}_A \quad \text{und} \quad C_E = 0 \quad (\text{Konzentration in der Frischluft}) \quad (16)$$

oder das Schreiben als Überkonzentration  $K = C_A - C_E$  ergeben die DGL

$$-V_R \frac{dK}{dt} = K \cdot \dot{V}_A \quad (17)$$

Die Betrachtung des Zeitabschnittes von  $t_1$  bis  $t_2$  und die Trennung der Variablen liefert

$$-\int_{K(t_1)}^{K(t_2)} \frac{dK}{K} = \int_{t_1}^{t_2} \frac{\dot{V}_A}{V_R} dt \quad (18)$$

Mit (16) liefert die Integration

$$-\ln\left(\frac{K(t_2)}{K(t_1)}\right) = \frac{\dot{V}_A}{V_R} (t_2 - t_1), \quad (19)$$

wobei die Umstellung zur Luftwechselzahl

$$W = \frac{\dot{V}_A}{V_R} = -\frac{\ln[K(t_2)/K(t_1)]}{t_2 - t_1} \quad (20)$$

ergibt. Meßbar ist die Abnahme des Grauwertes, der der Konzentration  $K$

$$K(t_2) = K(t_1) \exp[W(t_1 - t_2)] \quad (21)$$

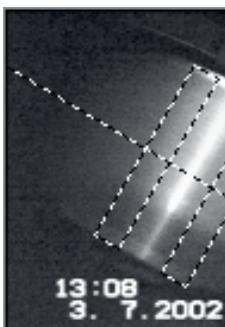
proportional ist. Der Übergang zu Grauwerten erfordert das Einführen eines Hintergrundgrauwertes B, da anderenfalls eine Fehlanpassung des Meßbereichs vorliegt. Zur Beschreibung der Änderung des Grauwertes y über der Zeit dient

$$y = B + A \quad \text{für} \quad t \leq t_1 \quad \text{und} \quad y = B + A \exp[W(t_1 - t)] \quad \text{für} \quad t \geq t_1 \quad (22)$$

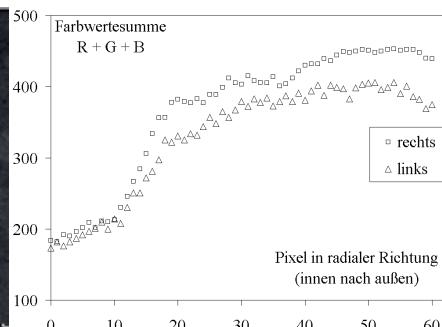
mit dem konzentrationsabhängigen Grauwertanteil A und der Startzeit  $t_1$ .

#### 4.3.3 Auswertung

Die im stroboskopischen Lichtschnitt aufgenommenen Sequenzen gelangen mit Hilfe eines Video-Digitalisiergerätes in den Verarbeitungsrechner. Die hohen Informationsverluste üblicher Kompressionsverfahren erfordern, die Bilder im unkomprimierten Format mit 24 Bit Farbtiefe bei 25 Bildern je Sekunde abzulegen. Wegen der hohen Datenrate von etwa 32 MB/s für 24 Bit Farbe bei 25 Bildern/s und 768 x 576 Auflösung, die der seinerzeit vorhandene Massenspeicher nicht erreichte, verarbeitete der Rechner längere Sequenzen mit einer Auflösung von nicht mehr als 192 x 144, was 1/16 der vollen Datenrate entspricht. Für kurze Sequenzen von etwa 14 s bzw. 3,5 s Dauer gelingt bei ausschließlicher Verwendung des Arbeitsspeichers die Nutzung höherer Auflösungen von 384 x 288 bzw. 768 x 576. Eine Digitalisierung mit niedrigeren Bildfrequenzen erweist sich als ungünstig, da interessierende instationäre Effekte die zeitliche Auflösung der Aufnahmetechnik ausreizen.



**Bild 44** Einzelbild einer Videosequenz mit Markierung der Grauwertabnahmebereiche links und rechts von radial verlaufender überbelichteter Lichtschnittmitte, Videosequenz unkomprimiert 192 x 144, 25 Hz, Rotormitte links unten, Rotormantel rechts oben, Betriebspunkt 3000 min<sup>-1</sup>, Bild für den Druck im Kontrast geändert



**Bild 45** Farbwertsumme über radiale Pixelposition (zugehöriges Bild, Aufnahmedaten, Betriebspunkt s. Bild 44) für zwei Bereiche links und rechts der Lichtschnittmitte, in tangentialer Richtung Farbwertsumme jeweils gemittelt

Die zerlegten Videodaten<sup>4</sup> liest ein vom Autor erstelltes Bildverarbeitungsprogramm als Einzelbilder automatisiert ein und gewinnt daraus örtliche Verläufe, die es durch Zusammenführung der Daten aller Bilder einer Sequenz zu zeitlichen Abläufen verbindet.

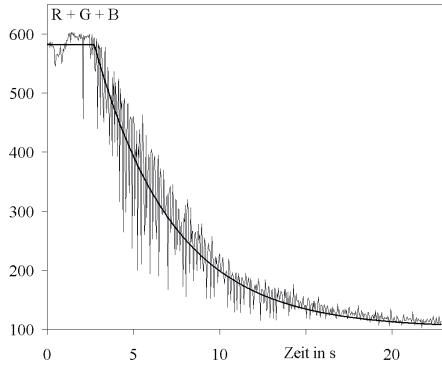
Bild 44 zeigt ein mit Videokamera und stroboskopischem Lichtschnitt durch ein Kammerfenster aufgenommenes Bild. In der Mitte des Lichtschnitts entstehen helle Bereiche, hervorgerufen durch an der Zylinderlinse vorbeigehendes bzw. gerade durchtretendes Licht des Lasers. Die Beleuchtungsintensität nimmt mit steigender Entfernung von der Mitte des Lichtschnittes ab. Das Bildverarbeitungsprogramm nimmt die Grauwerte der durch Umrahmung markierten Pixel ab. Um nicht

<sup>4</sup> Der Autor dankt Herrn Jens Mokronowski für die Erstellung des Programms zur Zerlegung der \*.avi – Videosequenzen in Einzelbilddateien.

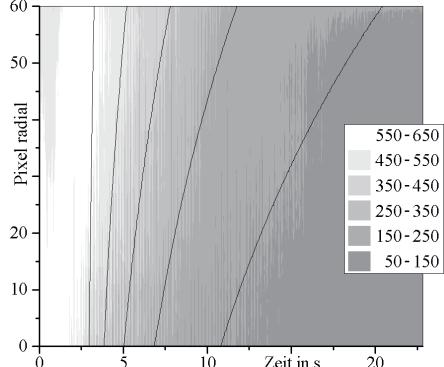
im überbelichteten Zentrum des Lichtschnitts zu messen, liegen die umrahmten Bereiche davon etwa 10 Pixel in tangentialer Richtung entfernt.

Bild 45 zeigt die aus Bild 44 entnommenen radialen Verläufe der tangential über 12 Pixel gemittelten Farbwertesumme für beide markierten Bereiche. Die Auswertung aller Bilder der Videosequenz liefert den zeitlichen Verlauf, den Bild 46 für eine radiale Position (Pixel 20) und Bild 47 für alle radialen Positionen zeigt.

Die Meßwerte weisen erwartungsgemäß eine etwa exponentiell abnehmende Bildhelligkeit auf. Dies ist auf eine abnehmende Rauchkonzentration in der Rotorkammer infolge von Austausch mit sauberer Luft zurückzuführen. Nach Ende der Rauchreindüstung beginnt die digitalisierte Videosequenz, bei der für einige Sekunden Dauer gleichmäßig helle Bilder entstehen und eine homogene Mischung signalisieren. Daher muß die Approximationsfunktion (22) zur Bestimmung der Luftwechselzahl  $W$  den Startzeitpunkt  $t_1$  als freien Koeffizienten enthalten. Außer den Meßwerten enthält Bild 45 auch die Approximationsfunktion (22), die den Informationsgehalt der Wechselanteile zugunsten der Luftwechselzahl  $W$  ausblendet.



**Bild 46** Farbwertesumme des radialen Pixels 20 (Bild 45) im zeitlichen Verlauf entnommen aus der Videosequenz gemäß Bild 44, Meßwerte mit Linien verbunden, Approximationsfunktion (22) zur Bestimmung der Luftwechselzahl



**Bild 47** Farbwertesumme  $R + G + B$  im zeitlichen und radialen Verlauf von der Videosequenz gemäß Bild 44, Meßwerte als Grauwertdarstellung, Approximationsfunktionen gemäß (22) und (23) als Iso-Linien

Um auch die Abhängigkeit des Luftwechselzahlverlaufs vom Radius  $r$  abzubilden, erhält die Approximationsfunktion (22) die Erweiterung

$$W = f(r) = D \cdot \exp(-E \cdot r) \quad (23)$$

mit zusätzlichem Koeffizienten  $E$ . Die Approximationen nimmt das o. g. Bildverarbeitungsprogramm vor, wobei im ersten Durchgang jede gemessene Zeitreihe der radialen Pixel bzw. Radien eine Funktion (22) mit den Koeffizienten  $B$ ,  $A$ ,  $t_1$  und  $W$  bestimmt. Da die Streuung infolge intensiver Bewegung in der Kammer hoch ausfällt, folgen weitere Durchläufe mit dem Ziel einer Approximationsfunktion je Fensterbereich (Bild 44, Bild 45) und Videosequenz.

Nach dem ersten Durchgang nutzt das Programm den Zentralwert aller Parameter  $B$  als festen Wert für den zweiten Durchgang. Analog erfolgt die Festsetzung des Parameters  $t_1$  nach dem zweiten Durchgang. Nach dem dritten Durchgang liegen mit den Zentralwerten von  $B$ ,  $t_1$ ,  $A$  und dem oberen Quartil von  $W$  gute Startwerte für eine Optimierung nach (22) und (23) mit den Koeffizienten  $B$ ,  $t_1$ ,  $A$ ,  $D$  und  $E$  vor.  $E$  bekommt den Startwert 0 entsprechend keiner radialen Abhängigkeit. Die Approximation mit den fünf Parametern basiert auf den Meßwerten aller Radien. Bisher behandelt das Programm die Bereiche links und rechts der Mitte des Lichtschnitts (Bild 44) getrennt. Die Annahme, daß der Startzeitpunkt  $t_1$  für beide Bereiche gleich ausfallen muß, ermöglicht eine

Approximation, die für beide Bereiche links und rechts vom Zentrum des Lichtschnitts die Koeffizienten A, B, D, E und eine gemeinsame Startzeit  $t_1$  liefert.

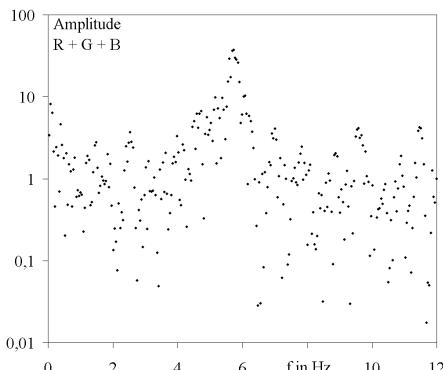
Diese Rechnung ist eine Optimierung mit 9 Koeffizienten und basiert auf dem linken und rechten Bereichsdatensatz. Als Startwerte fungieren die Mittelwerte der vorherigen Rechnung für jeden Bereich einzeln. Die Sicherheit der Ergebnisse steigt mit sinkender Parameteranzahl bezogen auf die Meßwertanzahl, weshalb eine einheitliche Formulierung mit wenigen Koeffizienten je Datensetze anzustreben ist.

Die Subtraktion der Approximationsfunktion von den Meßwerten isoliert den Schwankungsanteil. Diese Operation ist erforderlich, da der transiente Verlauf der Approximation in signifikantem Umfang niedrige Frequenzanteile enthält.

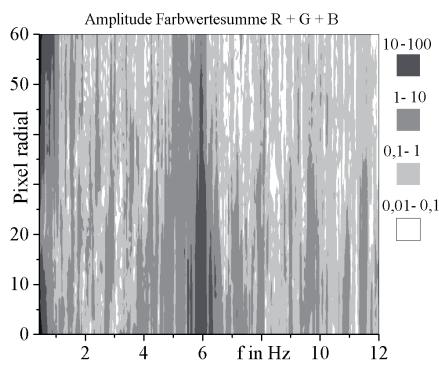
Zur Auswertung des Schwankungsanteils kommen Autokorrelation und Frequenzanalyse zum Einsatz. Die Zeit des ersten Nulldurchgangs  $t_0$  dient anhand der Autokorrelation zur Bestimmung einer Frequenz

$$f = 1/(4 t_0). \quad (24)$$

Dieses Vorgehen liefert selbst bei verrauschten Daten ein Ergebnis, wenn es eine vorherrschende Periodizität gibt. Detailreichere Auskunft hinsichtlich vertretener Frequenzen liefert das Amplitudenspektrum einer Frequenzzerlegung. Bild 48 und Bild 49 zeigen für das Beispiel die Spektren, wobei in der logarithmischen Auftragung deutliche Maxima zu verzeichnen sind.



**Bild 48** Amplitudenspektrum des Schwankungsanteils vom zeitlichen Verlauf der Farbwertesumme eines radialen Pixels (Bild 46), Schwankungsanteil aus Subtraktion von Meßwerten und Approximationsfunktion (22), (23)



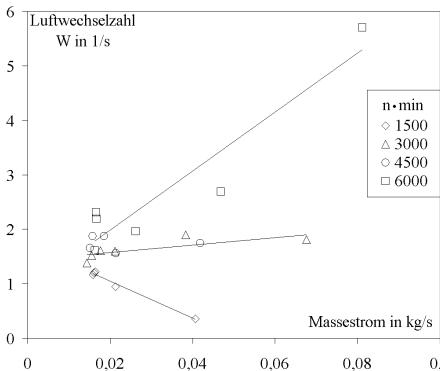
**Bild 49** Amplitudenspektrum des Schwankungsanteils vom zeitlichen Verlauf der Farbwertesumme aller radialen Pixel (Bild 47), Schwankungsanteil aus Subtraktion von Meßwerten und Approximationsfunktion (22), (23)

#### 4.3.4 Ergebnis und Zusammenfassung

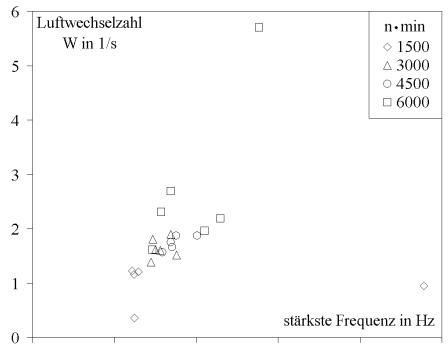
Ausgehend von den Videosequenzen mit ihren komplexen Helligkeitsverläufen werden aufschlußreiche Ergebnisse erwartet, weshalb seinerzeit weder Programmier- noch Rechenaufwand gescheut wurden, die Videosequenzen in quantifizierbare Ergebnisse zu überführen. Die scheinbar einfach fassbare Auftragung von Luftwechselzahlen, die aus dem Helligkeits- bzw. Rauchkonzentrationsverlauf resultieren, oder die Betrachtung der jeweils stärksten Signalfrequenzen bieten trotz aller Anstrengungen kein einfaches Bild.

Bild 50 zeigt die Auftragung der Luftwechselzahl (Abschnitt 4.3.2) über dem axialen Massestrom durch die betrachtete Rotorkammer mit Fenstern für normale Temperatursituation mit Rotormanteltemperatur ca. 100 °C und deutlich kühlerer Luft- und Nabentemperatur. Die eingetragenen Linien stützen sich auf die Meßwerte zu den Drehfrequenzen 1500, 3000 und 6000 min<sup>-1</sup>.

Offensichtlich besteht eine verteilte Abhängigkeit der Luftwechselzahl vom Durchsatz und von der Drehfrequenz. Eine Auftragung der Luftwechselzahlen über der Rossbyzahl (2), die für die LDA-Messungen (Abschnitt 4.1) die Kernrotationsverhältnisse  $\beta$  durch Bündelung der Abhängigkeiten von Durchsatz und Rotordrehfrequenz sortierte, ist hier nicht aufschlußreich. Die Abhängigkeit der Luftwechselzahl von Durchsatz und Rotordrehfrequenz ist demnach anders als die des Kernrotationsverhältnisses, obwohl prinzipiell ein niedriges Kernrotationsverhältnis auf einem hohen Impuls- und damit Masseaustausch beruht, der eine hohe Luftwechselzahl erwarten ließe.



**Bild 50** Luftwechselzahl  $W$  über Massestrom für varierte Rotordrehfrequenz,  $W$  für innerste radiale Position entsprechend radialem Pixel 0, d. h.  $W = D$  in (23), radiale Zustromung (Bild 8) mit normaler Temperatursituation, d. h. beheizter Rotormantel (ca. 100°C) und axiale Durchströmung von K2 mit kühlerer Luft



**Bild 51** Luftwechselzahl  $W$  über Grautonfrequenz mit höchster Amplitude für varierte Rotordrehfrequenz,  $W$  für innerste radiale Position entsprechend radialem Pixel 0, d. h.  $W = D$  in (23), Betriebsbedingungen wie für Bild 51

Die Betrachtung der Ergebnisse der Frequenzanalyse desselben Datensatzes zeigt Bild 51, welches die Luftwechselzahl aufgetragen über der jeweils stärksten Grautonfrequenz für die verschiedenen Drehfrequenzen zeigt. Diese Darstellung unterstreicht die Komplexität der untersuchten Strömungssituationen.

Um trotzdem eine Anknüpfungsmöglichkeit dieser Meßmethode an den gleichen Kammerbereich adressierende LDA-Messungen (Abschnitt 4.1) aufzuzeigen, kann die *nicht unbedingt eindeutige Abhängigkeit* der detektierten *Grautonfrequenzen* (z. B. Bild 51) vom *Kernrotationsverhältnis*  $\beta$  herangezogen werden.

Die Grautonfrequenzen entstehen dadurch, daß dominante Wirbelformationen in der rotierenden Kammer die Rauchkonzentration beim Ausmischen uneinheitlich reduzieren. Dadurch erzeugen die Wirbelgebilde zeitlich veränderliche und mit der Strömung umlaufende strukturierte Grautonverteilungen, die anhand registrierter Bilderfolgen zu Grautonfrequenzen ausgewertet sind.

Die größten Strukturen erzeugen Grautonfrequenzen, die der Strömungswinkelgeschwindigkeit  $\omega = c_{tan}/r$  und damit dem Quotienten aus tangentialer Geschwindigkeit  $c_{tan}$  in der Rotorkammer und zugehörigem Radius  $r$  entsprechen. Das Kernrotationsverhältnis ist der Quotient der Winkelgeschwindigkeiten von Strömung ( $\omega$ ) und Rotor ( $\Omega$ )

$$\beta = \frac{\omega}{\Omega} = \frac{c_{tan}}{r \Omega} \quad \text{mit} \quad \Omega = \frac{\pi n}{30} \quad \text{für} \quad n \text{ [min}^{-1}\text{].} \quad (25)$$

Die Umrechnung der genannten stärksten Grautonfrequenzen

$$f_g = (1 - \beta) n \quad \text{bzw.} \quad \beta = 1 - \frac{f_g}{n} \quad (26)$$

in ein Kernrotationsverhältnis  $\beta$  berücksichtigt die mit der Rotordrehfrequenz  $n$  getaktete stroboskopische Aufnahmetechnik, wodurch die Kamera Differenzdrehfrequenzen  $(1 - \beta) n$  zur Rotordrehfrequenz registriert. Diese Vorgehensweise ermöglichte, mit der niedrigen Bildrate damaliger Aufnahmetechnik zu arbeiten. Die nahe der Drehfrequenz liegenden Grautonfrequenzen würden anderenfalls das Abtasttheorem verletzen.

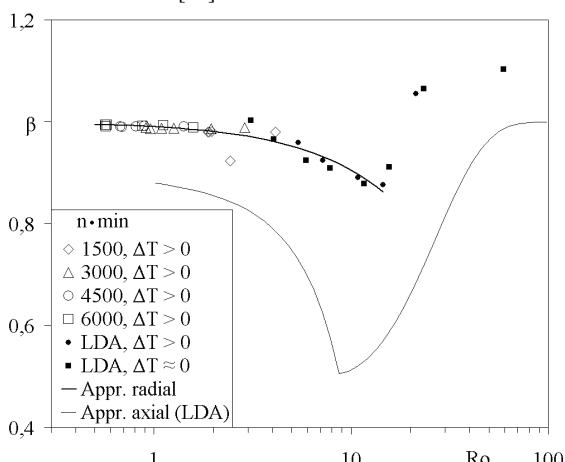
Diese Umrechnung (26) in Kernrotationsverhältnisse  $\beta$  ermöglicht eine Auftragung über der Rossbyzahl  $Ro$  (Bild 52), in der LDA-Meßwerte der gleichen Strömungsvariante mit radialem Zuströmung (vgl. Abschnitt 4.1.3, Bild 29) zum Vergleich enthalten sind.

Die Darstellung zeigt, daß die unterschiedlichen Meßtechniken komplementär eingesetzt werden können. Eine gemeinsame Approximation aus Rauch- und LDA-Meßwerten für das Kernrotationsverhältnis im Intervall  $0,3 < Ro < 14,5$  gelingt, indem das Wertepaar  $(\beta_m, Ro_0)$  des niedrigsten Kernrotationsverhältnisses mit  $\beta_m = 0,8622$  und  $Ro_0 = 14,5$  in

$$\beta = 1 - (1 - \beta_m) \frac{Ro}{Ro_0} \quad (27)$$

eingetragen wird. Die aus den LDA- Messungen bestimmte Approximation des Kernrotationsverhältnisses für axiale Zuströmung (Bild 29) wurde zum Vergleich in Bild 52 eingefügt.

Nur ein Meßwert ( $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ ;  $f_g = 1,9 \text{ Hz}$ ; Bild 51) entsprechend  $\beta = 0,92$  in Bild 52 liegt deutlich außerhalb der Approximation. Ein Blick in die Daten zeigt, daß die zweitstärkste systematisch auftretende Frequenz bei etwa 0,53 Hz liegt. Dies ergibt mit (26) ein Kernrotationsverhältnis von 0,979 und liegt damit nahe der Approximation (27) mit  $\beta = 0,977$ . In diesem Fall ist die *vierfache* der einfachen *Differenzdrehfrequenz* zur Rotordrehfrequenz dominant, was mit über den Umfang verteilten Wirbeln in der Rotorkammer erklärbar ist. Die Literaturstudie in der Dissertation von A. Günther [96] berichtet dazu aus numerischen und experimentellen Arbeiten.



**Bild 52** Kernrotationsverhältnis aus der stärksten Grautonfrequenz (26) aufgetragen über der Rossbyzahl für varierte Rotordrehfrequenz (offene Symbole für Rauch), radiale Zuströmung (Bild 8) mit normaler Temperatursituation ( $\Delta T > 0$ ), d. h. beheizter Rotormantel (ca.  $100^\circ\text{C}$ ) ohne Innenwellenrotation, LDA- Meßwerte (Abschnitt 4.1.3, Bild 29) für gleiche Strömungssituation (gefüllte Symbole für LDA), gemeinsame Approximation Rauch & LDA (dicke Linie) für radiale Zuströmung (27), Approximation (4) bis (6) aus LDA- Messungen für axiale Zuströmung in (dünne Linie, Abschnitt 4.1.2, Bild 21) zum Vergleich

Dieses Beispiel illustriert die erwähnte *nicht gesicherte Eindeutigkeit*, die aus der Art zu beobachtender Strukturen resultiert. Sobald ggf. mehrere aus dem Rauschteppich (Bild 48) hervortretende Frequenzen bestehen, stellt sich die Frage, welche davon zur Berechnung des Kernrotationsverhältnisses taugt. Prinzipiell sollte die niedrigste von null verschiedene Frequenz dafür geeignet sein. Die automatisierte Auswertung bestimmt die stärkste bzw. die mit größtem Signal- zu

Rauschverhältnis auftretende Frequenz. Im zuvor beschriebenen Fall war die vierfache die stärker als die einfache Differenzdrehfrequenz zwischen Strömung und Rotor hervortretende Frequenz.

Diese Vielfachen der als einfache *Differenzdrehfrequenz* zur Rotordrehfrequenz interpretierten Maxima im Frequenzspektrum (z. B. Bild 48) könnten Spekulationen zur Anzahl der umlaufenden Wirbel nähren oder sind nur Ergebnis der Frequenzzerlegung nicht sinusförmiger Signale.

Die Streuung der Rauchmeßwerte in Bild 52, fällt formal geringer aus als die der LDA- Messungen (Bild 10), da die bestimmten stärksten Grautonfrequenzen in den Bildern stabil auftreten. Ein unmittelbarer Vergleich hinsichtlich der Streuung ist problematisch, da die LDA- Messungen auf den Geschwindigkeitsmessungen einzelner Partikel beruhen und die Rauchmessungen auf Videosequenzen. Die Zeiten, über die Daten erfaßt und ausgewertet werden, sind etwa gleich (LDA – 10 s), da die Schwingungen in der Videosequenz auch etwa für 10 s (Bild 46) auftreten. Die Anzahl der Einzelmeßwerte (25 Hz x 10 s im Video) liegt auch etwa in einer Größenordnung, die der Anzahl der erfaßten Partikel beim LDA entspricht. Die Auswertung und Zusammenfassung mehrerer Videosequenzen, die radiale Verläufe mit jeweiliger tangentialer Mittelung (Bild 44) erfassen, bietet insgesamt mehr Datenbasis pro Meßwert als beim LDA und die Bestimmung von Streuungen aus Einzelmeßwerten ist schwierig, da die Frequenzanalysen der Rauchmessungen mittlere Ergebnisse hinsichtlich der Meßdauer liefern.

Eine Schwierigkeit der Rauchmessungen im Vergleich zum LDA besteht in der dargestellten Möglichkeit der Dominanz höherer harmonischer Frequenzen, wenn die erste interessiert. Mehr Sicherheit bietet u. U. die Auswertung mit Auto- oder Kreuzkorrelation, wobei letzteres zwei örtlich verteilte Sensoren und eine gute zeitliche Auflösung erfordert. Zwei tangential verteilte Meßpositionen (Bild 44) standen hier zur Verfügung, aber die zeitliche Auflösung der hier verwendeten Videosequenzen (25 Hz = 1 Bild pro Umdrehung bei  $1500 \text{ min}^{-1}$ ) genügt dafür nicht.

Ein weiterer Vorteil der Kreuzkorrelation besteht in der Möglichkeit die Richtung aufzulösen, d. h. unterscheiden zu können, ob die Strömung schneller oder langsamer als der Rotor rotiert. Gleichung (26) enthält die Grautonfrequenz  $f_g$  mit negativem Vorzeichen, da eine langsamere Rotation der Strömung im Vergleich zum Rotor vorausgesetzt wurde. Je nach Betriebspunkt sind Kernrotationsverhältnisse über 1 möglich, wie die LDA- Messungen in Bild 52 für höhere Rossbyzahlen zeigen. Eine Messung nebst Auswertung mit Kreuzkorrelation liefert dieses Vorzeichen.

*Zusammengefaßt* ist die Registrierung der Lichtintensität infolge einer Streuung an Rauchpartikeln in einer Strömung eine komplementäre Meßmöglichkeit für Strömungsuntersuchungen. Vorteilhaft gegenüber anderer optischer Meßtechnik, die eine Auflösung einzelner Partikel erfordert, ist die Möglichkeit kleinere Partikel zu verwenden, die ein besseres Strömungsfolgevermögen in starken Fliehkräftefeldern rotierender Maschinen aufweisen. Auswertung und Ergebnis der Messungen sind wegen prinzipieller Unterschiede nicht gleich. Die Vorteile einer Visualisierung der rauchmarkierten Strömung schwinden beim Einsatz in schnell rotierenden Kammern wegen der hohen Turbulenz. Einzelne Strukturen sind mit steigender Drehfrequenz der Kammer schwer zu detektieren. Daher ist dem Einsatz einer Kamera u. U. örtlich verteilte punktuell messende Sensorik mit höherer zeitlicher Auflösung vorzuziehen.

#### 4.4 Einordnung

Für eine Einordnung der in diesem Abschnitt 4 dargestellten Meßaufbauten in die im Abschnitt 3 dargelegte Systematisierung werden beide Kriterien (Bild 2 S. 8)

- Bewegung und Übertragung (Abschnitt 3.1) sowie
- Anordnung der Trennstelle in der Meßkette (Abschnitt 3.2)

herangezogen.

Hinsichtlich von *Bewegung und Übertragung* genügen alle drei Meßaufbauten (Abschnitte 4.1 bis 4.3) einer einheitlichen Einordnung. Die Meßstellen der jeweiligen Anwendung folgen einer Rota-

tionsbewegung auf einer radialen Position, so daß die *Relativbewegung* eine Kombination aus Winkel- und Tangentialgeschwindigkeit ist. Die *Übertragung* erfolgt direkt von der Meßstelle zum ruhenden Empfänger (LDA oder Kamera), wobei alle drei Varianten das Prinzip (Licht-) *Wellenausbreitung* nutzen. Dies gilt gleichermaßen für die *Hilfsenergie* zur Versorgung der Meßstelle wie auch für das *Signal* zur Übertragung der Meßwerte. Die Übertragung erfolgt für alle drei Fälle *diskontinuierlich* aufgrund der *umlaufenden* Bewegung.

Das LDA (Abschnitt 4.1) bildet hier eine Ausnahme, da es prinzipiell kontinuierlich – also umfänglich entlang des Radius des Meßvolumens in der Rotorkammer – Meßwerte aufnehmen könnte. D. h., der *Übertragungsbereich* entspricht einer Kreisbahn. Die Übertragung erfolgt nur deshalb diskontinuierlich, weil der optische Zugang aus Gründen mechanischer Festigkeit durch sechs Einzelfenster erfolgen muß. Daß LDA-Daten wegen der Partikel diskontinuierlich sind, hat im Sinne des Kriteriums *Bewegung und Übertragung* keine Relevanz, da das eine Eigenschaft des Meßverfahrens LDA und nicht eine Frage der Realisierung von Messungen am bewegten Maschinen teil ist.

Die anderen beiden Realisierungen (Abschnitte 4.2 u. 4.3) übertragen jeweils ein Bild (Feldmeßverfahren), wobei die *umlaufende* Bewegung eine *diskontinuierliche Übertragung* erfordert. Der *Übertragungsbereich* umfaßt nur eine Winkelposition, ist aber eine Fläche, um jeweils ein Bild übertragen zu können. Die Bewegungsunschärfe der Abbildung hängt dabei von der Belichtungszeit der jeweiligen stroboskopischen Beleuchtung ab.

Hinsichtlich der *Anordnung der Trennstelle* in der Meßkette (Abschnitt 3.2, Tabelle 1) sind die beiden Anwendungen (LDA und Luftwechselzahl, Abschnitte 4.1 und 4.3) Abschnitt 3.2.1 *Meßeffekt im bewegten System* zugeordnet, da ausschließlich der Meßeffekt im bewegten System mitfährt, und die ganze übrige Meßkette im ruhenden System liegt. Die Flüssigkristallmessungen (Abschnitt 4.2) ordnet die Systematisierung dem Abschnitt 3.2.2 *Passive Technik* zu, da die gekapselten thermochromen Flüssigkristalle als Sensor ohne aktive Signalverstärkung fungieren. Nur Meßeffekt und Sensor fahren auf dem bewegten System mit.

Bei allen drei der in Abschnitt 4 dargestellten Realisierungen von Messungen an bewegten Maschinenteilen liegt der überwiegende Teil der Meßkette im ruhenden Systemteil. Außer einem optischen Zugang und der Flüssigkristallapplikation (4.2) werden keine weiteren Instrumentierungsaufwendungen für den bewegten Teil der Meßkette erforderlich. Die in den Abschnitten 3.2.1 und 3.2.2 genannten Vorteile (geringer Instrumentierungsaufwand im bewegten System, Nutzung von Feldmeßverfahren) werden umfassend genutzt.

Abschließend ist einzuschätzen, daß die dargestellten Realisierungen, obwohl die jeweiligen Messungen schon einige Jahre zurückliegen, auch heute prinzipiell aktuell sind. Hinsichtlich verwendeter Kamera-, Erfassungs- und Rechentechnik hat es inzwischen technische Verbesserungen gegeben, die höhere Auflösung, höhere Datrate und schnellere Auswertung ermöglichen. Auch telemetrische Temperaturmeßstellen zur Kontrolle der Flüssigkristall-Messungen oder der Einsatz eines Pulslasers für den stroboskopischen Lichtschnitt wären hilfreich zur Erzielung besserer Ergebnisse, ohne daß dadurch die prinzipielle Vorgehensweise anders würde.

## 5 Messungen mit Telemetriesystem

Dieser Abschnitt beinhaltet Messungen, die im Sinne der Systematisierung des Abschnitts 3.2 „Anordnung der Trennstelle in der Meßkette“ die Trennung von bewegtem und ruhendem Teil der Meßkette nach der Digitalisierung haben (Abschnitt 3.2.5).

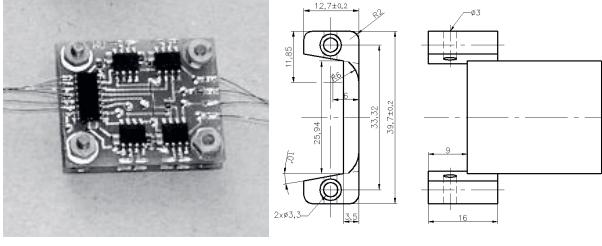
Die Messungen am Zweikammermodellrotor (Bild 6, Bild 67) liegen zeitlich einige Jahre nach den in Abschnitt 4 dargelegten. Die Konzeption des Zweikammermodellrotors enthielt zwei kommerzielle Telemetriesysteme mit insgesamt etwa 40 als Typ K-Thermoelemente auszuführenden Temperaturmeßstellen. Die Systeme beruhen auf komplexer aktiver analoger Technik, wobei eine Hochfrequenzantenne drahtlos die Hilfsenergie an das rotierende System überträgt und auf selbem Wege die Information zurückliefert (Abschnitt 3.2.3). Die eingangs geplanten Untersuchungen des Rotor scheibenwärmestroms, welche erst später [96, 103] gelangen, erfordern eine Meßunsicherheit von 0,1 K bei der Messung von Oberflächentemperaturdifferenzen am metallischen Rotor. Diese Anforderung resultiert aus Scheibendicke, Wärmestrom und Wärmeleitfähigkeit der Versuchsanordnung [z. B. 96]. Gleichzeitig genügt eine geringe Datenrate, da vorerst nur thermisch stationäre Messungen interessieren.

Schwierigkeiten mit den kommerziellen Telemetriesystemen (Abschnitt 3.2.3) bewirkten Entwicklungstätigkeit in diese Richtung, die es zur Rettung des AG Turbo Vorhabens COOREFF-T 1.3.6 „Strömung und Wärmeübergang in rotierenden Kavitäten“ [103] schnell abzuschließen galt.

Dieses Vorhaben lieferte maßgebliche Inhalte für die Dissertation von A. Günther [96], die der Autor mitbetreute.

### 5.1 Prinzipieller Aufbau eines digitalen Telemetriesystems

Auf Basis seinerzeit vergleichsweise neuer Halbleiter erfolgte bis zum Herbst des Jahres 2003 die Entwicklung einer Baugruppe (Bild 53) zur Abfrage von acht Thermoelementen vom Typ K. Diese enthalten jeweils Vergleichsstellen, Meßverstärker und ADU. Die rechts neben dem Foto skizzierten Elektronikträger *befestigen* die dargestellten Leiterplatten im Telemetrikkörper, den Bild 55 zeigt. Dieser Telemetrikkörper gibt den Baugruppen sicheren Halt, was angesichts der Fliehkräftbelastung von mehreren 1000 g funktionsrelevant ist.



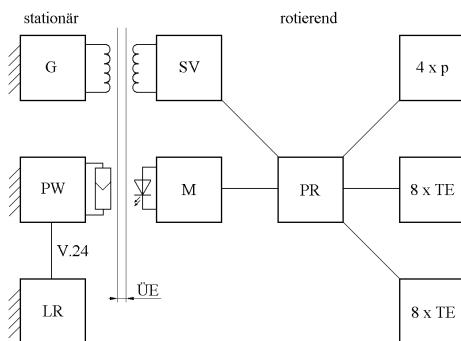
**Bild 53** Elektronikaufbau des Meßverstärkers/ADU zum Anschluß von Thermoelementen vom Typ K mit Skizze eines Elektronikträgers zum Einbau in den Telemetrikkörper dargestellt in Bild 55, Foto mit gesteigertem Kontrast

Für die Realisierung der ebenfalls erforderlichen *Druckmessungen* fanden kleine Drucksensoren ihren Platz in Taschen, die mantelseitig in den Telemetrikkörper eingebracht sind (Bild 55). Deren Montageradius ist größer als der der Elektronikmodule, weshalb die Drucksensoren Radialbeschleunigungen von über 12000 g erleiden. Damit verbundene Schwierigkeiten und Anstrengungen, die schlussendlich gebrauchsfähige Druckmessungen in der rotierenden Kammer ermöglichen, beschreibt Abschnitt 5.2.

Die Funktionsstruktur einer frühen Version eines am Zweikammermodellrotor eingesetzten Systems zeigt Bild 54. Ein Prozeßrechner PR sammelt über ein digitales Bussystem die Meßwerte

von verschiedenen Sensoren bzw. Meßbaugruppen ein. Bild 54 entspricht hinsichtlich der Instrumentierung dem Telemetriesystem 2 (Bild 6, Bild 67), das vier Druckmeßstellen und 16 anzu-schließende Thermoelemente umfaßte, während Telemetriesystem 1, zwei weitere Thermoelementbaugruppen anzuschließen ermöglichte.

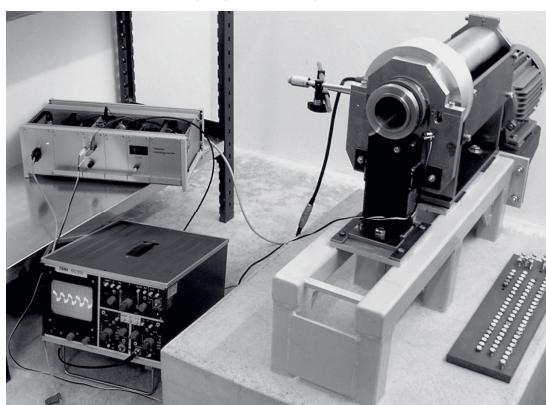
Die vom Prozeßrechner PR (Bild 54) übernommen Meßwerte gelangen zum Modulator M, der ein optisches Signal an den ruhenden Empfänger nebst Pegelwandler PW übermittelt. Dieser Pegelwandler liefert das dann normgerechte Schnittstellensignal an den Laborrechner LR. Die Versorgung des Telemetriesystems mit Hilfsenergie gewährleistet der Generator G, dessen Ausgangssignal induktiv die rotierende Spannungsversorgung SV speist, welche die Hilfsenergie in die seitens der anderen Baugruppen benötigte Form bringt.



**Bild 54** Funktionsstruktur des Telemetriesystems mit Generator G, Spannungsversorgung SV, Prozeßrechner PR, Modulator M, Pegelwandler PW, Laborrechner LR und den Sensoren bzw. Meßmodulen für Druck (4 x p) und Thermoelemente (8 x TE), s. Text, Übertragungsentfernung ÜE



**Bild 55** Telemetrikkörper zum Einbau verschiedener Elektronikmodule bzw. zur mantelseitigen Montage von Drucksensoren, Foto mit gesteigertem Kontrast



**Bild 56** Testaufbau zur Erprobung eines Teils der Elektronik mit induktiver Hilfsenergieeinspeisung ins rotierende System und optischer Datenübertragung, Oszilloskop zur Kontrolle des Generatorausgangssignals bei Speisung der Sendewicklung, rechts Schraubensatz zum Auswuchten für den späteren Betrieb bei hohen Drehfrequenzen, optische Datenübertragung funktionstüchtig bis ca. 7500 min<sup>-1</sup>

Bild 56 zeigt einen Testaufbau zur Erprobung des Telemetriesystems auf einfacher Spindel, die bis  $11600 \text{ min}^{-1}$  Drehfrequenz erreicht und zeigte, daß die optische Übertragungsstrecke auf radialer Position (Radius  $> 0$ , vgl. Abschnitt 6.1) oberhalb von etwa  $7500 \text{ min}^{-1}$  Drehfrequenz versagt. Die Umstellung auf eine ausschließlich induktive Übertragung unter Nutzung der gleichen Strecke, die auch die Hilfsenergie überträgt, löste das Problem. Auf Basis dieses Meßsystems entstanden verschiedene Arbeiten [U5, U7-U12, U14, U15, 94, 96, 103], wobei die genannte induktive Übertragung

gungstechnik wegen an verschiedenen Potentiometern einzustellender Kennwerte in der Handhabung sehr schwierig war. Diese Schwierigkeit wies die Variante mit getrennt optischer Datenübertragung nicht auf.

## 5.2 Kalibrierung der Druckmeßtechnik

Bei der Druckmessung in rotierenden Maschinenstrukturen besteht die Meßstelle in der Regel aus einer Druckzuleitung, beginnend am Meßort und endend am Drucksensor, und einem Telemetriesystem, das Hilfsenergie für den Sensor bereitstellt und über einen Datenkanal die Meßwerte ins ruhende System überträgt. Dabei wirken Fliehkräfte auf alle Bestandteile des Meßsystems in Abhängigkeit vom Montageradius der Bauteile.

Hinsichtlich der zeitlichen Auflösung stellt der Verzicht auf eine Druckzuleitung die beste Lösung dar. Das entspräche z. B. einer wandbündigen Montage des Drucksensors zur Realisierung einer Meßstelle für den statischen Druck in einer rotierenden Kammer. Diese Forderung liegt oft außerhalb des Möglichen, da Temperaturen oder konstruktive Randbedingungen die wandbündige Anordnung des Sensors am gewünschten Meßort verhindern. Dies erfordert dann eine Druckzuleitung, die einem Temperatur- und Fliehkräfteverlauf ausgesetzt ist.

Die radialen Verläufe der *Zuleitung* im rotierenden System bilden ähnlich einem U-Rohrmanometer eine Fluid-Säule, wobei die Zentrifugalbeschleunigung anstatt der Schwerkraft beim U-Rohr wirkt. Da die Beschleunigungen in Turbomaschinen Werte von  $100 \text{ km/s}^2$  in der Regel überschreiten, hat eine Vernachlässigung der Druckdifferenzen in der Gassäule maßgebliche systematische Meßfehler zur Folge. Diese hängen wegen starker Temperaturabhängigkeit der Dichte bei Gasen maßgeblich von der Temperatur ab. Der anschließende Abschnitt umreißt mögliche Meßfehler für eine Druckzuleitung von Sensoren im rotierenden System.

Der *Drucksensor* unterliegt der drehfrequenzabhängigen Radialbeschleunigung, gemäß dem Radius seiner Anordnung. Die Sensormembran reagiert je nach ihrer Orientierung und Massebelegung mit beschleunigungsbedingter Verformung, so daß ein Anteil des Druckmeßwertes statt auf Druck- auf Massekräften beruht. Die Abschnitte 5.2.2 und 5.2.3 enthalten theoretische Überlegungen, Ausführungen zu den Versuchsaufbauten und Ergebnisse.

### 5.2.1 Druckzuleitung zum Sensor unter Fliehkräfteeinfluß

Bei der Druckmessung im Rotierenden ruft die Verbindung des Sensors mit der Meßbohrung maßgebliche systematische Meßfehler hervor, wenn die Anordnung genügend hohe Beschleunigung erfährt und die verbindende Rohrleitung nicht nur axial auf konstantem Radius verläuft. Zur Berechnung des in der Zuleitung zum Sensor verursachten systematischen Fehlers bei der Druckmessung, ähnliche Ansätze enthält [42], dient der in Bild 57 schematisch dargestellte einfache Fall. Das Produkt aus dem Massendifferential  $dm$  und der Radialbeschleunigung  $\Omega^2 r$  steht der Änderung der Druckkraft  $A dp$  im Kräftegleichgewicht gegenüber

$$\Omega^2 r dm = A dp \quad \text{mit} \quad dm = \rho A dr \quad (28)$$

Mit der Querschnittsfläche  $A$  im Zuleitungsrohr und der lokalen Dichte  $\rho$  aus der Gleichung für Idealgas mit der speziellen Gaskonstante  $R$  für Luft erfolgt die Integration für konstante oder radiäle veränderliche Temperatur mit

$$\Omega^2 r dr = RT dp / \rho \quad \text{und den Fällen} \quad (29)$$

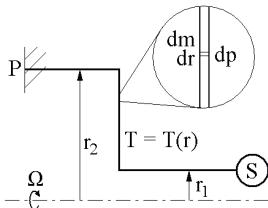
$$T = \text{konst.} \quad \text{oder} \quad T = T_0 / (1 + k r) \quad (30)$$

Daraus resultiert das Druckverhältnis  $p_2/p_1$  für das betrachtete radiale Zuleitungsstück bei in radia-ler Richtung konstant angenommener Temperatur

$$\frac{p_2}{p_1} = \pi_k = \exp\left(\frac{\Omega^2}{2RT}\left(r_2^2 - r_1^2\right)\right) \quad (31)$$

und bei gemäß (30) in radialer Richtung veränderlicher Temperatur

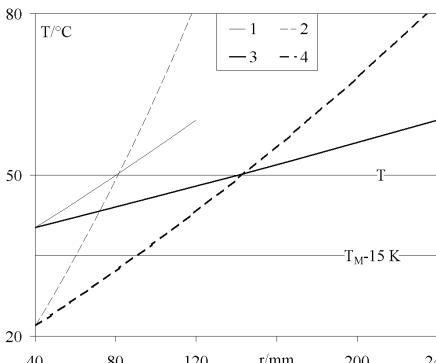
$$\frac{p_2}{p_1} = \pi = \exp\left(\frac{\Omega^2}{2RT_0}\left(r_2^2 - r_1^2 + \frac{2k}{3}(r_2^3 - r_1^3)\right)\right). \quad (32)$$



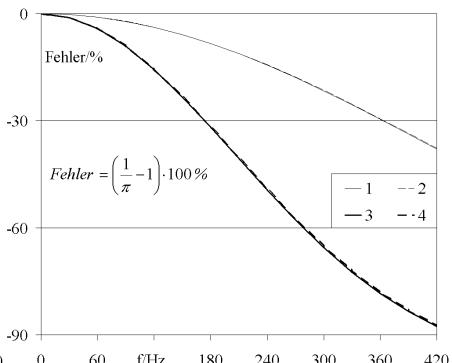
**Bild 57** Typische Situation eines Drucksensors in einer rotierenden Anordnung mit der Druckmeßbohrung P und Sensor S, verbunden durch ein Zuführungsrohr mit radialer Temperaturverteilung im Radiansprung von  $r_1$  bis  $r_2$ , Mittellinie als Rotationsachse, Winkelgeschwindigkeit  $\Omega$

In einem realen Meßaufbau können mehrere radiale Zuleitungspassagen entstehen, so daß die Druckkorrekturen nach (31) oder (32) mehrfach zu berechnen sind. Die einzelnen Radiansprünge einer Zuleitung gegeneinander aufzurechnen, ist unzulässig, wenn deren Temperaturverläufe sich unterscheiden.

Die Berechnung der systematischen Druckmeßfehler für vier Testfälle, bestehend aus den Kombinationen zweier Radiansprünge und zweier Temperaturverläufe, liefert die in Bild 58 bis Bild 61 dargestellten Ergebnisse.



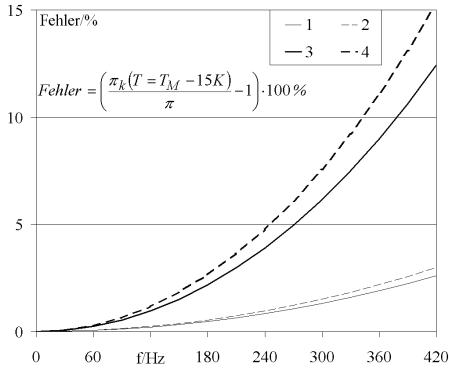
**Bild 58** Temperaturverläufe und Radiansprünge von vier Testfällen zur Berechnung systematischer Druckmeßfehler infolge Sensorzuleitungen mit radialer Verlegung im rotierenden Aufbau mit mittlerer Temperatur  $T_M$  und um 15 K zu niedriger mittlerer Temperatur  $T_M - 15$  K, zur Simulation eines Fehlers durch Korrektur mit abweichender Temperatur der radialen Zuleitung



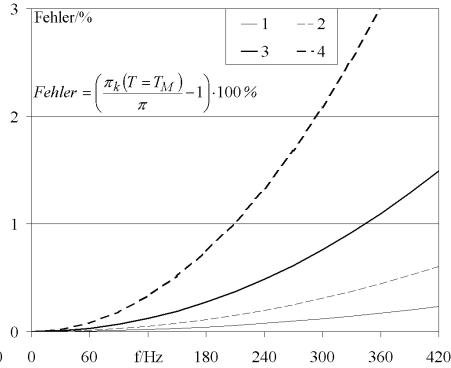
**Bild 59** Systematischer prozentualer Fehler infolge Sensorzuleitung im rotierenden Druckmeßaufbau in Abhängigkeit von der Drehfrequenz  $f$  (100 Hz meinen  $6000 \text{ min}^{-1}$ ) für die Testfälle (Bild 58), wenn *keine* Korrektur erfolgt, Druckverhältnis  $\pi$  entsprechend (32)

Demnach ist das Unterlassen einer Korrektur (Bild 59) für geringe Drehfrequenzen inakzeptabel, sobald der Verlegungspfad für die Druckzuleitung zum Sensor einen maßgeblichen Radiansversatz aufweist. Für viele Anwendungen genügt eine geschätzte Temperatur zur Korrektur (Bild 60). Das Diagramm zeigt den systematischen Fehler infolge 15 K von der tatsächlichen mittleren Temperatur  $T_M$  in der radialen Zuleitungspassage abweichender Korrekturtemperatur.

Für Anforderungen, bestehend aus hohen Drehfrequenzen, großen Radiensprüngen im Verlauf der Zuleitung und hoher Druckmeßgenauigkeit, ist die Messung der Temperatur der Radialpassage in der Druckzuleitung (Bild 61) empfehlenswert. Der verbleibende Fehler beruht auf der Verwendung einer konstanten, mittleren Temperatur zur Korrektur des Druckes (31) anstelle der Nutzung eines radialen Temperaturverlaufes (32).



**Bild 60** Systematischer prozentualer Fehler infolge Sensorzuleitung im rotierenden Druckmeßaufbau in Abhängigkeit von der Drehfrequenz  $f$  für die Testfälle (Bild 58), nach Korrektur mit zu niedriger Temperatur  $T_M - 15$  K der radialen Zuleitung



**Bild 61** Systematischer prozentualer Fehler infolge Sensorzuleitung im rotierenden Druckmeßaufbau in Abhängigkeit von der Drehfrequenz  $f$  für die Testfälle (Bild 58) nach Korrektur mit der mittleren Temperatur  $T_M$  der radialen Zuleitung

Zur Vermeidung eines systematischen Fehlers, den die Vernachlässigung des radialen Temperaturverlaufes hervorruft, kommt der Sensor zur Bestimmung der Korrekturtemperatur  $T$  nach (31) auf den Radius

$$r_T = \frac{2(r_2^3 - r_1^3)}{3(r_2^2 - r_1^2)} \quad (33)$$

Diese Vorschrift entsteht beim Gleichsetzen von (31) und (32) unter Verwendung des Temperaturverlaufes (30).

### 5.2.2 Drucksensormembran im Fliehkräftefeld

Bei der Verwendung von Drucksensoren im Fliehkräftefeld rufen die Massekräfte zusätzlich zu den Druckkräften Verformungen am Sensorelement hervor. Das Ausgangssignal  $p$  des im rotierenden Meßaufbau befindlichen Sensors setzt sich daher aus den druck- und beschleunigungsbedingten Anteilen  $p_p$  und  $p_a$  zusammen

$$p = p_p + p_a. \quad (34)$$

Der Beschleunigungsanteil  $p_a$  errechnet sich aus der Membranmasse  $m_M$ , der Winkelgeschwindigkeit  $\Omega$ , der Membranfläche  $A_M$ , der Membrandicke  $d_M$ , der Membrandicthe  $\rho_M$  und der Entfernung der Membran von der Drehachse  $r_M$

$$p_a = \frac{m_M r_M \Omega^2}{A_M} = \frac{\rho_M d_M A_M r_M \Omega^2}{A_M} = \rho_M d_M r_M \Omega^2. \quad (35)$$

Die Größen Membrandicthe und -dicke sind dem Anwender gewöhnlich nicht zugänglich. Bei einer Kalibrierung im rotierenden Aufbau liefert der Sensor den Druckmeßwert  $p$ , wobei die Zentrifugalbeschleunigung aus dem Radius der Sensoranordnung zur Drehachse und der Drehfrequenz bekannt sind. Den tatsächlich auf die Membran wirkenden Druck gibt der Kalibrator vor, wobei

für die rechnerische Berücksichtigung radialer Druckzuführungen die Rechnungen des vorstehenden Abschnittes Verwendung finden. Damit liegt bei der Kalibrierung der beschleunigungsbedingte Anteil  $p_a$  des Druckmeßwertes vor, so daß daraus das Produkt aus Membrandicke  $d_M$  und Membrandichte  $\rho_M$  als spezifische Masse der Membran  $M_M$  mit der Dimension Masse pro Fläche entsteht

$$M_M = \rho_M d_M = \frac{p - p_p}{r_M \Omega^2}. \quad (36)$$

Die Kalibrierung eines Drucksensors hinsichtlich Empfindlichkeit gegen Beschleunigung liefert danach die spezifische Membranmasse, die mit der Beschleunigung multipliziert den beschleunigungsbedingten Anteil des vom Sensor gelieferten Meßwertes  $p_a$  darstellt. Dieser ist zur Korrektur des Beschleunigungseinflusses vom Druckmeßwert zu subtrahieren.

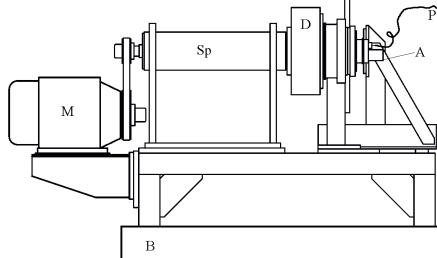
### 5.2.3 Rotierende Drucksensorkalibrierung

Zuerst erfährt der interessierende Drucksensor zusammen mit dem Telemetriesystem eine gewöhnliche Kalibrierung ohne Rotation bzw. Zentrifugalbeschleunigung, die z. B. ein Polynom

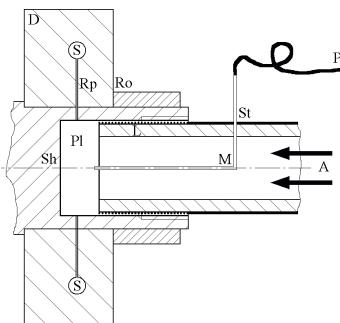
$$p = A p_D^2 + B p_D + C \quad (37)$$

mit den Koeffizienten A, B und C für das druckbedingte Ergebnis liefert, wobei  $p_D$  den digitalen Auslesewert des Telemetriesystems symbolisiert.

Der integrierte, temperaturkompensierte piezoresistive Drucksensor kommt danach zur Bestimmung seiner spezifischen Membranmasse zur Kalibrierung in einen Rotor (Bild 62). Dieser bietet die Möglichkeit, die auf den Sensor wirkende Belastung durch Änderung von Drehfrequenz und Druck zu variieren. Dazu bilden der Rotor und der Stator ein labyrinthgedichtetes Plenum, dessen Druck ein Vergleichsinstrument auf der Statorseite bestimmt (Bild 63). Dieser Druck, korrigiert um den im Abschnitt 5.2.1 berechneten zuleitungsbedingten Fehler, ist der Referenzdruck.



**Bild 62** Aufbau zur rotierenden Kalibrierung von Drucksensoren (Bild 56) schematisch mit Motor M, Spindel Sp, Betonfundament B, Anschluß A für Druckluft, Druckmeßschlauch P, Telemetrikkörper mit Drucksensoren D (Bild 55), Fundament, Antrieb, Spindel für weitere Aufbauten verwendet (Abschnitte 5.1, 6.1, 6.2, 6.4)



**Bild 63** Prinzipskizze zur rotierenden Kalibrierung von Drucksensoren im Schnitt mit der Welle Sh, dem Telemetrikkörper D mit Drucksensoren S zusammen mit dem Rotor Ro, gegenüber der Stator St mit stationärer Vergleichsmäßstelle M, Anschluß A für Druckluft, Druckschlauch P, Labyrinth L und Plenum Pl zwischen Rotor und Stator

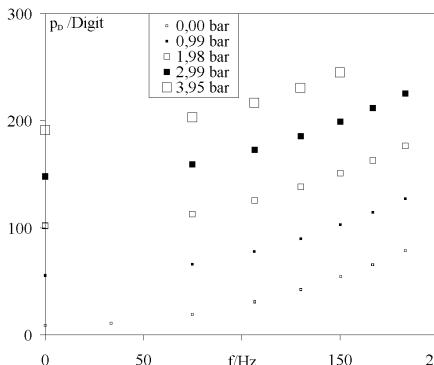
Bild 64 zeigt die digitalen Rohwerte des rotierenden Drucksensors für varierte Drehfrequenz und verschiedene Referenzdrücke. Die Anwendung des Kalibrierpolynoms (37) und das Einsetzen der damit erhaltenen Druckmeßwerte  $p$  sowie der Referenzdrücke für  $p_p$  in (36) liefert die spezifische Membranmasse  $M_M$  des untersuchten Sensors.

Bild 65 bestätigt die spezifische Membranmasse  $M_M$  als geeigneten Kalibrierparameter für Drucksensoren im Einsatz unter Fliehkräfteinfluß. Für eine  $\pm 1$  Digit- Unsicherheit liegen alle Meßwerte für unterschiedliche Referenzdrücke und varierte Drehfrequenzen auf der Ausgleichsgeraden, die eine Drehfrequenzabhängigkeit der spezifischen Membranmasse erkennen läßt.

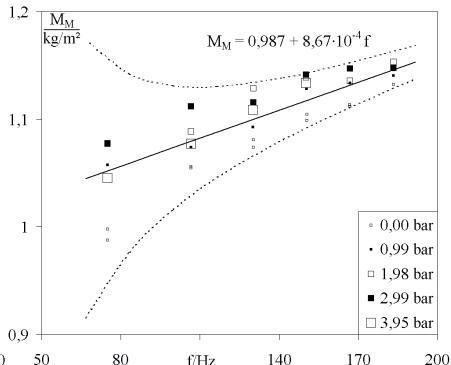
Aus den Ergebnissen der Untersuchung folgt die Erweiterung der Kalibrierung von Drucksensoren um einen drehfrequenzbestimmten Term

$$p = A p_D^2 + B p_D + C - r_M \Omega^2 M_M, \quad (38)$$

der aus der Zentrifugalbeschleunigung und der spezifischen Membranmasse besteht. Hohe Ansprüche an die Meßunsicherheit erfordern die Abbildung der Drehfrequenzabhängigkeit der spezifischen Membranmasse (Bild 65).



**Bild 64** Kalibrierung im rotierenden System, Rohdaten vom Drucksensor- ADU über der Drehfrequenz f des Rotors für varierten Überdruck im Plenum PI (Bild 63)



**Bild 65** Spezifische Membranmasse  $M_M$  eines Drucksensors über der Drehfrequenz des Rotors für varierten Überdruck, mit gemeinsamer Ausgleichsgeraden und Unsicherheit  $\pm 1$  Digit vom 8 Bit ADU

## 5.2.4 Zusammenfassung

Druckmessungen im rotierenden System erfordern die Berücksichtigung der Zentrifugalbeschleunigung für den Drucksensor selbst als auch für die druckseitige Zuleitung zum Sensor.

Der Einfluß der Zuleitung ist berechenbar, größere Radiensprünge im Verlauf der Zuleitung sowie hohe Drehfrequenzen erfordern eine temperaturabhängige Korrektur dieses Einflusses.

Drucksensoren unterliegen einer Querempfindlichkeit gegen hohe Beschleunigungen. Experimentelle Untersuchungen am rotierenden Meßaufbau mit telemetrischer Meßwerterfassung bestätigen den eingeführten Kalibrierparameter *spezifische Membranmasse* hinsichtlich seiner Eignung zur Modellierung. Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen belegen dies für Zentrifugalbeschleunigungen bis oberhalb von 12000 g.

Die experimentelle und theoretische [U5, U8] Bestätigung des eingeführten Parameters *spezifische Membranmasse* zur Kalibrierung der Querempfindlichkeit gegen hohe Beschleunigungen gestattet, den Sensor auch unter Fliehkräfteinflüssen mit konzentrierten Parametern zu beschreiben. Dies stellt bei der Modellierung komplexer Aufbauten eine maßgebliche Vereinfachung dar, da die Notwendigkeit von 2D- oder 3D-FEM-Modellen nebst deren Unsicherheiten hinsichtlich Geometrie- und Materialkennwerten entfallen. Zudem zeigen die Untersuchungen die gegenseitige Unabhängigkeit der Einflüsse Druck und Beschleunigung bzw. die Gültigkeit des Superpositionsprinzips auf, wodurch gemischte Glieder im Kalibrierpolynom entfallen.

### 5.3 Strömung in rotierender radial durchströmter Kammer

Die Verbesserung des Sekundärluftsystems von Gasturbinen begleitet deren Weiterentwicklung seit vielen Jahren. Dabei spielt neben der Steigerung des Wirkungsgrades, die maßgeblich von der Effizienz der Kühlluftführung bzw. vom KühlLuftanteil der vom Verdichter angesaugten Luft abhängt, die Erweiterung des Betriebsbereiches in Richtung Teillastbetrieb eine Rolle. Für beide Aspekte ist die das Sekundärluftsystem betreffende Auslegungssicherheit relevant.

Eine interessierende Strömungssituation ist die radiale Einströmung in eine rotierende Kammer, wie sie im Verdichter von Gastrubinen zur Abzweigung von KühlLuft für unterschiedliche Druckniveaus häufig Verwendung findet. Dabei strömt die KühlLuft durch Bohrungen oder Schlitze im Mantel einer rotierenden Kammer in Richtung Drehachse ein. Die rotierende Kammer besteht aus den Scheiben des Rotors, die eine Beschaufelung tragen, und dem Rotormantel, der die Strömung entlang des Hauptpfades von der des Sekundärluftsystems abgrenzt.

Den Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit entlang des Radius der rotierenden Kammer ohne Einbauten bestimmt das Kräftegleichgewicht der Reibungskräfte an den Scheiben und der Impulstromänderung in der Strömung. Für die anwendungsbedingt interessierenden Fälle ist die Umfangskomponente der Strömungsgeschwindigkeit wegen der hohen Drehfrequenzen der Maschinen deutlich größer als die radiale Geschwindigkeitskomponente, die der Massestrom der radialen Durchströmung bestimmt. Dieser Umstand und die Annahme von Rotationssymmetrie gestattet die Anwendung der Stromfadentheorie unter Berücksichtigung der Kompressibilität. Letzteres erfordert der starke Druckabfall in der rotierenden Kammer besonders bei hohen Drehfrequenzen des Rotors. Die unterschiedlichen Radien zugeordneten Drucksensoren registrieren für ausgewählte Meßpunkte der nachstehend beschriebenen experimentellen Untersuchungen eine Halbierung des Druckes über einem radialen Meßintervall von 110 mm.

Da die experimentellen Untersuchungen nicht in erster Linie der Aufklärung der Strömung und der Untersuchung des Druckabfalls dienen, sind neben einer umfangreichen Instrumentierung für thermische Messungen nur zwei voll redundant ausgeführte Druckmeßstellen entlang des Kammerradius implementiert, die im Idealfall aus mehreren über den Radius verteilten Meßstellen bestehen.

#### 5.3.1 Kernrotationsverhältnis $\beta$

Das Kernrotationsverhältnis, auch verwendet in [43] (u. Abschnitte 4.1.2, 4.3.4), gibt das Verhältnis aus tangentialer Geschwindigkeitskomponente  $c_u$  und Umfangsgeschwindigkeit  $u$  des Rotors in der Kammer bei einem Radius  $r$  und bei einer Rotordrehfrequenz  $\Omega$  an

$$\beta = \frac{c_u}{u} = \frac{c_u}{\Omega r}. \quad (39)$$

Die tangentiale Geschwindigkeitskomponente  $c_u$  und der Radius  $r$  ergeben die Radialbeschleunigung  $a_r$

$$a_r = \frac{c_u^2}{r}, \quad (40)$$

die maßgeblich für den Druckverlust verantwortlich ist. Die Eulergleichung [44]

$$dc = -\frac{dp}{\rho} - g dh \quad (41)$$

bilanziert den Druckverlust wegen eines Höhenunterschiedes im Schwerkraftfeld und wegen Veränderung der Bahngeschwindigkeit. Ein zusätzliches Glied, das Reibungsverluste berücksichtigt, kommt hinzu. Bei der Betrachtung von rotierenden Kammern spielt die Radialbeschleunigung

anstelle des Schwerkraftfeldes die maßgebliche Rolle, da die Radialbeschleunigung bei hinreichender Drehfrequenz des Rotors leicht einige 1000 g erreicht bzw. auch 100000 g übersteigt. Wegen der Übermächtigkeit der Radialbeschleunigung wird (41) zu

$$\frac{dp}{\rho} = a_r dr + \frac{dp_v}{\rho}, \quad (42)$$

wobei die Bahnbeschleunigung  $a_r$  vernachlässigt und ein reibungsbedingtes Verlustglied hinzugefügt sind. Das Vorzeichen des Beschleunigungsgliedes ist anders, da Fliehkraft und Radius in gleiche Richtung definiert sind im Gegensatz zu  $g$  dh in (41).

Zur Vereinfachung folgt die vorerst allein *fliehkraftbedingte Interpretation* des Druckabfalls in der rotierenden Kammer, wodurch das Verlustglied  $dp_v/\rho$  zunächst entfällt

$$R T \frac{dp}{p} = \Omega^2 \beta^2 r dr \quad (43)$$

Dabei kommt mit (39) und (40) auch die Gleichung des idealen Gases zum Einsatz. Die Einführung des relativen Radius  $x$ , der aus dem Bezug auf den Kammeraußenradius  $b$

$$x = r / b \quad (44)$$

folgt, liefert

$$R T \frac{dp}{p} = \Omega^2 \beta^2 b^2 x dx. \quad (45)$$

Wenn der Verlauf der Kernrotationszahl über dem Radius nicht bekannt ist und ein Meßwertepaar  $p_1$  und  $p_2$  vorliegt, kann eine integrale Kernrotationszahl  $\beta_i = \text{konstant}$  berechnet werden. Je nach Datenlage kommen ein radialer Temperaturverlauf mit den Koeffizienten  $T_0$  und  $k$

$$T = \frac{T_0}{1+kx} \quad \text{oder} \quad T = \text{konst.} \quad (46)$$

- ein umfangreicheres Nennerpolynom hat kaum Veränderungen zur Folge – oder eine konstante mittlere Temperatur zum Einsatz. Die Integration liefert

$$\beta_i = \frac{1}{\Omega b} \sqrt{\frac{RT_0 \ln(p_2/p_1)}{\frac{1}{2}(x_2^2 - x_1^2) + \frac{k}{3}(x_2^3 - x_1^3)}} \quad (47)$$

für den Fall mit etwa linearem Temperaturverlauf und für den einfachen Fall mit konstanter integraler Temperatur  $T_i$

$$\beta_i = \frac{1}{\Omega b} \sqrt{\frac{2RT_i \ln(p_2/p_1)}{x_2^2 - x_1^2}}. \quad (48)$$

Falls zur Berücksichtigung des Temperaturverlaufs eine polytrope Zustandsänderung dient und der Polytropenexponent  $n$  im Integrationsintervall konstant bleibt, steht anstelle (45)

$$R T_i \frac{d(p/p_1)}{(p/p_1)^{\frac{1}{n}}} = \Omega^2 \beta^2 b^2 x dx, \quad (49)$$

wobei der Bezugszustand 1 der an der Position  $x = x_1$  ist. Die Integration liefert

$$\beta_i = \frac{1}{\Omega b} \sqrt{\frac{2nRT_i}{n-1} \frac{1 - (p_2/p_1)^{\frac{n-1}{n}}}{x_1^2 - x_2^2}}. \quad (50)$$

Der Vorteil der vorstehend angegebenen integralen Kernrotationszahlen besteht in der einfachen Verwendung von Druckmeßwerten aus rotierenden Kammern. Ohne umfangreiche Modellierung ist eine integrale quantitative Aussage über die Umfangskomponente der Strömung im Meßintervall möglich, die besonders den Vergleich von Ergebnissen verschiedener Strömungssituationen am selben Versuchsstand zum Ziel hat. Die Übertragbarkeit auf andere Aufbauten begrenzt die Vernachlässigung des Reibungsgliedes in (42).

Die Anforderungen an die Genauigkeit der Druckmessung zur Bestimmung von Kernrotationsverhältnissen  $\beta$  in der rotierenden Kammer steigen mit abnehmender Drehfrequenz stark an (48).

### 5.3.2 Eindimensionales Modell

Die Erstellung eines eindimensionalen Modells für die dreidimensionale Strömung erfordert *vereinfachende Annahmen*. Da die zu betrachtenden rotierenden Kammern rotationssymmetrisch sind und auch die Einströmung am Mantel der Kammer als hinreichend gleich verteilt vorausgesetzt ist, stellt die Annahme einer *Rotationssymmetrie* eine vertretbare Ungenauigkeit dar. Zudem soll die *axiale Koordinate entfallen*, was vergleichsweise geringe Beträge der axialen Geschwindigkeitskomponente voraussetzt. Beide Annahmen reduzieren das Problem auf die radiale Koordinate. Effekte an der Grenzschicht der Kammerwände bleiben im Detail unberücksichtigt, da deren Einfluß auf den maßgeblich vom Hauptwirbel bestimmten Druckverlust gering vermutet wird. Der dem freien Wirbel ähnliche Hauptwirbel [43] bestimmt das auf die Seitenscheiben der Kammer wirkende Drehmoment seitens der an den Seitenscheiben reibenden Strömung. Das Drehmoment  $M$  steht über die Hauptgleichung der Strömungsmaschinen nach Euler [45] basierend auf der Impulstrombilanz mit den Umfangsgeschwindigkeiten  $u$  und  $c_u$  für Rotor und Strömung sowie dem Massestrom  $\dot{m}$  in Verbindung

$$\Delta M \Omega = \dot{m} \Omega \Delta (r c_u) = \dot{m} \Delta (u c_u), \quad (51)$$

worin  $\Omega$  die Rotordrehfrequenz und  $r$  den lokalen Radius symbolisieren. Da die rotierende Kammer in der Betrachtung nicht über Einbauten verfügt, die ihrerseits die Strömung ablenken oder führen, verursacht die Reibung des strömenden Mediums allein die Änderung der Strömungsparameter und damit das anhand der zugrundeliegenden Impulstrombilanz daraus resultierende Drehmoment, das an den Seitenscheiben der rotierenden Kammer wirkt.

Die Annahme reibungsfreier Strömung kommt dem Einsetzen von  $M = 0$  in (51) gleich, woraus folgerichtig die Gleichung des Freien Wirbels entsteht

$$0 = \Delta (r c_u), \quad r c_u = \text{const.} \quad \text{oder} \quad c_u \sim 1/r \quad (52)$$

Die Überlagerung der Strömung eines freien Wirbels mit der einer Senke, die die radiale Durchströmung der Kammer erfordert, ergibt die aus der Potentialtheorie bekannte Wirbelsenke, deren Stromlinie eine logarithmische Spirale beschreibt [44].

Die Berücksichtigung der Reibung führt zu einer Abweichung von der Modellvorstellung freier Wirbel oder Wirbelsenke. Die Umfangskomponente der Strömungsgeschwindigkeit steigt dann schwächer als das Reziproke des Radius mit der Abnahme des Radius steigt, was die Vorstellung von einer *spiralförmigen Stromlinie* nicht stört. Der Verbleib bei der spiralförmigen Stromlinie läßt die Seitenscheiben der rotierenden Kammer aus Sicht der Strömung als Wände eines ebenen Kanals erscheinen, wenn eine nicht zu kleine Windungsanzahl der Spirale zutrifft. Letzteres hängt vom Verhältnis aus radialer Geschwindigkeitskomponente, die der Massestrom bestimmt, und Umfangskomponente der Strömungsgeschwindigkeit ab.

Der Übergang zur Vorstellung eines *ebenen Kanals* bietet die Möglichkeit bekannte Abhängigkeiten des Druckverlustes von der Strömungsgeschwindigkeit zu nutzen, wie sie von den Rohrleitungen bekannt sind [46]. In Rohrleitungen oder Kanälen dient ein Verlustparameter symbolisiert durch  $\lambda$  oder  $\xi$  zur Beschreibung der Druckverluste, die für laminare Strömung proportional zur Geschwindigkeit und für turbulente Strömung etwa quadratisch zu- oder abnehmen.

Für Kanalströmungen ist die charakteristische Länge bzw. der gleichwertige Durchmesser  $d$  die doppelte Kanalbreite  $2s$ , wie sie auch zur Bildung der Reynoldszahl Verwendung findet [47]. Daraus resultiert in Übereinstimmung mit von den Rohrleitungen Bekanntem der Ansatz für den Druckverlust  $\Delta p_v$

$$\frac{\Delta p_v}{\rho} = \frac{\xi}{d} \frac{c^2}{2} \Delta l = \frac{\xi}{2s} \frac{w^2}{2} \Delta l, \quad \text{oder} \quad \frac{dp_v}{dl} = \frac{\rho \xi}{4s} w^2, \quad (53)$$

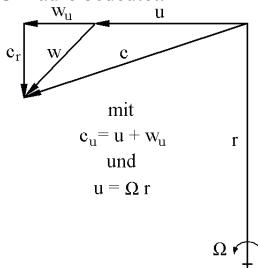
wobei die Relativgeschwindigkeit  $w$  zur Kanalwand bzw. hier zur Kammerwand und der für den Druckverlust verantwortliche Längenabschnitt der Stromlinie  $\Delta l$  im Relativsystem enthalten sind. Der Übergang von der Lauflänge der Stromlinie im Relativsystem zum Kammerradius gestattet hennach die Integration entlang des Radius und gelingt mit den Identitäten

$$\frac{dl}{dt} = w, \quad \frac{dr}{dt} = c_r, \quad \frac{w}{c_r} = \frac{dl}{dr}, \quad dx = \frac{dr}{b}, \quad (54)$$

die in differentieller Schreibweise mit (53)

$$\frac{dp_v}{\rho} = \frac{\xi b}{4s} \frac{w^3}{c_r} dx \quad (55)$$

ergeben. Das zugehörige Geschwindigkeitsdreieck zeigt Bild 66. Für den wandreibungsbedingten dichtespezifischen Druckverlust bei radialem Kammerdurchströmung geht der Reibungsbeiwert  $\xi$  im Zähler und das Verhältnis der Beträge der radialen Geschwindigkeitskomponente  $c_r$  und der Relativgeschwindigkeit  $w$  im Nenner ein. Das zuletzt genannte Verhältnis ist der Sinus des Winkels der Stromlinie im Relativsystem gegen die Umfangsrichtung, so daß der Druckverlust mit der Anzahl der Umläufe der Stromlinie für eine Radialpassage steigt, da ein geringer Winkel viele Umläufe bedeutet.



**Bild 66** Geschwindigkeitsdreieck für den Radius  $r$  zur mit Drehfrequenz  $\Omega$  rotierenden Kammer mit den absoluten Werten der mittleren Strömungsgeschwindigkeit  $c$  und den relativen Werten  $w$ , wobei  $c_r = w_u$ ,

Der Druckverlust in einer Rohrströmung verursacht eine auf das Rohr wirkende Axialkraft, die von der Wandschubspannung herrührt. Dies gilt analog für den ebenen Kanal mit dem Druckverlust  $\Delta p$  und der Fläche des Strömungsquerschnitts  $s\Delta l$ , deren Produkt die genannte Axialkraft ergibt. Diese verursacht die Schubspannung  $\tau$

$$\tau = \Delta p_v \frac{s \Delta l}{2 \Delta r \Delta l} = \frac{s}{2} \frac{dp_v}{dl} \quad (56)$$

an der Fläche  $2\Delta r \Delta l$  der beiden Kanalwände, die den Seitenscheiben der rotierenden Kammer entsprechen. Das von der Schubspannung  $\tau$  an beiden Seitenscheiben verursachte Drehmoment für einen radialen Abschnitt  $\Delta l$  beträgt

$$\Delta M = 2\tau 2\pi r^2 \Delta l = \tau 4\pi r^2 \Delta l. \quad (57)$$

Die Gleichungen (51), (53), (56) und (57) ergeben

$$\frac{\Delta M \Omega}{\dot{m}} = \Delta(u c_u) = \frac{\Omega \rho \xi}{\dot{m}} w^2 \pi r^2 \Delta r, \quad (58)$$

die differentiell geschrieben und mit Einführung des relativen Radius  $x = r/b$

$$d(u c_u) = \frac{\xi}{4} \frac{2\pi \Omega b^3}{V} w_u^2 x^2 dx \quad (59)$$

liefern. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit  $w$  relativ zum Rotor ist durch deren Umfangskomponente  $w_u$  zu ersetzen, da sie das Drehmoment verursacht. Die Einführung des Kernrotationsverhältnisses  $\beta$  liefert

$$\frac{d\beta}{dx} = \frac{\xi}{4} \frac{Re_\varphi}{Re_r} x^2 \operatorname{sgn}(\beta - 1) (\beta - 1)^2 - \frac{2\beta}{x} \quad \text{mit} \quad \frac{Re_\varphi}{Re_r} = \frac{2\pi \Omega b^3}{V}, \quad (60)$$

wobei das Verhältnis der Reynoldszahlen

$$Re_\varphi = \frac{\Omega b^2 \rho}{\eta} \quad \text{und} \quad Re_r = \frac{\dot{m}}{2\pi b \eta} \quad (61)$$

bestimmende dimensionsfreie Kenngröße ist, die den radialem Massestrom  $\dot{m}$  in der Kammer enthält. Die Vorzeichenfunktion  $\operatorname{sgn}$  erfordert der Fall  $\beta < 1$ , wenn die Reibung die Strömung in Umfangsrichtung antreibt. Das Verhältnis der Reynoldszahlen

$$\frac{Re_\varphi}{Re_r} = \frac{1}{Fr G} \quad \text{mit} \quad G = s/b \quad (62)$$

steht in Relation zur Froudezahl  $Fr$

$$Fr = \frac{c_r}{\sqrt{a_b b}} = \frac{c_r}{\Omega b},$$

wenn die gewöhnlich die Relation von Trägheits- und Gravitationskräften beschreibende Kennzahl  $Fr$  mit der radialem Komponente der mittleren Strömungsgeschwindigkeit  $c_r$  in der Kammer, der Zentrifugalbeschleunigung  $a_b = \Omega^2 b$  am Außenradius  $b$  der Kammer und dem Außenradius als maßgebliche Länge gebildet ist. Die Vernachlässigung des Reibungsterms ergibt für die Kernrotationszahl  $\beta$

$$\frac{d\beta}{dx} = -\frac{2\beta}{x} \quad \text{bzw.} \quad \beta = \frac{\beta_b}{x^2},$$

wenn bei der Integration die Konstante  $\beta_b$  als Kernrotationszahl am Außenradius für  $x = 1$  oder  $r = b$  Verwendung findet. Gleichung (60) gibt die radiale Verteilung der Umfangskomponente der mittleren Strömungsgeschwindigkeit an. Den Zusammenhang zu dem experimentell zugänglichen statischen Druck  $p$  in der Kammer liefert die Bilanz der Beschleunigungen entlang der Stromlinie erweitert um den durch die Reibung bedingten Druckverlust  $dp_v$

$$\frac{dp}{\rho} = \frac{c_u^2}{r} dr + \frac{dp_v}{\rho} \quad (63)$$

mit (42) und (40). Die durch die Zentrifugalbeschleunigung und die Reibung bedingten Druckverluste sind erheblich größer als der Einfluß der Bahnbeschleunigung  $c_{de}$ , weshalb er zur Vereinfachung keine Berücksichtigung findet. Das Einführen des relativen Radius  $x = r/b$  und des Reibungsdruckverlustes (55) ergibt zunächst

$$\frac{dp}{\rho} = \left( \frac{c_u^2}{x} + \frac{\xi b}{4s} \frac{w^3}{c_r} \right) dx \quad (64)$$

und nach Umformung und Einführung der Gleichung des idealen Gases

$$\Psi \frac{dp}{p dx} = \beta^2 x + \frac{\xi \text{Re}_\phi}{4 \text{Re}_r} x^4 \left[ 1 + \left( \frac{c_r}{w_u} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} (\beta - 1)^3 \quad \text{mit} \quad \Psi = \frac{RT}{\Omega^2 b^2}. \quad (65)$$

Eine Vereinfachung von (65) ermöglicht die Tatsache, daß für die im Anschluß beschriebenen Versuche das Geschwindigkeitsverhältnis  $c_r/w_u \leq 0,034$  ist. Der höchste Mittelwert des Verhältnisses für das betrachtete radiale Intervall beträgt 0,02, so daß das Reibungsglied durch die Vernachlässigung von  $c_r/w_u$  nur um 0,06 % zu schwach repräsentiert ist. (65) vereinfacht sich daher zu

$$\Psi \frac{dp}{p dx} = \beta^2 x + \frac{\xi \text{Re}_\phi}{4 \text{Re}_r} x^4 (\beta - 1)^3. \quad (66)$$

Das Verhältnis der Reynoldszahlen und  $\Psi$  enthalten Dichte oder Temperatur und hängen damit vom Radius bzw. von  $x$  ab. Zur Modellierung kommt eine polytrope Zustandsänderung mit Annahme eines konstanten Polytopenexponenten  $n$  zum Einsatz, wodurch (60) und (66) die Form

$$\frac{d\beta}{dx} = \frac{\xi \text{Re}_\phi}{4 \text{Re}_r} \left| \left( \frac{p}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}} x^2 \operatorname{sgn}(\beta - 1) (\beta - 1)^2 - \frac{2\beta}{x} \right| \quad \text{mit} \quad \frac{\text{Re}_\phi}{\text{Re}_r} \Big|_1 = \frac{2\pi\Omega b^3 \rho_1}{\dot{m}} \quad \text{und} \quad (67)$$

$$\Psi_1 \frac{d \left( \frac{p}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}}}{\left( \frac{p}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}} dx} = \beta^2 x + \frac{\xi \text{Re}_\phi}{4 \text{Re}_r} \left| \left( \frac{p}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}} x^4 (\beta - 1)^3 \right| \quad \text{mit} \quad \Psi_1 = \frac{\rho_1}{\Omega^2 b^2 \rho_1} \quad (68)$$

annehmen. Das Verhältnis der Reynoldszahlen und die Zahl  $\Psi$  gelten jetzt dem Zustand 1 des Gases und sind damit konstant. Dieses eindimensionale Differentialgleichungssystem hat die Variable relativer Radius  $x$ , wobei dessen Lösung das Druckverhältnis  $p/p_1$  und das Kernrotationsverhältnis  $\beta$  jeweils als gesuchte Funktion von  $x$  liefern soll.

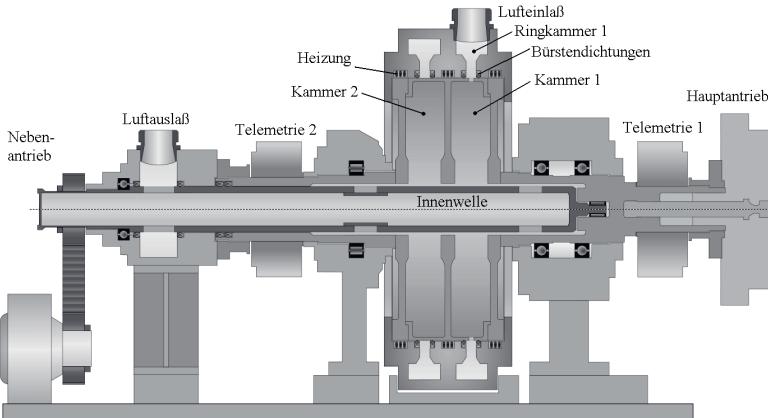
Die Integration dieses Gleichungssystems bestehend aus (67) und (68) geschieht numerisch. Freie Koeffizienten sind der Reibungsbeiwert  $\xi$ , der Polytopenexponent  $n$  und die jeweilige Integrationskonstante. Als Integrationskonstante für (67) bietet sich das Kernrotationsverhältnis eines bestimmten Radius, z. B.  $\beta_b$  für den Außenradius  $b$ , an. Für (68) kann der Gaszustand an einer Stelle, für die beispielsweise Meßwerte vorliegen, als Integrationskonstante zum Einsatz kommen.

Das als maßgebliche dimensionsfreie Kenngröße bestimmte Verhältnis der Reynoldszahlen  $\text{Re}_\phi/\text{Re}_r$  wird in Abschnitt 5.3.4 zur Auftragung der Meßdaten verwendet. Das Verhältnis enthält die veränderliche Dichte  $\rho$ , für die geeigneter Mittelwert zu berechnen ist. Dies gilt insbesondere dann, wenn integrale Werte eines Radienintervalls, z. B. Kernrotationsverhältnisse der betrachteten rotierenden Kammer aufzutragen sind. Da die Zentrifugalbeschleunigung die auf die Gasmasse wirkende maßgebliche Einflußgröße hinsichtlich der radialen Druck- und Dichteverteilung ist, liegt die Wichtung mit der Zentrifugalbeschleunigung  $= \Omega^2 b^2 x b$  bei der Dichtemittelwertbestimmung nahe. Sie liefert die Korrektur des auf Gaszustand 1 beruhenden Verhältnisses der Reynoldszahlen zu dem gewünschten integralen Kennwert mit dem Index 1. Dazu bedarf es der Multiplikation mit dem durch die beschriebene gewichtete Mittelung gewonnenen Dichteverhältnis  $\rho_1/\rho$ .

$$\frac{\text{Re}_\phi}{\text{Re}_r} \Big|_1 = \frac{\text{Re}_\phi}{\text{Re}_r} \Big|_1 \frac{\rho_1}{\rho_1} = \frac{\text{Re}_\phi}{\text{Re}_r} \Big|_1 \frac{\int_1^2 \beta^2 x \frac{\rho}{\rho_1} dx}{\int_1^2 \beta^2 x dx}. \quad (69)$$

### 5.3.3 Experimentelle Untersuchungen zum Kernrotationsverhältnis $\beta$

Zur experimentellen Untersuchung steht der *Zweikammer-Modellrotor* zur Verfügung. In der hier beschriebenen Untersuchung dient die in Bild 67 gezeigte rechte Ringkammer 1 dem radialen Lufteintritt in die rotierende Kammer 1.



**Bild 67** Zweikammer-Modellrotor [103] zur Untersuchung von Strömung und Wärmeübergang in rotierenden Kammern im Aufbau für radiale Einströmung

In die Innenwelle einzusetzende Ringe gestatten, Bohrungen wechselweise so zu verschließen, daß die Luft die rotierende Kammer 1 an deren Nabens in Richtung Haupt- oder in Richtung Nebenantrieb verläßt. Die Innenwelle ist für diese Untersuchung nicht instrumentiert.

Das aus zwei ähnlichen Teilen bestehende *Telemetriesystem* beschreibt Abschnitt 5.1. In jedem Telemetrikkörper (Bild 55) sind vier Druckaufnehmer installiert, deren Kalibrierung und Korrektur Abschnitt 5.2 darlegen. Telemetriesystem 2 erfaßt 16 und Telemetriesystem 1 mißt 32 Temperaturen mit Hilfe von Thermoelementen des Typs K.

In die interessierende Kammer 1 (Bild 67) strömt Luft in radialer Richtung durch 13 gleichmäßig über den Umfang des Kammermantels verteilte Bohrungen mit einem Durchmesser von 5 mm und mit einer Länge von 5,5 mm ein. Die Kammerbreite  $s$  nimmt in Nabennähe aus Festigkeitsgründen ab, so daß ein Spaltverhältnis  $G = s/b$  von 0,26 nahe der Innenwelle vorliegt.

**Tabelle 4** Meßstellen in Kammer 1, soweit für die beschriebene Untersuchung benötigt

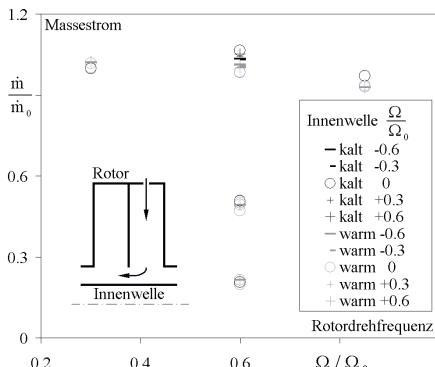
Meßstelle	relativer Radius x	Winkelanordnung	Symbol
$p_{sB04}$	0,823	270°	$p_1 = (p_{sB03} + p_{sB04})/2$
$p_{sB03}$	0,823	90°	
$p_{sB02}$	0,257	270°	$p_2 = (p_{sB01} + p_{sB02})/2$
$p_{sB01}$	0,257	90°	
$T_{IB10}$	0,823	325°	$T_1$
$T_{IB02}$	0,360	325°	$T_3$

Die Kammer 1 rechts begrenzende Scheibe trägt (Tabelle 4) vier Druck- und zwei Temperaturmeßstellen, die der hier beschriebenen Untersuchung dienen. Die zwei zur Bestimmung der *Lufttemperatur* installierten Thermoelemente des Typs K sind auf unterschiedlichem Radius angebracht. Sie hält jeweils ein etwa 1 cm langes senkrecht auf der Scheibe stehendes Stahlröhrrchen, an dessen Ende die nackte Schweißperle etwa einen Millimeter übersteht. Zur Bestimmung der Lufttemperatur aus der Temperatur des Thermoelements und der lokalen Strömungsgeschwindigkeit kommt ein Rückgewinnungsfaktor von 0,6 nach [11] zur Anwendung.

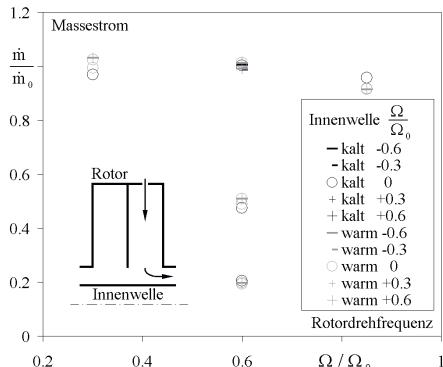
Die Meßstellen für den *statischen Druck* sind einfach redundant und unter Verwendung von Kupferrohr mit 0,8 mm Außen- und 0,5 mm Innendurchmesser ausgeführt, so daß Meßwerte für zwei Radien von jeweils zwei Druckaufnehmern beim Telemetriesystem einlaufen. Da die Sensoren in den Telemetrikkörpern angeordnet sind, bewirkt die den Druck zuführende Rohrleitung einen systematischen Fehler, der von der im starken Radialbeschleunigungsfeld auf die massebehaftete Luft in der Rohrleitung wirkenden Kraft ausgeht, die einen drehfrequenz-, druck- und temperatur-abhängigen Offset beim Druckmeßwert hervorruft.

Für die dafür nötige Druckkorrektur (31) in Abschnitt 5.2 bzw. [U5, U8] kommen für den jeweiligen Radiensprung mittlere Temperaturen zum Einsatz. Für den großen Radiensprung von  $x = 0,205$  bis  $0,823$  gemäß Tabelle 4 für den Druck  $p_1$  steht beispielsweise der Mittelwert der Meßwerte vierer auf die Oberfläche aufgeschweißter Thermoelemente zur Verfügung.

Der systematische Fehler analog Bild 61 in Abschnitt 5.2, der aus der Verwendung einer mittleren Temperatur im Vergleich zu einem radialen Temperaturverlauf für die Korrektur des Offsets, das die Gassäule in der Zuleitung zum Sensor verursacht, verbleibt, ist kleiner als 0,06 % für die höchste Drehfrequenz  $\Omega/\Omega_0 = 0,85$  dieser Untersuchung. Für abnehmende Drehfrequenzen sinkt dieser Fehleranteil deutlich.



**Bild 68** Versuchspogramm für radiale Einströmung und Abströmung in Richtung Mittelscheibe, radialer Massestrom über normierter Drehfrequenz für verschiedene Drehfrequenzen der Innenwelle und verschiedene Temperaturen, kalt  $\approx 40^\circ\text{C}$  und warm  $\approx 100^\circ\text{C}$



**Bild 69** Versuchspogramm für radiale Einströmung und Abströmung in Richtung Antrieb, radialer Massestrom über normierter Drehfrequenz für verschiedene Drehfrequenzen der Innenwelle und verschiedene Temperaturen, kalt  $\approx 40^\circ\text{C}$  und warm  $\approx 100^\circ\text{C}$

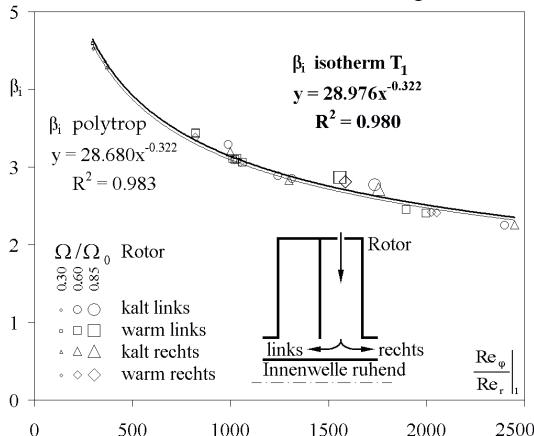
Das *Meßprogramm* für diese Untersuchung zeigen Bild 68 und Bild 69, wobei die Parameter Drehfrequenz des Rotors, Drehfrequenz der Innenwelle, radialer Massestrom durch die 13 Mantelbohrungen des Rotors, Temperatur und Abströmrichtung variiert sind.

Die Drehfrequenzen sind auf die höchste Winkelgeschwindigkeit  $\Omega_0$  des Gesamtprogramms, die einer Drehfrequenz von  $10000\text{ min}^{-1}$  entspricht, normiert. Höhere Drehfrequenzen als  $\Omega/\Omega_0 = 0,85$  können aus Erwärmungsgründen für radiale Einströmung nicht gefahren werden. Der Massestrom ist auf den höchsten Wert  $\dot{m}_0$  dieser Untersuchung normiert.

Die Messung eines Punktes dauert etwa eine halbe Stunde infolge der Mittelung von 100 Einzelmeßwerten. Für das Erreichen der thermischen Beharrung, die für alle Meßpunkte vorliegt, vergeht ein mehrfaches der vorgenannten reinen Meßzeit. Die Übergänge zwischen den Punkten thermischer Beharrung sind auch aufgezeichnet aber nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

### 5.3.4 Ergebnis

Als erstes Ergebnis sind die integralen Kernrotationszahlen aufzuführen, die aus den Druckmeßwerten anhand (48) zu berechnen sind. Dies entspricht der vereinfachten isothermen Annahme mit der Temperatur  $T_1$  (Tabelle 4). In den Gleichungen (67) und (68) des eindimensionalen Modells steht das Reynoldszahlenverhältnis  $Re_\varphi/Re_r$  als maßgebliche dimensionsfreie Kenngröße, über der die integralen Kernrotationszahlen in Bild 70 aufgetragen sind. Das Diagramm bestätigt das Reynoldszahlenverhältnis als ordnenden Kennwert, da unabhängig von Drehfrequenz und Massestrom alle Meßergebnisse etwa auf einer Linie liegen. Zudem ist erwartungsgemäß unerheblich, ob die Luft nach links oder rechts in axialer Richtung die rotierende Kammer verläßt.



**Bild 70** Integrales Kernrotationsverhältnis über Reynoldszahlenverhältnis für verschiedene Rotordrehfrequenzen und verschiedene Temperaturen am Mantel, kalt  $\approx 40^\circ\text{C}$  und warm  $\approx 100^\circ\text{C}$  und für varierte Abströmrichtung, Linien für isotherme (fett) und polytrope Berechnung (50) bzw. (69) des Kernrotationsverhältnisses, Datenpunkte nur für isotherm dargestellt, Reynoldszahlenverhältnis gemäß dem Zustand  $p_1, T_1$  (Tabelle 4)

Zur Anwendung des im Abschnitt 5.3.2 beschriebenen einfachen Modells ist die numerische Integration des Gleichungssystems (67), (68) so auszuführen, daß die Meßwerte auf den radialem Temperatur- und Druckverteilungen des Modells liegen. Der Gaszustand am Radius  $r_1$  mit der Temperatur  $T_1$  und dem Druck  $p_1$  dient als Integrationskonstante für (68). Zur Anpassung an die beiden verbleibenden Meßwerte  $p_2$  und  $T_3$  stehen der Reibungsbeiwert  $\xi$ , der Polytropenexponent  $n$  und die Integrationskonstante für (67) entsprechend dem Kernrotationsverhältnis  $\beta_b$  am Außenradius  $b$  zur Verfügung.

Um diese Unterbestimmung zu vermeiden müßte mindestens ein weiterer Druckmeßwert an anderer radialer Position verfügbar sein. In Ermangelung des zusätzlichen Meßwertes sind entweder für den Reibungsbeiwert  $\xi$  oder für die Kernrotationszahl  $\beta_b$  am Außenradius Annahmen zu treffen.

Wegen der hohen Umfangsgeschwindigkeiten sind die gemessenen Lufttemperaturen, mit Hilfe des Rückgewinnungsfaktors  $r_f$  anhand

$$T_{f1} = T_1 - r_f \frac{c_{ul}^2}{2c_p} \quad (70)$$

zu korrigieren, wobei die gemessene Temperatur  $T_1$  in Abhängigkeit von der zugehörigen Umfangsgeschwindigkeit  $c_{ul}$  gemindert wird. Die Vernachlässigung des radialen Geschwindigkeitsanteils, der viel kleiner als die Umfangskomponente ist, stellt keine signifikante Ungenauigkeit dar.

Aus dem Schrifttum z. B. [43] ist bekannt, daß bei radialer Einströmung die Umfangskomponente höchstens die Umfangsgeschwindigkeit des Rotors erreicht, vorausgesetzt die Zuströmung zum Rotor erfuhr keine maßgebliche Vorbeschleunigung. Die volle Umfangsgeschwindigkeit entsprechend  $\beta = 1$  erreicht die Strömung bei Eintritt durch poröses Material [43], während ihr das durch

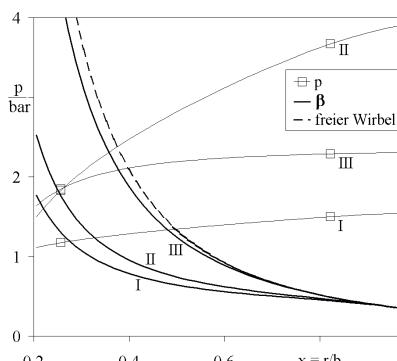
Bohrungen nicht gelingt. Die Annahme  $\beta = 1$  am Rotormantel bzw.  $\beta_b = 1$  für radiale Zuströmung ist daher ein Grenzfall.

Um für den Reibungsbeiwert eine Annahme zu treffen, dient die zuvor erwähnte Randbedingung  $\beta_b \leq 1$  und die Vermutung, daß turbulente Strömung vorherrscht. Nach [46] ist der Reibungsbeiwert dann unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit. Zusammengenommen bietet sich daher als zweiter zu betrachtender Modelfall ein Wert  $\xi = \text{konst. an}$ , für den das Modell  $\beta_b \leq 1$  liefert. Für den hier beschriebenen Fall wurde  $\xi = 0,005$  aus dem  $\lambda - \text{Re}$  bzw.  $\xi - \text{Re}$  - Schaubild für Rohrreibung [46] abgelesen.

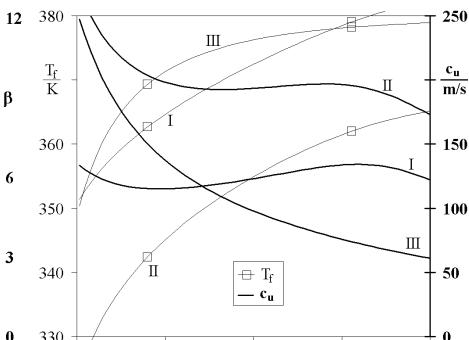
**Tabelle 5** Meß- und Kennwerte dreier im Detail untersuchter Fälle gemäß Bild 71 und Bild 72 für die Annahme  $\beta_b = 1$  sowie gemäß Bild 75 und Bild 76 für die Annahme  $\xi = 0,005$

Fall	$\frac{\dot{m}}{\dot{m}_0}$	$\frac{\Omega}{\Omega_0}$	$\beta_b$	$\xi$	n	$\beta_i$ (48)	$\beta_i$ (50)	$\frac{Re_\phi}{Re_{r,  }}$	$\frac{Re_\phi}{Re_{r,  }}$
I	0,2	0,6	1	0,045	1,34	2,42	2,38	2024	1855
II	0,9	0,85		0,036	1,14	2,81	2,75	1587	1194
III	1,0	0,3		0,009	1,30	4,52	4,46	299	275
I	0,2	0,6	0,45	0,005	1,80	2,42	2,36	2023	1897
II	0,9	0,85	0,57		1,30	2,81	2,70	1584	1238
III	1,0	0,3	0,97		1,33	4,52	4,46	299	276

Zur Illustration dienen drei Fälle gemäß Tabelle 5 für variierten Durchsatz und unterschiedliche Drehfrequenzen. Die Fälle sind so gewählt, daß das als maßgebliche dimensionsfreie Kenngröße isolierte Reynoldszahlenverhältnis  $Re_\phi/Re_r$  den im Rahmen der Messungen untersuchten Bereich dieser Kenngröße abdeckt.



**Bild 71** Telemetrische Meßwerte des statischen Drucks  $p$  mit vom Modell geliefertem Druckverlauf und radialer Verlauf des Kernrotationsverhältnisses  $\beta$  jeweils für drei Fälle (Tabelle 5) mit  $\beta_b = 1$ , zugehörige Temperatur- und Umfangsgeschwindigkeitsverläufe siehe Bild 72



**Bild 72** Telemetrische Meßwerte der Lufttemperatur  $T_f$  mit vom Modell geliefertem Temperaturverlauf und radialer Verlauf der Umfangsgeschwindigkeit  $c_u$  jeweils für drei Fälle (Tabelle 5) mit  $\beta_b = 1$ , zugehörige Druck- und Kernrotationszahlverläufe siehe Bild 71

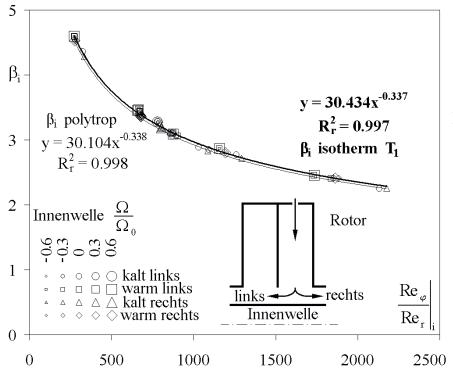
Ausgehend von dem zuvor angeführten Grenzfall, der von der Annahme  $\beta = 1$  am Rotormantel bzw.  $\beta_b = 1$  ausgeht, liefert das eindimensionale Modell (Abschnitt 5.3.2) Druck-, Kernrotationsverhältnis-, Temperatur- und Umfangsgeschwindigkeitsverläufe, die sich in beschriebener Weise

auf die jeweils zwei radial verteilten Druck- und Lufttemperaturmeßwerte stützen. Die Darstellungen aller drei Fälle enthalten Bild 71 und Bild 72.

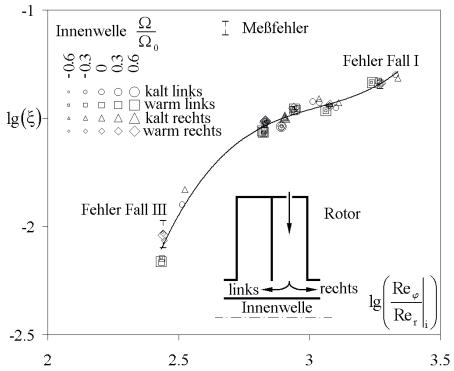
Die im Bild 71 erkennbare Modellannahme  $\beta_b = 1$  führt zu einer zu hoch angesetzten Umfangsgeschwindigkeit der Zuströmung, wodurch das Modell immer Umfangskomponenten der Luftströmung liefert, die die der Rotorscheiben übersteigt. Die Reibung bremst die Strömung daher an jeder radialen Position.

Die Anpassung von (67) und (68) an die Meßwerte durch Variation des Polytropenexponenten  $n$  und des Reibungsbeiwertes  $\xi$  für die Modellannahme  $\beta_b = 1$  liefert die Werte  $n, \xi$  als Ergebnis. Trotz der genannten Unzulänglichkeit der Annahme liefert das Modell Reibungsbeiwerte, die hinsichtlich der Größenordnung möglich erscheinen, und die das Reynoldszahlenverhältnis  $Re_\varphi/Re_r$  in der Darstellung gut entlang einer Kurve sortiert (Bild 74).

Bild 73 zeigt analog Bild 70 das integrale Kernrotationsverhältnis, wobei Bild 73 die Daten aller hier beschriebener Messungen enthält und die Rotordrehfrequenz zu Gunsten der Drehfrequenz der Innenwelle nicht als Parameter im Diagramm erkennbar ist. Außerdem verbessert die Auftragung über dem integralen Verhältnis der Reynoldszahlen (69) die Sortierung der Meßwerte entlang einer Kurve. Ein Einfluß der Drehfrequenz der Innenwelle besteht nicht (Bild 74).



**Bild 73** Integrales Kernrotationsverhältnis über integralem Reynoldszahlenverhältnis für verschiedene Rotor-, Innenwellendrehfrequenzen und verschiedene Temperaturen, kalt  $\approx 40^\circ\text{C}$  und warm  $\approx 100^\circ\text{C}$  und für variierte Abströmrichtung, Linien für **isotherme** und polytropische Berechnung des Kernrotationsverhältnisses nach (48) und (50), Datenepunkte nur nach isothermer Rechnung, integrales Reynoldszahlenverhältnis (69) unter der Modellannahme  $\beta_b = 1$ , Meßunsicherheit nicht größer als Symbolgröße



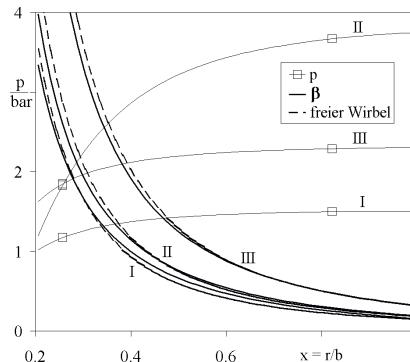
**Bild 74** Reibungsbeiwert  $\xi$  über integralem Reynoldszahlenverhältnis für verschiedene Rotor-, Innenwellendrehfrequenzen und verschiedene Temperaturen, kalt  $\approx 40^\circ\text{C}$  und warm  $\approx 100^\circ\text{C}$  und für variierte Abströmrichtung, integrales Reynoldszahlenverhältnis (69), Reibungsbeiwert  $\xi$  und Polytropenexponent als Koeffizienten von (67) und (68) zur Anpassung des Modells an die Meßwerte unter der Annahme  $\beta_b = 1$ , zugehörige Kernrotationsverhältnisse siehe Bild 73, Einfluß der Meßunsicherheit auf den Reibungsbeiwert siehe Fehlerbalken für die Fälle I und III, für Fall II Unsicherheit < Symbolgröße

Für die komplementäre *Annahme*  $\xi = 0,005$  für den Reibungsbeiwert liefert das Modell (Abschnitt 5.3.2) durch Anpassung von (67) und (68) an die Meßwerte durch Variation von Polytropenexponent  $n$  und Kernrotationsverhältnis am Rotormantel  $\beta_b$  radiale Verläufe für Druck und Kernrotationsverhältnis sowie für Temperatur und Umfangsgeschwindigkeit (Bild 75, Bild 76). Ergebnis sind der Polytropenexponent und das Kernrotationsverhältnis am Rotormantel  $\beta_b$ .

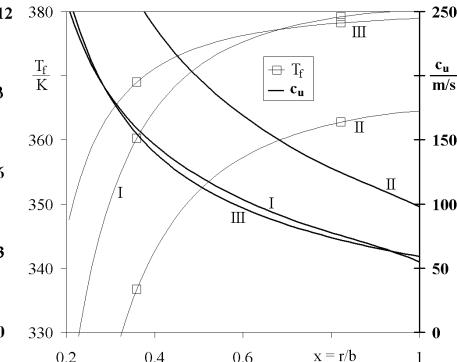
Die Vergleiche von Bild 71 mit Bild 75 und von Bild 72 mit Bild 76 zeigen die Verschiedenheit beider Annahmen. Während die Strömung wegen der gewählten Annahme  $\beta_b = 1$  (Bild 71, Bild 72) bei Kammereintritt immer mindestens die Umfangsgeschwindigkeit der Rotorscheiben

hat, liegt für die andere Annahme (Bild 75, Bild 76) bei Kammereintritt eine geringere Umfangskomponente im Vergleich zum Rotor vor. So wirkt die Reibung für die Annahme  $\xi = 0,005$  (Bild 75, Bild 76) im äußeren Kammerbereich beschleunigend und weiter innen, wenn die Strömung die Kammer „überholt“ hat verzögernd auf die Strömung in Umfangsrichtung.

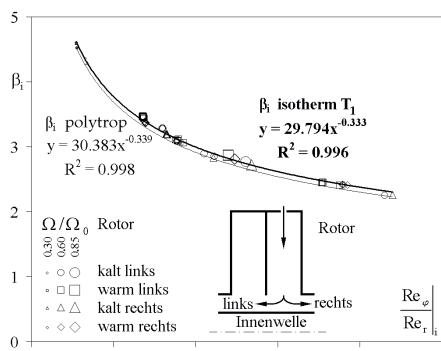
Die Interpretation mit der Annahme  $\xi = \text{konstant}$  ist wirklichkeitsnäher als die Interpretation auf Basis der Annahme  $\beta_b = 1$ . Die auf der Annahme  $\xi = 0,005$  beruhende Darstellung der integralen Kernrotationsverhältnisse analog Bild 70 und Bild 73 zeigt Bild 77.



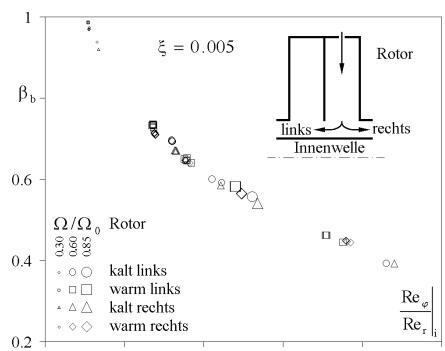
**Bild 75** Telemetrische Meßwerte des statischen Drucks  $p$  mit vom Modell geliefertem Druckverlauf und radialer Verlauf des Kernrotationsverhältnisses  $\beta$  jeweils für drei Fälle (Tabelle 5) mit  $\xi = 0,005$ , zugehörige Temperatur- und Umfangsgeschwindigkeitsverläufe siehe Bild 76



**Bild 76** Telemetrische Meßwerte der Lufttemperatur  $T_f$  mit vom Modell geliefertem Temperaturverlauf und radialer Verlauf der Umfangsgeschwindigkeit  $c_u$  jeweils für drei Fälle (Tabelle 5) mit  $\xi = 0,005$ , zugehörige Druck- und Kernrotationszahlverläufe siehe Bild 75



**Bild 77** Integrales Kernrotationsverhältnis über integralem Reynoldszahlenverhältnis für verschiedene Rotordrehfrequenzen und verschiedene Temperaturen, kalt  $\approx 40^\circ\text{C}$ , warm  $\approx 100^\circ\text{C}$  und für varierte Abströmrichtung, Linien für isotherme und polytropen Berechnung des Kernrotationsverhältnisses nach (48) und (50), Datenpunkte aus isothermer Rechnung, integrales Reynoldszahlenverhältnis nach (69) für Annahme  $\xi = 0,005$



**Bild 78** Kernrotationsverhältnis am Rotormantel  $\beta_b$  über integralem Reynoldszahlenverhältnis für verschiedene Rotordrehfrequenzen, verschiedene Temperaturen, kalt  $\approx 40^\circ\text{C}$ , warm  $\approx 100^\circ\text{C}$  und für varierte Abströmrichtung, integrales Reynoldszahlenverhältnis nach (69), Kernrotationsverhältnis am Rotormantel  $\beta_b$  und Polytropenexponent als Koeffizienten von (67) und (68) zur Anpassung des Modells an die Meßwerte für Annahme  $\xi = 0,005$ , zugehörige integrale Kernrotationsverhältnisse siehe Bild 77

### 5.3.5 Wertung

Das herangezogene Differentialgleichungssystem bestehend aus (67) und (68) enthält das Reynoldszahlenverhältnis  $Re_\phi/Re_r$  als maßgebliche Ähnlichkeitskenngröße. Unabhängig von einer spezifischen Lösung, die der Interpolation von Meßdaten genügt, fallen die Meßwerte (isotherm, Bild 70) mit geringer Abweichung auf eine Linie. Eine spezifische Lösung des Gleichungssystems ist dafür nicht erforderlich bzw. die sortierende Wirkung ist unabhängig davon.

Die Berücksichtigung der veränderlichen Dichte (69) (vgl. Bild 70 mit Bild 73 o. Bild 77) verbessert die sortierende Wirkung von  $Re_\phi/Re_r$ , macht aber von der Lösung Gebrauch. Der Einfluß des verwendeten Verlaufs des Kernrotationsverhältnisses hat trotz des Unterschieds von Bild 71 und Bild 75 wenig Einfluß auf die Paßgenauigkeit der Meßwerte zur Kurve, wie der Vergleich der zugehörigen Darstellungen von Bild 73 und Bild 77 zeigt.

Trotz der *gut konzentrierten* Lage entlang einer Kurve der aus den Meßwerten berechneten Punkte in Bild 78 ist zu berücksichtigen, daß dieses Ergebnis Begrenzungen wegen der getroffenen Annahmen unterliegt. So wiegt die Annahme einer im Mittel eindimensionalen turbulenten Strömung mit dem Reibungsbeiwert  $\xi = 0,005$  schwer. Zudem verliert die Vernachlässigung des Reibungseinflusses der Radialkomponente der Strömungsgeschwindigkeit mit steigendem radialen Durchsatz, entsprechend hoher  $Re_r$  (Bild 78) bzw.  $Re_\phi/Re_r$  gegen null gehend, zunehmend an Rechtfertigung.

Zur Auswertung des Differentialgleichungssystems sind einige Annahmen nur deshalb erforderlich, da nicht genügend radial verteilte Meßstellen installiert waren. Dies kann bei anschließenden Arbeiten Berücksichtigung finden.

### 5.3.6 Zusammenfassung

Die telemetrische Druckmessung in rotierenden Maschinenstrukturen gestattet anhand geeigneter Modellierung die Untersuchung der Strömung für Anwendungen, bei denen optische Verfahren prinzipiell oder wegen mangelnder optischer Zugänglichkeit versagen. Die telemetrische Druckmessung kann daher über das Druckmeßergebnis hinaus den Stellenwert einer komplementären oder ergänzenden Meßtechnik zu optischen Verfahren mit direktem Zugang zur Strömungsgeschwindigkeit erreichen, wenn die Instrumentierung eine hinreichende Meßstellenanzahl für die Modellierung ermöglicht, wobei eine höhere Meßstellenanzahl die Unsicherheit für die Modellierung reduziert und darüber hinaus eine grundsätzliche Überprüfung des Ansatzes ermöglicht.

Die anhand der einfachen eindimensionalen Modellierung der radialen Durchströmung isolierte dimensionsfreie Kennzahl  $Re_\phi/Re_r$  sortiert die Meßergebnisse in der Darstellung entlang einer Kurve. Dies trifft für die varierten und maßgeblichen Versuchsparameter radialer Durchsatz, Temperatur und Rotordrehfrequenz zu. Die variierte Abströmrichtung in der betrachteten rotierenden Kammer hat erwartungsgemäß keinen maßgeblichen Einfluß.

Unerwartetes Ergebnis ist der als nicht nennenswert registrierte Einfluß von Drehfrequenz und Drehrichtung der Innenwelle.

## 5.4 Einordnung

Für eine Einordnung der in diesem Abschnitt 5 dargestellten Meßaufbauten in die im Abschnitt 3 dargelegte Systematisierung werden beide Kriterien (Bild 2 S. 8)

- Bewegung und Übertragung (Abschnitt 3.1) sowie
- Anordnung der Trennstelle in der Meßkette (Abschnitt 3.2)

herangezogen.

Beide Meßaufbauten (Abschnitte 5.2 und 5.3) nutzen das in Abschnitt 5.1 beschriebene Telemetriesystem. Hinsichtlich des Kriteriums *Bewegung und Übertragung* liegt eine *Rotationsbewegung* vor, während die Übertragung von Hilfsenergie und Information aus konstruktiven Gründen auf *radialer Position* erfolgen muß, woraus eine kombiniert rotatorische und translatorische Relativbewegung resultiert.

Dieser Bedingung folgend muß der Übertragungsbereich zur Realisierung einer kontinuierlichen Übertragung so beschaffen sein, daß für jeden Rotordrehwinkel sowohl Hilfsenergie als auch Information die Trennstelle zwischen bewegtem und ruhendem Maschinenteil passieren können.

Ausgehend von diesen Randbedingungen hinsichtlich der vorliegenden Bewegung kommt das *Übertragungsprinzip Feld* zur Überwindung der Trennstelle zum Einsatz. Sowohl die Hilfsenergie- als auch die Informationsübertragung erfolgt per magnetischem Wechselfeld. Die Kanaltrennung von Hilfsenergie- und Informationstransport geschieht durch Wahl verschiedener Frequenzen. Um eine kontinuierliche Übertragung auf radialer Position zu ermöglichen, werden konzentrisch zueinander angeordnete Übertragungswicklungen auf der Welle bzw. ruhend verwendet.

Hinsichtlich der *Anordnung der Trennstelle* in der Meßkette (Abschnitt 3.2, Tabelle 1) sind die hier beschriebenen Anwendungen im Sinne der Systematisierung Abschnitt 3.2.5 „Aktive digitale Technik“ zugeordnet. Dabei fahren alle Teile der Meßkette (Abschnitt 2.1) beginnend beim *Meßeffekt* bis zur *Digitalisierung* auf dem bewegten Maschinenteil mit. Wesentliche Vorteile der aktiven digitalen Technik wie z. B. die Möglichkeit der fehlerfreien Übertragung (Prüfsumme, Abschnitt 3.2.5) mit frei wählbarer nicht prinzipiell durch die Übertragung begrenzter Auflösung und Kanalanzahl werden genutzt.

Abschließend ist einzuschätzen, daß die dargestellten Realisierungen auch heute prinzipiell noch aktuell sind. Die Verwendung modularer digitaler Technik mit Erweiterungs- bzw. Modifikationsmöglichkeit und mit moderatem Reparaturaufwand im Falle des Versagens einzelner Bestandteile hat sich bewährt. Diese Prinzipien sind daher Ausgangspunkt für weitere Aktivitäten. Verbesserungspotential besteht hinsichtlich der Betriebssicherheit von Übertragung, Installation und teils auch der Instrumentierung.

## 6 Messungen mit komplexem Telemetriesystem

Dieser Abschnitt beinhaltet Messungen, die im Sinne der Systematisierung des Abschnitts 3.2 „Anordnung der Trennstelle in der Meßkette“ die Trennung von bewegtem und ruhendem Teil der Meßkette nach der Zwischenspeicherung haben (Abschnitt 3.2.6).

Aufbau und Besonderheiten eines Telemetriesystems, für das deutlich andere Anforderungen im Vergleich zum im Abschnitt 5 thematisierten System bestehen, umreißt dieser Abschnitt. Während dort einige Druck- und möglichst viele Temperaturmeßstellen auf Basis von Thermoelementen mit geringer zeitlicher Auflösung und bester Meßunsicherheit der Temperaturmeßstellen gefordert waren, gilt es für das hier thematisierte System, neue Sensorik zu integrieren, komplexe Meßabläufe zu steuern und zeitliche Auflösung mehrkanalig zu realisieren, um Untersuchungen bis in den akustischen Bereich hinein möglich zu machen. Die Nutzung des hier Grundlage bildenden Telemetriesystems erfolgte einige Jahre nach Durchführung der Arbeiten zu Abschnitt 5.

Nach einem ersten Unterabschnitt, der u. a. Einblicke in die Funktionsweise des Telemetriesystems gewährt, thematisieren nachfolgende Unterabschnitte Vor- und Erprobungsarbeiten, die eine anschließende wissenschaftliche Nutzung des Telemetriesystems erfordert. Dazu zählt auch die Erprobung einer Meßtechnik zur Bestimmung von Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK).

Die Ergebnisse der telemetrischen Messungen im Vorhaben AG Turbo 2020 3.1.3 „Wärmeübergang in verzweigten, rotierenden Kavitäten“ [105] am Kühlluftmodellrotor- Versuchsstand sind u. a. Gegenstand einer Dissertation, die der Autor mitbetreute.

### 6.1 Prinzipieller Aufbau eines digitalen Telemetriesystems mit Zwischenspeicher

Dieser Abschnitt vergleicht das am Zweikammer- Modellrotor (Abschnitt 5) verwendete System mit dem für den Kühlluftmodellrotor realisierten und gibt Auskunft über dessen prinzipiellen Aufbau. Wesentlich sind die geänderte Einbausituation am für das neue System vorgesehenen *Kühlluftmodellrotor*<sup>5</sup> einerseits und die verschiedenen Meßaufgaben andererseits.

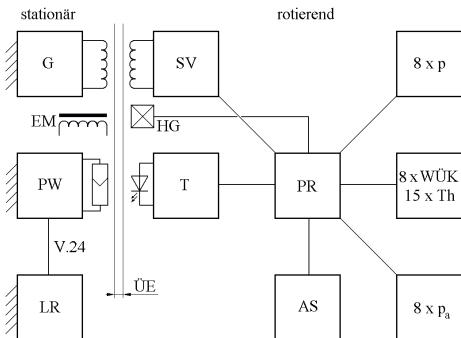
Der *Vergleich der Telemetriesysteme* betrachtet deren Einbausituation hinsichtlich von Bewegung und Übertragung (Abschnitt 3.1). An beiden Anlagen liegt eine Drehbewegung vor, wobei am Kühlluftmodellrotor ein *freies Wellenende* die Übertragung vereinfacht.

Beim *Zweikammer- Modellrotor* (Bild 6 und Bild 67) muß die Übertragung aus konstruktiven Gründen auf einer radialen Position ( $Radius > 0$ ) erfolgen, wodurch die Relativbewegung dort eine Kombination von Rotation und Translation ist. Dies erschwert die Nutzung eines separaten optischen Datenkanals und führt letztlich zu einer integralen induktiven Übertragung von Hilfsenergie und Daten über dieselben Wicklungen (Abschnitt 5.1). Die Trennung der hinsichtlich Übertragungsleistung um mehrere Größenordnungen unterschiedlichen Hilfsenergie- und Datensignale bereitete dabei Probleme, die häufige Nachjustierungen der Systemkomponenten erfordert.

Das neue System kann die Hilfsenergie in gleicher Weise induktiv auf radialer Position im Gegensatz dazu jedoch separat vom Datenkanal übertragen. Im Wellenmittelpunkt liegt als Relativbewegung eine reine Rotation vor, was die optische Datenübertragung dort vereinfacht und überdies höhere Datenraten ermöglicht. Diffizile Einstellarbeiten beim Start des Systems erübrigt diese Kanaltrennung.

---

<sup>5</sup> Der Autor dankt Herrn Heinz Kluttig für die konstruktive Unterstützung der Arbeiten, die auch jenseits seines Renteneintritts Fertigstellung und Betrieb der Versuchsanlagen sichern half.



**Bild 79** Funktionsstruktur des Telemetriesystems mit Generator G, Spannungsversorgung SV, Prozeßbrechner PR, Arbeitsspeicher AS, Treiber T, Pegelwandler PW, Laborrechner LR, Elektromagnet EM und Hallgeber HG sowie den Sensoren bzw. Meßmodulen für Druck (8 x p, 8 x p<sub>a</sub> für akustische Messung) und Thermistoren, WÜK- Sensoren (8 x WÜK, 15 x Th), s. Text, Übertragungsentfernung ÜE



**Bild 80** Telemetrikkörper zum Einbau verschiedener Elektronikmodule bzw. zur mantelseitigen Montage von Drucksensoren, Foto mit gesteigertem Kontrast



**Bild 81** Telemetriekörper am oberen Wellenende des noch nicht geschlossenen Kühlluftmodellrotors für Versuchsbetrieb bei bis über  $9000 \text{ min}^{-1}$ , unterhalb des Telemetriekörpers Laufscheibe I mit verschiedenen Bohrungen und den 8 installierten WÜK-Sensoren mit je 4 Stück auf zwei gegenüberliegenden Winkelpositionen, Foto mit gesteigertem Kontrast

Auch hinsichtlich der Anordnung der Trennstelle (Abschnitt 3.2) in der Meßkette sind die Telemetriesysteme der beiden Versuchsanlagen zu unterscheiden. Während der Zweikammer-Modellrotor mit einem einfachen digitalen System ohne Zwischenspeicherung maßgeblicher Meßdatenmengen auskommt (Abschnitt 3.2.5), nutzt das Telemetriesystem des Kühlluftmodellrotors einen erweiterten Arbeitsspeicher (Bild 79), um 51600 Datensätze zur akustischen Druckmessung zwischenzuspeichern (Abschnitt 3.2.6). Dies ist erforderlich, da die akustischen Druckmessungen (Abschnitt 6.2) die Datenrate des Datenkanals (u. a. V.24) übersteigen.

Die Funktionsstruktur des am Kühlluftmodellrotor eingesetzten Systems zeigt Bild 79. Ein Prozeßrechner PR mit Arbeitsspeicher AS sammelt über ein digitales Bussystem die Meßwerte von verschiedenen Sensoren bzw. Meßbaugruppen ein. Die eingesammelten Meßwerte gelangen zum Treiber T, der ein optisches Signal an den ruhenden Empfänger nebst Pegelwandler PW übermittelt. Dieser Pegelwandler liefert das dann normgerechte Schnittstellensignal an den Laborrechner LR. Die Versorgung des Telemetriesystems mit Hilfsenergie gewährleistet der Generator G, dessen Ausgangssignal induktiv die rotierende Spannungsversorgung SV speist, welche die Hilfsenergie in die benötigte Form bringt.

Wegen der Unterschiedlichkeit der realisierten Meßtechnik (Bild 79) muß das Telemetriesystem verschiedene Betriebsarten beherrschen. Zunächst gibt es einen Modus, der alle Meßstellen mit 23 Hz Abtastrate abfragt. Diese Abtastrate resultiert aus der Begrenzung der Übertragungsdatenrate, da diese Betriebsart kontinuierlich ohne Zwischenspeicherung von maßgeblichen Meßdatenmengen arbeitet.

Für die Bestimmung von Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK, s. Abschnitt 6.3) gibt es eine weitere Betriebsart, in die das System zyklisch wechselt. In diesem Modus fragt der Prozeßrechner nur die Meßstellen, die eine Bestimmung der WÜK an betreffender Position benötigt. Dieser komplexe Meßablauf (Abschnitte 6.3 und 6.4) nutzt den Arbeitsspeicher bei veränderlicher Abtastrate. Die Übertragung der Meßdaten erfolgt nachträglich.

Den Übergang in die Betriebsart zur akustischen Druckmessung ( $8 \times p_a$ , Bild 79) kann ein Schaltbefehl an das Telemetriesystem vom ruhenden System aus initiieren. In diesem Modus fragt der Prozeßrechner nur diese Drucksensoren mit einer Auflösung von 8 Bit und einer Abtastrate von 8777 Hz ab. Zudem wird das Drehgebersignal, das der Elektromagnet EM und der Hallgeber HG gemeinschaftlich dem Prozeßrechner PR bereitstellen (Bild 79), erfaßt. Nachdem der Arbeitsspeicher mit 51600 Datensätzen gefüllt ist erfolgt die Übertragung.

Mit Ausnahme der akustischen Druckmessung kommen ausschließlich 16 Bit ADU zum Einsatz. Weitere Details zur Instrumentierung enthalten die nachfolgenden Abschnitte jeweils spezifisch nach Erfordernis (z. B. Abschnitt 6.4.1).

Bild 80 zeigt ein Foto des Telemetrikörpers, der die verschiedenen Elektronikmodule und auch Drucksensoren aufnimmt. Bild 81 zeigt das fertige Telemetriesystem im eingebauten Zustand bei noch geöffnetem Kühlluftmodellrotor.

## 6.2 Akustische Messungen im rotierenden Ringraum

Im Sekundärluftsystem von Gasturbinen strömt die Kühlluft vom rotierenden ins stationäre System und umgekehrt. Von der Rotationssymmetrie abweichende Strömungswiderstände erzeugen Druckschwankungen, die den akustischen Bereich erreichen. Dabei ist sicherzustellen, daß die zu erwartenden Amplituden die Druckdifferenz zwischen Heißgaspfad und Kühlsystem nicht überschreiten, um Heißgaseinbruch zu vermeiden.

Dieser Abschnitt beschreibt die Realisierung akustischer Messungen im rotierenden Aufbau. Leider sind diese Aktivitäten nicht hinreichend lange betrieben worden und daher in der Ergebnisqualität nicht soweit, daß sie eine Dissertation zu speisen vermochten. Thematik und meßtechnische Realisierung beherbergen jedoch ausreichend Potential in dieser Richtung und ergänzen diese Arbeit in systematischer Hinsicht. Die hier präsentierten Inhalte sind anteilig in [U13] publiziert, und dieselbe Technik ermöglichte die in [U20] beschriebenen Arbeiten.

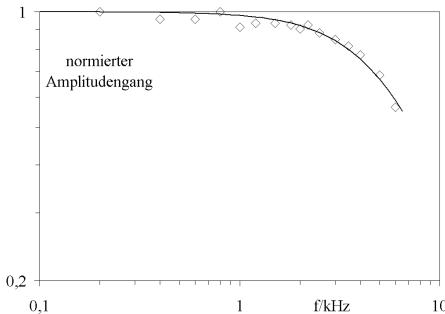
Für die Charakterisierung einer Meßkette zur Druckmessung im rotierenden System bis in den akustischen Bereich hinein gilt es, über die Kalibrierung gegen Druck, Fliehkraft bzw. Beschleunigungseinflüsse (Abschnitt 5.2) und ggf. Temperatur (Abschnitt 6.4.1) hinaus, den Frequenz- und eventuell auch den Phasengang zu bestimmen.

Die Bestimmung des Frequenzgangs eines Drucksensors geschieht häufig durch die Bereitstellung eines hinreichend bekannten Schallfelds, wobei das entweder ein kalibriertes Vergleichsinstrument oder einen Aufbau mit meßbarer oder bekannter Kolbenbewegung (Pistonfon) erfordert. Diese Vorgabe mechanischer Bewegungen ist besonders hinsichtlich erreichbarer Frequenzen begrenzt.

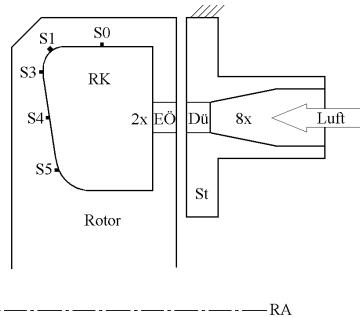
Eine vergleichsweise einfache Möglichkeit der Bestimmung des Frequenzgangs eines Drucksensors mit Membran besteht in der Nutzung der Membranmasse. Diese macht den Druckaufnehmer sensitiv gegen Beschleunigung (Abschnitt 5.2), wodurch Schwingtisch und Referenzbeschleunigungssensor den Frequenzgang zu bestimmen ermöglichen. Voraussetzung ist dabei, daß der Sensor der Beschleunigungsbelastung insgesamt standhält, was für rotierende Aufbauten aber ohnehin

im Pflichtenheft steht. Die Schwierigkeit der Bereitstellung eines zur Kalibrierung geeigneten Schallfeldes entfällt, während ein Schwingtisch mit kalibriertem Beschleunigungssensor zu mäßigen Kosten verfügbar ist.

Bild 82 zeigt einen normierten Amplitudengang eines im später rotierenden Aufbau verwendeten Sensortyps. Der Sensor gelangte dafür neben einem Beschleunigungssensor auf den Schwingtisch, der je Frequenzwert auf etwa  $100 \text{ m/s}^2$  Amplitude eingestellt wurde. Die vom Hersteller angegebene Ansprechzeit von  $\leq 1 \text{ ms}$  ist bestätigt. Für die Anbindung an das Telemetriesystem kommt am Eingang des ADU noch ein weiterer Tiefpaß hinzu, um höhere Frequenzanteile zur Vermeidung von Abtastfehlern stärker zu dämpfen.



**Bild 82** Normierter Amplitudengang eines Drucksensors aufgetragen über der Anregungsfrequenz  $f$  des Schwingtisches bei einer Anregungsbeschleunigung von  $100 \text{ m/s}^2$ , Tiefpaß zweiter Ordnung als Linie zum Vergleich eingetragen



**Bild 83** Versuchsaufbau mit um Rotationsachse RA rotierender Ringkammer RK mit zwei Einlaßöffnungen EÖ, Stator St mit acht Düsen Dü beaufschlagt mit Druckluft, acht telemetrische Drucksensoren S0 bis S7 (Tabelle 6), Düsen und Einlaßöffnungen gleichmäßig über den Umfang verteilt, Anregung infolge Rotation mit Düsen-, Einlaß- überlauffrequenz (8x je Umdrehung, Bild 85)

Die stationäre Kalibrierung erfolgt analog Abschnitt 5.2, wobei eine lineare Approximation für die verwendete 8 – Bit- Auflösung genügt. Die Korrektur der Fliehkräftewirkung tritt hier in den Hintergrund, da nur die Wechseldrücke betrachtet werden.

**Tabelle 6** Sensorpositionen im rotierenden Ringraum für statische Druckmessung (Bild 83)

Sensorbenennung	Radius/m	Winkel/° Umfangposition	Winkel/° => Lage der Druckmeßbohrung
S0	0,170	337,5	90
S1	0,167	315,0	45
S2	0,170	292,5	90
S3	0,160	270,0	0
S4	0,130	247,5	0
S5	0,095	225,0	0
S6	0,170	157,5	90
S7	0,170	112,5	90

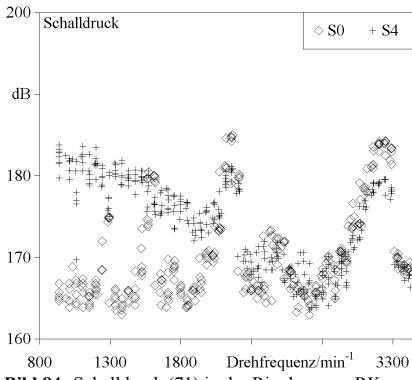
Bild 83 zeigt den *Versuchsaufbau* mit der rotierenden Ringkammer RK schematisch. Sie wird über den Stator St mit Druckluft gespeist. Dazu besteht der Stator aus einer Ringplatte und acht Düsen Dü, welche über einen Luftverteiler mit abgeglichenem Druckverlust aller acht Zweige mit der Luftversorgung via Motorstellventil und DN50 Blendenmeßstrecke verbunden sind.

Den Rotor nebst Telemetriesystem trägt eine Spindel (Bild 56, Bild 62), die ein Drehstromasynchronmotor mit Zahnirementrieb in Drehung versetzt. Die Drucksensoren sind in den Rotor von außen eingesetzt, und die Meßbohrungen (Bild 83) enden in der Ringkammer. Die Lage der Sensoren S0, S2, S6 und S7 (Tabelle 6) unterscheiden sich nur hinsichtlich der Umfangsposition, weshalb Bild 83 nur S0 zeigt. Um akustische Messungen zu ermöglichen, ist sicherzustellen, daß die Zuführung des Drucks zum Sensor das Übertragungsverhalten bzw. den Frequenzgang der Meßkette nicht beeinträchtigt. Dies geschieht hier durch Minimierung des Zuführungsweges, weshalb die Sensoren 3 mm hinter der Begrenzungsfäche der Ringkammer sitzen, während Bohrungen mit Ø 1,5 mm die Verbindung zum Ringraum bilden.

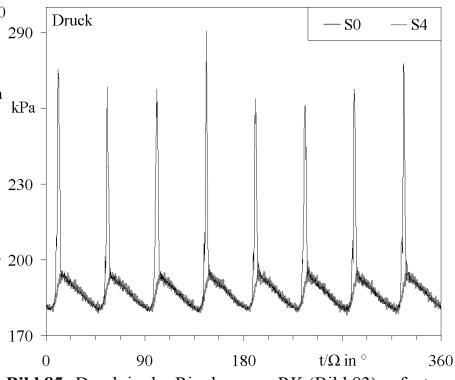
Der Meßbetrieb erfolgt entweder mit niedriger Abtastrate kontinuierlich oder mit 8777 Hz diskontinuierlich (Abschnitt 6.1). Für die Suche nach interessanten Drucksituationen in der Ringkammer genügt es zunächst, die Drehfrequenz und damit die Anregungsfrequenz zu variieren, und dabei die Differenz zwischen höchstem und niedrigstem Druckmeßwert aus einer Reihe von Meßwerten zu bilden, sowie dies in Schalldruck(pegel)

$$L_p = 20 \lg \left( \frac{p_{\max} - p_{\min}}{20 \mu\text{Pa}} \right) \quad (71)$$

mit genannter Druckdifferenz  $p_{\max} - p_{\min}$  und Vergleichsschalldruck 20  $\mu\text{Pa}$  für die Hörschwelle umzurechnen und aufzutragen (Bild 84). Für diese Aktivität genügt die kontinuierliche Messung mit niedriger Datenrate, da noch keine Frequenzen und Phasenlagen interessieren.



**Bild 84** Schalldruck (71) in der Ringkammer RK (Bild 83) aufgetragen über der Rotordrehfrequenz für zwei Drucksensoren S0 und S4, Schalldruck berechnet aus der Differenz von Maximal- und Minimalwerten der jeweiligen Sensoren, zur Suche von Resonanzen



**Bild 85** Druck in der Ringkammer RK (Bild 83) aufgetragen über der winkelgeschwindigkeitsbezogenen Zeit (Winkel, eine Rotordrehung) für zwei Drucksensoren S0 und S4, bei  $\Omega = 42,2 \text{ rad/s}$  bzw. Drehfrequenz  $403 \text{ min}^{-1}$ , große Ausschläge von S4 infolge Füllvorgang, S4 gegenüber Einlaß, Darstellung auf Basis c2- stetigem Spline durch 1305 bzw. 1306 Meßwerte je Rotordrehung für S0 und S4 (s. Text)

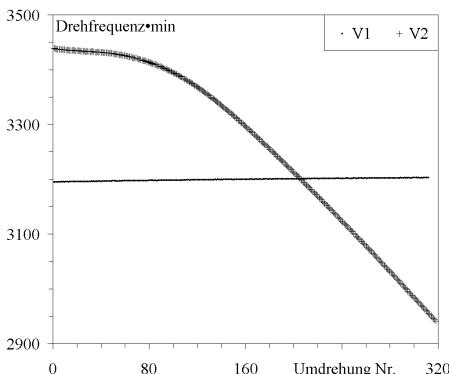
Bild 84 zeigt Meßwerte vom Sensor S0, der am Rotormantel (Bild 83) angeordnet ist, und von S4, welcher auch hinsichtlich der Umfangslage gegenüber der Einlaßöffnung EÖ mißt. Bild 84 zeigt deutliche Schalldruckabhängigkeiten von der Drehfrequenz, die je nach Düsen- und Einlaßöffnungskonstellation die Art der Anregung bestimmt, wobei hier nur der eine dargestellte Aufbau mit zwei symmetrisch angeordneten Einlaßöffnungen EÖ und acht Düsen Dü thematisiert ist.

Zur Charakterisierung der Anregung läuft der Rotor mit niedriger Drehfrequenz von  $403 \text{ min}^{-1}$ , um Hohlraumresonanzen nur schwach anzuregen. Das Motorstellventil der Luftversorgung wird so weit geöffnet, daß die Signale gut im Meßbereich der Drucksensoren (ca. 0,9 bis 3 bar) liegen. Die

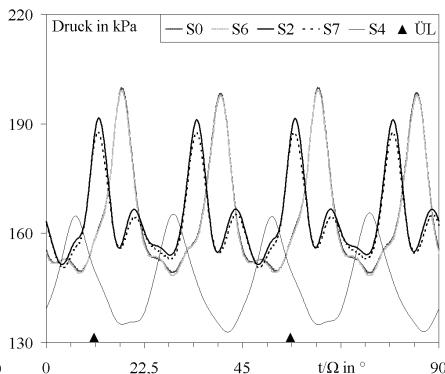
Aufzeichnung mit 8777 Hz Abtastrate liefert Bild 85, das Meßdaten der Dauer einer Rotordrehung zeigt. Der Meßschrieb der Drucksignale über der Zeit ist so über einem Winkel von 0 bis 360° aufgetragen.

Diese Darstellung ist vorteilhaft, da die Relation der Zeitachse zur Anregung gleich bleibt. Dieser Vorteil kostet bei der Auswertung einigen Aufwand, da die Anzahl mit konstanter Abtastrate je Umdrehung registrierter Werte für jede Drehfrequenz anders ist. Zudem erfolgen die Messungen der einzelnen Kanäle zeitmultiplex, so daß die Meßwerte zur per Hallgeber HG (Bild 79) erfaßten Drehwinkelposition für jeden Kanal separat zuzuordnen sind. Dies bedingt für jeden Kanal zunächst eine separate Zeitleiste mit ggf. ungleicher Meßwertanzahl je Rotordrehung. Um dennoch eine umlaufperiodische Darstellung (Bild 85) zu ermöglichen, kommt für jeden Kanal je Rotordrehung eine c2- stetige Spline- Funktion zum Einsatz, die durch die Meßwerte verläuft und die Interpolation erlaubt. Zur Berechnung einer Spline- Funktion ist ein Gleichungssystem zu lösen, dessen Gleichungsanzahl der Meßwertanzahl je Rotordrehung entspricht. Von diesen Splines rechnet der Algorithmus 1440 Stützstellen je Rotordrehung für die Darstellung mit einheitlicher Zeit- bzw. Winkelschrittweite über alle Kanäle aus. Die Darstellungen enthalten aus diesem Grund Linien und nicht Symbole, obwohl sie auf Meßwerten beruhen.

Bild 85 zeigt die Anregung der Kammer, wobei alle Sensoren analog S0 das periodische Füllen der Ringkammer mit nachfolgendem Druckabfall zeigen. Die Anregung erfolgt wegen der acht Düsen im Stator alle 45° und wegen der zwei Einlaßöffnungen symmetrisch in der Ringkammer. Durch den Spalt zwischen Stator und Rotor entweicht die Luft aus dem Rotor, wenn nicht gerade ein Düsenpaar mit dem Einlaßöffnungspaar in der Winkelposition übereinstimmen.



**Bild 86** Rotordrehfrequenz über Umdrehung für zwei verschiedene Messungen V1 und V2, V1 mit gleichmäßig steigender Drehfrequenz von 3195 bis 3203 min<sup>-1</sup>, V2 mit Motorbremse, Meßdauer jeweils etwa 6 s



**Bild 87** Druck in der Ringkammer RK (Bild 83) phasen-gemittelt aufgetragen über winkelgeschwindigkeitsbezogener Zeit (Winkel,  $\frac{1}{4}$  Rotordrehung), auf Basis c2- stetiger Splines durch ca. 165 Meßwerte je Rotordrehung, Phasenmittelung von 312 Einzeldrehungen V1 Bild 86, Loch- Überlauf ÜL (Winkel) aus S4- Maxima von Bild 83, ohne Fliehkräftekorrektur (S0, S2, S6, S7 liegen etwa 19 kPa niedriger)

Eine Ausnahme bildet S4, der gegenüber der Einlaßöffnung in der Fülldruckwelle sitzt, weshalb dessen Signal bei hinreichend niedriger Drehfrequenz hohe Ausschläge verzeichnet. Oberhalb von etwa 2100 min<sup>-1</sup> Drehfrequenz sind die Signalausschläge bzw. Wechseldrücke von S4 nicht mehr pauschal größer als die der anderen Sensoren (Bild 84). Jenseits von 2100 min<sup>-1</sup> bestimmt vorrangig die Resonanzausprägung die Wechsel- bzw. Schalldrücke in der Ringkammer.

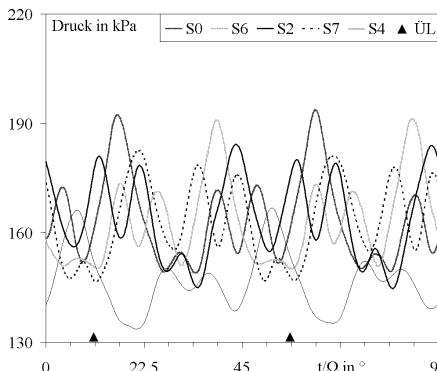
Bild 84 weist auf Resonanzen u. a. bei Drehfrequenzen von etwa 3200 min<sup>-1</sup> hin, zu deren Betrachtung die Daten zweier Meßreihen V1, V2 vorliegen. Bild 86 zeigt dazu die Drehfrequenzverläufe,

die Hallgebersignale (Bild 83) des Telemetriesystems während der jeweils etwa 6 s Aufzeichnungszeit für 51600 Datensätze bei 8777 Hz Abtastrate lieferten.

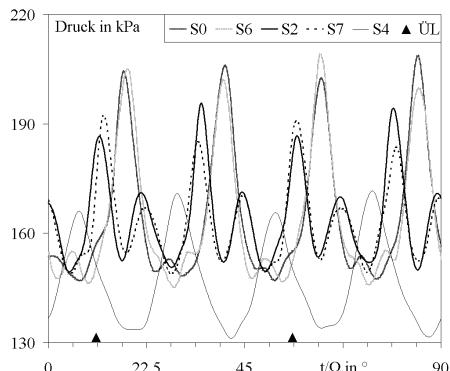
Während der Messung V1 steigt die Drehfrequenz von ca. 3195 bis 3203  $\text{min}^{-1}$  schwach mit etwa 1,6  $\text{min}^{-1}/\text{s}$  an, die Signale der Drucksensoren sind stabil rotationsperiodisch, weshalb Bild 87 die über alle 312 Umdrehungen phasengemittelten Signale der Drucksensoren zeigt. Aus Symmetriegründen von Anregung, Aufbau und auch Meßdaten genügt für diesen Aufbau generell die anteilige Darstellung der Rotationsperiode.

Bild 87 enthält die Daten der Sensoren S0, S6 sowie S2, S7, die jeweils ein Paar mit 180°- Versatz in der Umlangsposition (Tabelle 6) bilden, und das Signal von S4, der gegenüber der Einlaßöffnung montiert ist. Zudem ist die Phasenposition des Einlaß- Überlaufs ÜL, die aus den Druckmaxima des S4- Signals von Bild 85 resultiert, in Achsen Nähe eingetragen.

Die Betrachtung von Bild 87 bestätigt die Spiegelsymmetrie der Signale, so daß S0, S6 und sogar auch S2, S7 gleiche Paare bilden. Unterschiede wären für S2, S7 vorrangig zu erwarten, da die Sensoren S2, S7 in der Umlangsposition mittig zwischen den Einlaßöffnungen (67,5 und 247,5°) montiert sind, weshalb kleinste Laufzeitdifferenzen der Schallpfade mit der und gegen die Rotationsbewegung z. B. infolge Luftbewegung im Ringraum relativ zum Rotor Ungleichheiten hervorrufen würden.



**Bild 88** Druck in der Ringkammer RK (Bild 83) aufgetragen über winkelgeschwindigkeitsbezogener Zeit (Winkel,  $\frac{1}{4}$  Rotordrehung), auf Basis c2- stetigem Spline durch 164 o. 165 Meßwerte für eine Rotordrehung, Einzeldrehung Nr. 204 von V2 Bild 86 mit  $3204 \text{ min}^{-1}$ , Loch- Überlauf ÜL (Winkel) aus S4 Maxima von Bild 83, ohne Flieh- kraftkorrektur (S0, S2, S6, S7 liegen etwa 19 kPa niedriger)



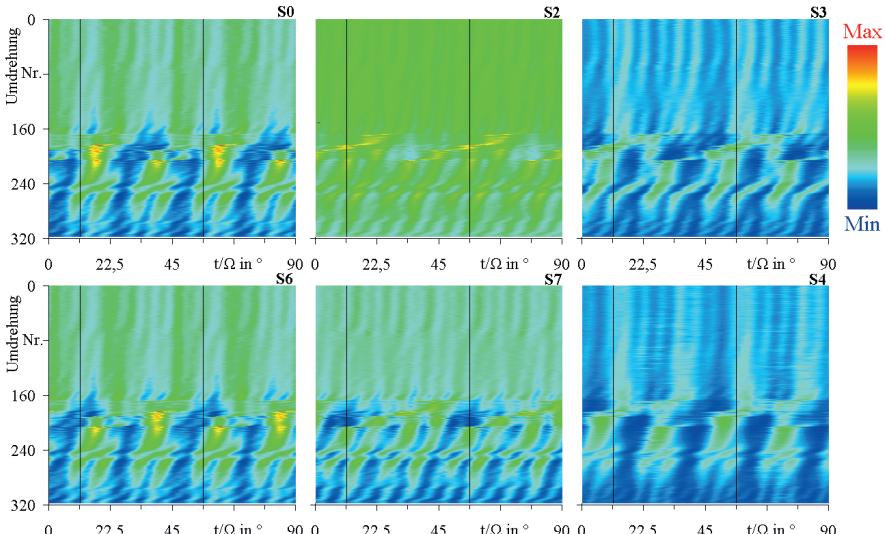
**Bild 89** Druck in der Ringkammer RK (Bild 83) aufgetragen über winkelgeschwindigkeitsbezogener Zeit (Winkel,  $\frac{1}{4}$  Rotordrehung), auf Basis c2- stetigem Spline durch 164 o. 165 Meßwerte für eine Rotordrehung, Einzeldrehung Nr. 207 von V2 Bild 86 mit  $3197 \text{ min}^{-1}$ , Loch- Überlauf ÜL (Winkel) aus S4 Maxima von Bild 83, ohne Flieh- kraftkorrektur (S0, S2, S6, S7 liegen etwa 19 kPa niedriger)

Den Vergleich mit der Messung V2 (Bild 86), während der die Drehfrequenz von Umdrehung 204 bis 207 von ca. 3204 auf 3197  $\text{min}^{-1}$  mit etwa 120  $\text{min}^{-1}/\text{s}$  infolge Motorbremsbetrieb abnimmt, ermöglichen Bild 88 und Bild 89. Ein Blick auf Bild 89 bestätigt eine maßgebliche Übereinstimmung mit Bild 87 und damit auch eine zu Messung V1 vergleichbare Druck- bzw. Resonanzsituation. Auf Basis von Messungen drei Rotorumdrehungen früher im Ablauf (Bild 86) zeigt Bild 88 eine im Vergleich sehr verschiedene Situation. Die zuvor erwähnten Symmetrien bestehen nicht bzw. unterliegen starken Abweichungen.

Dieses Beispiel illustriert neben der Komplexität der Inhalte auch die Notwendigkeit geeigneter Möglichkeiten zur Meßdatendarstellung und Auswertung. Um die jeweils nur 6 s dauernden Messungen für einen Datensatz vollständig in einem Diagramm darstellen zu können, kommt die Um-

rechnung in Bilder zum Einsatz, wobei der Farbkanal H des HSI- Farbraumes (Abschnitt 4.2) den Druck linear abbildet und somit die jeweilige Pixelfarbe bestimmt. Die Zeit (Winkel) bleibt der horizontalen Bild- bzw. Diagrammachse zugeordnet, während die vertikale Achse die Umdrehungsnummer des Rotors bezeichnet. Eine Pixelzeile enthält damit die Daten eines Sensors für eine Rotorumdrehung. Auf diese Weise entsteht je eine Aufzeichnung (6 s, 51600 Datensätze) ein Bildersatz mit je einem Bild pro Sensor.

Bild 90 ist eine solche Darstellung, welche die Meßdaten von sechs Sensoren der Meßreihe V2 (Bild 86) zeigt. Die Verläufe von Bild 88 und Bild 89 sind jeweils als Zeilen in Bild 90 enthalten, wobei aus Symmetriegründen nur die Zeit entsprechend einer Viertelrotordrehung dargestellt ist.



**Bild 90** Druck in der Ringkammer RK (Bild 83) von Sensoren S0, S2 - S4, S6, S7 aufgetragen über winkelgeschwindigkeitsbezogener Zeit (Winkel,  $\frac{1}{4}$  Rotordrehung), auf Basis c2- stetiger Splines durch 153 bis 180 Meßwerte für eine Rotordrehung, von V2 Bild 86, Lochüberlauf (Winkel, vertikale Linien) aus S4 Maxima von Bild 83, Sensoren S0, S6 sowie S2, S7 Paare mit  $180^\circ$  Umfangspositionsversatz zueinander, Einlaßöffnungen EÖ (Bild 83) und S4 mittig zwischen S2, S7 in Umfangsrichtung, S0, S6 mit  $45^\circ$  und, S3 mit  $22,5^\circ$  Umfangsversatz zu EÖ (Tabelle 6), Bilder von M. Karsch [95] modifizierte Anordnung, Skalierung leider uneinheitlich

Die beiden symmetrisch angeordneten Sensorpaare S0, S6 und S2, S7 sind im Bild jeweils übereinander angeordnet, S3 und S4 erscheinen rechts daneben. Bild 86 zeigt für V2, daß der Bremsvorgang etwa bei Umdrehung 80 einsetzt. Bild 90 weist entsprechend oberhalb bzw. für kleinere Umdrehungsnummer für alle Einzelbilder vertikale Strukturen auf. Dies entspricht stationären Schalldrucksituationen, während für den Bereich des Bremsvorganges ab Umdrehungsnummer 80 starke Veränderungen der Strukturen auftreten, die mit vorübergehenden Symmetrieverstörungen einhergehen.

Dieses Beispiel zeigt einerseits die große auszuwertende bzw. zu betrachtende Datenmenge und eröffnet andererseits den Blick auf ein spannendes Forschungsfeld. Die hier vorgestellte Einzelmessung ist nur ein „Punkt“ im Parameterraum, den die Versuchsvariablen Drehfrequenz, Druckniveau, stationäre (Durch-) Strömungskomponenten, Anregungs- bzw. Einlaß- oder Düsenkonfiguration, Kammereinbauten, Kammergeometrie und ggf. Strömsmedium aufspannen. Die Kombination mit Wärmeübergangsmessungen auf Basis der lokal angewendeten Übertemperaturmethode (Abschnitt 6.3), die für die Untersuchung von schallinduzierter Beeinflussung des Wärmeübergangs einsetzbar ist [U24], bietet weitere interessante Meßmöglichkeiten.

Für die Systematisierung dieser Arbeit steht die Realisierung zeitaufgelöster Messungen im rotierenden System im Mittelpunkt des Interesses, wodurch Bereiche meßtechnisch zugänglich werden, für die bisher nur wenige oder keine Versuchsdaten vorliegen.

### 6.3 Wärmeübergangskoeffizientensor für telemetrische Anwendungen

Für die Auslegung von rotierenden Maschinen hinsichtlich strukturmechanischer und kühlungsrelevanten Parameter ist die Kenntnis der Bauteiltemperaturen maßgeblich. Diese Temperaturen sind von der Wärmebilanz interessanter Teile unmittelbar abhängig, die von den thermischen und strömungsmechanischen Verhältnissen in den betrachteten Maschinenstrukturen bestimmt ist. Der Wärmeübergangskoeffizient (WÜK) auf der Oberfläche bewegter Maschinenteile ist dabei der Schlüsselkennwert, da er einerseits zusammen mit den meist bekannten Prozeßtemperaturen die Wärmebilanzierung rotierender Teile unmittelbar gestattet und andererseits eine sensitive Möglichkeit zum Abgleich mit numerischen Berechnungen darstellt. Letzteres ist dadurch bedingt, daß vorrangig die lokale Strömungssituation an der Oberfläche des rotierenden Maschinenteils den WÜK bestimmt. Daher gilt es, eine verbesserte Meßtechnik zur direkten Bestimmung lokaler WÜK in rotierenden Maschinenstrukturen bereitzustellen. Der Fokus liegt dabei einerseits auf der Validierung der gewählten Meßmethode generell und andererseits auf einer paßgerechten Realisierung des Meßaufbaus für die Implementierung in Telemetriesysteme.

Dabei wird hinsichtlich der Applikationstechnologie, der Ausführung der Meßschaltung und der Meßwertinterpretation sowie der Auswertung Neuland betreten. Dies liegt an der Verwendung nichtlinearer Bauteile mit hohem Meßeffekt und an der technologisch schwierigen Anwendung im rotierenden System, das die Nutzung eines angepaßten Telemetriesystems erfordert. Die Realisierung einer derartigen rotierenden Meßanordnung durch andere Arbeitsgruppen des Fachgebietes war zuvor nicht bekannt.

Die Anordnung gestattet rückwirkungsarme Messungen, die weder die Temperatursituation noch den Wärmetransport am Versuchsobjekt signifikant verfälschen. Zudem ermöglicht die Meßanordnung einen direkten Zugang zum WÜK ohne Notwendigkeit von maßgeblichen Wärmeströmen in den Bauteilen des Versuchsstandes und eignet sich für metallische Bauteile mit guter Wärmeleitfähigkeit. Die Inhalte des Abschnitts basieren u. a. auf den Veröffentlichungen [U16, U18] und dem Bericht [104]. Weiterführende Untersuchungen und Meßtechnikanwendungen bei stationärer Strömung enthalten die Diplomarbeiten von A. Kuntze und P. Höbold [98, 99].

#### 6.3.1 Literatursicht

Ausgehend von den nach E. Kaiser [48] systematisiert dargelegten prinzipiellen Möglichkeiten der Wärmestrommessung an Oberflächen, einen Überblickscharakter haben auch [49, 50], kommen für die speziellen Randbedingungen in rotierenden Maschinenstrukturen nicht alle Möglichkeiten in Frage. In diesem Zusammenhang sind als Erschwernisse vorrangig hohe Temperaturen und extreme Zentrifugalbeschleunigungen sowie je nach Anordnung Zugänglichkeitsprobleme und die Notwendigkeit der Messung im drehenden System zu nennen. Während die Ziele fast aller Untersuchungen auf niedrigerem Temperaturniveau erreichbar sind, bleibt die Forderung nach hohen Drehfrequenzen erhalten, um nutzbare bzw. auf Maschinen übertragbare Resultate zu erlangen.

Auf Basis der Übersicht in [48] zu den prinzipiellen Möglichkeiten erscheint die Anwendung der *Analogie von Wärme- und Stoffübergang* zweckmäßig, da ein direkter Zugang zum WÜK besteht. Praktisch kommt die leistungsfähige *Naphtalin-Sublimationsmethode* jedoch nicht in Frage, da für die Gültigkeit der Analogie von Wärme- und Stoffübergang die isothermen und isobaren Versuchsbedingungen nicht hinreichend realisierbar sind. Dies trifft um so stärker zu, je höher und realitätsnäher die Drehfrequenzen der zu untersuchenden Maschinenteile sind. Drücke und Temperaturen sind mindestens vom Radius zur Drehachse und von der Drehfrequenz maßgeblich abhängig (Abschnitt 5), wodurch die zugrundegelegte Analogie nicht mehr einheitlich zutrifft bzw. ent-

sprechend ungenau in der Aussage ist. Diese Problematik legt die Dissertation von M. Kloss [51] umfassend dar.

Auch die *Umkehrmethode* für WÜK [48], die die instationäre Lösung der eindimensionalen Wärmeleitungsgleichung mit der Annahme eines halbunendlichen Raumes oder dreidimensionale instationäre FEM- Rechnungen nutzt, bereitet Schwierigkeiten, da einerseits die Wärmekapazitäten in den Zuleitungen die Realisierung des Temperatursprunges der Fluidtemperatur erschweren und andererseits verlässliche Oberflächentemperaturen schwer zu messen sind. Dies trifft besonders dann zu, wenn temperaturempfindliche Beschichtungen, beispielsweise aufgetragene Flüssigkristallanstriche, oder Sensorsaupbauten direkt auf in Maschinen üblichen metallischen Oberflächen mit hoher Wärmeleitfähigkeit angebracht sind. Der daraus resultierende signifikante systematische Fehler beruht auf der Diskrepanz zwischen der für die Bestimmungsgleichung zu nutzenden hohen Wärmeleitfähigkeit des Metalls und der vergleichsweise niedrigen Wärmeleitfähigkeit der Beschichtung zur Temperaturmessung, deren Dicke vielleicht sogar unbekannt ist. Die Methode kommt in [52-54] zum Einsatz, wobei durch Verzicht auf metallischen Grundwerkstoff das letztere Problem nicht auftrat. Die Zuleitungen sind wegen einfacherem Aufbau kurz genug. Messungen nach gleichem Prinzip an einem Polycarbonatotor sind in [55-57] beschrieben, wobei eine dreigliedrige Reihenentwicklung des Temperaturverlaufs das Problem des abgeschwächten Sprungs behandelt. Als Oberflächentemperaturmeßtechnik kommen analog zu [35] Flüssigkristallbeschichtungen, stroboskopische Beleuchtung und Bildverarbeitung bei der Auswertung zum Einsatz.

Mehrheitlich kommt zur Bestimmung von WÜK oder Nusselt- Zahlen der Umweg über den Wärmestrom also die *Wärmestrom- Temperaturdifferenzmethode* [48] zum Einsatz [58-76, 96], bei der aus dem Wärmestrom  $q_h$  senkrecht zur Wand und der Differenz aus Wandtemperatur  $T_w$  und der Bezugstemperatur  $T_0$  der WÜK

$$\alpha = \frac{q_h}{T_w - T_0} \quad (72)$$

für konvektive Kühlung resultiert. Bestehende Unterschiede der aufgeführten Publikationen betreffen die Art der Wärmestrombestimmung und die Temperaturmeßtechnik. Die *Wärmestrom- Temperaturdifferenzmethode* setzt die Kenntnis der Oberflächentemperatur und der Bezugstemperatur in der Strömung zur Bestimmung der Temperaturdifferenz  $T_w - T_0$  voraus. Komplizierte Strömungsverhältnisse erschweren die Bestimmung einer geeigneten Bezugstemperatur, die eine Fluidtemperatur am strömungsseitigen Ende der thermischen Grenzschicht sein sollte. Häufig kommt ersatzweise die Eintrittstemperatur zum Einsatz, wobei für maschinennahe Bedingungen Nulldurchgänge der Temperaturdifferenz die Folge sind [96]. Die daraus resultierenden Polstellen im Verlauf der so gewonnenen WÜK oder Nusselt- Zahlen sind nicht real.

Außerdem behindern Nulldurchgänge beim Wärmestrom, wie sie unter realen Maschinenbedingungen mit natürlich eingestellten Temperaturprofilen vorkommen, die Anwendung der *Wärmestrom- Temperaturdifferenzmethode*. Um trotzdem Ergebnisse zu publizieren, sind vereinzelt aus thermodynamischer Sicht unsinnige negative Nusselt- Zahlen errechnet worden, statt gemessene Wärmestromdichten als Randbedingung für numerische Rechnungen zu verwenden. Eine andere Möglichkeit besteht in der direkten Beheizung der Rotorscheiben [58, 59, 61-65, 69-72, 75, 76], wodurch Richtung und Betrag des Wärmestroms fest vorgegeben und folglich Nulldurchgänge des Wärmestroms sicher verhindert sind.

Mit Rücksicht auf diese Problematik, für den einfachen Fall beschrieben in [77], sind in [96, U10, U11, U14, U19] für den maschinennahen Versuchsaufbau ohne vorbestimmte Temperatursituation keine WÜK oder Nusselt- Zahlen angegeben.

Aus Sicht der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Zielanwendung Turbomaschine ist die Methodik der Wärmestrombestimmung zu bewerten. Mit Blick auf die gesichteten Publikationen folgt die Unterteilung nach [48] in die *Hilfswandmethode* für [59, 60, 63-65, 69-72, 75, 76] und die *Gradientenmethode* für [58, 61, 62, 66-68, 96, U10, U11, U14, U19].

Mit der *Hilfswandmethode* bestimmten Wärmeströmen haftet der Nachteil einer maßgeblichen Beeinflussung des Untersuchungsgegenstandes durch das Meßgerät an, da die Hilfswände der Wärmestrommeßanordnungen aus einem Isolierstoff bestehen, die den Wärmestrom im Vergleich zur Anordnung ohne Meßanordnung reduzieren. Dieser Aspekt der Rückwirkung ist in [48-50] thematisiert.

Ein aus einem Wismuteinkristall bestehender Wärmestromaufnehmer ist Gegenstand von [73]. Die Besonderheit besteht in dem direkten Zugang zum Wärmestrom ohne Umweg über Temperaturdifferenzen.

Die *Gradientenmethode* gewinnt aus der vollständigen Temperaturberandung des Bauteils mit Hilfe einer Ausgleichsrechnung, z. B. mit einer Finite- Volumen- Rechnung, die Temperaturverteilung im Bauteil. Der Temperaturgradient normal zur Wand multipliziert mit der Wärmeleitfähigkeit der Wand entspricht dem Wärmestrom durch Berandung bzw. Bauteiloberfläche. Die Anwendung der *Gradientenmethode* für rotierende Scheiben oder Kammern [58, 61, 62, 66-68, 96, U10, U11, U14, U19,] birgt daher einerseits die Schwierigkeit der Oberflächentemperaturnessung auf dem metallischen Bauteil mit guter Wärmeleitfähigkeit und andererseits die aus der guten Wärmeleitfähigkeit resultierende Problematik kleiner Temperaturunterschiede, die eine erhöhte Meßunsicherheit bedingen. Die Publikationen [78, 79] thematisieren die Auswirkungen von Anordnung und Dichte der Meßstellen mit Bezug zur Meßunsicherheit und der für die Gradientenmethode erforderlichen Interpolation zwischen den Meßstellen für die Gewinnung der Temperaturberandung.

Owen [79] empfiehlt, den Einfluß von Meßstellenanordnung und Interpolation auf das Ergebnis für die erreichte Meßunsicherheit zu prüfen, wie es für [U10, U11, U14, U19, 96] mit 19 Oberflächentemperaturen auf einer Scheibe der Zweikammeranordnung ausgeführt wurde. Eine niedrige Meßstellendichte [66-68] erscheint vor diesem Hintergrund problematisch.

Eine Möglichkeit [48], direkt WÜK zu bestimmen, bietet die *Anpassungsmethode*, deren Anwendung [U9] für rotierende Kammern beschreibt. Die Anpassungsmethode benötigt ein Modell der Meßanordnung, für die gemessene Temperaturen oder Temperaturverläufe vorliegen. Die gesuchten WÜK sind als veränderliche Parameter z. B. als thermische Widerstände im Modell enthalten. Diese sind dann zu variieren, bis das Modell die Temperaturen liefert, die als Meßwerte vorliegen.

Auch bei der *Anpassungsmethode* besteht die Problematik der geeigneten Bezugstemperatur, wie sie für die Wärmestrom-Temperaturdifferenzmethode erläutert ist. Eine falsche Bezugstemperatur hätte entweder gleichermaßen negative WÜK oder eine fehlgeschlagene Parametervariation zur Folge.

Eine weitere Möglichkeit [48], direkt WÜK zu bestimmen, bietet die *Übertemperaturmethode*, deren Anwendung [80] für eine rotierende Scheibe beschreibt. Bei der Übertemperaturmethode wird das Bauteil, für das der WÜK interessiert, mit bekannter Leistung beheizt, so daß die Temperatur des Bauteils durch Ableitverluste und den konvektiven Wärmeübergang, den der WÜK verkörpert, bestimmt ist. Sind die Temperaturen und Ableitverluste bekannt bzw. gemessen, so ist auch der WÜK bestimmt.

Der maßgebliche Vorteil der *Übertemperaturmethode* besteht darin, daß keine Meßwärmeströme äußerlich aufzuprägen sind. Es genügt, die Meßanordnung auf der hinsichtlich des Wärmeübergangs interessierenden Fläche zu beheizen. Die nötige Heizleistung hängt von der Isolation, von der Größe der Meßanordnung und vom Meßbereich ab.

Eine nachteilige Rückwirkung auf das Meßobjekt entsteht nur dann, wenn hohe Leistungseinträge oder großflächige Verfälschungen der im Meßobjekt vorgefundenen Wärmeübergänge vorliegen. Die schon mehrfach für andere Methoden aufgeführte Problematik der geeigneten Bezugstemperatur löst hier eine Temperaturnessung bei ausgeschalteter Heizung, was nur als korrekt gelten kann, wenn die Heizung die Fluidtemperatur nicht beeinflußt. Diese genannten Nachteile sind für die Zielanwendung durch konstruktive Maßnahmen auszugleichen.

### 6.3.2 Anordnung zur Messung von Wärmeübergangskoeffizienten

Anhand des Quellenstudiums und hinsichtlich der telemetrischen Anwendung der Meßtechnik wird die *lokale Anwendung der Übertemperaturmethode* zur Realisierung gewählt. Sie gewährleistet aufgrund lokaler Erwärmung einen geringen Hilfsenergiebedarf und zudem eine kleine, leichte Sensorinstallation. Beide Aspekte sind Grundvoraussetzung für eine telemetrische Meßanordnung.

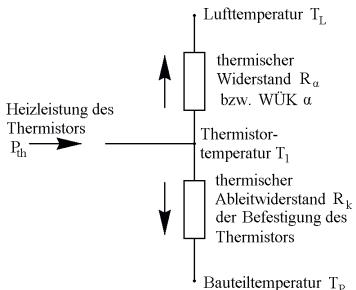


Bild 91 Vereinfachtes thermisches Modell der Meßanordnung

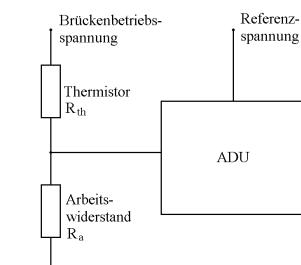


Bild 92 Vereinfachte elektrische Prinzipschaltung mit Thermistor in Halbbrückenanordnung und Analog-Digital-Umsetzer (ADU)

Auf Basis *kleiner Thermistoren* ist demnach eine Meßschaltung zu konzipieren, die mit hoher Auflösung die Temperatur mißt und für die Übertemperaturmethode durch Wahl des Meßstromes eine hinreichende Heizleistung bereitstellt. Letztere gilt es ebenfalls zu registrieren. Die wandbündige Anordnung des Thermistors im Bauteil für dessen Überströmungssituation der WÜK interessiert, erlaubt dann anhand gemessenen Wärmeaustrags und beteiligter Heizfläche  $A_t$ , den WÜK

$$\alpha = \frac{P_{th,n}}{(T_1 - T_L)A_t} \quad (73)$$

zu berechnen. Dabei wird der Thermistor durch die Nettoheizleistung  $P_{th,n}$  um die Temperaturdifferenz von Thermistor-  $T_1$  und Lufttemperatur  $T_L$  erwärmt. Die Erwärmung wird durch den konvektiven Wärmeaustausch bzw. den WÜK  $\alpha$  begrenzt. Wegen erforderlicher Befestigung des Meßaufbaus im zu untersuchenden Bauteil verzweigt die gemessene Heizleistung  $P_{th}$

$$P_{th} = P_{th,n} + \frac{T_1 - T_p}{R_k} = \frac{T_1 - T_L}{R_\alpha} + \frac{T_1 - T_p}{R_k} \quad (74)$$

in den konvektiv ( $R_\alpha$ ) und den per Wärmeleitung ( $R_k$ ) ausgetragenen Anteil. Diesen Zusammenhang verdeutlicht Bild 91 anhand eines elektrischen Ersatzschaltbildes für die Betrachtung mit konzentrierten Parametern. Den WÜK  $\alpha$  repräsentiert der thermische Widerstand

$$R_\alpha = \frac{1}{A_t \alpha}, \quad (75)$$

und  $R_k$  modelliert mit der Temperaturdifferenz aus Thermistor-  $T_1$  und Bauteiltemperatur  $T_p$  die thermischen Ableitverluste. Diese Ableitverluste ( $R_k$ ) sind durch Kalibrierung bei Abwesenheit konvektiven Wärmeaustauschs bestimmbar, während die Lufttemperatur  $T_L$  (74), die für das strömungsseitige Ende der Grenzschicht gilt, meßtechnisch nicht zugänglich ist. Eine zweite Messung zur Zeit  $t = 0$ , bei der die Heizleistung im Sinne einer gesteigerten Thermistortemperatur noch nicht wirkt ( $P_{th} = 0$ ), ergänzt (74) um (76) zu einem Gleichungssystem.

$$0 = \frac{T_{10} - T_{L0}}{R_\alpha} + \frac{T_{10} - T_{p0}}{R_k} \quad (76)$$

Die Indexerweiterungen 0 der Temperaturen kennzeichnen die Zeit  $t = 0$ . Aus der Annahme stationärer Meßbedingungen und hinreichender Rückwirkungsarmut der Meßanordnung folgt die Unveränderlichkeit der Temperaturen  $T_L$  und  $T_P$  im zeitlichen Verlauf des Ausgleichs

$$T_L = T_{L0} \quad \text{und} \quad T_P = T_{P0}. \quad (77)$$

Mit (77) und der Einführung einer Übertemperatur des Thermistors

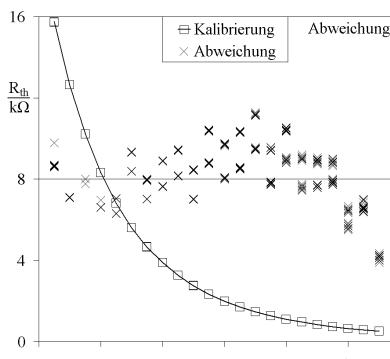
$$\theta_1 = T_1 - T_{10} \quad (78)$$

und (74) sowie (76) entsteht der Zusammenhang

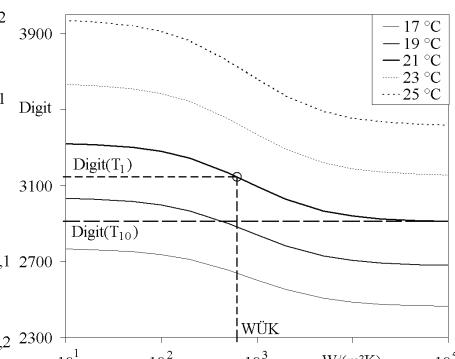
$$P_{th} = \theta_1 \left( \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_k} \right). \quad (79)$$

Eine prinzipiell analoge Herleitung findet sich in [81] oder anderer geeigneter Grundlagenliteratur.

Aus den gemessenen Thermistortemperaturen  $T_1$  und  $T_{10}$  sowie der an der Sensorfläche  $A_t$  wirkenden und ebenfalls registrierten Heizleistung  $P_{th}$  und mit dem kalibrierten thermischen Ableitwiderstand  $R_k$  ist der WÜK  $\alpha$  bzw.  $R_a$  meßtechnisch direkt zugänglich. Die reale Meßanordnung beinhaltet Wärmekapazitäten, weshalb die Thermistortemperatur  $T_1$  bzw. die Übertemperatur  $\theta_1$  zur Funktion der Zeit mit  $T_1(t = 0) = T_{10}$  und  $\theta_1(t = 0) = 0$  werden. Im Rahmen der Auswertung ist der thermische Ausgleichsvorgang zur Bestimmung der genannten Meßgrößen auszuwerten.



**Bild 93** Kennlinie des Thermistors mit Abweichung der Kalibrierwerte von der Approximation (80)



**Bild 94** Statisches Übertragungsverhalten der Meßkette als Funktion von WÜK und Anfangstemperatur  $T_{10}$ , WÜK auf Basis der Anfangstemperatur  $T_{10}$  und der Ausgleichstemperatur  $T_1$

Die **Meßschaltung** (Bild 92) zur Bestimmung von WÜK ist eine schaltbare Halbbrücke bestehend aus Thermistor und Arbeitswiderstand  $R_a$ , deren Signal am Eingang eines 12-Bit ADU anliegt. Die Meßschaltung liefert auf Basis von Brückeneinspannung,  $R_a$ , ADU-Referenzspannung und der zu kalibrierenden Abhängigkeit des elektrischen Thermistorwiderstandes  $R_{th}$  von der Temperatur die zeitlichen Verläufe von Temperatur und Heizleistung des Thermistors.

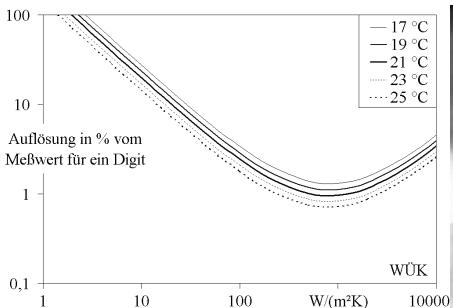
Zur **Kalibrierung des Thermistors** (Bild 93) kommen ein „WIKA Temperatur- Kalibrator Modell 9105“ und ein Multimeter „Keithley Modell 2000“ zum Einsatz. Für den Kalibrator ist eine Unsicherheit von  $\pm 0,1$  K angegeben. Für das Multimeter beträgt die Unsicherheit bei der Bestimmung des elektrischen Widerstandes  $\pm 1 \Omega$  im  $100 \text{ k}\Omega$ -Meßbereich bei einem Meßstrom von  $10 \mu\text{A}$ . Als Ausgleichsfunktion der in 5 K-Schritten im Bereich von  $15^\circ\text{C}$  bis  $120^\circ\text{C}$  erfolgten Kalibrierung dient

$$R_{th} = R_0 e^{B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (80)$$

wobei der Exponent B und  $R_0$  die Koeffizienten der Kalibrierung sind.  $R_0$  ist der Widerstand des Thermistors bei  $T = T_0 = 298,15$  K.

Aus der Summe tatsächlich realisierter thermischer und elektrischer Kennwerte entsteht das statische Übertragungsverhalten der gesamten WÜK- Meßanordnung (Bild 94). Die Auflösung der Meßschaltung hinsichtlich der Temperatur beträgt im Meßbereich 110 bis 130 Digit/K.

Ausgehend von der Anfangstemperatur  $T_{10}$  bzw. dessen zugehörigem ADU- Wert Digit( $T_{10}$ ) ist beim Ablesen des WÜK in Bild 94 die zugehörige  $T_{10}$ - Kurve am rechten Diagrammrand aufzusuchen. Dieser Temperaturkurve, entsprechend  $T_{10} = 21$  °C in Bild 94, folgend, ist der Schnittpunkt mit der Linie Digit( $T_1$ ) für die Ausgleichstemperatur des Thermistors aufzusuchen. Die horizontale Position des Schnittpunktes im Diagramm liefert den zugehörigen WÜK.



**Bild 95** Auflösung der Meßanordnung zur Bestimmung von WÜK; Wertigkeit eines ADU- Digits in Prozent vom WÜK- Meßwert aufgetragen über dem WÜK für verschiedene Temperaturen  $T_{10}$



**Bild 96** Pitot- Rohr und Hitzdrahtsonde über der Platte mit 2 eingebauten Thermistoren und mittig dazwischen Wandbohrung zur Messung des statischen Drucks (am Foto Kontrast gesteigert und Farben entfernt)

Für die Anwendung interessiert die Auflösung der Meßanordnung, die Voraussetzung für eine hinreichende Genauigkeit ist. In Bild 94 entspricht der Anstieg der jeweiligen Kurve der Auflösung, die zur Bewertung aber in Relation zum Meßwert zu sehen ist. Daher wird die Auflösung als Wertigkeit eines Digits in Prozent vom WÜK- Meßwert in Bild 95 angegeben. Eine niedrige Wertigkeit eines Digits im Vergleich zum jeweiligen Meßwert signalisiert eine hohe Auflösung, weshalb Werte unterhalb von 10 % anzustreben sind.

Die Steigerung des Arbeitswiderstands der Halbbrücke (Bild 92) verursacht eine generelle Verschiebung der Kurvenschar (Bild 95) nach oben. Dies entspricht einer Senkung der Auflösung.

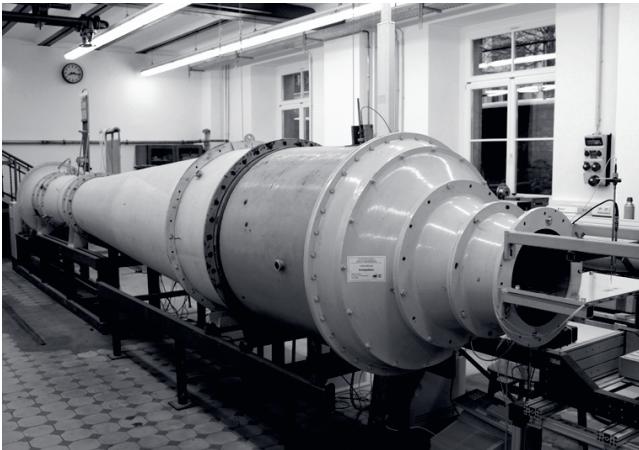
Die Steigerung des thermischen Ableit- bzw. Isolationswiderstands  $R_k$  verursacht eine generelle Verschiebung der Kurvenschar (Bild 95) nach unten entsprechend einer Steigerung der Auflösung. Daher ist für eine gute thermische Isolation des Thermistors zu sorgen. Für die Zielanwendung ist das ein Kompromiß, da eine bessere thermische Isolation eine schwächere Befestigung des Thermistors im rotierenden Versuch bedeutet. Das Problem der thermischen Isolierung wurde auch für die elektrische Kontaktierung berücksichtigt.

Der Vergleich des Einflusses der aktiven Fläche  $A_t$ , der von der Bauform des Thermistors abhängt, liefert eine Verschiebung des WÜK- Meßbereichs zu höheren Werten bei der kleineren Bauform gegenüber der größeren Bauform, wenn der thermische Isolationswiderstand  $R_k$  gleich bleibt.

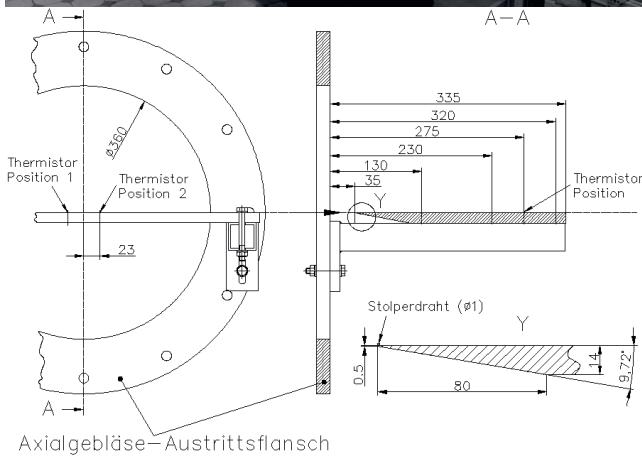
Dies ist hinsichtlich der erforderlichen Befestigung nicht zu erwarten. Die plattenbündige Oberfläche des Thermistors beträgt  $1,28 \text{ mm}^2 \pm 3 \%$ .

Zudem verschiebt eine schlechtere thermische Isolation, entsprechend kleiner werdendem Isolationswiderstand  $R_k$ , den empfindlichsten Bereich der Meßanordnung zu höheren WÜK. Weitere technologische Betrachtungen enthält [104].

Bild 96 zeigt die fertig in die Oberfläche eingebetteten thermistorbasierten WÜK- Sensoren im Erprobungsaufbau längsangeströmte Platte.



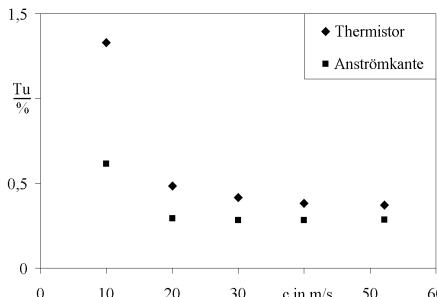
**Bild 97** Einstufiges Axialgebläse zur Kalibrierung von Meßanordnungen an längs angeströmter Platte im Freistrahrl, Durchmesser 0,36 m, max. Geschwindigkeit ca. 55 m/s



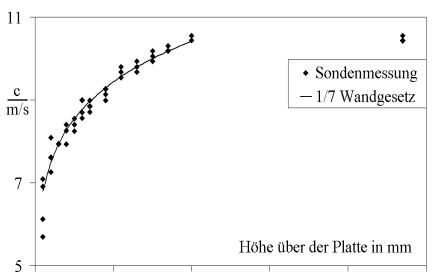
**Bild 98** Aufbau der Platte am Austrittsflansch der Freistrahldüse des Axialgebläses (Bild 97), Positionsangaben der Thermistoren und der vier Druckmeßbohrungen, Detail der Anströmkanthe mit Stolperdraht

### 6.3.3 Erprobung an längsangeströmter Platte

Die Erprobung des entwickelten Sensors erfolgt im Aufbau an der längs angeströmten Platte im Freistahl des einstufigen Axialgebläses (Bild 97) an der TU Dresden. Bild 98 zeigt die Abmessungen der Platte, ihre Position im Freistahl und die Anordnung des Thermistors. Die Strahlqualität wurde durch Traversierung eines Pitot- Rohrs und einer Hitzdrahtsonde überprüft (Bild 96). Bild 99 zeigt den Turbulenzgrad an zwei Positionen im Freistahl ohne Platte. Der Strahl weist einen niedrigen Turbulenzgrad auf, der mit abnehmender Geschwindigkeit zunimmt und bei der Entfernung, die der späteren Position der Meßanordnung entspricht, geringfügig höher ist als nahe der Freistrahldüse. Bild 100 zeigt das Geschwindigkeitsprofil über der Meßanordnung in Abhängigkeit vom Plattenabstand.

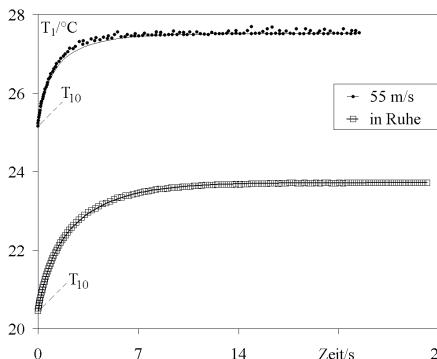


**Bild 99** Turbulenzgrad im Freistrahlgang über Strömungsgeschwindigkeit, über angeströmter Plattenkante und über dem Thermistor, jeweils 67 mm über axialer Mittellinie des Freistrahls

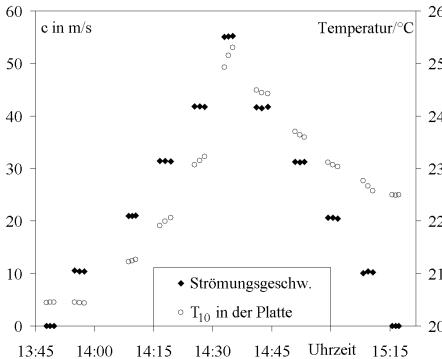


**Bild 100** Strömungsgeschwindigkeit im Freistrahlgang, Meßwerte aufgetragen über dem vertikalen Abstand von der Plattenoberfläche für eine Position über dem Thermistor und 1/7 Wandgesetz

Zur Kontrolle des Druckverlaufs entlang der Platte sind Bohrungen zur Messung des statischen Drucks an verschiedenen Positionen in Strömungsrichtung eingebracht (Bild 98). Ein Thermoelement erfaßt die Lufttemperatur vor der Freistrahldüse und ein weiteres die Temperatur der Platte nahe der Meßanordnung.



**Bild 101** Temperatur beim Ausgleichsvorgang zweier Messungen mit verschiedener Strömungsgeschwindigkeit im Freistrahlgang, Starttemperatur  $T_{10}$  am Anfang des Ausgleichsvorganges, Approximation durch Modell (Bild 103) als Linie



**Bild 102** Strömungsgeschwindigkeit im Freistrahlgang, Meßunsicherheit 0,6 m/s bei 10,6 m/s, 0,12 m/s bei 55,1 m/s; Thermistor- Starttemperatur  $T_{10}$ , Meßunsicherheit (Differenz nicht absolut) kleiner als Symbolgröße

Bild 101 zeigt zwei typische Meßabläufe für verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten. Zu Beginn schaltet die Halbbrücke den Meßstrom ein, woraufhin der ADU nach Ablauf des elektrischen Einschwingens die Starttemperatur  $T_{10}$  des Thermistors abliest. Der elektrische Einschwingvorgang ist zeitlich um Größenordnungen kürzer als der thermische Einschwingvorgang [104].

Das Meßprogramm umfaßt zwei Reihen (Bild 102), die die Strömungsgeschwindigkeit  $c$  gestuft variieren. Für jede Einstellung erfolgen drei Einzelmessungen. Die Starttemperatur des jeweiligen Ausgleichsvorgangs ist auch dargestellt. Die Leistung der Versuchsanlage heizt die Halle auf, wodurch ein in der Auswertung zu berücksichtigender zeitlicher Temperaturgradient entsteht.

### 6.3.4 Auswertung

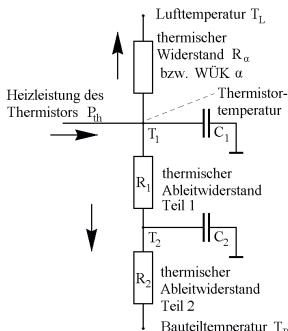
Die Auswertung des Ausgleichsvorganges (Bild 101) gelingt im einfachen Fall mit der Starttemperatur  $T_{10}$  und der *stationären* Endtemperatur des Thermistors  $T_1$ , deren Differenz – die Übertemperatur  $\theta_1$  – in die Bestimmungsgleichung (79) einzusetzen ist. Die ebenfalls gemessene Heizleistung des Thermistors  $P_{th}$  und der aus der Kalibrierung bekannte thermische Ableit- bzw. Isolationswiderstand  $R_k$  kommen hinzu und liefern den thermischen Widerstand  $R_\alpha$  bzw. den WÜK  $\alpha$  (75).

Abweichungen von thermisch stationären Versuchsbedingungen erfordern dahingegen die Berücksichtigung der Wärmekapazitäten der Meßanordnung. Die Erfahrung mit Modellversuchen der experimentellen Turbomaschinenforschung zeigen, daß Versuchspunkte mit Temperaturschwankungen unterhalb von 1 K als stationär gelten, da eine genauere Einstellung schwierig oder unmöglich ist oder unverhältnismäßig lange Meß- und Ausgleichszeiten erfordert. Auch bei der Erprobung (Bild 102) liegen zeitliche Temperaturgradienten vor.

Daher kommt ein thermisches Modell auf Basis einer Betrachtung mit konzentrierten Parametern mit zwei Wärmekapazitäten (Bild 103) anstelle des einfachen Dimensionierungsmodells (Bild 91) zur Anwendung. Der thermische Ableit- bzw. Isolationswiderstand

$$R_k = R_1 + R_2 \quad (81)$$

wird dadurch auf zwei thermische Einzelwiderstände  $R_1$  und  $R_2$  aufgeteilt. Eine gegenständliche Zuordnung der Wärmekapazitäten  $C_1$  und  $C_2$  erfolgt nicht. Sie sind genauso wie die Aufteilung von  $R_k$  nur als Koeffizient der Approximation des thermischen Ausgleichsvorganges  $\theta = f(t)$  zu sehen (Bild 101).



**Bild 103** Elektrisches Ersatzschaltbild des erweiterten thermischen Modells der Meßanordnung für einen Ansatz mit konzentrierten Parametern mit zwei Wärmekapazitäten zur Berücksichtigung der thermischen Trägheit

Das rechnerische Modell liefern die Knotensatzgleichungen der Schaltung von Bild 103 für den unbeheizten Startzustand mit dem Indexzusatz 0

$$0 = \frac{T_{10} - T_{L0}}{R_\alpha} + \frac{T_{10} - T_{20}}{R_1} + \dot{T}_{10} C_1, \quad (82)$$

$$\frac{T_{10} - T_{20}}{R_1} = \frac{T_{20} - T_{P0}}{R_2} + \dot{T}_{20} C_2 \quad (83)$$

und für den Zustand mit Heizleistung

$$P_{th} = \frac{T_1 - T_L}{R_\alpha} + \frac{T_1 - T_2}{R_1} + \dot{T}_1 C_1, \quad (84)$$

$$\frac{T_1 - T_2}{R_1} = \frac{T_2 - T_P}{R_2} + \dot{T}_2 C_2. \quad (85)$$

Mit der Einführung der Übertemperaturen  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  gemäß

$$\theta_1(t) = T_1(t) - T_{10}, \quad \dot{\theta}_1 = \dot{T}_1, \quad (86)$$

$$\theta_2(t) = T_2(t) - T_{20}, \quad \dot{\theta}_2 = \dot{T}_2, \quad (87)$$

dem im Verlauf der Messung des Ausgleichs unveränderlich angenommenen und den gesamten Aufbau betreffenden zeitlichen Temperaturgradienten  $A$ , der den Verlauf von Lufttemperatur  $T_L$  und Plattentemperatur  $T_P$

$$T_L = T_{L0} + A t, \quad (88)$$

$$T_P = T_{P0} + A t \quad \text{mit} \quad (89)$$

$$A = \dot{T}_{L0} = \dot{T}_{P0} = \dot{T}_{10} = \dot{T}_{20} \quad (90)$$

annähert, entsteht das Differentialgleichungssystem

$$\dot{\theta}_1 = -\frac{\theta_1}{C_1} \left( \frac{1}{R_\alpha} + \frac{1}{R_1} \right) + \frac{\theta_2}{R_1 C_1} + \frac{A t}{R_\alpha C_1} + A + \frac{P_{th}}{C_1}, \quad (91)$$

$$\dot{\theta}_2 = \frac{\theta_1}{R_1 C_2} - \frac{\theta_2}{C_2} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) + \frac{A t}{R_2 C_2} + A. \quad (92)$$

Dabei besteht für die Zeit  $t$ , die seit Einschalten des Meßstroms verstreicht, die Annahme, daß die Lufttemperatur  $T_L$  und die Plattentemperatur  $T_P$  gemäß (88) und (89) zeitlich einem linearen Verlauf folgen. Diese Annahme dient der Abbildung geringfügiger Abweichung von thermisch stationären Versuchsbedingungen, wie sie in der Praxis außer beim Ruheversuch kaum vermeidbar sind.

Die Heizleistung  $P_{th}$ , die der Meßstrom dem Thermistor zuführt, nimmt um etwa 10 % im Verlauf des thermischen Ausgleichsvorgangs wegen sinkendem Thermistorwiderstand zu. In das Gleichungssystem geht der Endwert entsprechend der höchsten Leistung der Einfachheit halber als Konstante ein. Die dadurch entstehende Abweichung betrifft die Kurvenform im anfänglichen Teil des Ausgleichsvorganges. Die Approximation der Kurvenform geschieht durch Variation der Modellparameter  $C_1$ ,  $C_2$  und  $R_1$ , die einer direkten Bestimmung nicht zugänglich sind. Der Einfluß der vereinfachten Abbildung der Heizleistung  $P_{th}$  als Konstante ist gering im Vergleich zur Modellvariabilität durch die drei Parameter, so daß diese Vereinfachung für  $P_{th}$  zulässig ist.

Die Lösung des Differentialgleichungssystems (91), (92) stellt die Approximationsfunktion für die Übertemperatur  $\theta_1(t)$  bzw. die gemessene Thermistortemperatur  $T_1(t)$  bereit.

Zur Bestimmung der Modellparameter  $C_1$ ,  $C_2$  und  $R_1$  aus dem Ruheversuch –  $R_2$  liegt mit (81) aufgrund der Kalibrierung fest –, ist die Lösung des Differentialgleichungssystems  $T_1(t)$  für  $A = 0$  und  $1/R_\alpha = 0$  zu verwenden. Für die vorhandenen Meßwerte geschieht das auf Basis der drei anfänglichen und der drei abschließenden Ruheversuche einer Meßreihe (Bild 102).

Für die Bestimmung der WÜK der angeströmten Platte bleiben die bisher nicht benutzten Koeffizienten  $A$  und  $R_\alpha$ . Den Temperaturgradienten  $A$ , der die Abweichung von stationären Versuchsbedingungen beschreibt, liefert die Änderung der Starttemperaturen  $T_{10}$  während der jeweils drei Messungen bei gleichen Bedingungen gemäß Bild 102. Die Variation des den WÜK abbildenden thermischen Widerstands  $R_\alpha$  paßt die Kurve  $T_1(t)$ , die dem Differentialgleichungssystem entstammt, an die Meßwerte (Bild 101) an. Eine Fehlanpassung durch einen falschen Gradienten  $A$  bewirkt einen nicht paßgerechten Anstieg, und ein unpassender Wert  $R_\alpha$  bewirkt eine Parallelverschiebung der Kurve  $T_1(t)$  im Vergleich zu den Meßwerten des letzten Drittels des thermischen Ausgleichsvorgangs (Bild 101).

### 6.3.5 Ergebnis

Die Auswertung der thermischen Ausgleichsvorgänge liefert durch Approximation des beschriebenen Modells dessen Koeffizienten  $R_a$  bzw. WÜK  $\alpha$  (75), die erwartungsgemäß mit der Strömungsgeschwindigkeit über der Platte ansteigen, während die Meßanordnung im Rahmen der Meßunsicherheit keine Hysterese aufweist.

Die bestimmten WÜK (Bild 104) sind zutreffend für die beheizte Thermistorfläche und im Rahmen der Meßunsicherheit prinzipiell ohne weitere Kalibrierung gültig. Zur Bewertung der Meßergebnisse (Bild 104) dient die Umrechnung der WÜK anhand

$$Nu_x = \frac{\alpha x}{\lambda}, \quad (93)$$

wobei  $x$  die Lauflänge in Strömungsrichtung beginnend bei der angeströmten Plattenkante (Bild 98),  $\alpha$  den gemessenen lokalen WÜK (75),  $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit der Luft und  $Nu_x$  die lokale Nusseltzahl bezeichnen. Diese Umrechnung ermöglicht den Vergleich mit der Korrelation für die längs angeströmte Platte in turbulenter Strömung [82]

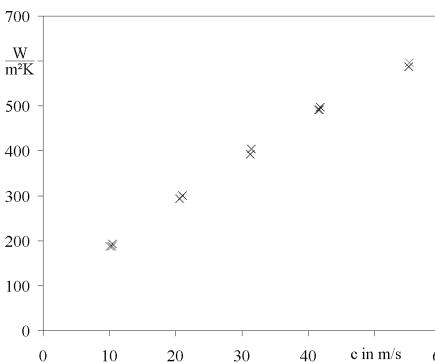
$$Nu_x = 0,0296 \cdot Re_x^{0.8} \cdot Pr^{1/3}. \quad (94)$$

Sie gilt für konstante Plattentemperatur im Bereich  $Pr \in (0,6; 60)$  und  $Re_x \in (5 \cdot 10^5; 10^7)$  bzw. für turbulente Überströmung der Platte und eignet sich als Vergleichsreferenz, da sie in 50 Jahren [83] immer wieder bestätigt wurde. Die aufgetretenen Differenzen betreffen die vierte Nachkommastelle des Koeffizienten. Die Reynoldszahl

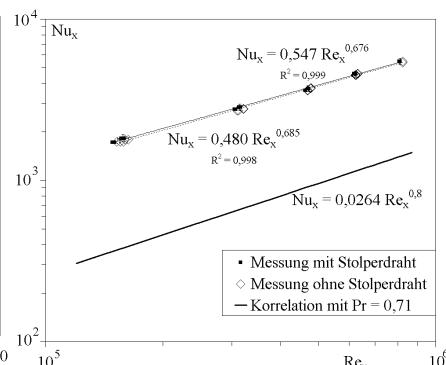
$$Re_x = \frac{c x}{v} \quad (95)$$

enthält ebenfalls die Lauflänge  $x$  entlang der Platte, die Strömungsgeschwindigkeit  $c$  über der Platte außerhalb der Grenzschicht und die Viskosität der Luft  $v$ .

Den Vergleich des Meßergebnisses mit der Korrelation Gl. (94) zeigt Bild 105, das zwei gemessene Abläufe (Bild 102) enthält. Um sicher zu sein, daß für die niedrigen Reynoldszahlen eine turbulente Strömung vorliegt, erfolgt eine zweite Messung mit Stolperdraht. Der Draht mit  $\varnothing 1$  mm ist nach [88] dimensioniert. Beide Messungen unterscheiden sich im Rahmen der Unsicherheit nicht.



**Bild 104** WÜK über Strömungsgeschwindigkeit, Ablauf gemäß Bild 102, WÜK aus  $R_a$  (75),  $R_a$  durch Approximation des thermischen Ausgleichs anhand Modell bestimmt, Messungen ohne Stolperdraht



**Bild 105** Vergleich der aus der Messung bestimmten Nusseltzahlen und der Korrelation (94) für die längs angeströmte Platte, Messung mit und ohne Stolperdraht  $\varnothing 1$  mm, Abschätzung der Meßunsicherheit (Fehlerbalken) analog Abschnitt 0

Das Verhältnis der aus der Messung bestimmten Nusseltzahlen (93) und denen der Korrelation (94) beträgt etwa vier. Dieser Faktor repräsentiert den Unterschied des Wärmeübergangs an der längs angestromten Platte mit verkürztem thermischem Anlauf im Vergleich zu einheitlicher PlattenTemperatur. Die Korrelation gilt für einheitliche PlattenTemperatur mit simultaner Entwicklung von strömungsseitiger und thermischer Grenzschicht beginnend bei der angestromten Kante der Platte ( $x = 0$ ). In der verwendeten Meßanordnung dient nur ein kleiner Teil der Plattenoberfläche – die Thermistoroberseite – der Bestimmung des WÜK, und die Entwicklung der thermischen Grenzschicht beginnt erst an der Thermistoroberfläche.

Kays und Crawford [84] geben für die Berücksichtigung der unbeheizten Anlaufstrecke in deren Gleichung 12-22 einen Korrekturterm an, der integriert über die beheizte Länge des hier verwendeten Thermistors einen Faktor 2,15 liefert [U16]. Der Faktor bestätigt eine Überhöhung aber auf niedrigerem Niveau als der hier bestimmte Faktor 4. Die Korrektur nach [84] basiert auf früheren Arbeiten seitens Reynolds, Kays und Kline [85], bei der Abmessungen Verwendung fanden, die zwei bis drei Größenordnungen größer als die hier beschriebenen sind. Daher besteht die Vermutung eingeschränkter Übertragbarkeit auf die hier sehr viel kleineren Abmessungen.

Mocikat und Herwig [86, 87] untersuchen diese Frage anhand eines Filmsensors mit 130 mm Länge quer zur bzw. 3 mm in Strömungsrichtung. Der Sensor ist auf einem Zylinder mit 46 mm Durchmesser in einem Strömungskanal mit 190 mm Breite installiert. Diese Anordnung registriert einen „tac-factor“ (tac = thermal adjustment coefficient) von 0,28 bzw. reziprok eine Überhöhung um Faktor 3,6. Weitere Untersuchungen zeigen, daß der Überhöhungsfaktor u. a. von der effektiven Sensorheizfläche und deren thermischen Isolation abhängt [98, 99, U24].

## 6.4 Rotierende Scheibe

Der anfänglichen Intention (Abschnitt 6.3) folgend findet eine Weiterentwicklung der an längsangestromter Platte stationär erprobten Sensorvariante statt. Eine Implementierung in das Telemetriesystem nebst Modifikation der Meßschaltung kommt hinzu.

Der Erprobung an einer rotierenden freien Scheibe dient ein kleiner Testrotor, der Drehfrequenzen bis  $11600 \text{ min}^{-1}$  erlaubt. Telemetriesystem und Experiment haben kaum Ähnlichkeit mit dem Aufbau zur rotierenden Kalibrierung von Drucksensoren (Abschnitt 5.2), während Motor, Spindel und Fundament identisch sind.

In diesem Abschnitt enthaltene Inhalte ermöglichen die Veröffentlichungen [U21, U23] und speisen die Diplomarbeit von B. Heinschke [97].

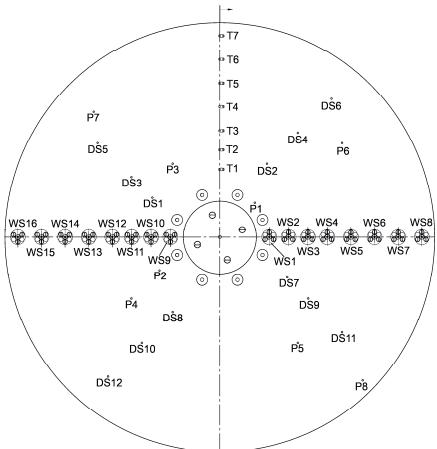
### 6.4.1 Instrumentierung

Die Instrumentierung der rotierenden freien Scheibe ist umfangreich, da dieser Aufbau gleichzeitig als Test des Telemetriesystems für dessen Einsatz im vergleichsweise komplexen KühlLuftmodellrotor dient, der einen Teil des SekundärLuftsystems einer Industriegasturbine abbildet. Bild 106 zeigt die Vorderansicht der aus einer Aluminiumlegierung bestehenden instrumentierten Scheibe mit 400 mm Außendurchmesser.

Neben den mit WS1 bis WS8 bezeichneten WÜK- Sensoren sind zusätzlich statische Druckmeßstellen P1 bis P8 mit Auflösung 16 Bit für Abtastung mit ca. 23 Hz und DS1 bis DS12 mit Auflösung 8 Bit für Abtastung mit ca. 8777 Hz implementiert. Von den 8-Bit Druckmeßstellen sind 8 Sensoren angeschlossen, während die anderen 4 Sensoren zur Vermeidung von Unwuchten ohne Verkabelung auskommen. Die Drucksensoren der Meßstellen P1 bis P8 sind im Telemetrikörper (Bild 80, Bild 108) angeordnet, der zuvor einer stationären Kalibrierung bei zwei Temperaturen zur Korrektur einer geringen Temperaturabhängigkeit unterzogen wurde. Zudem absolvierte der Telemetrikörper eine rotierende Kalibrierung der enthaltenen Drucksensoren zur Bestimmung der Querempfindlichkeit auf Fliehkraft (analog Abschnitt 5.2). Zusätzlich sind mit oberflächenbündig

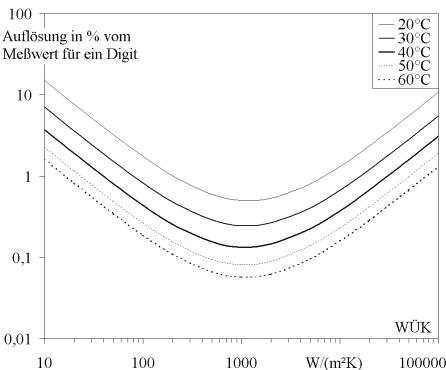
angeordneten Thermistoren realisierte Temperaturmeßstellen T1 bis T14 realisiert, von denen die erste Hälfte auf der Scheibenvorderseite (Bild 106) appliziert wurde.

Für die hier anschließende Auswertung sind nur die mit WS1 bis WS8 bezeichneten WÜK-Sensoren relevant, die in Abwandlung zu Abschnitt 6.3 eine zusätzliche rückseitige thermistorbasierte Temperaturmeßstelle zur Bestimmung der Scheibentemperatur aufweisen. Die WÜK-Sensoren WS9 bis WS16 sind baugleich aber passiv, da nur zur Vermeidung von Unwuchten implementiert.

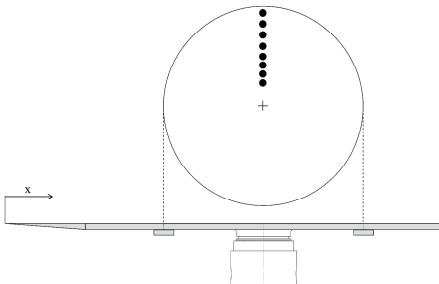


**Bild 106** Instrumentierung der Vorderseite der rotierenden freien Scheibe mit WÜK-Sensoren WS1 bis WS16, Druckmeßstellen 16 Bit 23 Hz P1 bis P8, Druckmeßstellen 8 Bit 8,777 kHz DS1 bis DS12, oberflächenintegrierte Temperaturmeßstellen T1 bis T7, einige Meßstellen passiv – nur zur Vermeidung von Unwuchten, zentral 8 Senkschrauben zum Auswuchten, aktive WÜK-Sensoren WS1 bis WS8 auf den Scheibenradien 46, 64, 82, 100, 122, 144, 166 und 188 mm

Die realisierte Meßschaltung ist analog Abschnitt 6.3, wobei die vorgesehene Anwendung im Kühlluftmodellrotor einen breiteren Arbeitstemperaturbereich und Fliehkräfteresistenz erfordert. Die infolgedessen reduzierte Auflösung wird durch Auswahl eines anderen ADU kompensiert, wodurch die modifizierte Schaltung eine im Vergleich bessere Auflösung für Temperaturen oberhalb 25 °C erzielt (Bild 95, Bild 107).



**Bild 107** Auflösung der Meßanordnung zur Bestimmung von WÜK; Wertigkeit eines ADU-Digits in Prozent vom WÜK-Meßwert aufgetragen über dem WÜK für verschiedene Temperaturen  $T_{10}$



**Bild 108** Aufbau zur ruhenden Kalibrierung der rotierenden Scheibe in der längsangeströmten Platte am Austrittsflansch der Freistrahldüse des Axialgebläses (Bild 97), Montage analog Bild 98

Zur Verbesserung der Approximation der Thermistorkalibrierung kommt die im Vergleich zu (80) erweiterte Formel

$$T = \left\{ \frac{1}{T_0} + \frac{1}{B} \left[ \ln \frac{R_{th}}{R_0} + a_2 \left( \ln \frac{R_{th}}{R_0} \right)^2 \right] \right\}^{-1} \quad (96)$$

zur Anwendung. Zudem erfolgt die Auswertung anhand eines gegenüber Bild 103 um eine weitere thermische Kapazität erweiterten Modells [U22, U24]. Dadurch wird bei der Approximation des thermischen Ausgleichs (analog Bild 101), die zur Bestimmung des WÜK dient (Abschnitt 6.3), eine geringere Abweichung erzielt.

#### 6.4.2 Kalibrierung in der Längsplatte

Der für die lokale Anwendung der Übertemperaturmethode auftretende Überhöhungsfaktor ist das Verhältnis aus gemessenem WÜK und WÜK- Korrelationswert auf Basis einheitlicher Temperatursituation. Diese Überhöhung des Meßergebnisses gegenüber der zugehörigen Korrelation (Bild 105) gilt es, für jeden WÜK- Sensor zu bestimmen, um den systematischen Einfluß von Applikationsunterschieden der kleinen Sensorabmessungen korrigieren zu können.

Dafür wird der gesamte Aufbau rotierende Scheibe (Bild 106) nebst Telemetrikkörper und Wellenadapter in eine passend ausgefräste längs angeströmte Platte (Bild 108) montiert und analog Abschnitt 6.3 vom Freistrahler überströmt. Die Anströmkante der Längsplatte trägt (Abschnitt 6.3, Bild 98) einen Stolperdraht mit  $\varnothing$  1 mm, der gemäß Kraemer [88] dimensioniert ist. Die Übergabe von Hilfsenergie und Datenstrom zum und vom Telemetriesystem geschieht in diesem Kalibrier- aufbau per Kabel.

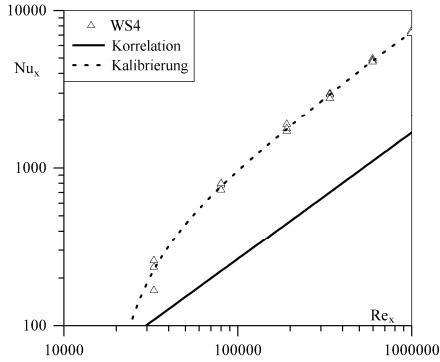


Bild 109 Korrelation (94) [82, 83] im Vergleich zu den gemessenen Nusseltzahlen des WÜK- Sensors WS4 (Bild 106), ruhende Kalibrierung (97) des rotierenden Aufbaus in der Anordnung längsangeströmte Platte im Freistrahler (Bild 108)

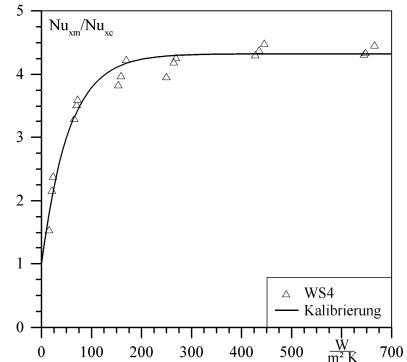


Bild 110 Kalibrierung der Überhöhung (97) in Abhängigkeit vom WÜK für den Sensor WS4 (Bild 109, Bild 106), drei Meßwerte je Betriebspunkt

Bild 109 zeigt exemplarisch die Meßwerte eines (WS4, Bild 106) der acht WÜK- Sensoren in der Scheibe im Vergleich zur Korrelation (94) [82, 83] (vgl. Abschnitt 6.3). Obwohl die Ausführung der WÜK-Sensoren wegen der erforderlichen Fliehkräftefestigkeit für den rotierenden Aufbau etwas abweicht sind die Ergebnisse vergleichbar. Der Vergleich mit der Korrelation (94) liefert eine Überhöhung im Sinne eines Verhältnisses aus gemessenen und aus der Korrelation entnommenen Nusseltzahlen  $Nu_{xm}/Nu_{xc}$  (Bild 110), wobei dieses Verhältnis wie für die in Abschnitt 6.3 genannten Messungen etwa vier beträgt.

Zur Kalibrierung dieser Überhöhung (Bild 110) ist das Verhältnis aus Meßwerten und zugehörigem Korrelationswert (94) über dem WÜK aufgetragen. Die Approximationsfunktion

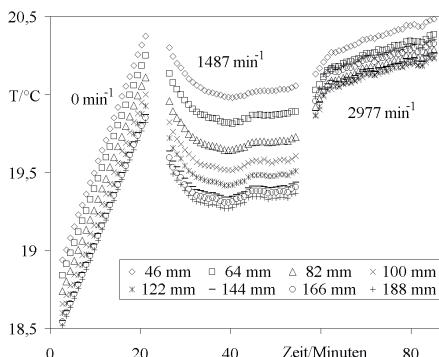
$$\frac{Nu_{xm}}{Nu_{xc}} = 1 + (k - 1) \left[ 1 - \exp \left( -\frac{\alpha}{\alpha_0} \right) \right] \quad (97)$$

beschreibt den Übergang der Überhöhung von einem niedrigen Wert zu einem konstanten Endwert  $k$  in Abhängigkeit vom WÜK. Die Funktion kommt mit den beiden Koeffizienten  $k$  und  $\alpha_0$  aus und modelliert die Abhängigkeit der Überhöhung von der Reynoldszahl (Bild 109) anhand des ebenfalls mit der Reynoldszahl ansteigenden WÜK. Gemeinsam mit der Korrelation (94) ist so der Zusammenhang von Nusseltzahl (93) und Reynoldszahl (95) für die längsangeströmte Platte abgebildet.

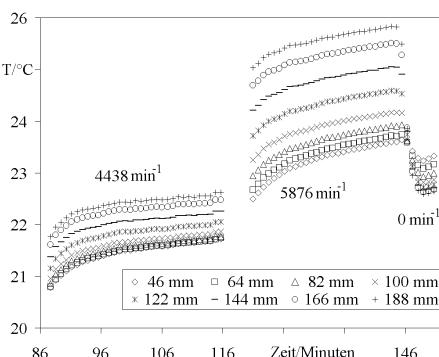
#### 6.4.3 Messungen an der freien Scheibe

Für die Messungen im rotierenden System erfolgt der Umbau der Scheibe nebst Telemetrikkörper und Wellenadapter von der längsangeströmten Platte (Bild 108) auf die Spindel (Bild 62). Hilfsenergieversorgung und Meßdatentransport arbeiten kabelfrei.

Die Diagramme Bild 111 bis Bild 113 zeigen den Temperaturverlauf der Versuchsfahrten über der Zeit für alle 8 Sensorradien, wobei die Scheibentemperaturmeßwerte der an WÜK- Sensorrückseite installierten Thermistoren als zeitliche Mittelwerte von 353 Einzelwerten aufgetragen sind. Das telemetrische Datenerfassungssystem wurde eine Viertelstunde vor Aufzeichnungsstart eingeschaltet. Den anfangs (Bild 111) ohne Rotation auftretenden zeitlich linearen Temperaturanstieg verursacht die Hilfsenergieversorgung des Telemetriesystems, die eine merkliche Verlustleistung thermisch in den Versuchsstand einkoppelt. Die konvektive Kühlung der Scheibe hat eine radiale Temperaturverteilung zur Folge, wobei die höchsten Temperaturen am geringsten und die niedrigsten Temperaturen am höchsten Radius auftreten. Dies ist erwartungsgemäß, da die Einkopplung der Verlustleistung wellennah erfolgt (Bild 108).



**Bild 111** Scheibentemperaturverlauf über der Zeit beim Betrieb der freien Scheibe für verschiedene Scheibenradien und Drehfrequenzen, Meßwerte von den Thermistoren auf der WÜK- Sensorrückseite

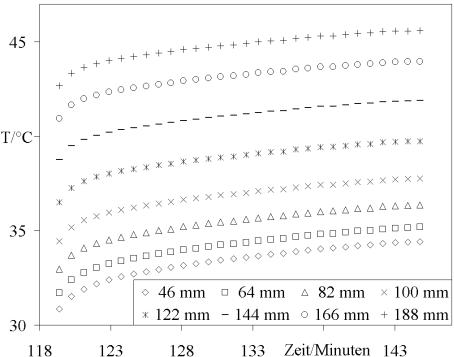


**Bild 112** Scheibentemperaturverlauf über der Zeit beim Betrieb der freien Scheibe für verschiedene Scheibenradien und Drehfrequenzen, Meßwerte von den Thermistoren auf der WÜK- Sensorrückseite

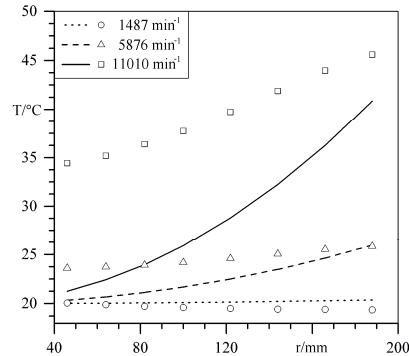
Je nach eingestellter Scheibendrehfrequenz tritt eine Veränderung der radialen Temperaturverteilung auf (Bild 111 bis Bild 114). Während bei niedriger Drehfrequenz ( $1487 \text{ min}^{-1}$ ) die intensivere konvektive Kühlung im äußeren Radienbereich der Scheibe überwiegt, dominiert bei hohen Drehfrequenzen der Aufstaueffekt, den die adiabate Wandtemperatur

$$T(r) = 20^\circ\text{C} + \Pr^{\frac{1}{3}} \frac{(\Omega r)^2}{2 c_p}, \quad (98)$$

zum Vergleich eingetragen in Bild 114, beschreibt. Dabei sind  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  als Umgebungstemperatur bzw.  $T_{\infty}$  und die dritte Wurzel der Prandtlzahl  $\text{Pr}$  als Rückgewinnungsfaktor angesetzt. Winkelgeschwindigkeit  $\Omega$  und Radius  $r$  der Scheibe sowie die Wärmekapazität  $c_p$  der Luft gehen ebenfalls ein [z. B. 89].



**Bild 113** Scheibentemperaturverlauf über der Zeit beim Betrieb der freien Scheibe für verschiedene Scheibenradien und  $11010\text{ min}^{-1}$  Drehfrequenz, Meßwerte von den Thermistoren auf der WÜK- Sensorrückseite



**Bild 114** Meßwerte des Scheibentemperaturverlaufs über dem Scheibenradius für Betriebspunkte mit unterschiedlicher Scheibendrehfrequenz, radikal verlauf der adiabaten Wandtemperatur (98) mit  $T_{\infty} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  zum Vergleich

Der gemessene radiale Verlauf der Scheibentemperatur (Bild 114) weicht von der Modellvorstellung der adiabaten Wandtemperatur (98) erwartungsgemäß ab, da die Wärmeleitung in der Scheibe, die eingekoppelte Verlustleistung des Telemetriesystems und Einflüsse der Luftreibung auf beiden Scheibenseiten nicht von der Modellvorstellung für eine adiabate Scheibenseite berücksichtigt sind. Die Modellvorstellung enthält aber den Einfluß, der den Temperaturanstieg an der Scheibe im äußeren Radienbereich maßgeblich hervorruft.

Neben rotations- und verlustleistungsbedingten Einflüssen auf die radikalen Temperaturverläufe im Bauteil treten signifikante zeitliche Temperaturgradienten in Umgebungsluft und Metallkonstruktion auf, die auch in realen Versuchsanlagen bei angestrebter stationärer Fahrweise nie gänzlich vermeidbar sind. Somit sind die im Abschnitt 6.3 formulierten Anforderungen an das WÜK- Meßverfahren hinsichtlich Querempfindlichkeit gegen zeitliche Temperaturgradienten und Temperaturniveau bestätigt. Insbesondere die Eignung der Meßmethode bei überlagerter Erwärmung des Meßaufbaus in der WÜK- Sensorumgebung verifizierte eine vom Autor initiierte Diplomarbeit [99] an einem stationären Versuchsaufbau.

Für die Darstellung der *Meßergebnisse* erfolgt eine Umrechnung der gemessenen WÜK  $\alpha$  in Nusseltzahlen

$$\text{Nu}_r = \frac{\alpha \cdot r}{\lambda}, \quad (99)$$

wie sie unter Verwendung des Radius des Sensors  $r$  auf der rotierenden Scheibe und der Wärmeleitfähigkeit von Luft  $\lambda$  für diese Konfiguration üblich ist. Für die Auftragung wird die Reynoldszahl

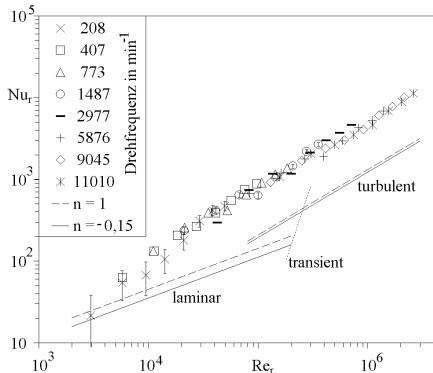
$$\text{Re}_r = \frac{\Omega \cdot r^2}{\nu} \quad (100)$$

unter Verwendung desselben Radius, der Winkelgeschwindigkeit der Scheibe  $\Omega$  und der Viskosität der Luft  $\nu$  berechnet. Bild 115 zeigt die unkalibrierten Nusseltzahlen (99) über der Reynoldszahl.

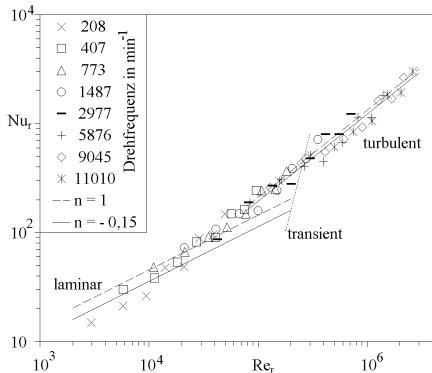
Die aufgetragenen Meßwerte (Bild 115) weisen eine *signifikante Streuung* auf, obwohl die Mittelwerte dreier Einzelmessungen also von drei thermischen Ausgleichsvorgängen (analog Bild 101) angegeben sind. Diese Streuung resultiert bei niedrigen WÜK bzw. Reynoldszahlen einerseits aus begrenzter Auflösung (Bild 107) und andererseits generell aus thermisch *unsteten Zustrombedingungen*. Die experimentelle Untersuchung geschah im Winter, wobei die freie Scheibe vermutlich Luftschwaden zufällig abwechselnd aus Heizkörper- oder Kellerfußbodenumgebung ansaugte. Mehr Details nebst Ausgleichskurven und Diskussion der Streuung finden sich in [U23].

Neben den thermischen Randbedingungen beeinflußt die Meßunsicherheit das Ergebnis. Die in Bild 115 eingetragenen vertikalen Fehlerbalken (208 und  $1487 \text{ min}^{-1}$ ) geben die abgeschätzte Unsicherheit seitens Meßaufbau und Meßschaltung an. Diese Unsicherheit der Nusseltzahlen setzt sich zusammen aus den Einzelunsicherheiten des Radius  $r$  (99), der aktiven Sensorfläche  $A_t$  (75) und dem Einfluß der Unsicherheit der Temperaturmessung auf die Wärmeleitfähigkeit der Luft  $\lambda$  (99). Zudem kommen die Unsicherheiten des Temperaturkalibrators (Bild 93) und des bei der Temperaturkalibrierung sowie bei der Kalibrierung der Meßschaltung (inkl. ADU) verwendeten Multimeters. Zusammen mit der doppelten Standardabweichung der Meßwerte von der thermischen Ausgleichsfunktion (analog Bild 101 bzw. Fig. 10 & 11 [U23], Unsicherheit der Approximation) und umgerechnet in ADU-Digit erfolgt erweitert um die Unsicherheit des ADU (in Digit) der Übergang zum WÜK anhand der Auflösung. Bild 107 gibt dazu die Wertigkeit eines Digits in Abhängigkeit des WÜK an. Die Summierung der Einflüsse unterschiedlicher Herkunft erfolgt quadratisch. Die Unsicherheit der aktiven Sensorfläche  $A_t$  (ca. 2 %) dominiert bei  $\text{WÜK} > 300 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ , während bei niedrigeren Werten die anderen Unsicherheiten zusammengenfaßt in  $R_a$  (75) hervortreten.

Die Unsicherheit der Reynoldszahl ist gering ( $\leq 1 \%$ ), da Sensorradius  $r$  und Winkelgeschwindigkeit  $\Omega$  als unmittelbare Einflüsse mit geringer Toleranz gemessen sind. Die horizontalen Fehlerbalken sind kleiner als die Symbolgröße (Bild 115) und daher nicht dargestellt. Weitere Einzelheiten zur Abschätzung der Meßunsicherheit enthält die vom Autor initiierte Diplomarbeit von B. Heinschke [97].



**Bild 115** Nusseltzahlen (99) aus gemessenen WÜK aufgetragen über der Reynoldszahl (100) von 8 Sensoren (Bild 106) positioniert an verschiedenen Scheibenradien und für variierte Scheibendrehfrequenz, jeweils Mittelwert dreier Einzelmessungen, laminare (101) und turbulente (102) Korrelationen für verschiedene Temperaturprofile (103) mit Exponenten  $n$ , transiente Korrelation (104)



**Bild 116** Nusseltzahlen (Bild 115) kalibriert nach (97) bzw. Bild 110 aufgetragen über der Reynoldszahl von 8 Sensoren (Bild 106) positioniert an verschiedenen Scheibenradien und für variierte Scheibendrehfrequenz, jeweils Mittelwert dreier Einzelmessungen, laminare (101) und turbulente (102) Korrelationen für verschiedene Temperaturprofile (103) mit Exponenten  $n$ , transiente Korrelation (104)

Die Anwendung der Kalibrierung an der längsangeströmten Platte (Bild 109, Bild 110, Abschnitt 6.4.2) auf die Meßwerte an der rotierenden freien Scheibe reduziert die Nusseltzahlen (Bild 115) und liefert Bild 116.

Zum Vergleich der Meßergebnisse dienen die von Dorfman [90] angegebenen Korrelationen

$$Nu_{r \text{ laminar}} = 0.308 (n+2)^{0.5} \text{ Pr}^{0.5} \text{ Re}_r^{0.5}, \quad (101)$$

$$Nu_{r \text{ turbulent}} = 0.0197 (n+2.6)^{0.2} \text{ Pr}^{0.6} \text{ Re}_r^{0.8}, \quad (102)$$

die auf der analytischen Lösung von Navier-Stokes- und Energiegleichungen basieren. Die Korrelationen enthalten die Prandtlzahl  $\text{Pr}$  (= 0,72 für Luft), die Reynoldszahl  $\text{Re}_r$  (100) und den Exponenten  $n$  des radialen Temperaturprofils  $T(r)$  der Scheibe

$$\theta = T(r) - T_{\infty} = c_0 r^n, \quad (103)$$

wobei die vom Scheibenradius  $r$  abhängige Übertemperatur der Scheibe  $\theta$  gegenüber der Temperatur der zuströmenden Luft  $T_{\infty}$  mit dem Koeffizienten  $c_0$  und dem Exponenten  $n$  beschrieben ist. Beide Korrelationen sind für zwei verschiedene radiale Temperaturverläufe ( $n = -0,15$  und  $n = 1$ ) in Bild 115 und Bild 116 zum Vergleich angegeben, da für unterschiedliche Drehfrequenzen qualitativ verschiedene radiale Temperaturverteilungen (Bild 114) registriert wurden. Deren Bereich umreißen die zwei angegebenen Exponenten.

Die ebenfalls eingetragene (Bild 115, Bild 116) Korrelation für den laminar- turbulent- Übergang

$$Nu_{r \text{ transition}} = 10 \cdot 10^{-20} \text{ Re}_r^4 \quad (104)$$

beruht auf Arbeiten von Popiel und Boguslawski [91]. Zur Auswahl der zum Vergleich verwendeten Korrelationen enthält [U23] noch weitere Ausführungen.

Im *Ergebnis* zeigt der Vergleich gemessener Nusseltzahlen (Bild 115) mit der angegebenen Korrelation für turbulente Strömung (101) in ähnlicher Weise eine signifikante Überhöhung der Meßwerte gegenüber der Korrelation wie für die längsangeströmte Platte (Abschnitte 6.3 und 6.4.2). Diese im Abschnitt 6.3.5 diskutierte Überhöhung resultiert u. a. aus unbeheizter Anlaufstrecke und der Diskrepanz zwischen den Sensoraspektverhältnissen, die einerseits groß für die Korrelationen und andererseits klein ( $\approx 2$ ) für die hier verwendeten Sensoren sind. Die quantitative Aufteilung der Einzeleinflüsse ist nach aktuellem Stand der Arbeiten noch nicht abgeschlossen. Für die Verwendbarkeit der WÜK- Sensoren ist dieser Aspekt unerheblich, wenn eine geeignete Kalibrierung gelingt.

Bemerkenswert ist daher die prinzipielle Gültigkeit der Sensorkalibrierung von der längsangeströmten Platte (Abschnitt 6.4.2) für die Meßwerte von der rotierenden freien Scheibe. Die Anwendung dieser Kalibrierung auf die Meßwerte der freien Scheibe verschiebt die Meßwerte in den Bereich der Korrelation der rotierenden freien Scheibe (Bild 115, Bild 116). Vor dem Hintergrund der Tatsache, daß die verwendeten Korrelationen auf kontinuierlicher Temperaturverteilung im interessierenden Bauteil beruhen, ist aufgezeigt, daß die Überhöhung der mit der lokalen Übertemperaturmethode gemessenen WÜK durchaus für verschiedene Strömungssituationen gleich ausfallen kann.

Aus meßtechnischer Sicht ist das ein maßgeblicher Vorteil, da die Überhöhung gemessener WÜK als spezifische Eigenschaft der lokalen Übertemperaturmethode damit übertragbar wird hinsichtlich der Korrelationen klassischer Arbeiten, die auf Meßanordnungen mit einheitlicher bzw. kontinuierlicher Temperaturverteilung im untersuchten Bauteil beruhen.

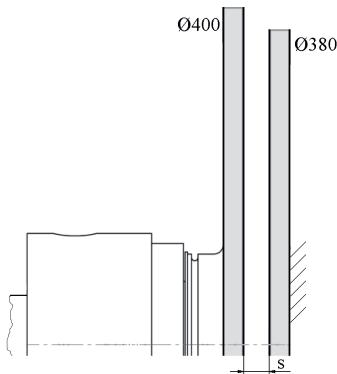
Ein weiterer Aspekt ist die registrierte starke *Streuung* der Meßwerte, die größer ausfällt als die Unsicherheit des Meßaufbaus, wie die in Bild 115 eingetragenen Fehlerbalken verdeutlichen. Der genaue Blick auf den thermischen Ausgleich (analog Bild 101, aber vom rotierenden Aufbau Fig. 9 bis 11 [U23]) zeigt Schwankungen niedriger Frequenz, die auf veränderliche Lufttemperatu-

ren in der Zuströmung zurückzuführen sind. Die Ursachen für die Registrierung dieser Schwankungen sind demnach die hohe Auflösung der Meßschaltung hinsichtlich der Temperatur, die geringe thermische Trägheit des Sensors und die zudem kleinen Abmessungen der Meßanordnung. Dies gilt insbesondere im Vergleich zu den Aufbauten früherer Arbeiten, bei denen große Meßanordnungen mit hoher Temperaturdifferenz zwischen Fluid und Bauteil zum Einsatz kamen. Zudem wurde das untersuchte Bauteil meist gänzlich beheizt mit dem Zweck der Untersuchung des Wärmeübergangs.

Die registrierte Streuung ist daher Ausdruck der Sensitivität des verwendeten WÜK-Sensors. Die lokale Anwendung der Übertemperaturmethode bedingt somit einerseits die erzielte örtliche Auflösung und andererseits die geringe Rückwirkung auf das Meßobjekt, da auf anteilig sehr kleiner Fläche am Bauteil nur geringe Übertemperaturen benötigt werden. Ein einzelner WÜK-Sensor trägt nur wenige mW thermische Leistung in die untersuchte strömungsthermische Situation ein, weshalb er hinsichtlich seines daher geringen Hilfsenergiebedarfes ideal für den Einsatz als Bestandteil einer telemetrischen Meßeinrichtung geeignet ist.

#### 6.4.4 Messungen am offenen Rotor-Stator-System

Im Anschluß an die Erprobung des Telemetriesystems an der freien Scheibe kann durch Modifikation des Aufbaus das offene Rotor-Stator-System untersucht werden. Dabei kommt der beim Ausschneiden der längsangestromten Platte (Abschnitt 6.4.2, Bild 108) entstandene Rest als Gegenplatte zum Einsatz. Das so realisierte offene Rotor-Stator-System komplettiert eine Traverse, welche eine Spaltmaßverstellung ermöglicht. Dieser Abstand zwischen Rotor und Stator ist als Versuchspараметer am Kühlluftmodellrotor ebenfalls verstellbar. Der Statordurchmesser beträgt 380 mm, der Durchmesser der rotierenden Scheibe 400 mm.



**Bild 117** Aufbau zum offenen Rotor-Stator-System, Rotorscheibe mit Telemetriesystem links, Statorplatte rechts, Rotorscheibe mit 400 mm Durchmesser und Statorscheibe mit 380 mm Durchmesser, Abstand s der Scheiben variiert

Die Inhalte dieses und des nachstehenden Abschnitts 6.4.5 entstanden im Rahmen der vom Autor initiierten Diplomarbeit von B. Heinschke [97] und wurden später veröffentlicht [U26].

Im Gegensatz zum vorstehenden Abschnitt kommt eine konzentrisch angeordnete Statorplatte (Bild 117) hinzu, die den zusätzlichen Variationsparameter Abstand  $s$  zwischen der rotierenden Scheibe und der Statorplatte hervorruft. Dieser wird häufig dimensionsfrei

$$G = s / D_s \quad (105)$$

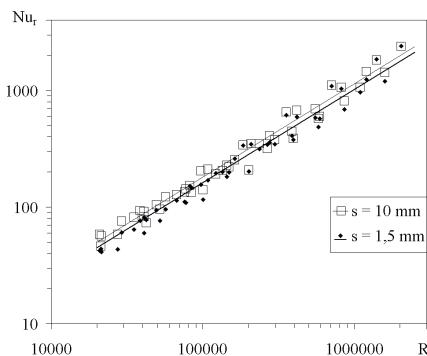
verwendet, wobei der Spalt oder Abstand  $s$  mit dem Durchmesser  $D_s$  der Statorplatte ins Verhältnis gesetzt wird (z. B. Pellé u. Harmand [92] oder Daily u. Nece [93]).

Das Meßprogramm enthält die Abstände 1½, 3, 5½, 10 und 25 mm sowie die Drehfrequenzen 208, 407, 773, 1487, 2977, 5876 und 8558 min<sup>-1</sup>. Die mit der freien Scheibe realisierten noch höheren

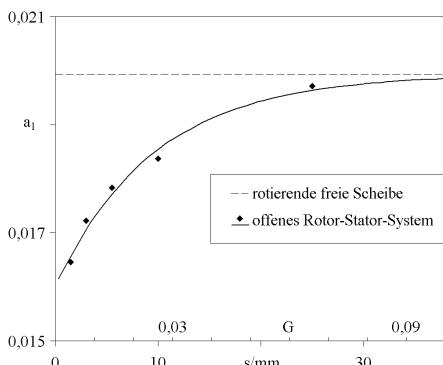
Drehfrequenzen bereiteten im Aufbau Rotor-Stator-System wegen einer Resonanz im Statorplattengestell Schwierigkeiten und konnten daher nicht gefahren werden.

Im Gang der Auswertung kommt analog der Untersuchung der freien Scheibe die Kalibrierung an der längsangeströmten Platte zum Einsatz (Abschnitt 6.4.2). Das Ergebnis (Bild 118) unterscheidet sich zunächst wenig von dem der Untersuchung der freien Scheibe (Bild 116). Ein präziser Blick auf die Meßdaten verrät eine geringe Abhängigkeit von dem Abstand  $s$  zwischen rotierender Scheibe und Stator. Dabei ist der Unterschied erwartungsgemäß für den kleinsten Abstand von  $s = 1,5$  mm am größten und kaum merklich für den größten untersuchten Abstand ( $s = 25$  mm), wobei die Präsenz der Platte den Wärmeübergang reduziert. Dies ist mit Rücksicht auf die Behinderung des freien Zustroms zur Rotscheibe durch die Statorplatte begründbar.

Die Schwierigkeit der unmittelbaren Unterscheidbarkeit der Meßwerte von der freien Scheibe und des Rotor-Stator-Systems sind einerseits durch den geringen Unterschied der WÜK und andererseits durch die maßgebliche Streuung der Meßwerte (Abschnitt 6.4) bedingt. Daher kann die Quantifizierung der systematischen Unterscheidung der Meßwerte des Rotor-Stator-Systems von denen der freien Scheibe nur im Verbund bzw. gestützt auf alle Meßwerte erfolgen.



**Bild 118** Nusseltzahlen (99) aus gemessenen WÜK aufgetragen über der Reynoldszahl (100), offenes Rotor-Stator-System mit variiertem Abstand  $s$  zwischen rotierender und ruhender Scheibe, von 8 Sensoren (Bild 106) positioniert an verschiedenen Scheibenradien, von verschiedenen Scheiben-drehfrequenzen, jeweils Mittelwert dreier Einzelmessungen, nur Meßwerte für  $Re_r > 20000$ , Approximation (106) auf Basis individueller Exponenten  $n$  (103) für jede gemessene Drehfrequenz, nur Darstellung mit mittlerem  $n$  beteiligter Messungen



**Bild 119** Koeffizient  $a_1$  (106) über dem Abstand  $s$  bzw.  $G$  (105), bestimmt aus den Meßwerten (Bild 118) für die variierten Abstände auf Basis der turbulenten Korrelation (102) von Dorfman [90], Approximation (107) mit Konvergenz gegen den gemessenen Wert der rotierenden freien Scheibe  $a_1 = 0,01993$ , Ergebnis auf Basis von WÜK-Meßwerten verschiedener Sensordurchmesser und verschiedener Drehfrequenzen der im offenen Rotor-Stator-System betriebenen rotierenden Scheibe (Bild 106)

Ausgehend von der prinzipiellen Ähnlichkeit des offenen Rotor-Stator-Systems zur freien Scheibe und der Tatsache, daß mit steigendem Abstand zwischen der rotierenden Scheibe und der Statorplatte der Fall freie Scheibe immer mehr angenähert wird, ist es naheliegend, der Korrelation für die freie Scheibe einen Korrekturterm hinzuzufügen, der mit zunehmendem Abstand  $s$  bzw.  $G$  abklingt.

Dafür wird der Korrelation (102) von Dorfman [90] anstelle des konstanten Faktors 0,0197 der Koeffizient  $a_1$  vorangestellt.

$$Nu_r = a_1 (n + 2.6)^{0.2} Pr^{0.6} Re_r^{0.8} \quad (106)$$

Dieser Koeffizient  $a_1$  kann jetzt unter Beibehaltung der Korrelation für die freie Scheibe für alle gemessenen Abstände  $s$  im Rotor-Stator-System bestimmt werden. Dieser Vorgang ist prinzipiell für die Abstände  $s = 1,5$  mm und  $s = 10$  mm in Bild 118 dargestellt.

Das Ergebnis der Anpassung durch Variation des Koeffizienten  $a_1$  zeigt Bild 119. Die Symbole geben den Wert des Koeffizienten  $a_1$  für den jeweiligen Abstand an. Der Wert für die rotierende freie Scheibe  $a_1 = 0,01993$  ist als Linie eingezeichnet, gegen welche die Approximation

$$a_1 = 0,01993 - 0,0039 \exp(-G/0,0255) \quad (107)$$

für zunehmenden Abstand  $G$  konvergiert.

Da für jede gemessene Drehfrequenz eine andere radiale Temperaturverteilung auftritt, wird jeweils der passende Exponent  $n$  (103) bestimmt. Nur für die Darstellung (Bild 118) kommt ein mittleres  $n$  zum Einsatz. Darüber hinaus erfolgt wieder eine arithmetische Mittelung dreier Einzelmesswerte für WÜK bzw. Nu. Für die Approximation, die auf der Korrelation (102) von Dorfman [90] für turbulente Strömung beruht, finden nur die Meßwerte Verwendung, deren Reynoldszahl  $Re_r > 20000$  ist. Dies stützt sich u. a. auf die Beobachtung, daß der Anstieg  $Re_r^{0,8}$  unterhalb  $Re_r = 20000$  nicht mehr vorliegt (Bild 116).

#### 6.4.5 Ergebnis

Das Ergebnis umfaßt sowohl inhaltliche als auch technische bzw. technologische Aspekte, die einerseits experimentelle Daten nebst Korrelation als auch die erfolgreiche Validierung des zu erprobenden Telemetriesystems betreffen.

So kann im Ergebnis der Arbeiten an der rotierenden freien Scheibe, die um den Aufbau offenes Rotor-Stator-System erweitert wurden, eine Korrelation angegeben werden, die beide Anordnungen hinsichtlich des Gültigkeitsbereiches abdeckt [97]. Sie basiert auf der erstmals von Dorfman [90], (102) für die rotierende freie Scheibe und turbulente Strömung angegebenen Korrelation. Diese konnte mit geringer Abweichung bestätigt und um einen Korrekturterm für die Anordnung offenes Rotor-Stator-System erweitert werden. Dabei ist der Fall rotierende freie Scheibe der Sonderfall des offenen Rotor-Stator-Systems mit sehr großem Abstand zwischen Rotor und Stator. (106) und (107) bilden zusammen die Korrelation

$$Nu_r = \left( 0,01993 - 0,0039 e^{\frac{-G}{0,0255}} \right) (n + 2,6)^{0,2} Pr^{0,6} Re_r^{0,8}, \quad (108)$$

wobei der Exponent  $n$  (103) in Anlehnung an Dorfman [90] das radiale Temperaturprofil angibt [97]. Eine Überprüfung der Gültigkeit des neuen Terms (107) für andere Prandtlzahlen  $Pr$  erfolgte nicht. Die Reynolds- (100) und die Nusseltzahlen (99) gelten für den lokalen Radius  $r$  auf der rotierenden Scheibe.

Aus technischer bzw. technologischer Sicht ist die erfolgreiche Erprobung und Validierung eines komplexen Telemetriesystems zur Messung von Drücken und Temperaturen im rotierenden System bei bis über  $11000 \text{ min}^{-1}$  Drehfrequenz herauszustellen. Dabei erzielt die Temperaturmessung eine hohe Auflösung (besser als  $0,01 \text{ K}$ ). Die dabei nicht ganz befriedigende Streuung durch das Rauschen der Schaltung konnte für den nachfolgenden Aufbau am Kühlluftmodellmotor so verbessert werden, daß Schwankungen um etwa  $0,1$  bis  $0,2 \text{ mV}$  im vollständigen Meßaufbau verbleiben.

Außerdem konnte eine bisher nicht etablierte Meßmethode zur Bestimmung des WÜK auf Basis der lokal angewendeten Übertemperaturmethode in das Telemetriesystem eingebunden werden. Dies belegt die besonderen Vorteile der Eigenentwicklung hinsichtlich der Flexibilität und letztlich auch hinsichtlich der Kosten, wie ein Blick auf die Preise kommerziell angebotener Systeme zeigt.

## 6.5 Einordnung

Für eine Einordnung der in diesem Abschnitt 6 dargestellten Meßaufbauten in die im Abschnitt 3 dargelegte Systematisierung werden beide Kriterien (Bild 2 S. 8)

- Bewegung und Übertragung (Abschnitt 3.1) sowie
- Anordnung der Trennstelle in der Meßkette (Abschnitt 3.2)

verwendet.

Die Meßaufbauten der Abschnitte 6.2 und 6.4 nutzen das in Abschnitt 6.1 beschriebene Telemetriesystem. Abschnitt 6.3 berichtet von einer Sensorik, die speziell für den Einsatz an diesem Telemetriesystem ausgelegt ist und deren telemetrischen Einsatz Abschnitt 6.4 darlegt.

Hinsichtlich des Kriteriums *Bewegung und Übertragung* liegt wie bei den Meßtechnikanwendungen des Abschnitts 5 eine *Rotationsbewegung* vor. Die Übertragung der Hilfsenergie erfolgt auf *radialer Position*, während für die Informationsübertragung ein freies Wellenende zur Verfügung steht.

Daraus resultieren unterschiedliche Anforderungen für die *Übertragungsbereiche* von Hilfsenergie und Information. Während die Hilfsenergie analog Abschnitt 5 eine Trennstelle mit kombiniert rotatorischer und translatorischer Bewegung überwinden muß, genügt für den Informationstransport ein kleiner Übertragungsbereich, der nur die Wellenmittelpunktsbahn sicher einschließt.

Die Realisierung der Hilfsenergieübertragung ist analog dem für Abschnitt 5 eingesetzten Telemetriesystem, welches das *Übertragungsprinzip Feld* (magnetisches Wechselfeld) nutzt. Im Gegensatz dazu erfolgt die Informationsübertragung am Wellenmittelpunkt optisch, was dem Übertragungsprinzip (Licht-) *Wellenausbreitung* zuzuordnen ist. Diese unterschiedlich gewählten Prinzipien und Größen bewirken eine gute Kanaltrennung von Hilfsenergie- und Informationsübertragung.

Hinsichtlich der *Anordnung der Trennstelle* in der Meßkette (Abschnitt 3.2, Tabelle 1) sind die im Abschnitt 6 beschriebenen Telemetrieanwendungen im Sinne der Systematisierung Abschnitt 3.2.6 „Digitale Technik mit Zwischenspeicher“ zugeordnet. Dabei fahren alle Teile der Meßkette (Abschnitt 2.1) beginnend beim *Meßeffekt* bis zur *Zwischenspeicherung* auf dem bewegten Maschinenteil mit. Die wesentlichen Vorteile der digitalen Technik werden in gleicher Weise genutzt wie in Abschnitt 5.4 für das zuerst eingesetzte System erwähnt. Darüber hinaus erfordern die Betriebsarten mit erhöhter zeitlicher Auflösung (akustische Messungen, WÜK-Messungen) eine Abtastrate, welche die realisierte Übertragungsdatenrate übersteigt. Ein implementierter Zwischenspeicher ermöglicht für begrenzte Zeit deutlich höhere Datenraten und löst das Problem des Übertragungsdatenratengpasses. Jenseits des implementierten Zwischenspeichers nutzt das System ein komplexeres Betriebsprogramm, das mehrere Betriebsarten und komplexere Meßabläufe zu steuern ermöglicht.

Abschließend ist einzuschätzen, daß die dargestellten Realisierungen aktuell sind. Die Verwendung modularer digitaler Technik wird ausgebaut und bietet Potential für weitere Realisierungen sowie die Implementierung neuer Module für erweiterte Meßaufgaben. Die Darstellung zeigt zudem, daß insbesondere experimentell bisher unzugängliche wissenschaftliche Fragen des Forschungsfeldes durch zielgerichtete Arbeit meßtechnisch aufgelöst werden können.

## 7 Zusammenfassung

Diese Arbeit umreißt Aktivitäten und Aufwendungen, die ein Übergang vom ruhenden Laborexperiment zu einem auf dem bewegten Maschinenteil mitgeführten Meßaufbau erfordert. Ziel dieses Übergangs ist die Bereitstellung von Meßdaten aus Bereichen der maschinenbaulichen Betrachtung, für die einerseits ein ruhendes Experiment keine zutreffenden Ergebnisse liefern kann, und deren Sachverhalte andererseits durch analytische oder numerische Rechnungen nicht mit hinreichender Genauigkeit zugänglich sind.

Die Arbeit beginnt mit einer Motivation, welche die Abgrenzung hinsichtlich Übertragungsentfernung und Relativgeschwindigkeit so formuliert, daß typische Maschinenbau-Telemetriesysteme innerhalb und Fernerkundungssysteme außerhalb der Betrachtung liegen. Im Anschluß werden mögliche Vorgehensweisen eines mit der „Messung am bewegten Maschinenteil“ betrauteten Ingenieurs *systematisiert*. Dies geschieht anhand von Kriterien, die den Lösungsraum für diese Menge an Meßaufgaben aufspannen. Zu den dabei als vorrangig erkannten *Systematisierungskriterien* zählen die *Übertragung* von Meßdaten und Hilfsenergie, die *Bewegung* bzw. Relativbewegung an der Trennstelle und die *Anordnung der Trennstelle* im Informationspfad der Meßkette. Diese Trennstelle ist erforderlich, um Differenzgeschwindigkeiten zueinander bewegter Maschinenteile zu ermöglichen, und bildet somit die Grundlage für die Mehrzahl von Realisierungen des Messens in bewegten Maschinenstrukturen. Der Hauptabschnitt „Systematisierung“ enthält abschließend einen Algorithmus für die Realisierung von Messungen an bewegten Maschinenteilen, der aus der systematischen Betrachtung und der Erfahrung in diesem Gebiet resultiert.

Die *inhaltlichen Hauptabschnitte* 4 bis 6 thematisieren unterschiedliche Meßaufbauten, die alle von der Forschung im Bereich der Sekundärluftsysteme von Turbomaschinen initiiert sind, oder Kalibrierungen bzw. akademische Begleituntersuchungen liefern. Dabei füllen die inhaltlich ausgerichteten Hauptabschnitte die aus der *Systematisierung* resultierende kombinatorische *Variantenvielfalt* von Realisierungen zum „Messen am bewegten Maschinenteil“ erwartungsgemäß nicht aus.

Abschnitt 4 behandelt Untersuchungen, die mit optischem Zugang zum rotierenden System arbeiten und ohne aktives Telemetriesystem auskommen. Im Vergleich dazu beruhen die Abschnitte 5 und 6 meßtechnisch jeweils auf aktiven digitalen Telemetriesystemen aus eigener Entwicklung. Während das System zum Abschnitt 5 zunächst für eine vorhandene Versuchsanlage eines laufenden Forschungsvorhabens überhaupt eine Lösung zur Erfassung von Druck und Temperatur liefert, wurde das System zum Abschnitt 6 konsequent weiterentwickelt, wodurch die andere Versuchsanlage von neuen Möglichkeiten des im Vergleich zum zuvor genannten Telemetriesystem komplexeren Systems profitiert.

Diese Weiterentwicklung betraf einerseits die Möglichkeit mehrerer Betriebsarten für verschiedene Aufgaben, bei denen Meßabläufe z. B. zeitaufgelöste Druckmessungen bis in den akustischen Bereich hinein gezielt gesteuert und seitens des Experimentators vom ruhenden System her auszulösen waren. Andererseits wurde ein Meßverfahren zur direkten Bestimmung lokaler Wärmeübergangskoeffizienten derart entwickelt, daß Kompatibilität zum Telemetriesystem besteht. Dieses Meßverfahren mußte, da es bisher auch für Messungen im ruhenden Labor so nicht eingeführt war, zunächst untersucht werden.

*Insgesamt* verdeutlicht diese Arbeit, daß insbesondere die interdisziplinäre Tätigkeit problemangepaßte Versuchs- bzw. Meßaufbauten hervorbringt, die zum Vergleich stehende kommerzielle Lösungen deutlich übertreffen. Hier treffen Fachgebetskomponenten aus den Bereichen *Meß- und Regelungstechnik* sowie *Elektronik* für die Realisierung maßgeschneideter meßtechnischer Versuchsaufbauten zusammen. Die Erfordernisse der Maschinenbauanwendung Gasturbine fügen

*Strömungsmechanik, Thermodynamik* und zugehörige Konstruktionsaspekte als integrale Bestandteile hinzu. Erst eine insgesamt aus Sicht aller beteiligten Fachgebiete effiziente und funktionale Lösung ermöglicht die beste Anpassung an die Problemstellung. Dieser Vorteil resultiert allgemein und in systematischer Weise aus einem interdisziplinären Vorgehen, das *feste traditionelle Schnittstellen* z. B. zwischen Sensorik und Datenerfassungstechnik oder hinsichtlich der Trennstelle in der Meßkette zur Überwindung von Relativbewegung vermeidet.

Speziell für diese Arbeit resultieren die direkten Lösungswege aus der globalen Gestaltungsfreiheit für alle Systemkomponenten, die Meßmethode, Sensorik, Erfassungstechnik, Telemetriesystem und Maschinenkonstruktion bzw. Versuchsanlage einschließen. Dieses Vorgehen ermöglicht einerseits die aus akademischer Sicht wünschenswerte Erschließung *neuer Forschungsfelder* und andererseits die Gewinnung von Industriepartnern, die aktuelle Fragestellungen nebst *Drittmitteln* für gemeinsame Forschung beisteuern.

Der Erfolg der in dieser Arbeit dargelegten Aktivitäten wurde durch interdisziplinäres Vorgehen maßgeblich begünstigt. Dies betrifft sowohl die Kombination von maschinenbaulicher Fragestellung mit der spezialisierten, maßgeschneiderten meßtechnischen Lösung als auch die im Einzelnen genannten aber weniger vordergründig behandelten informationstechnischen Aspekte. Diese Ausweitung der Anforderungen bzw. Ausreitung der Möglichkeiten hinsichtlich der Integration von Elektronik, Meßtechnik sowie Informationstechnik ist ein seit vielen Jahren bestehender Trend im Maschinen- und Anlagenbau. Daher können *allgemein steigende Anforderungen* an alle Berufsgruppen vom Facharbeiter bis zum Diplomingenieur für aktuelle und zukünftige Absolventen vorausgesetzt werden.

Dieser Aspekt ist einerseits aus Sicht der Ausbildungseinrichtung und andererseits hinsichtlich der Ausdifferenzierung von Ausbildung insgesamt relevant. Vor dem Hintergrund steigender Anforderungen kann die Abkürzung eines Ingenieur-Hochschulstudiums auf Niveau eines Bakkalaureats als alleinige Ausbildung kaum überzeugen und bestenfalls vermeintlicher Kostensenkung bzw. der Erfüllung irrationaler politischer Vorgaben dienen. Vielmehr ist zu erwarten, daß Facharbeiter und andere Vertreter der praktischen Ebene zusätzlich zur Berufsausbildung theoretische Kenntnisse durch aufbauende Ausbildungen oder Studiengänge erwerben. Ein Verzicht auf den praktischen Teil der Ausbildung – etwa durch ein abgekürztes Ingenieurstudium allein – führt zu Ausbildungsinsuffizienz, was die Arbeitsmarktauglichkeit der Absolventen infrage stellt.

So scheint die vielerorts umgesetzte Aufteilung des Hochschuldiploms ins Bakkalaureat mit der Möglichkeit einer Verlängerung, die zu einem dem Diplomingenieur vergleichbaren Abschluß führt, besonders unsinnig, da die meisten Studenten *ohne Berufsausbildung* ins Studium starten.

Die Frage der *steigenden Anforderungen* an Absolventen betrifft die *Hochschule* in gleicher Weise. Jeder Akteur im Bereich der Ausbildung wird sich in Auseinandersetzung mit eigenen Erfahrungen die Frage stellen, was ein Absolvent von der Hochschule mitbekommen sollte. Diese Frage findet allgemein dahingehend eine Antwort, daß der junge Ingenieur ein im beruflichen Sinne möglichst taugliches *Weltbild* auf den Weg mitbekommt, das ihn dazu befähigt, die allgegenwärtigen technischen Geräte und Einrichtungen hinsichtlich ihrer Funktionalität umfassend zu verstehen, um Verbesserungen dafür erarbeiten zu können.

Diese Forderung bewirkt im Idealfall einen Lehrplan, der Grundlagen und anwendungsorientierte Spezialkenntnisse vermittelt. Vor dem Hintergrund von Veränderungen muß der Fokus der Ausbildung Kenntnisse und Fertigkeiten adressieren, die ausnahmslos lange anhaltende Relevanz versprechen. Die bloße Einarbeitung in ein Programmsystem oder ausufernde Spezialisierungen würden dem widersprechen, während umfassende *Grundlagen* ergänzt um Kompetenzen mit *Bandbreite* und *Kombinierbarkeit* in diesem Sinne wünschenswert sind, und den Absolventen ein Bestehen am ebenfalls veränderlichen Arbeitsmarkt ermöglichen.

Eine Konkretisierung hinsichtlich der Frage nach einem *hypothetischen Studiengang*, der die Erfahrungen aus der vorliegenden Arbeit berücksichtigt, knüpft an das o. g. *interdisziplinäre Vorge-*

hen an. Eine effiziente Realisierung resultiert danach aus der *Vermeidung des technologischen Umwegs über traditionelle Schnittstellen* zwischen den Fachgebieten.

Diese Schnittstellen sind Ergebnis ausbildungsbedingter *Fachgebietshorizonte*. Sie ermöglichen einerseits im industriellen Bereich notwendige Spezialisierung und Parallelisierung von Arbeitsprozessen und sind andererseits technologische Umwege, die technisch und wirtschaftlich bessere integrale Lösungen verhindern. Im Vergleich dazu können effizientere und funktionssicherere Problemlösungen dadurch entstehen, daß die Anzahl der Schnittstellen reduziert wird. Dies erfordert im Umkehrschluß die Abschwächung wirksamer Fachgebietshorizonte beteiligter Ingenieurdisziplinen. Dies kann die Hochschule durch *Gestaltung ihrer Studiengänge* beeinflussen.

Diese Überlegung führt zum Vorschlag eines fachübergreifenden Studiengangs, der Inhalte von Maschinenbau-, Elektro- und Informationstechnikstudium vereinigt. In Abgrenzung zu vorhandenen derartigen Studiengängen, sind vollwertige Studienabschlüsse *beider* Disziplinen anzustreben, da anderenfalls Befähigung und Akzeptanz im Bereich jeweiliger Einzelabschlüsse leiden. Interdisziplinäre Studienarbeiten mit Begutachtung seitens beider Fachgebiete wären Bestandteil.

Diese Klasse von Ingenieuren kann den im internationalen Vergleich verlorenen technologischen Vorsprung wiederbringen und im existentiellen Wettbewerb die Erwerbsgrundlage sichern. Ein maßgeblicher Anteil dieser Erwerbsgrundlage ist der *Maschinenbau*.

## Literaturverzeichnis

- [1] Der Große Duden: Wörterbuch und Leitfaden der deutschen Rechtschreibung. 6. Auflage. Leipzig: Bibliographisches Institut 1990.
- [2] Brockhaus: ABC der Naturwissenschaft u. Technik. 7. Auflage. Leipzig: F. A. Brockhaus 1960.
- [3] Rohrbach, Christof: Handbuch für elektrisches Messen mechanischer Größen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1967.
- [4] Langenscheidt-Redaktion: Langenscheidts Fremdwörterbuch. 5. Auflage. Berlin, München: Langenscheidt 1993.
- [5] BI-Elementarlexikon. 2. Auflage. Leipzig: Bibliographisches Institut 1986.
- [6] Der Brockhaus in zehn Bänden. Leipzig, Mannheim: F. A. Brockhaus 2005.
- [7] Edgecomb, D. W.: Telemetry. The Electrician and Electrical Engineer, A Monthly Review of Theoretical and Applied Science. Vol. III, January to December 1884, 265-266.
- [8] Alvord, H. E.: Telemetric Aid to Meteorological Records, Proceedings of The American Association for the Advancement of Science. 34th Meeting, Ann Arbor, Michigan, August 1885, 81-83.
- [9] Long, S. A.; Reiger, P. A.; Edney, S. L.; Knabe, F.; Bernhard, D.; Elliott, M. W.: Application of a Miniature Telemetry System in a Small Gas Turbine Engine. Proceedings of ASME Turbo Expo Vancouver, British Columbia, Canada, GT2011-45910, 2011.
- [10] Luck, K.; Modler, K.-H.: Getriebetechnik: Analyse, Synthese, Optimierung. Berlin: Akademie-Verlag; Wien, New York: Springer-Verlag 1990.
- [11] Bernhard, F.: Technische Temperaturmessung. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2004.
- [12] Kaiser, E.; Hoschke, M.; Weikert, E.: Schaufelschwingungsmessungen an Radialturbinen eines Abgasturboladers. Maschinenbautechnik 20, Heft 4, S. 166-169, 1972.
- [13] Ashtekar, A.; Sadeghi, F.; Powers, G.; Mantel, K.; Griffith, R.: Experimental Investigation of Turbocharger Rotor Bearing System. Proceedings of ASME Turbo Expo Vancouver, Canada, GT2011-45999, 2011.
- [14] Gregory, O. J.; Conkle, J. R.; Birnbaum, T. J.: Wireless temperature measurement system and methods of using same. US-Patent application number 20 110 280 279; Publication date: 11/17/2011.
- [15] Gregory, O.; Conkle, J.; Birnbaum, T.: Wireless temperature sensor for gas turbine engine applications. Proceedings 56th International Instrumentation Symposium, pp. 177–200, Rochester, Vt, USA, May 2010.
- [16] Hudak, S. J.; Lanning, B. R.; Light, G. M.; Chan, K. S.; Moryl, J. A.; Pruitt J. R.: Embedded Thin-Film Sensor for Crack Detection and Monitoring in Fracture Critical Turbine Engine Components. Proc. of ASME Turbo Expo Barcelona, Spain, GT2006-91260, 2006.
- [17] Liu, T.; Campbell, B.; Bruns, S.; and Sullivan, J. P.: Temperature- and pressure-sensitive luminescent paints in aerodynamics. Applied Mechanics Reviews, vol. 50(4), pp: 227-246 1997.

- [18] Navarra, K. R.; Rabe, D. C.; Goss, L. P.: The Application of Pressure- and Temperature Sensitive Paints to an Advanced Compressor. Proceedings of ASME Turbo Expo Munich, 2000-GT-614, 2000.
- [19] Adler, A. J.: Wireless Strain and Temperature Measurement with Radio Telemetry. Experimental Mechanics, 11(5), 378-384, 1971.
- [20] Habib, A. J.; Barton, J. L.; Mathison, R. M.; Dunn, M. G.: Wireless Telemetric Data Acquisition and Real-Time Control for a High Measurement-Density Internal Heat Transfer Experiment. Proceedings of ASME Turbo Expo Düsseldorf, GT2014-26408, 2014.
- [21] DeAnna, R. G.: Wireless Telemetry for Gas-Turbine Applications. NASA/TM-2000-209815, Cleveland, Ohio, 2000.
- [22] Zeisberger, A.; Matziol, L.; Deubert, F.: Modern Telemetry Systems and Rotating Instrumentation. Proc. of ASME Turbo Expo Amsterdam, Netherlands, GT2002-30048, 2002.
- [23] Heuer, T.; Engels, B.; Klein, A.; Heger, H.: Numerical and Experimental Analysis of the Thermo-Mechanical Load on Turbine Wheels of Turbochargers. Proceedings of ASME Turbo Expo Barcelona, Spain, GT2006-91260, 2006.
- [24] Ludewig, H.: Schwingungsuntersuchungen an Turbinenschaufeln von Abgasturboladern. offprint MTZ, Vol. 29, 408-414, 1968.
- [25] Ludewig, H.: Schwingungsmessungen an Turbinenschaufeln von Abgasturboladern mit Hochtemperatur-Dehnungsmessstreifen“, offprint Messtechnische Briefe 1/1969.
- [26] Gyekenyesi, A. L.; Haase, W. C.: Rotor Health Monitoring by Wireless Localized Sensing. Proceedings of ASME Turbo Expo Glasgow, UK, GT2010-23651, 2010.
- [27] Yang, J.: A silicon carbide wireless temperature sensing system for high temperature applications. Sensors (Basel, Switzerland), 13(2), 1884-1901, 2013.
- [28] Aktive elektronische Bauelemente. 1988 Teil 1. Erfurt: Bauteilkatalog des VEB Kombinat Mikroelektronik (RFT), 1988.
- [29] Mitchell, D.; Kulkarni, A.; Roesch, E.; Subramanian, R.; Burns, A.; Brogan, J.; Greenlaw, R.; Lostetter, A.; Schupbach, M.; Fraley, J.; Waits, R.: Development and F-Class Industrial Gas Turbine Engine Testing of Smart Components with Direct-Write Embedded Sensors and High Temperature Wireless Telemetry. Proceedings of ASME Turbo Expo Berlin, Germany, GT2008-51533, 2008.
- [30] Mitchell, D.; Kulkarni, A.; Waits, R.; Lostetter, A.; Schupbach, M.; Fraley, J.: Development and Testing of Harsh Environment, Wireless Sensor Systems for Industrial Gas Turbines. Proceedings of ASME Turbo Expo Orlando, Florida, USA, GT2009-60316, 2009.
- [31] RRD UNIVERS Digital Telemetry System. Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG, Issue 22, Sept. 2003.
- [32] Farthing P.R., Long C.A., Owen J.M., Pincombe J.R.; Rotating Cavity with Axial Throughflow of Cooling Air: Flow Structure. J. Turbomachinery, Vol. 114, 237-246; ASME 1992.
- [33] Prandtl, L.: Führer durch die Strömungslehre. 6. Auflage. Braunschweig: Vieweg 1965.
- [34] Schlichting, H.; Gersten, K.: Grenzschicht-Theorie. 9. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 1997.
- [35] Kaiser, E.: Surface temperature measurement with liquid crystals for flow visualisation. Technisches Messen, Vol. 70, Oldenbourg 2003.
- [36] Anderson, M. R.; Baughn, J. W.: Liquid-crystal thermography: Illumination spectral effects Part 2-Theory. Journal of Heat Transfer, Vol. 127, 588-597; ASME 2005.

- [37] Sun, J. H.; Leong, K. C.; Liu, C. Y.: Influence of hue origin on the hue-temperature calibration of thermochromic liquid crystals. *Heat and Mass Transfer*, Vol. 33, 121-127, 1997.
- [38] King, M. P.: Convective Heat Transfer in a Rotating Annulus. PhD thesis, University of Bath, 2003.
- [39] Eckelmann, H.: *Einführung in die Strömungsmeßtechnik*. Teubner Verlag, Stuttgart 1997.
- [40] Oertel, H.: *Optische Strömungsmeßtechnik*. G. Braun, Karlsruhe 1989.
- [41] Fürst, W.: Beitrag zur Durchflußmessung mittels Testgasbeimischung. *Wiss. Zeitung TU Dresden* 24 (1975) H. 3/4, S. 633 – 635.
- [42] Regnery, D.; Hoeppner, U.; Vortmeyer, N.; Nitsche, K.: Measurements of complex air flow phenomena inside the rotor of an operating industrial gas turbine, C557/073/99, IMECE Conf. Trans., Vol. 1/A, S. 89-100, 1999.
- [43] Owen, J. M.; Rogers, R. H.: *Flow and Heat Transfer in Rotating-Disc Systems. Volume 2 Rotating Cavities*. John Wiley & Sons 1995.
- [44] Albring, W.: *Angewandte Strömungslehre*. Dresden, Leipzig: T. Steinkopff Verlag 1961.
- [45] Pfleiderer, C.; Petermann, H.: *Strömungsmaschinen*. 6. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1991.
- [46] Nikuradse, J.: *Strömungsgesetze in rauen Röhren*. Berlin: VDI-Verlag 1933.
- [47] Verein Deutsche Ingenieure: *VDI-Wärmeatlas*. 10. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2006.
- [48] Kaiser, Erwin: Zur Wärmestrommessung an Oberflächen - unter besonderer Berücksichtigung von Hilfswand-Wärmestromaufnehmern. Habilitation TU Dresden 1982.
- [49] Diller, T. E.: Advances in Heat Flux Measurements. *Advances in Heat Transfer* 1993. Vol. 23, S. 279-368.
- [50] Childs, P. R. N.; Greenwood, J. R.; Long, C. A.: Heat flux measurement techniques. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 1999, Vol. 213, No. 7, pp. 655-677
- [51] Kloss, M.: *Stoffübergang in durchströmten, rotierenden Relativsystemen; Aussagefähigkeit der Naphthalin-Sublimations-Methode*. Dissertation, TU Darmstadt 2015.
- [52] Platzer, K.-H.; Hirsch, C.; Metzger, D. E.; Wittig, S.: Computer-based areal surface temperature and local heat transfer measurements with thermochromic liquid crystals (TLC). *Experiments in Fluids* 1992. Vol 13, S. 26-32.
- [53] Bunker, R. S.; Metzger, D. E.; Wittig, S.: Local Heat Transfer in Turbine Disk Cavities: Part I - Rotor and Stator Cooling With Hub Injection of Coolant. *J. Turbomachinery* 1992. Vol. 114, S. 211.
- [54] Bunker, R. S.; Metzger, D. E.; Wittig, S.: Local Heat Transfer in Turbine Disk Cavities: Part II - Rotor Cooling With Radial Location Injection of Coolant. *J. Turbomachinery* 1992. Vol. 114, S. 221.
- [55] Lock, G. D.; Yan, Y.; Newton, P. J.; Wilson, M.; Owen, J. M.: Heat transfer Measurements Using Liquid Crystal in a Per-Swirl Rotating-Disc System. *Proc. of ASME Turbo EXPO Atlanta, GT2003-38123*, 2003.
- Lock, G. D.; Yan, Y.; Newton, P. J.; Wilson, M.; Owen, J. M.: Heat transfer Measurements Using Liquid Crystal in a Per-Swirl Rotating-Disc System. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 2005, Vol. 127, pp. 375-382.

- [56] Lock, G. D.; Wilson, M.; Owen, J. M.: Influence of fluid-dynamics on heat transfer in a pre-swirl rotating-disc system. Proc. of ASME Turbo EXPO Wien 2004, GT2004-53158.
- Lock, G. D.; Wilson, M.; Owen, J.M.: Influence of fluid-dynamics on heat transfer in a pre-swirl rotating-disc system. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 2005. Vol. 127, S. 791.
- [57] Kakade, V. U.; Lock, G. D.; Wilson, M.; Owen, J.M.; Mayhew, J. E.: Effect of Radial Location of Nozzles on Heat Transfer in Pre-Swirl Cooling Systems. Proc. of ASME Turbo EXPO Orlando 2009. GT2009-59090.
- [58] Pellé, J.; Harmand, S.: Heat Transfer Study in a Rotor Stator System Air Gap with an Axial Inflow. European Conference on Turbomachinery in Athens, 05. bis 09.03.2007, Nr. 057, Tagungsband S. 1085-1094.
- [59] Roy, R. P. ; Xu, G.; Feng,J.: A Study of Convective Heat Transfer in a Model Rotor-Stator Disk Cavity. Journal of Turbomachinery 2001, Vol. 123, No. 3, S. 621-632.
- [60] Johnson, Bruce V.; Lin, J. D.; Daniels, William A.; Paolillo, Roger: Flow Characteristics and Stability Analysis of Variable-Density Rotating Flows in Compressor-Disk Cavities. J. Eng. Gas Turbines Power 2006. Vol. 128, No. 1, S. 118-127.
- Johnson, Bruce V.; Lin, J. D.; Daniels, William A.; Paolillo, Roger: Flow Characteristics and Stability Analysis of Variable-Density Rotating Flows in Compressor-Disk Cavities. Proc. of ASME Turbo EXPO Wien, GT2004-54279, 2004.
- [61] Owen, J.M.; Bilimoria, E. D.: Heat Transfer in Rotating Cylindrical Cavities. Journal Mechanical Engineering Science IMechE 1977, Vol. 19, No. 4, pp 175-187.
- [62] Firouzian, M., Owen, J. M., Pincombe, J. R., Rogers, R. H.: Flow and Heat Transfer in a Rotating Cylindrical Cavity with a Radial Inflow of Fluid. Part 2: Velocity, Pressure and Heat Transfer Measurements. Int. J. Heat and Fluid Flow 1986, 7, p. 21-27.
- [63] Farthing, P. R.; Long, C. A.; Owen, J. M.; Pincombe, J. R.: Rotating Cavity With Axial Throughflow of Cooling Air: Heat Transfer. J. Turbomach 1992. Vol. 114, S. 229.
- [64] Long, C. A.: Disk heat transfer in a rotating cavity. Int. J. Heat and Fluid Flow 1994. Vol. 15, No. 4.
- [65] Long, C. A.; Morse, A. P.; Zafiroopoulos, N.: Buoyancy-Affected Flow and Heat Transfer in Asymmetrically Heated Rotating Cavities. J. Turbomach. 117, 461 (1995).
- [66] Long, C.A.; Childs, P.R.N.: Shroud Heat Transfer Measurements inside a Heated Multiple Rotating Cavity with Axial Throughflow. Int. J. Heat and Fluid Flow 2007, 28, S. 1405-1417.
- [67] Long, C.; Childs, P.: The Effect of Inlet Conditions on the Flow and Heat Transfer in a Multiple Rotating Cavity with axial Throughflow. Proc. Int. Symp. on Jet Propulsion and Power Engineering, Kunming, China 17.-22.09.2006.
- [68] Patounas, D.S.; Long, C. A.; Childs, P.R.N.: Disc Heat Transfer in Gas Turbine Compressor Internal Air Systems. European Conference on Turbomachinery in Graz, 23. bis 27.03.2009, Nr. 91, ISBN 978-3-85125-036-7.
- [69] Chen, J.-X.; Gan, X.; Owen, J.M.: Heat transfer in an air-cooled rotor-stator system. J. Turbomach. 118 (1996), pp. 444-451.
- [70] Chen, J.-X.; Gan, X.; Owen, J.M.: Heat transfer from air-cooled contrarotating disks. J. Turbomach. 119 (1997), pp. 61-67.
- [71] Owen, J.M.; Powell, J.: Buoyancy-Induced Flow in a Heated Rotating Cavity. Proc. of ASME Turbo EXPO Wien 2004, GT2004-53210.

- [72] Owen, J.M.; Abrahamsson, H.; Lindblad, K.: Buoyancy-Induced Flow in Open Rotating Cavities. Proc. of ASME Turbo EXPO Barcelona 2006. GT2006-91134.
- [73] Suslov, D.; Dullenkopf, K.; Schulz, A.; Wittig, S.: Development and Application of a Novel Technique for Direct Heat Flux Measurements in Turbomachinery Flows. Flow, Turbulence and Combustion 2002. Vol. 69, S. 249-270.
- [74] Ladisch, H.; Schulz, A.; Bauer, H.-J.: Heat transfer Measurements on a Turbine Airfoil with Pressure Side Separation. Proc. of ASME Turbo EXPO Orlando 2009. GT2009-59904.
- [75] Heinen, M.: Kopplung von Strömungs- und Wärmetransportvorgängen an einer rotierenden Scheibe. Dissertation. RWTH Aachen, 1992.
- [76] Bohn, D. E.; Deutsch, G. N.; Simon, B.; Burkhardt, C.: Flow visualisation in a rotating cavity with axial throughflow. Proc. of ASME TURBO EXPO 2000, 2000-GT-280.
- [77] Schlichting, H.: Der Wärmetübergang an einer längsangestromten ebenen Platte mit veränderlicher Wandtemperatur. Forschung im Ingenieurwesen 1951, Bd. 17, S. 1-8
- [78] Cooke, A.; Childs, P.; Long, C. A.: An Investigation into the Uncertainty of Turbomachinery Disc Heat Transfer Calculations using Monte Carlo Simulation Methods. ASME paper GT2006-90143.
- [79] Owen, J. M.: On the Computation of Heat-Transfer Coefficients from Imperfect Temperature Measurements. J. Mechanical Engineering Science 1979, Vol. 21 No. 5, pp. 323-334.
- [80] Cardone, G.; Astarita, T.; Carluomagno, G. M.: Heat Transfer Measurements on a Rotating Disk. International Journal of Rotating Machinery 1997, Vol. 3, No. 1, pp. 1-9.
- [81] Bernhard, F.: Technische Temperaturmessung. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2004.
- [82] Herwig, H.; Moschalski, A.: Wärmeübertragung. 2. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2009.
- [83] Gröber; Erk; Grigull: Grundgesetze der Wärmeübertragung. 3. Auflage Springer 1963.
- [84] Kays, W. M.; Crawford, M. E.: Convective heat and mass transfer. 2nd Edition, New York, McGraw-Hill 1980.
- [85] Reynolds, W. C.; Kays, W. M.; Kline, S. J.: Nasa Memo 12-2-58W. Washington 1958.
- [86] Mocikat, H.; Herwig, H.: An advanced thin foil sensor concept for heat flux and heat transfer measurements in fully turbulent flows. Heat Mass Transfer 2007. Vol. 43, S. 351-364.
- [87] Mocikat, H.; Herwig, H.: Heat transfer measurements in fully turbulent flows: basic investigations with an advanced thin foil triple sensor, Heat Mass Transfer (2008) 44, 1107-1116.
- [88] Kraemer, Kurt: Über die Wirkung von Stolperdrähten auf den Grenzschichtumschlag, Z. Flugwiss. 9, Heft 1, S. 20-27, 1961.
- [89] Shevchuk, I. V.: Convective Heat and Mass Transfer in Rotating Disk Systems. 1. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2009.
- [90] Dorfman, L.A.: Hydrodynamic Resistance and the Heat Loss of Rotating Solids. Oliver and Boyd, Edinburgh, 1963.
- [91] Popiel, Cz. O.; Bogusławski, L.: Local Heat-Transfer Coefficients on the Rotating Disk in Still Air. Int. J. Heat Mass Transfer 18 (1), 1974, 167-170.
- [92] Pelle, J.; Harmand, S.: Heat transfer measurements in an opened rotor-stator system air-gap. Experimental Thermal and Fluid Science, Bd. 31, Nr. 3, S. 165-180, 2007.

- [93] Daily, J. W.; Nece, R. E.: Chamber Dimension Effects on Induced Flow and Frictional Resistance of Enclosed Rotating Disks. *J. of Basic Engineering*, 82 (1), S. 217, 1960.

## Zitierte, vom Autor betreute akademische Abschlußarbeiten

- [94] Brandenburg, T.: Untersuchung des Einflusses der experimentellen Parameter auf die Kernrotationszahl in schnell rotierenden Kammern. Diplomarbeit, TU Dresden 2009.
- [95] Karsch, M.: Schallmessung in rotierenden Kavitäten. Großer Beleg, TU Dresden 2013.
- [96] Günther, André: Experimentelle Untersuchung zu Durchströmung und lokalem Wärmeübergang in rotierenden Kavitäten. Dissertation, TU Dresden 2013.
- [97] Heinschke, Benjamin: Messung von Wärmeübergangskoeffizienten an einer schnell rotierenden Scheibe mit variiertem Strömungssituation. Diplomarbeit, TU Dresden 2014.
- [98] Kuntze, Alexander: Charakterisierung der Übertemperaturmethode zur lokalen Messung von Wärmeübergängen mit Thermistorsensoren für variierte Strömungs- und Betriebskennwerte im stationären Aufbau. Diplomarbeit, TU Dresden 2014.
- [99] Höbold, Philipp: Konstruktion, Erprobung und Charakterisierung eines Messaufbaus zur direkten Bestimmung von Wärmeübergangskoeffizienten und Wärmestromdichten. Diplomarbeit, TU Dresden 2014.

## Zitierte Berichte

- [100] Kaiser, E.: Experimentelle Untersuchung generischer Rotor-Belüftungskonfigurationen. Abschlussbericht zum Projekt “Engine 3E 2010” AP4200, MAT, IEM, TU Dresden, 2001.
- [101] Kaiser, E.: Experimentelle Untersuchung generischer Rotor-Belüftungskonfigurationen. Forschungsbericht, MAT, IEM, TU Dresden, 2003.
- [102] Kaiser, E.; Uffrecht, W.: Untersuchungen am rotierenden Zweikammermodell, Luftdurchsatz-Druckkorrelationen mit nicht durchgehenden Luftführungsröhrchen (LFR, giggle-tubes). Abschlußbericht eines Forschungsvorhabens der TU Dresden mit der MTU-München AG, Dezember 2004.
- [103] Günther, A.; Brandenburg, T.; Uffrecht, W.: Abschlußbericht zum AG Turbo Teilvorhaben COOREFF-T 1.3.6 „Strömung und Wärmeübergang in rotierenden Kavitäten“, TU Dresden 2010.
- [104] Günther, A.; Uffrecht, W.: Machbarkeitsstudie und Modifikation des Meßsystems hinsichtlich telemetrischer Messung von Wärmeübergangskoeffizienten an Rotorscheiben. Bericht der TU Dresden an MAN Diesel & Turbo SE, März 2011.
- [105] Heinschke, B.; Uffrecht, W.: Abschlußbericht zum Verbundprojekt AG Turbo 2020 Vorhaben 3.1.3 „Wärmeübergang in verzweigten, rotierenden Kavitäten“, TU Dresden 2016.

## Veröffentlichungen mit eigener Beteiligung

- [U1] Kaiser, E.; Uffrecht, W.: Auswirkungen von Fertigungsproblemen lasergebohrter Düsen auf die Zerstäubung von Flüssigkeiten. In: Spray '99. Universität Bremen 1999, ISBN 3 88722 448-5.
- [U2] Uffrecht, W.; Kaiser, E.: Quick and Non-Destructive Testing of Small Laser Drillings. Beitrag zur International Conference on Flexible Automation & Intelligent Manufacturing in Dresden vom 15. bis 17.07.2002.
- [U3] Uffrecht, W.: Meßtechnische Ansätze zur berührungs freien Prüfung kleiner, mit Laser gefertigter Bohrungen. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 8 Nr. 974. Düsseldorf: VDI-Verlag 2003.
- [U4] Uffrecht, W.; Kaiser, E.: Streulichtmessungen in Luft zur Strömungsvisualisierung in rotierenden Kammern. Technisches Messen 72 (2005) Nr. 12, S. 671/678.
- [U5] Uffrecht, W.; Kaiser, E.: Influence of force field direction on pressure sensors calibrated at up to 12000g. ASME GT2008-50355, 2008.
- [U6] Günther, A.; Uffrecht, W.; Kaiser, E.; Odenbach, S.: Experimental analysis of varied vortex reducer configurations for the internal air system of jet engine gas turbines. ASME GT2008-50738, 2008.
- [U7] Uffrecht, W.: Untersuchung des Fliehkräfteinflusses auf Drucksensoren und Druckmessung in schnell rotierenden Systemen. Tagungsband S. 288-298 des XXII. Messtechnischen Symposiums des Arbeitskreises der Hochschullehrer für Messtechnik 11. – 13.09.2008, ISBN 978 3 8322 7506 8, Shaker 2008.
- [U8] Uffrecht, W.; Kaiser, E.: Influence of force field direction on pressure sensors calibrated at up to 12000g. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power Vol. 130 (2008) 061602.
- [U9] Uffrecht, W.; Günther, A.: Non-Stationary Thermal Modelling for Heat Transfer Coefficient Deduction in Rotating Cavities. European Conference on Turbomachinery in Graz, 23. bis 27.03.2009, Nr. 087, Tagungsband S. 807-815, ISBN 978-3-85125-036-7.
- [U10] Günther, A.; Uffrecht, W.; Heller, L.; Odenbach, S.: Experimental and Numerical Analysis of Heat Transfer in Compressor-Disc Cavities for a Transition between Heating and Cooling Flow. European Conference on Turbomachinery in Graz, 23. bis 27.03.2009, Nr. 111, Tagungsband S. 367-376, ISBN 978-3-85125-036-7.
- [U11] Günther, A.; Uffrecht, W.; Odenbach, S.: Local Heat Flux Measurements in Heated Rotating Cavities for Several Flow Regimes. Proc. of ASME Turbo EXPO Glasgow, GT2010-22544, 2010.
- [U12] Uffrecht, W.; Günther, A.: The deduction of the integral and the estimation of the local core rotation ratio by telemetric pressure measurements in a two cavity test rig. ASME GT2010-22593, 2010.
- [U13] Schroeder, G., Uffrecht, W.: A New Test Rig for Time-Resolved Pressure Measurements in Rotating Cavities with Pulsed Inflow. ASME GT2010-22596, 2010.
- [U14] Günther, A., Uffrecht, W., Odenbach, S.: Local Heat Flux Measurements in Heated Rotating Cavities for Several Flow Regimes. Journal of Turbomachinery, Vol. 134, 051016, 2012.
- [U15] Uffrecht, W.; Günther, A.: The Deduction of the Integral and the Estimation of the Local Core Rotation Ratio by Telemetric Pressure Measurements in a Two Cavity Test Rig. J. Eng. Gas Turbines Power 134, 042502 (2012), DOI:10.1115/1.4004452.

- [U16] Uffrecht, W.; Günther, A.; Caspary, V.: Electro-Thermal Measurement of Heat Transfer Coefficients. Proceedings of ASME Turbo Expo Copenhagen 2012, GT2012-68144.
- [U17] Günther, A.; Uffrecht, W.: First Results of a New Test Rig for the Research on the Internal Air System of an Industrial Gas Turbine. Proc. of ASME Turbo Expo Copenhagen, GT2012-68198, 2012.
- [U18] Uffrecht, W.; Günther, A.; Caspary, V.: Kleine Thermistoren zur Messung von Wärme-übergangskoeffizienten. Technisches Messen 79, Nr. 12, 2012, DOI 10.1524/teme.2012.0230.
- [U19] Günther, A.; Uffrecht, W.; Odenbach, S.: The Effects of Rotation and Mass Flow on Local Heat Transfer in Rotating Cavities with Axial Throughflow. Proceedings of ASME Turbo Expo Düsseldorf, GT2014-26228, 2014.
- [U20] Günther, A.; Uffrecht, W.; Caspary, V.: Time-Resolved Pressure Measurements at a Dual-Cavity Test Rig for Research on the Internal Air System of an Industrial Gas Turbine. Proceedings of ASME Turbo Expo Düsseldorf, GT2014-26231, 2014.
- [U21] Heinschke, B.; Uffrecht, W.; Günther, A.; Caspary, V.; Odenbach, S.: Telemetric Measurement of Heat Transfer Coefficients in Gaseous Flow – First Test of a Recent Sensor Concept in a Rotating Application. Proceedings of ASME Turbo Expo Düsseldorf, GT2014-26239, 2014.
- [U22] Eschmann, G.; Kuntze, A.; Uffrecht, W.; Odenbach, S.: Measurement of Heat Transfer Coefficients in Gaseous Flow – First Test of a Recent Sensor Concept for Stationary and Oscillating Flow. Proceedings of ASME Turbo Expo Düsseldorf, GT2014-26240, 2014.
- [U23] Uffrecht, W.; Heinschke, B.; Günther, A.; Caspary, V.; Odenbach, S.: Measurement of Heat Transfer Coefficients at up to 25500 g – a Sensor Test at a Rotating Free Disk with Complex Telemetric Instrumentation. International Journal of Thermal Sciences 2015.
- [U24] Eschmann, G.; Kuntze, A.; Uffrecht, W.; Kaiser, E.; Odenbach, S.: Experimental and numerical investigation of heat transfer coefficients in gaseous impinging jets – first test of a recent sensor concept for steady and unsteady flow. International Journal of Thermal Sciences 2015.
- [U25] Stephan, S.; Uffrecht, W.; Raddatz, M.: Sensorkonzept zur Bestimmung der Dampffeuchte und des thermischen Zustandspunkts von Nassdampf mittels Schwingungsspektroskopie. Technisches Messen 84, Nr. 11, 2017, S. 719, DOI 10.1515/teme.2017.0058.
- [U26] Heinschke, B.; Uffrecht, W.; Odenbach, S.; Caspary, V.: Telemetric Heat Transfer Coefficient Measurements in an Open Rotor-Stator System Air Gap at up to 8500 Rpm. Proceedings of ASME Turbo Expo Oslo, GT2018-75060, 2018.
- [U27] Spura, D.; Gampe, U.; Eschmann, G.; Uffrecht, W.: Experimental Investigation of Heat Transfer in Cavities of Steam Turbine Casings under Generic Test Rig Conditions. Proceedings of ASME Turbo Expo Oslo, GT2018-75463, 2018.
- [U28] Kuntze, A.; Odenbach, S.; Uffrecht, W.: Experimental Investigation of Moment Coefficients in Open Rotor-Stator Disc Systems. Proceedings of European Conference on Turbomachinery in Lausanne, 08. bis 12.04.2019.
- [U29] Diemel, E.; Odenbach, S.; Rey Villazon, J.; Guijarro Valencia, A.; Reinecke, M.; Uffrecht, W.: High Speed Single Cavity Rig with Axial Throughflow of Cooling Air: Rig Structure and Periphery. Proceedings of ASME Turbo Expo Phoenix, GT2019-91265, 2019.

Alle 23 Reihen der „Fortschritt-Berichte VDI“  
in der Übersicht – bequem recherchieren unter:  
**elibrary.vdi-verlag.de**

Und direkt bestellen unter:  
**www.vdi-nachrichten.com/shop**

- Reihe 01** Konstruktionstechnik/  
Maschinenelemente
- Reihe 02** Fertigungstechnik
- Reihe 03** Verfahrenstechnik
- Reihe 04** Bauingenieurwesen
- Reihe 05** Grund- und Werkstoffe/Kunststoffe
- Reihe 06** Energietechnik
- Reihe 07** Strömungstechnik
- Reihe 08** Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik
- Reihe 09** Elektronik/Mikro- und Nanotechnik
- Reihe 10** Informatik/Kommunikation
- Reihe 11** Schwingungstechnik
- Reihe 12** Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik
- Reihe 13** Fördertechnik/Logistik
- Reihe 14** Landtechnik/Lebensmitteltechnik
- Reihe 15** Umwelttechnik
- Reihe 16** Technik und Wirtschaft
- Reihe 17** Biotechnik/Medizintechnik
- Reihe 18** Mechanik/Bruchmechanik
- Reihe 19** Wärmetechnik/Kältetechnik
- Reihe 20** Rechnergestützte Verfahren
- Reihe 21** Elektrotechnik
- Reihe 22** Mensch-Maschine-Systeme
- Reihe 23** Technische Gebäudeausrüstung



# Ingenieure wollen immer alles ganz genau wissen. Wie wär's mit einem E-Paper- oder Zeitungs-Abo?



## Mehr Meinung. Mehr Orientierung. Mehr Wissen.

Wesentliche Informationen zu neuen Technologien und Märkten.

Das bietet VDI nachrichten, Deutschlands meinungsbildende Wochenzeitung zu Technik,

Wirtschaft und Gesellschaft, den Ingenieuren. Sofort abonnieren und lesen.

Donnerstagabends als E-Paper oder freitags als Zeitung.

**Jetzt abonnieren: Leser-Service VDI nachrichten, 65341 Eltville**

**Telefon: +49 6123 9238-201, Telefax: +49 6123 9238-244, vdi-nachrichten@vuservice.de**

[www.vdi-nachrichten.com/abo](http://www.vdi-nachrichten.com/abo)

100  
JAHRE

**VDI nachrichten**

TECHNIK IN  
SZENE GESETZT.



## REIHE 08

MESS-,  
STEUERUNGS-  
UND REGELUNGS-  
TECHNIK



NR. 1273

ISBN 978-3-18-527308-7

BAND  
1|1

VOLUME  
1|1