

Institut für Strömungsmaschinen

Universität Hannover

**„Experimentelle Untersuchungen zur Bereitstellung  
einer Datenbasis für die Optimierung der aktiven  
Stabilitätsverbesserung“**

Abschlußbericht zum

Vorhaben 1.1.4

im Teilverbund-Projekt

„Aktive Stabilitätsverbesserung – Analyseverfahren“

der Arbeitsgemeinschaft AG Turbo II

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. J. Seume

Bearbeiter: Dipl.-Ing. A. Reißner

2001

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN <b>3-18-091640-0</b>	2. Berichtsart <b>Abschlußbericht</b>
3a. Titel des Berichts <b>Experimentelle Untersuchungen zur Bereitstellung einer Datenbasis für die Optimierung der aktiven Stabilitätsverbesserung</b>	
3b. Titel der Publikation <b>Aerodynamische Instabilität eines 4-stufigen transsonischen Verdichters und Erkennung mittels neuronaler Netze</b>	
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname) <b>Reißner, Andreas</b>	5. Abschlußdatum des Vorhabens <b>31.06.01</b>
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname) <b>Methling, F.-O.; Volgmann, W.; Stoff, H., Grauer, F.</b>	6. Veröffentlichungsdatum <b>18./19. 09.01</b>
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) <b>Institut f. Strömungsmaschinen, Universität Hannover Appelstr. 9 30167 Hannover</b>	7. Form der Publikation <b>VDI-Berichte ; 1640</b>
13 Fördernde Institution (Name, Adresse) <b>Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)  53107 Bonn</b>	9. Ber.Nr. Durchführende Institution  10. Förderkennzeichen *) <b>03270611/1</b>
16. Zusätzliche Angaben <b>Aufgrund der Art des Vorhabens ist eine eigenständige Veröffentlichung nicht sinnvoll. Deshalb wird hier beispielhaft auf die Veröffentlichungen der Projektpartner hingewiesen.</b>	11a. Seitenzahl Bericht <b>52</b>
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	11b. Seitenzahl Publikation <b>25</b>
18. Kurzfassung <p>Zur Zeit ist es notwendig, Axialverdichter mit deutlichem Abstand von den hoch belasteten Betriebspunkten zu betreiben, obwohl häufig dort die besten Wirkungsgrade zu erzielen wären. In diesen Bereichen kann es leicht zu sog. Pumpen kommen, wodurch der Verdichter einem extremem Schädigungspotential ausgesetzt ist. Die Vorwarnzeiten für das Pumpen sind bisher noch sehr kurz. Sie liegen in einem Bereich von deutlich weniger als einer Sekunde (abhängig von der Belastung und der Drehzahl des Verdichters). Ziel dieser Untersuchungen ist es, eine Datenbasis zu liefern, anhand derer die Entstehungsmechanismen untersucht und möglichst frühzeitige Vorwarnalgorithmen entwickelt bzw. erprobt werden können.</p> <p>Es ist eine umfangreiche Datenbasis sowohl an verschiedenen stabilen als auch instabilen Betriebspunkten in unterschiedlichen Lastbereichen erstellt worden. Die nun zur Entwicklung von Frühwarnsystemen zur Verfügung steht.</p>	12. Literaturangaben <b>22</b>
19. Schlagwörter <b>Rotating Stall, Pumpen, Verdichterinstabilität</b>	14. Tabellen <b>3</b>
20. Verlag <b>VDI-Verlag, Düsseldorf 2001</b>	15. Abbildungen <b>50</b>
21. Preis <b>EUR 58,00</b>	

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN <b>3-18-091640-0</b>	2. Type of Report <b>Final Report</b>
3a. Report Title <b>Experimental Investigations for Provision of a Data Basis for optimization of Active Surge Control</b>	
3b. Title of Publication <b>Aerodynamic instability of a 4-stage transsonic compressor and stall monitoring based on neural networks</b>	
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) <b>Reißner, Andreas</b>	5. End of Project <b>31.06.01</b>
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s)) <b>Methling, F.-O.; Volgmann, W.; Stoff, H., Grauer, F.</b>	6. Publication Date <b>18./19. 09.01</b>
8. Performing Organization(s) (Name, Address) <b>Institut f. Strömungsmaschinen, Universität Hannover Appelstr. 9 30167 Hannover</b>	7. Form of Publication <b>VDI-Berichte ; 1640</b>
13 Sponsoring Agency (Name, Address) <b>Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)  53107 Bonn</b>	9. Originators Report No.  10. Reference No. <b>03270611/1</b>
	11a. No. of Pages Report <b>52</b>
	11b. No. of Pages Publication <b>25</b>
	12. No. of References <b>22</b>
	14. No. of Tables <b>3</b>
	15. No. of Figures <b>50</b>
16. Supplementary <b>Aufgrund der Art des Vorhabens ist eine eigenständige Veröffentlichung nicht sinnvoll. Deshalb wird hier beispielhaft auf die Veröffentlichungen der Projektpartner hingewiesen.</b>	
17. Presented at (Title, Place, Date)	
18. Abstract  <p>Presently axial compressors have to run with considerable distance to operation points of high load although usually the best efficiencies can be obtained there. In those areas there is high danger of surge which brings high damaging potential to the compressor. The prediction time to surge presently is very short (<math>\ll 1s</math>) and depends on the load and rotor rotation of the compressor. The goal of this project is the production of a data basis to investigate stall inception (which is the precursor of surge) and to develop and test better precursory warning algorithms with.</p> <p>An extensive set of data as well in stable as in unstable operating points in different load areas has been developed which now is ready for use in research of forewarning systems.</p>	
19. Keywords <b>Rotating Stall, Surge, Compressor Instability</b>	
20. Publisher <b>VDI-Verlag, Düsseldorf 2001</b>	21. Price <b>EUR 58,00</b>

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen 0327061I/1 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

# Inhaltsverzeichnis

---

1	Schlußbericht .....	1
1.1	Aufgabenstellung .....	1
1.1.1	Gesamtziel des Vorhabens.....	1
1.1.2	Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens .....	3
1.2	Voraussetzungen .....	3
	Verdichter .....	4
	Messtechnik.....	7
1.3	Planung und Ablauf.....	10
1.4	Stand von Wissenschaft und Technik .....	11
	Literatur.....	14
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	16
1.6	Erzielte Ergebnisse .....	17
	Weitere Messungen.....	21
1.7	Voraussichtlicher Nutzen .....	24
1.8	Während der Durchführung des Projektes bekannt gewordener Fortschritt auf diesem Gebiet bei anderen Stellen .....	24
1.9	Geplante Publikation der Ergebnisse .....	24
1.10	Anhang.....	25
1.10.1	1. Meßkampagne.....	26
1.10.2	2. Meßkampagne.....	37
2	Erfolgskontrollbericht.....	49
2.1	Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms .....	49
2.2	Wissenschaftlicher und Technischer Erfolg .....	49
2.3	Einhaltung des Finanzierungs- und Zeitplans .....	50
2.4	Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	51
2.5	Gemachte bzw. in Anspruch genommene Erfindungen / Schutzrechte .....	51
2.6	Arbeiten ohne konkrete Lösungen .....	51

## 1 Schlußbericht

### 1.1 Aufgabenstellung

#### 1.1.1 Gesamtziel des Vorhabens

Für den Einsatz von Turbomaschinen gewinnt der hochbelastete Betriebsbereich zunehmend an Bedeutung. Die Gründe dafür sind vielfältig. Der wichtigste Aspekt ist, dass in vielen Turbomaschinen der hochbelastete Betriebsbereich auch der Bereich mit dem besten Wirkungsgrad, d.h. den niedrigsten spezifischen Kosten der Anlage ist. Besonders im Bereich der Energiegewinnung ist auch wünschenswert, diesen Arbeitsbereich für die Spitzenlastversorgung zu nutzen.

Allerdings ist der hochbelastete Betriebsbereich zu steigenden Lasten hin von der Stabilitätsgrenze des Verdichters der jeweiligen Turbomaschine begrenzt. An dieser Grenze findet der Umschlag des Verdichters vom sicheren stabilen Betrieb in den instabilen Betrieb statt, welcher leicht zu gravierenden Schädigungen der gesamten Maschine führt. Dabei wird die verzögerte Strömung bei abnehmendem Volumendurchsatz in den Schaufelkanälen des Verdichters zunehmend destabilisiert (Abb.1.1).

Die Annäherung an die Stabilitätsgrenze führt zuerst zu kleinen Störungen, die kurzzeitig im gesamten Gitter auftreten. In einem der Strömungskanäle bricht die Strömung dann aber weitgehend zusammen, was sich auf einen bzw. einige benachbarte Kanäle ausweiten kann. Dadurch wird die Strömung in den benachbarten Schaufelkanälen saugseitig stabilisiert, druckseitig aber weiter destabilisiert. Daraus ergibt sich eine Verschiebung der Kanalversperrung in druckseitige also Gegendrehrichtung. Ist die Menge des druckseitig im System enthaltenen Volumens groß genug, wird dadurch der Pumpvorgang ausgelöst, der das größte Gefährdungspotenzial für die Maschine besitzt.

Leider ist die Stabilitätsgrenze jedoch im realen Maschinenbetrieb kein genau definierter Punkt auf der Betriebskennlinie. Über die Betriebszeit der Maschine hinweg verändert sich der Umschlagpunkt vom stabilen in den instabilen Betriebsbereich in Abhängigkeit von vielen teilweise bisher unbekanntem Parametern. Von den bekannten seien nur u.a. Temperatur, Druck aber auch Verschmutzung oder Beschädigung der Beschaukelung genannt. Aus diesem Grund

wird derzeit in Turbomaschinen ein großer Sicherheitsabstand zur Stabilitätsgrenze vorgeschrieben (Pumpgrenzabstand, englisch „surge margin“), um sicherzustellen, daß diese nicht überschritten wird. Dadurch wird jedoch auch ein Betrieb der Maschine in dem Bereich besten Wirkungsgrades verhindert.

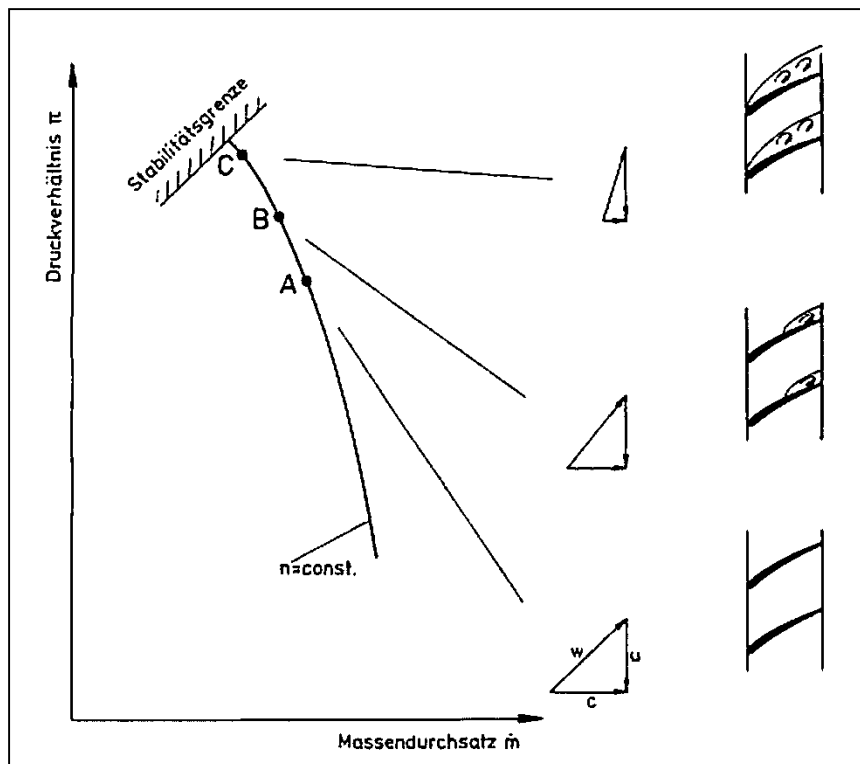


Abb. 1.1: Entstehungsmechanismen der rotierenden Ablösung

Ziel des Gesamtvorhabens, in das dieses Vorhaben eingebunden ist, ist es, Analyseverfahren weiterzuentwickeln und zu vervollständigen, die den Zustand der Strömung bewerten und damit entweder den aktuellen Abstand des Verdichters zur Stabilitätsgrenze bestimmen oder ein bevorstehendes Überschreiten der Stabilitätsgrenze rechtzeitig vorhersagen zu können, so daß ein vorheriges Ergreifen von geeigneten Gegenmaßnahmen möglich ist.

### 1.1.2 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens

Um dies Ziel erreichen zu können, sind umfangreiche Informationen über die Strömung sowie das Verhalten von Verdichtern notwendig, die über eine industriennahe Auslegung verfügen. Ziel dieses Teilvorhabens 1.1.4 (Fkz 03270611/1), das am Institut für Strömungsmaschinen der Universität Hannover durchgeführt wurde, war es, in dem am Institut für Strömungsmaschinen vorhandenen vierstufigen Modellverdichter mit moderner (CDA-)Beschaufelung Auslegung Ort und Zeitpunkt der beginnenden Instabilität zu detektieren. Zusätzlich wurden die Strömungsverhältnisse vor und hinter dem am stärksten zur Instabilität neigenden Schaufelgitter an stabilen Betriebspunkten in unmittelbarer Nähe der Stabilitätsgrenze, aber auch an verschiedenen anderen stabilen Punkten auf den unterschiedlichen Betriebskennlinien des Verdichters gemessen. Die aus diesen Messungen erhaltenen Messdaten sollten als eine Datenbasis dienen, mit Hilfe derer den Projektpartnern die Entwicklung von Analyseverfahren zur Erkennung des Abstands des Betriebspunktes von der Stabilitätsgrenze oder sogar einer drohende Instabilität in einer industriennah ausgelegten Maschine ermöglicht werden kann.

Eigene Entwicklungen von Analyseverfahren von Seiten des Instituts für Strömungsmaschinen sind in diesem Vorhaben nicht vorgesehen. Das Ziel dieses Teilvorhabens ist ausschließlich die Bereitstellung der Datenbasis.

## 1.2 Voraussetzungen

Die Voraussetzungen zur Erstellung einer solchen Datenbasis lassen sich in verschiedene Unterpunkte unterteilen. So muß für die Erstellung einer geeigneten Datenbasis eine Anlage zur Verfügung stehen, die in der Lage ist, Daten unter realitätsnahen Bedingungen zur Verfügung zu stellen. Reale Maschinen stehen dafür im Allgemeinen nicht zur Verfügung, da an solchen ein instabiler Betrieb unbedingt vermieden werden muß.

Des Weiteren muß eine Meßwerterfassung zur Verfügung stehen, die in der Lage ist, zwei möglicherweise konträre Zielsetzungen zu erfüllen. Zum einen muß sie dafür



geeignet sein, Effekte zu erfassen, die Auskunft über die zu untersuchenden Strömungszustände geben können, zum anderen muß der Aufbau der Meßvorrichtung aber dergestalt sein, daß sie in reale Maschinen eingebaut werden kann und keine Rückwirkungen auf die Strömung verursacht.

### Verdichter

Der für dieses Vorhaben eingesetzte Modellverdichter ist ein vierstufiger Axialverdichter, der mit einer modernen CDA-Beschaufelung ausgestattet ist. Der Verdichter ist so ausgelegt, das er die Verhältnisse in einer hochbelasteten Industriemaschine sehr gut wiedergibt (siehe Tabelle 1.1). Der Gehäuseinnendurchmesser ist konstant auf 340 mm gehalten (siehe Abb. 1.2). Die Änderung der Kanalhöhe wird somit nur über die Veränderung des Nabendurchmessers erreicht. Der Betriebspunkt des Verdichters wird durch Veränderung der Drehzahl und mit Hilfe einer Ringdrossel im Austritt des Verdichters eingestellt. Durch diese Anord-

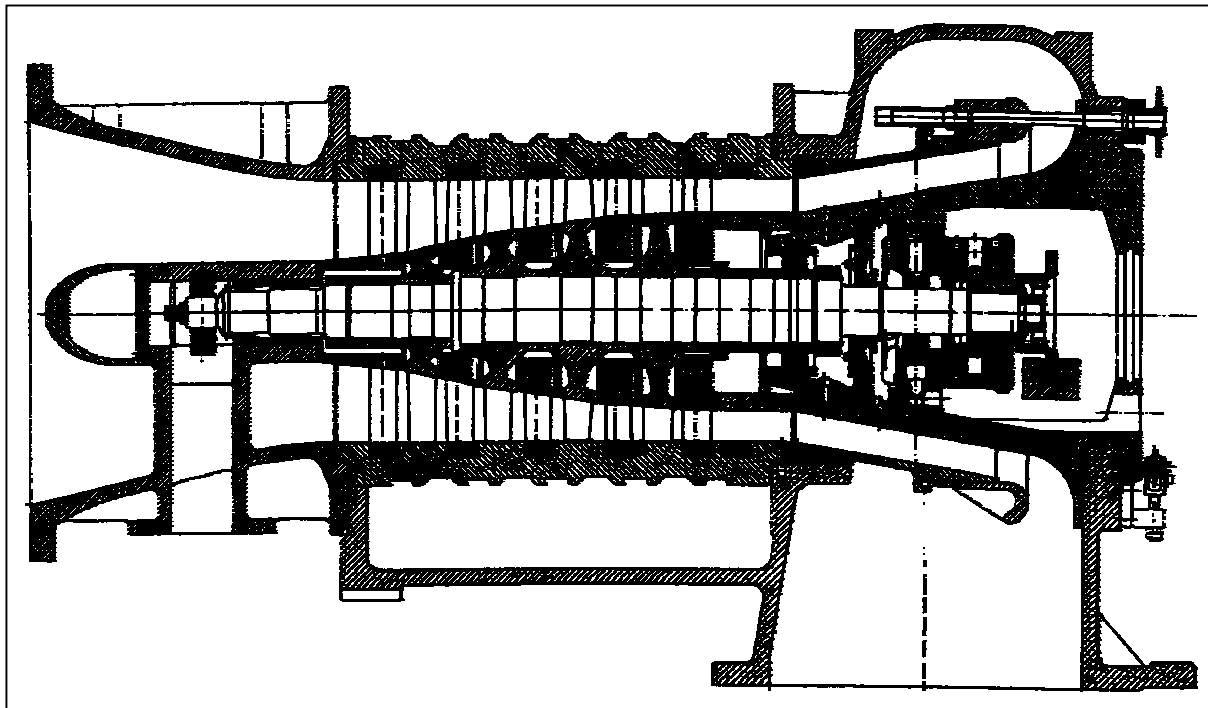


Abb. 1.2: Versuchsverdichter

nung der Ringdrossel wird beim Androsseln des Verdichters ein so geringes Volumen hinter dem Verdichter eingeschlossen, daß bei Überschreiten der Stabilitätsgrenze des Verdichters das Pumpen praktisch ausgeschlossen wird. Somit wird die Gefährdung des Verdichters erheblich reduziert.

Nenn Drehzahl	$n_{\text{nenn}}$	=	18000 min <sup>-1</sup>
Massenstrom	$\dot{m}_{\text{red}}$	=	14,1 kg/s
Totaleintrittsdruck	$p_e^0$	=	0,6 - 1,0 bar
Gesamtwirkungsgrad	$\eta_{ix}$	=	0,88
Gesamtdruckverhältnis	$\pi$	=	2,95
Stufenzahl	$z$	=	4
Stufendruckverhältnis	$\pi_{St}$	=	1,3
Außendurchmesser(konst.)	$D_a$	=	340 mm
Schaufelhöhe	$H$	=	90 ... 45 mm
Axialgeschwindigkeit	$c_z$	=	190 ... 150 m/s
Umfangsgeschwindigkeit	$u_a$	=	320 m/s
Spalte über Rotor 1 bis 4	$s_1-s_4$	=	0,8; 0,6; 0,55; 0,4 mm

Tab. 1.1: Kenndaten des Versuchsverdichters

Für die in diesem Teilvorhaben geplanten Messungen verfügt der Verdichter über eine größere Zahl von Bohrungen im Verdichtergehäuse, die mit instationären Druckaufnehmern bestückt werden können. Diese sind auf fünf Umfangspositionen verteilt. Die Umfangspositionen sind bewußt in unregelmäßige Abständen gewählt worden, um zu verhindern, daß möglicherweise Frequenzen, die in der Strömungsmessung erscheinen könnten, in unterschiedlichen Druckaufnehmern gleichzeitig erscheinen und somit als globale Phänomene, also Phänomene, die in der Axialen Position gleichzeitig auftreten (z.B. axiale Druckwellen), fehlinterpretiert werden. Die möglichen Meßstellen sind jeweils zwischen Lauf- und Leiträdern an diesen Umfangspositionen angeordnet. Zusätzlich ist eine weitere Meßposition über dem ersten Laufrad installiert. Die genaue Anordnung der möglichen Meßstellen ist in Abb. 1.3 zu sehen.

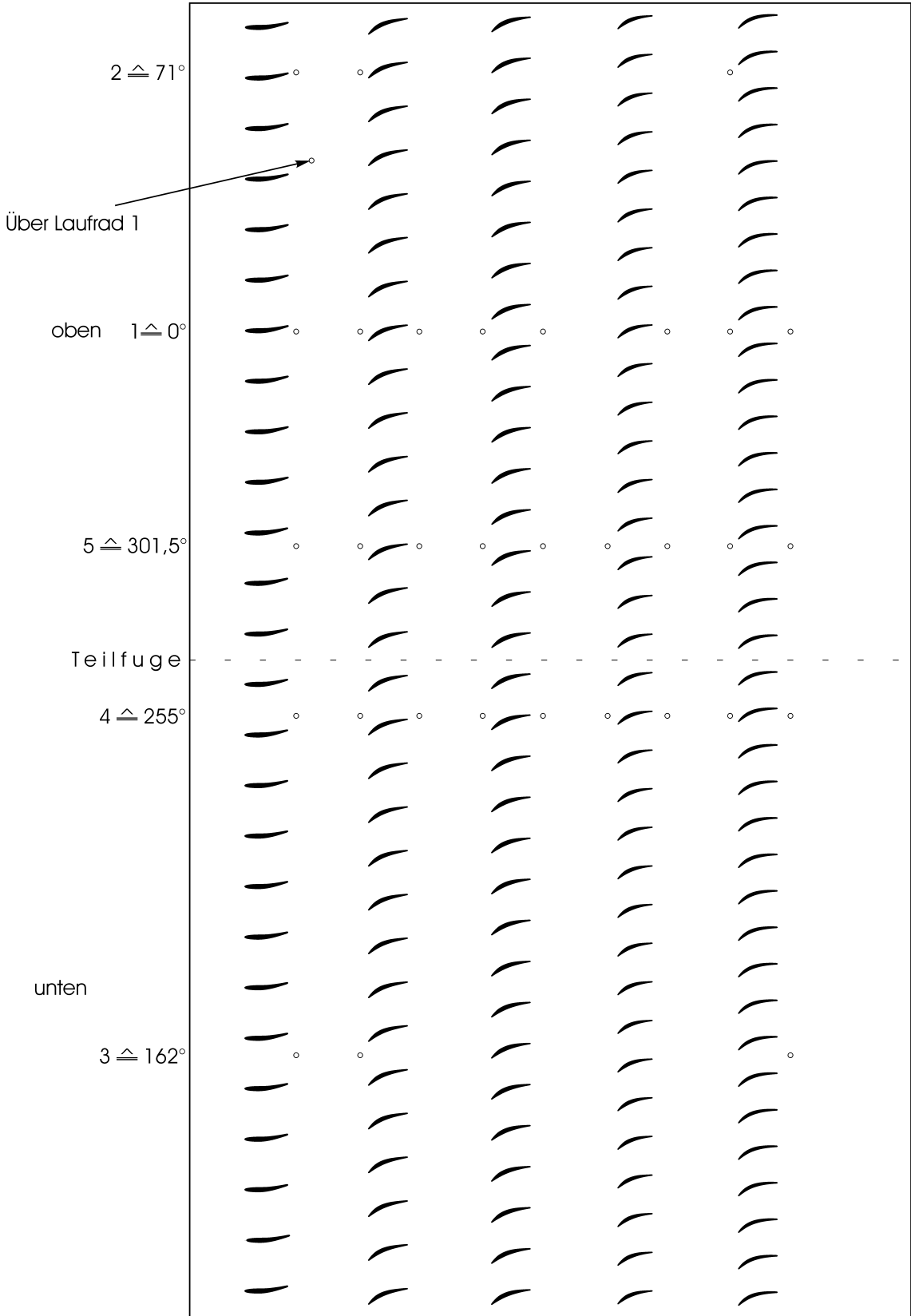


Abb. 1.3: Positionen möglicher instationärer Druckaufnehmer

Der Massenstrom wird über eine Meßblende nach DIN1952 gemessen. Diese befindet sich in der Ansaugleitung des Verdichters mit einem Abstand, der ausreichend ist, damit sich die Strömung nach der Störung, die diese Meßblende darstellt wieder vergleichmäßigt (Abb. 1.4). Für die Maschinenüberwachung steht eine Reihe von stationären Druck-, Temperatur-, Beschleunigungs- sowie eine Drehzahlmeßstelle zur Verfügung. Da der Elektromotor, der den Verdichter antreibt, nicht in der Lage ist die Leistung zu erbringen, die für den Betrieb des Verdichters unter Umgebungsbedingungen aufzubringen, wird der Verdichter im Unterdruck betrieben (Absolutdruck  $\approx 500 \dots 600 \text{ mbar}$ ).

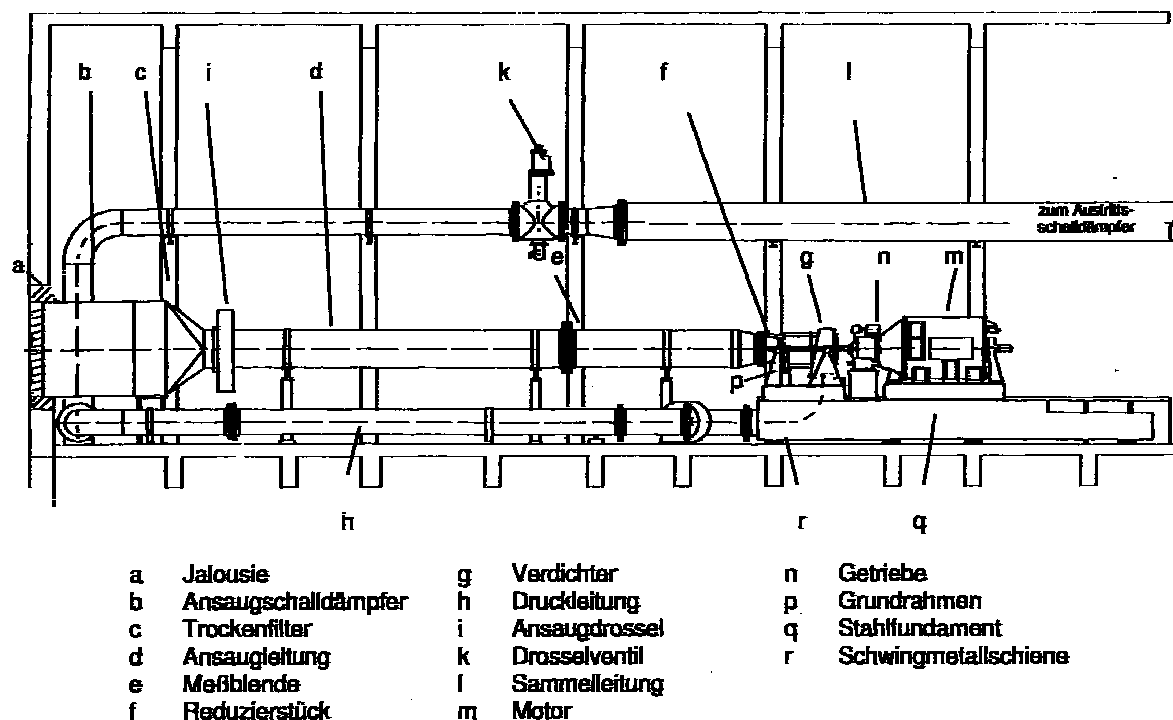


Abb. 1.4: Versuchsstand des 4-stufigen Axialverdichters

## Messtechnik

Für die Durchführung der Messungen steht neben den stationären Meßvorrichtungen zur Einstellung des jeweiligen Betriebspunktes eine Anlage zur Verfügung, mit der die instationären Verläufe des statischen Drucks in der stationären und in der transienten Strömung im gehäusenahen Bereich aufgenommen werden können. Es stehen dabei verschiedene Meßwertaufnehmer für die bei der Beschreibung des Verdichters im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Meßstellen zur Verfügung.

Dabei handelt es sich Ultraminiatur-Druckaufnehmer (Typ XCS – 062 und XCQ - 062) der Firma Kulite mit Meßwertbereichen zwischen 350 mbar und 1700 mbar. Dabei handelt es sich um Differenzdruckaufnehmer, die die Druckdifferenz zwischen der Messposition, an der der Druckaufnehmer eingesetzt wird, und einer Gegendruckposition (im Allgemeinen die freie Umgebung in der Halle ⇒ Umgebungsdruck) messen. Diese werden über abgeschirmte Kabel an Verstärkerkarten und von dort aus an einen Transientenrekorder der Firma Krenz angeschlossen. Zusätzlich kann auf dem Transienrekorder auch das Drehsignal der Welle des Verdichters aufgezeichnet werden. Dies wird über ein Lichtsignal und eine Lochblende auf der Welle antriebsseitig aufgenommen.

Bei einer Messung wird der Verdichter an den gewünschten Positionen so mit den Druckaufnehmern bestückt, daß diese bündig zur Gehäuseinnenfläche angeordnet sind. Jeder Druckaufnehmer wird dann mit einem Kabel verbunden, das das Meßsignal an die fest mit dem Kabel verbundenen Verstärkerkarte leitet. Von den einzelnen Verstärkern aus wird das Signal dann entweder an den Transientenrekorder, ein Bandgerät oder andere mögliche Ausgabegeräte weitergegeben (Abb. 1.5). An verschiedenen Stellen innerhalb dieser Messkette existieren Monitorpunkte, an denen die Signale abgegriffen und z.B. an einem Oszilloskop überprüft werden können, um z.B. bei Problemen die Meßkette schneller überprüfen zu können.

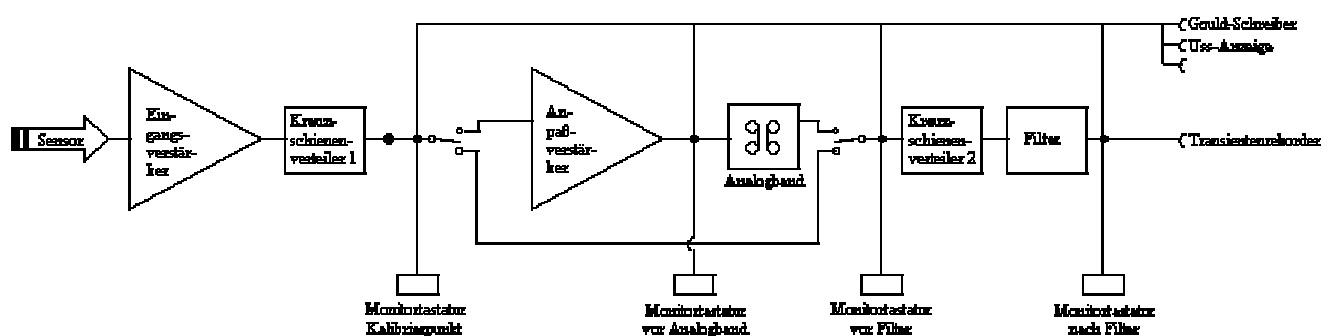


Abb. 1.5: Messkette

An den Verstärkerkarten werden die jeweiligen Meßstrecken bis zu den Verstärkern hin (also Druckaufnehmer, Kabel und Verstärkerkarte) stationär so kalibriert, daß bei Umgebungsdruck 0 V Spannung und bei 1000 mbar 1000 mV Spannung ausgegeben werden. Da die Druckaufnehmer nach den von Kulite mitgelieferten Datenblättern über eine Temperaturdrift von bis zu 5,5% verfügen, werden die Ausgleichsdruckkalibrierungen im Betrieb also bei erwärmter Maschine noch einmal durchgeführt. Dafür wird die Gegendruckleitung des jeweiligen Kulite an eine stationäre Meßstelle auf gleicher axialer Position des Verdichters angeschlossen. Dadurch wird die Druckdifferenz des Aufnehmers eliminiert und die Spannung am Verstärker auf 0 V nachgeregelt. Die Meßdaten, die aus dieser Messkette aufgenommen werden können, werden dann für jeden Kanal einzeln auf jeweils gleichen Meßkarten parallel aufgezeichnet. Dafür verfügt jede Meßkarte über einen RAM-Speicher von 512 kB Aufnahmekapazität. Das entspricht bei einer Abtastrate von 50 kHz einer Aufnahmezeit von ca. 10,5 Sekunden. Bei Erhöhung der Abtastrate reduziert sich die Aufnahmezeit entsprechend. Die maximal 12 gleichzeitig einsetzbaren Karten sind dabei zeitlich parallel getriggert. So ist gewährleistet, daß die erhaltenen einzelnen Meßpunkte an allen Kanälen zum gleichen Zeitpunkt gemessen worden sind. Erst nach der eigentlichen Meßwertaufnahme werden die Meßdaten der einzelnen Kanäle nacheinander von einem Rechner eingelesen und auf einer Festplatte abgespeichert.

Da aus den Leitungen der Versuchsanlage ein Netzbrummen nicht eliminiert werden kann, wird zusätzlich zu den in dem Verdichter messenden Druckaufnehmern das Meßsignal eines frei gegen Umgebung messenden Druckaufnehmers mitgemessen. Dieser nimmt dadurch nur das Netzbrummen auf welches so hinterher aus allen Messdaten wieder herausgerechnet werden kann. Damit stehen nach Abzug zweier Kanäle für das Drehzahlsignal und das Netzbrummen noch insgesamt zehn Kanäle für die Messung der einzelnen Drucksignale zur Verfügung.

### 1.3 Planung und Ablauf

Die Planung sowie die zeitliche Abwicklung des Teilvorhabens 1.1.4 sind wie folgt gegliedert:

#### 1. Konzipierung der Datenbasis

In Zusammenarbeit mit der MTU und den beteiligten Hochschulinstituten der Vorhabengruppe „Aktive Stabilitätsverbesserung - Analyseverfahren" wurde eine geeignete Konzeption einer Datenbasis erstellt. Dabei wurden sowohl Meßpositionen als auch Abtastrate sowie das Format, in dem die Daten übergeben worden sind festgelegt. Die Konzeptionierung der Datenbasis wurde nach der Verwertung der Daten einer ersten Meßkampagne für eine weitere Meßkampagne erweitert und so den Bedürfnissen der Analyseverfahren angepaßt.

#### 2. Implementierung der notwendigen instationären Meßtechnik im Verdichter

Entsprechend der Konzeption der Datenbasis wurde der 4-stufige Versuchsverdichter des Instituts für Strömungsmaschinen der Universität Hannover mit der notwendigen instationären Meßtechnik ausgerüstet. Diese besteht in erster Linie aus wandbündig eingesetzten Druckaufnehmern der Firma Kulite.

#### 3. Durchführung der instationären Messungen

Die instationären Strömungseffekte während der Entwicklung der Instabilitäten wurden mit wandbündigen Druckaufnehmern für unterschiedliche Drehzahlbereiche mit hoher zeitlicher Auflösung ermittelt. Dabei wurde die Drossel im Austritt des Verdichters mit jeweils der gleichen Geschwindigkeit geschlossen. Um die Entwicklung der Instabilitäten möglichst gut aufzulösen wurde dafür eine niedrige Geschwindigkeit gewählt.

### 4. Aufbereitung der Meßdaten zur Erweiterung der Datenbasis

Die aus den durchgeführten Messungen gewonnenen Daten wurden entsprechend der Konzeption der Datenbasis aufgearbeitet und den Partnern der Vorhabengruppe 1.1 zur Verfügung gestellt.

### 5. Informationsaustausch über den Entwicklungsstand der Projektpartner

Durch eine direkte Vernetzung mit dem Zentralrechner der Technischen Informationsbibliothek der Universität Hannover ist ein schneller Zugang zu aktuellen Veröffentlichungen zum Themenschwerpunkt erleichtert. Neueste Erkenntnisse können somit sofort aufgegriffen werden und ggf. in die durchzuführenden Arbeiten einfließen. Es fand zudem hinsichtlich der Literaturrecherche eine enge Zusammenarbeit mit den Projektpartnern (Abschnitt 1.5) statt. Nennenswerte Veröffentlichungen, die starke Auswirkungen auf den Verlauf des Projektes hatten, wurden aber nicht gefunden.

### 6. Dokumentation

Zum Ende der ersten Hälfte des Förderzeitraums wurden die bis dahin gewonnenen aufbereiteten Meßergebnisse den Projektpartnern der Vorhabengruppe als erster Teil der Datenbasis zur Verfügung gestellt. Die bei der jeweiligen Auswertung hinsichtlich der Pumpgrenzfrüherkennung auftretenden neuen Fragestellungen wurden in das laufende Versuchsprogramm aufgenommen. Es ergab sich aus diesen Fragestellungen die Notwendigkeit einer zweiten erweiterten Messkampagne um die Datenbasis in erforderlicher Weise zu vervollständigen. Zur Dokumentation des Fortgangs des Teilvorhabens wurden in regelmäßigen Abständen (Januar 2000, Juli 2000, Januar 2001, Juli 2001) Zwischenberichte an das Forschungszentrum Jülich sowie die AG Turbo geleitet worden. Im Anschluß an die Beendigung dieses Teilvorhabens wird dieser Abschlußbericht verfaßt.

## 1.4 Stand von Wissenschaft und Technik

Grundvoraussetzung für eine frühzeitige Detektion der Verdichterinstabilitäten sind detaillierte Kenntnisse über die Mechanismen, die zur Destabilisierung der



Verdichterströmung führen. Die Entstehungsmechanismen der Instabilitäten werden durch zwei unterschiedliche Modelle beschrieben. Die Theorie der kleinen Störungen von Moore und Greitzer /14/ beschreibt eine globale Entwicklung des Rotating Stall (zu Deutsch: umlaufende Ablösung). Der axialen Geschwindigkeitskomponente der homogenen Strömung ist eine modale Welle überlagert. Die Umlaufgeschwindigkeit der modalen Welle ergibt sich aus der Verdichterkennlinie und der Kanalgeometrie des Verdichters. Wird der Durchsatz verringert, wird das System instabil. Die kleine Störung entwickelt sich zum Rotating Stall. Das zweite Modell ist auf die aerodynamische Überlastung einzelner Schaufelgitter im Stufenverband zurückzuführen. Es kommt zu stochastischen Ablösungen der Strömung an einzelnen Schaufelprofilen. Die durch die Ablösung hervorgerufene Kanalversperrung führt zu einer asymmetrischen Belastung benachbarter Schaufeln des Gitters, die eine saugseitige Verlagerung der Störung im Schaufelgitter hervorruft. Hat sich eine der lokalen Störungen stabilisiert, setzt der Rotating Stall ein.

Die von Day /4/ an unterschiedlichen Versuchsverdichtern durchgeführten experimentellen Studien zeigen, daß die Destabilisierung entsprechend der Theorie der kleinen Störungen überwiegend in näherungsweise inkompressiblen Verdichterströmungen auftritt. Eine klare Zuordnung der Verdichterklassen ‚inkompressibel‘ bzw. ‚kompressibel‘ zu dem jeweiligen Modelltyp kann jedoch nicht vorgenommen werden. Untersuchungen von Day und Freemann /5/ zeigen Überschneidungen der unterschiedlichen Verdichterklassen, die besonders im Teillastbereich zu beobachten sind.

Zuverlässigere, übertragbare Kriterien zur frühzeitigen Detektion sich bildender Instabilitäten können nur durch detaillierte Erkenntnisse über die Struktur der dreidimensionalen Strömung während der Ausbildung zu rotierenden Instabilitäten gewonnen werden. An einem einstufigen Axialverdichter wurden von Poensgen und Gallus /16/ umfangreiche Untersuchungen zur Struktur des Rotating Stall durchgeführt. Die Auswertung der mit einer dreidimensionalen CTA-Meßtechnik durchgeführten Strömungsabtastrung innerhalb der Axialspalte erlaubt einen tiefen Einblick in die Strömungsvorgänge des ausgebildeten Rotating Stall. Während der Ausbildung der Instabilitäten konnten von Poensgen zwei unterschiedliche Konfigurationen der rotierenden Störungen nachgewiesen werden. Bei kontinuierlichem Schließen der Drossel liegen unmittelbar vor der Stabilitätsgrenze

beide Konfigurationen vor und interferieren. Blanco-Marigorta et al. /1/ führten Hitzdrahtmessungen an einem Fan mit variablem Anstellwinkel durch. Die im Absolut- und Relativsystem durchgeführten Messungen der Geschwindigkeiten zeigen Abhängigkeiten der Stallstruktur vom Anstellwinkel. Untersuchungen zum Rotating Stall bei den technisch anspruchsvolleren, hochbelasteten, mehrstufigen Verdichtern beschränken sich im Allgemeinen auf instationäre Druckmessungen mit wandbündig installierten Druckaufnehmern und Strömungsab tastungen im Verdichtereintritt. Sowohl Escuret und Garnier /6/ als auch Waltke /22/ zeigen an mehrstufigen Axialverdichtern mit CDA-Beschaufelung, daß auch bei modernen hochbelasteten Verdichtern mit Hilfe von wandbündigen Druckmessungen nachgewiesen werden kann, welche der Stufen im Stufenverband in Abhängigkeit von Drehzahl und variablem Anstellwinkel des Vorleitrades die Instabilitäten auslösen.

Sollen Maßnahmen zur Unterdrückung des Rotating Stall durchgeführt werden, müssen Verfahren entwickelt werden, die den Beginn der Instabilität oder deren Vorläufer frühzeitig erkennen und somit einen Regeleingriff ermöglichen. Die in der Literatur vorgestellten Arbeiten zeigen, daß Instabilitäten in inkompressibel arbeitenden Verdichtern gegenüber hoch belasteten mehrstufigen Verdichtern eine wesentlich längere Entwicklungsphase durchlaufen. Bedingt durch die flachen Charakteristiken sind im stabilen Kennfeldbereich rotierende Störungen zu beobachten, die die Stabilität des Gesamtsystems nicht beeinträchtigen wodurch ein Regeleingriff nach erfolgreicher Detektion der Instabilitäten möglich wird /15/. Aufgrund der kurzen Entwicklungsphase des Rotating Stall bei mehrstufigen hochbelasteten Verdichtern müssen hier zur aktiven Stallunterdrückung leistungsfähigere dynamische Verfahren zur Detektion der Instabilitäten entwickelt werden, die einen erfolgreichen Regeleingriff zulassen bevor die Stabilität des Gesamtsystems beeinträchtigt wird.

Das unter der genannten Problemstellung von Hönen und Gallus /10/ an einem vielstufigen Axialverdichter einer Gasturbine erprobte Verfahren ermittelt über die FFT-Analyse den Frequenzanteil des Drehkluges im Frequenzspektrum. Bei der Annäherung an die Stabilitätsgrenze wird die Schaufelfrequenz durch Einfluß der Strömungsablösungen unterdrückt. Tryfonidis /21/ et al. verwendet zur Stall-Früherkennung ein Verfahren, das auf der Ermittlung der Kohärenz des Pre-Stall beruht. Eine Kennfelderweiterung zu niedrigeren Massendurchsätzen wurde erfolgreich von Day /3/ und Paduano /15/ durchgeführt. Day unterdrückt die

Ausbildung einer entstehenden rotierenden Ablösung zur Stallzelle durch zeitabhängig gesteuertes, impulsives Einblasen von Luft am Gehäuse. Paduano führt mit über den Umfang unabhängig verstellbaren Vorleitschaufeln erfolgreich eine Kompensation der aufschwingenden modalen Welle durch. Bei beiden Verfahren konnte innerhalb des Kennfeldbereiches mit aktiver Stallunterdrückung kein weiterer Druckgewinn realisiert werden.

Ein weiteres Arbeitsfeld auf dem Weg zur Entwicklung industriell einsetzbarer Methoden zur aktiven Stallunterdrückung ist die theoretische Vorhersage des Entstehungsortes der Instabilitäten in Abhängigkeit der Belastungsverteilungen im Stufenverband. Um die kostenintensiven experimentellen Ermittlungen der Entstehungsorte zu minimieren müssen die in den Kennfeld-Berechnungsverfahren implementierten Kriterien zur Vorhersage der Instabilitäten herangezogen und weiterentwickelt werden. Basierend auf Gitteruntersuchungen mit NACA 65 Profilen leitete Lieblein /12/ einen äquivalenten Diffusionsfaktor ab. Überschreitet der äquivalente Diffusionsfaktor einen kritischen Grenzwert löst die Strömung ab. Bei Fottner /7/ wird die Stabilitätsgrenze erreicht, wenn der kritische äquivalente Diffusionsfaktor auf mehr als 30% der Schaufelhöhe überschritten wird. Ein weiteres Modell nach Koch /11/ beruht auf einer Analogie der Stabilitätskriterien des Schaufelkanals einer Verdichterstufe zum 2-dimensionalen Diffusor. Die im Diffusor empirisch ermittelten Stabilitätskriterien werden in modifizierter Form auf die Strömung innerhalb des Schaufelkanals übertragen.

### Literatur

- /1/ Blanco-Marigorta, E. Ballesteros-Tajadura, R. Santolaria,C.: Hot Wire Measurements during Rotating Stall in a variable Pitch Axial Flow Fan, ASME 96-GT-441
- /2/ Blöcker, U.: Das transiente Verhalten mehrstufiger Axialverdichter bei der Regelung mit einer „Schnellen Leitschaufelverstellung“, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 7, Nr. 152,1985
- /3/ Day, I., J.: Active Suppression of Rotating Stall and Surge in Axial Compressors, ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 115, Jan.1993

- 
- /4/ Day, I. J.: Stall Inception in Axial Flow Compressors, Journal of Turbomachinery, Vol. 115,1993
- /5/ Day, I. J.; Freeman,C.: The unstable behaviour of low and high speed compressors. ASME 93-GT-26, 1993
- /6/ Escuret, J. F.; Garnier, V.: Stall Inception Measurements in a High-Speed Multistage Compressor, ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 118, October 1996
- /7/ Fottner, L.: Kennfeldrechnung für Axialverdichter. Technischer Bericht 72/008, Projekt 262, MTU-München, 1972
- /8/ Gehring, S.; Rieß, W. : Modelle zur Bestimmung der Stabilitätsgrenze von Axialverdichtern, VDI-Berichte Nr.1208,1995
- /9/ Hendricks, G.J.; Bonnaure, L.P.; Longley, J.P.; Greitzer, E.M.; Epstein, A.H.: Analysis of Rotating Stall Onset in High Speed Flow Compressors. AIAA Paper 93-2233, Jun. 1993
- /10/ Hönen, H.; Gallus H., E.: Monitoring of Aerodynamic Load and Detection of Stall in Multistage Axial Compressors, ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 117, Jan.1995
- /11/ Koch, C.C.: Stalling Pressure Rise Capability of Axial Flow Compressor Stages. ASME Paper 81-GT-3, 1981
- /12/ Lieblein, S.: Loss and Stall Analysis of Compressor Cascades. Trans. ASME, Journal of Basic Engineering, Sept.1959
- /13/ Mansoux, C.; Gysling, D.L.; Setiawan, J.D.; Paduano, J.D.: Distributed Nonlinear Modeling and Stability Anaysis of Axial Compressor on Stall and Surge. Proc. of the American Control Conference, Baltimore, 1994
- /14/ Moore, F. K., Greitzer, E. M.: A Theory of Post-Stall Transients in Axial Compression Systems: Part 1 - Development of Equations, and Part II, ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 108,1986

- 
- /15/ Paduano, J. D.; Epstein; Valavani; Longley; Greitzer; Guenette: Active Control of Rotating Stall in a Low-Speed Axial Compressor, ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 115, Jan.1993
- /16/ Poensgen, C. A.; Gallus, H.E.: Rotating Stall in a Single-Stage Axial Flow Compressor, ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 118, April 1996
- /17/ Rieß, W.; Walbaum, M.: Meßtechnische Erfassung instationärer Strömungsvorgänge in mehrstufigen Axialverdichtern, Mitteilungen Pfeleiderer-Institut Nr.1, W.H. Faragallah Verlag Braunschweig, 1994
- /18/ Rieß, W.; Walbaum, M.: Initiation and Propagation of Flow Instabilities in Multi-Stage Axial Compressors, AGARD PEP 85th Symposium on Loss Mechanisms and Unsteady Flow in Turbomachines, 1995
- /19/ Rieß, W.; Gehring, S.: Pumpgrenzbestimmung, HTGT-Turbotech Interimsphase, Vorhaben 1.220,1996
- /20/ Schlamann, U.; Teipel, I., Rieß, W.: Experimentelle Untersuchungen der Strömungsphänomene des Rotating Stall und des Pumpens bei mehrstufigen, hochbelasteten Axialverdichtern, VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 7, Nr.91,1985
- /21/ Tryfonidis, M.; Etchevers, O.; Paduano, J., D.; Epstein, A., H.; Hendricks, G., J.: Pre-Stall Behaviour of Several High-Speed Compressors, ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 117, Jan.1995
- /22/ Waltke, Ulrich: Untersuchung der Endstufen eines vielstufigen Axialverdichters mit CDA-Beschaufelung, HTGT-Turbotech Interimsphase, Vorhaben 1.141, Febr. 1997

## **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Dieses Vorhaben ist Teil der Vorhabengruppe „Aktive Stabilitätsverbesserung – Analyseverfahren“. Dieser Vorhabengruppe gehören die RWTH Aachen, RU Bochum, TH Darmstadt, TU München, sowie als Industriepartner die MTU Motoren- und Turbinen-Union München GmbH an. Im Rahmen dieser Vorhabengruppe

wurden am Versuchsverdichter des IfS Messungen im stabilen Betriebsbereich sowie im Übergang zum instabilen Betrieb durchgeführt. Mit Hilfe dieser Daten wurden von den anderen Partnern (Tabelle 1.2) Analyseverfahren neu bzw. weiterentwickelt. Sowohl die Erstellung der Datenbasis als auch die Entwicklung der Analyseverfahren fand in enger Abstimmung mit den jeweiligen Projektpartnern statt. Eine Zusammenarbeit mit außenstehenden Stellen fand nicht statt.

Teilprojekt Nr	Stichwort	Firma/Prof.	wiss. Bearbeiter	Status
1.1.2	Überwachungssystem zur Pumpgrenzdetektion	Prof. Niehuis	Dr. Hönen	in Arbeit
1.1.3	Vergleich und Weiterentwicklung	MTU	Dr. Grauer	in Arbeit
1.1.5	Aktive Stabilitätsverbesserung	Prof. Stoff	Methling	abgeschlossen
1.1.6	Übertragung und Weiterentwicklung von Signalanalyseverfahren	Prof. Hennecke	Wagner	abgeschlossen
1.1.7	Aktive Stabilitätsverbesserung - Weiterentwicklung von Signalanalyseverfahren	Prof. Kau/Rick	Uhlmann	abgeschlossen

Tab. 1.2: Projektpartner und Projektstatus

## 1.6 Erzielte Ergebnisse

Als erzielte Ergebnisse sind im Fall dieses Teilvorhabens 1.1.4 die Daten anzusehen, die im Rahmen dieses Vorhabens am Versuchsverdichter des Instituts für Strömungsmaschinen gewonnen wurden. Diese Daten dienen dem Zweck, die Analyseverfahren der Projektpartner zu entwickeln bzw. weiterzuentwickeln und zu erproben. Grundlage für diese Messungen war allerdings die Konzeptionierung der durchzuführenden Messungen. Dabei mußte geklärt werden, welche Anforderungen die einzelnen Analyseprogramme an die Daten stellen würden. Die Fragen, die dabei auftraten, waren:

1. An welcher Stelle des Verdichters sind die frühesten Anzeichen für eine beginnende Rotierende Instabilität zu erwarten?
2. Wie soll der Verdichter instrumentiert werden, um die benötigten Daten zu erhalten?

3. Wie hoch muß die Abtastfrequenz gewählt werden, um möglichst viele Effekte während einer Messung aufzunehmen?

Weitere festzulegende Parameter für die Messungen waren die relative Drehzahl und die Geschwindigkeit mit der die Austrittsdrossel des Versuchsverdichters verfahren werden sollte. Darüber wird der Betriebspunkt des Verdichters eingestellt.

Zu 1: Im Vorfeld durchgeführte Messungen am Versuchsverdichter des IfS haben gezeigt, daß unabhängig vom Drehzahlverhältnis, bei dem der Verdichter betrieben wird, in der ersten Verdichterstufe die ersten deutlichen Anzeichen für eine Destabilisierung der Strömung sichtbar werden. Das erweist auch insofern als vorteilhaft, als die Meßdaten der ersten Stufe nicht durch stromauf liegende Stufen zusätzlich verrauscht werden. Aus diesen Gründen wurde ein Schwerpunkt bei der Instrumentierung des Verdichters auf die erste Stufe gelegt.

Zu 2: So wurden vor der ersten Stufe fünf Sensoren in unregelmäßigen Abständen um den Umfang verteilt. Die Gründe für die unregelmäßigen Abstände wurden bereits in Abschnitt 1.4 dargelegt. Ein weiterer Sensor wurde über dem ersten Laufrad, genau auf Höhe der größten Druckdifferenz des Laufrades installiert. Weitere Druckaufnehmer wurden in axialer Richtung jeweils hinter den Lauf- und Leiträdern eingebaut. Diese sind alle auf der gleichen Umfangsposition angebracht. Auf ursprünglich vorgesehene invasive Messungen der Druckverläufe in den Schaufelkanälen wurde verzichtet, da invasive Messungen zwangsläufig mit einer Störung der Strömung verbunden gewesen wären. Diese hätte aber zum einen das Verhalten des Verdichters in der Nähe der Stabilitätsgrenze entscheidend beeinflußt und somit die erhaltenen Meßdaten gerade in Hinblick auf diese verfälscht. Außerdem ist eine invasive Meßtechnik im industriellen Einsatz nur schwer zu implementieren, da die Zwischenräume zwischen den einzelnen Lauf- und Leiträdern in industriellen Maschinen nur sehr klein sind.

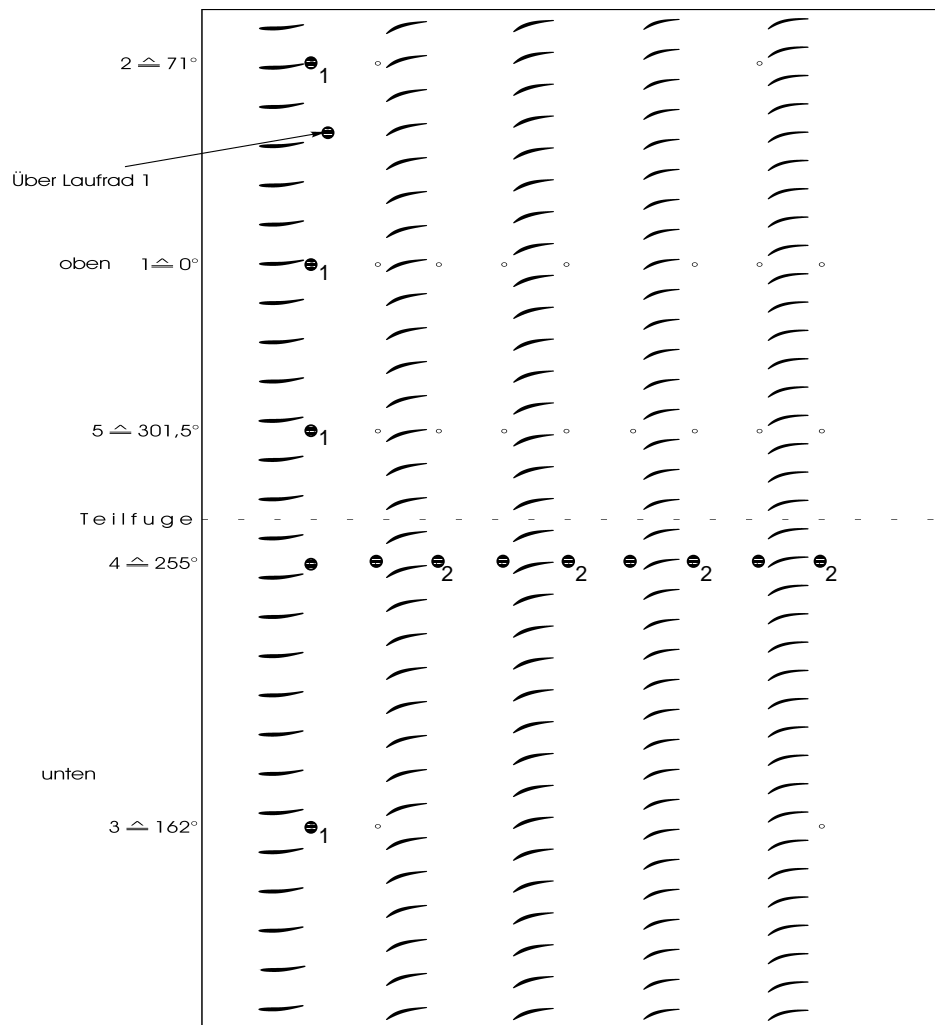


Abb. 1.6: Positionen der instationären Druckaufnehmer

Somit standen für die Messungen nur die hier genannten Druckmeßstellen - alle wandbündige Meßpositionen - zur Verfügung. In der Summe waren dies 14 Meßstellen. Zusammen mit der Drehzahlmessung und dem Aufnehmer für das Netzbrummen ergaben sich insgesamt 16 Meßstellen. Der am IfS eingesetzte Transientenrekorder kann diese Zahl von Meßstellen nicht gleichzeitig aufzeichnen, so daß die Zahl der Meßstellen aufgeteilt werden mußte. Deshalb wurden die Meßpositionen die in einer Kiellinie hintereinander jeweils hinter den Laufrädern liegen zusammen mit dem Aufnehmer über dem ersten Laufrad und dem Drehzahlsignal sowie dem Störsignalaufnehmer abwechselnd mit den Druckaufnehmern, die über den Umfang vor dem ersten Laufrad verteilt sind, und den restlichen in Kiellinie angeordneten Aufnehmern zusammen gemessen. Die Aufnehmer, die nur in einer der beiden Konfigurationen aufgezeichnet werden, sind mit einer 1 für Konfiguration 1 bzw. einer 2 für die zweite Konfiguration gekennzeichnet.



Zu 3: Als nächstes waren die Abtastfrequenz und daraus resultierend eine eventuelle Filterung der Meßdaten festzulegen. Der Verdichter hat eine Nenndrehzahl von  $18000 \text{ min}^{-1}$  ( $=300 \text{ s}^{-1}$ ) und eine Schaufelzahl pro Rad, die zwischen 23 und 34 liegt. Um die Strömungsverhältnisse für diese Gitter in etwa auflösen zu können und um ein hinreichend gutes Oversampling der Daten (=verbesserte Auflösung der niedrigen Frequenzen, um das Zeitfenster eine Frequenzanalyse zu reduzieren) zu gewährleisten, wurde die Abtastfrequenz auf 50 kHz festgelegt. Das entspricht etwa dem doppelten der höchsten Schaufelfrequenz. Somit wurde eine gute Auflösung der statischen Druckverläufe gewährleistet. Um Frequenzspiegelungseffekte (Aliasing), die durch die Digitalisierung der Messdaten auftreten können zu vermeiden, wurden die Messungen mit einem 20 kHz Tiefpaßfilter gefiltert. Aliasing-Effekte wurden so vermieden.

Das Ziel des Teilvorhabens 1.1.4 war, möglichst die Effekte im kritischen Bereich in der Nähe der Stabilitätsgrenze zu detektieren. Deshalb erschien es notwendig, die Geschwindigkeit, mit der die Drossel im Austritt des Versuchsverdichters des IfS verfahren wird um den Betriebspunkt des Verdichters einzustellen, möglichst gering zu halten. Diese wurde mit 200 Schritten pro Sekunde gewählt, was etwas mehr als 1% der möglichen Gesamtschrittweite der Drossel entspricht. Diese Geschwindigkeit gewährleistete einen auf der einen Seite einen langsamen Übergang in den instabilen Betrieb, auf der anderen Seite blieb dennoch genügend Zeit, um den gesamten Verfahrensvorgang der Drossel in den instabilen Betrieb und wieder zurück in den stabilen Betrieb aufzuzeichnen.

Um die verschiedenen Betriebsbereiche, in denen Turbomaschinen im industriellen Einsatz üblicherweise betrieben werden, möglichst gut erfassen zu können, wurden Messungen bei drei unterschiedlichen Verhältnissen von Betriebsdrehzahl/Nenn-drehzahl durchgeführt, bei  $n/n_{\text{Nenn}} = 0,6; 0,8$  und  $0,95$ . Damit sollten die typischen Lastverhältnisse, die bei Axialverdichtern auftreten, abgedeckt werden. Es wurden bei diesen Drehzahlverhältnissen jeweils im stabilen Betriebsbereich in der Nähe der Stabilitätsgrenze kurze Messungen mit einer Dauer von ca. 0,5 Sekunden aufgezeichnet. Diese sollten den Analyseprogrammen als Muster für eine noch stabile Strömung dienen. Zusätzlich wurden ausführliche Messungen bei den gleichen Drehzahlverhältnissen durchgeführt, im Verlauf derer jeweils die Stabilitätsgrenze einmal zu einem instabilen Betriebspunkt und darauf wieder zurück zu einem stabilen Betriebspunkt überschritten wurde. Diese ausführlichen Messungen wurden in ihrer Dauer von der Speicherkapazität der Meßkarten des Transientenrekorders begrenzt. Die zeitliche Dauer dieser Messungen betrug somit

ca. 10,5 Sekunden. Der Ablauf der jeweiligen Messung mit Überschreiten der Stabilitätsgrenze war dabei folgender. Die Maschine wurde zu Beginn des Versuchs vorsichtig an die Stabilitätsgrenze herangefahren. Im Anschluß daran wurde die Drossel in kleinen Schritten solange weiter geschlossen, bis der Verdichter die Stabilitätsgrenze überschritt. Der letzte stabile Betriebspunkt wurde damit als Stabilitätsgrenze betrachtet und diese somit für den jeweiligen Tag als bekannt angesehen. Danach wurde der Verdichter wieder in den stabilen Betrieb zurück- und vorsichtig an die Stabilitätsgrenze herangefahren. Im Anschluß daran wurde der Betriebspunkt des Verdichters noch einmal langsam über die Stabilitätsgrenze verschoben. Gleichzeitig damit wurde die Aufzeichnung der Meßdaten gestartet. Diese wurden dann im Anschluß an die jeweilige Messung in einen an den Transientenrekorder angeschlossenen Computer übertragen und von dort aus aufbereitet und in die mit den Projektpartnern abgesprochene Form konvertiert. In dieser Form wurden die Daten auf CDs gebrannt und den Projektpartnern zugesandt. Diese Meßdaten sowie die der 2. Meßkampagne (s.u.) sind in einem Anhang an diesen Bericht als Abb. A.1-Abb. A.43 graphisch dargestellt.

### **Weitere Messungen**

Aus der Auswertung dieser Daten durch die Projektpartner konnten anschließend Erweiterungen sowie Änderungen der Vorgaben, die im Rahmen der Konzeptionierung gemacht worden waren, abgeleitet werden. Zwar waren die Projektpartner der TU Darmstadt (Teilvorhaben 1.1.6 – vgl. Tab. 1.2) an weiteren Messungen nicht interessiert, doch für die Partner der RWTH Aachen (Teilvorhaben 1.1.2) waren die Daten der ersten Messungen nicht ausreichend. So erwies sich bei der Auswertung der bis dahin aufgebauten Datenbasis die Dauer von ca. 0,5 Sekunden der Messungen der jeweiligen stabilen Betriebspunkte für eine gute Differenzierung für die meisten Partner als zu kurz. Außerdem erschienen weitere stabile Betriebspunkte auch mit größerem Abstand zur Stabilitätsgrenze notwendig, um die Betriebspunkterkennung des Verdichters zu vervollständigen und gegebenenfalls Veränderungen im Verhalten der Strömung detektieren zu können. Als dritte Änderung sollte die Abtastfrequenz sowie die Eckfrequenz des Tiefpaßfilters angehoben werden, da von Projektpartnern (speziell von der RWTH Aachen) Signalverläufe im Bereich von ca. 35 kHz gesucht wurden. Als letztes hatte sich herausgestellt, daß die Anzahl der Meßpositionen deutlich reduziert werden konnte.

Mit diesen Erkenntnissen konnte der Anforderungskatalog an die Messungen aktualisiert und mit diesem eine zweite Meßreihe gestartet werden. Für diese wurde die Abtastfrequenz auf 100 kHz heraufgesetzt, da dies die nächst mögliche einstellbare Abtastfrequenz des Transientenrekorders ist. Somit war die benötigte Eckfrequenz des Tiefpaßfilters auf 50 kHz festgelegt. Da die maximale Aufzeichnungsdauer der Messungen durch die Speicherkapazität der Meßkarten des Transientenrekorders begrenzt wird, reduzierte sich diese durch die Verdopplung der Abtastfrequenz auf die Hälfte, also ca. 5,25 Sekunden. In Ersatz für die kurzen Messungen im stabilen Bereich, die sich als unzureichend erwiesen hatten, wurden in der zweiten Meßreihe Messungen mit maximaler Aufzeichnungsdauer ( $\approx 5,25\text{s}$ ) an fünf verschiedenen Betriebspunkten der jeweiligen Drehzahlkennlinie durchgeführt. Zwischen den beiden Meßreihen war jedoch eine zeitweilig weggedämpfte Resonanzschwingung des Getriebes im Antrieb des Verdichters bei 60% der Nenndrehzahl wieder aufgetreten. Dadurch wurden weitere Messungen in diesem Drehzahlbereich für die zweite Meßreihe unmöglich. Im Ausgleich dafür wurde auf die Drehzahlkennlinien bei 50% und 70% der Nenndrehzahl ausgewichen. Die Betriebspunkte, an denen Messungen im stabilen Betriebs durchgeführt wurden, sind in Abb. 1.7 dargestellt, die Daten selbst sind wie die Daten der ersten Meßreihe im Anhang zusammengefaßt. Zusätzlich wurden Messungen mit Überschreitung der Stabilitätsgrenze durchgeführt. Diese starteten jedoch nicht unmittelbar an der Stabilitätsgrenze, sondern am letzten gemessenen stabilen Betriebspunkt. Die Meßmethode unterschied sich jedoch nicht von der Methode der ersten Meßreihe. Die aus dieser Meßreihe erhaltenen Daten wurden in identischer Weise aufbereitet und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt.

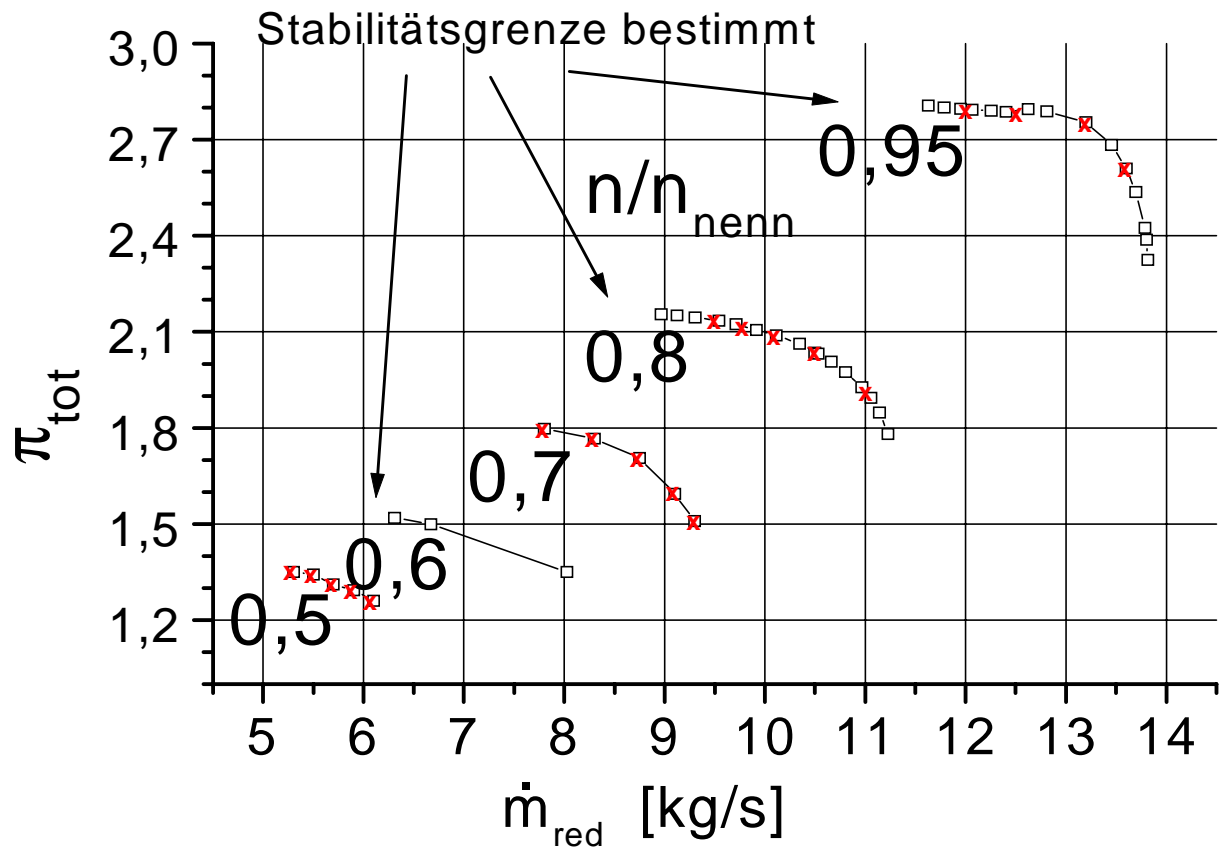


Abb. 1.7: Kennfeld mit den instationär gemessenen stabilen Betriebspunkten

Somit entstand im Rahmen dieses Vorhabens eine Datenbasis, die in verschiedenen Betriebsbereichen des Versuchsverdichters Auskunft über dessen Betriebsverhalten gibt. Aufgrund der Tatsache, daß die Auslegung des Versuchsverdichters eng an die Auslegungen industrieller Verdichter angelehnt ist, sollten die Daten auch auf industrielle Verdichter übertragbar sein.

Durch eine hohe zeitliche Auflösung der Daten sowie eine ausführliche Instrumentierung des Versuchsverdichters während der Messungen wurde eine detaillierte Darstellung der Verläufe der statischen Wanddrücke an den verschiedenen Betriebspunkten erzielt.

### **1.7 Voraussichtlicher Nutzen**

Im Rahmen dieses Vorhabens entstand eine Datenbasis, die es ermöglicht, für verschiedene Verfahren zur Detektion von entstehenden Instabilitäten in Strömungen von Axialverdichtern eine gemeinsame Entwicklungs- und Prüfgrundlage zu bieten. Der dafür eingesetzte Versuchsverdichter ähnelt dabei von den Strömungsverhältnissen her einem hochbelasteten industriellen Verdichter, so daß eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf industrielle Verdichter mit guter Übereinstimmung gegeben ist. Dadurch wurden die Entwicklungen verschiedener Verfahren zur Pumpgrenzfrüherkennung sowie deren direkter Vergleich ermöglicht.

### **1.8 Während der Durchführung des Projektes bekannt gewordener Fortschritt auf diesem Gebiet bei anderen Stellen**

Es wurden im Verlauf der Durchführung des Projektes keine Informationen über vergleichbare Projekte von anderen Stellen gefunden.

### **1.9 Geplante Publikation der Ergebnisse**

Da eine Publikation von Meßdaten ohne eine dazugehörige Interpretation nicht sinnvoll ist, wurden die Ergebnisse dieses Teilprojektes, das ausschließlich der Erzeugung solcher Meßdaten diente, nicht vom Institut für Strömungsmaschinen veröffentlicht. Sie werden im Rahmen der Veröffentlichungen der Projektpartner als mitveröffentlicht betrachtet. Dies geschieht in Übereinstimmung mit allen Projektpartnern. Beispielhaft wird im Berichtsblatt eine der Veröffentlichungen der Projektpartner aufgeführt.

## 1.10 Anhang

Die im Rahmen dieses Teilprojekts gewonnenen Daten werden in diesem Abschnitt vollständig dargestellt. Diese Daten wurden dabei in die Bereiche

Meßkampagne

und

Meßkampagne

unterteilt. Da die Anzahl der gemessenen Kanäle bei der ersten Meßkampagne die am Institut für Strömungsmaschinen mögliche Zahl von 12 überstieg, wurden die Messungen in jeweils zwei Konfigurationen durchgeführt. Die Kanalbelegung der beiden Konfigurationen lautet:

Kanal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1:	v LA1 u (3)	v LA1 ur (4)	v LA1 or (5)	v LA1 om (1)	v LA1 oli (2)	ü LA1	n LA1	n LA2	n LA3	n LA4
2:	v LA1	v LA2	v LA3	v LA4	n LE4	ü LA1	n LA1	n LA2	n LA3	n LA4

Tab. 1.3: Positionen der Meßstellen in Meßkampagne 1

Dabei wird für Konfiguration 1 bei den ersten 5 Kanälen jeweils die Umfangsposition in Klammern mit angegeben. Die Umfangsposition der übrigen Meßstellen ist jeweils Position 4 (vgl. Abb. 1.3). Die Kanäle 11 und 12, die nicht in Tabelle 1.3 aufgeführt sind, nehmen das Drehzahlsignal und das Netzbrummen auf (vgl. Abschnitt 1.6). Bei den Messungen der 2. Konfiguration ist die Nomenklatur der Kanäle bei der Aufnahme der Meßdaten nicht gegenüber der 1. Konfiguration verändert worden.

Bei der **2. Meßkampagne** war die Zahl der gemessenen Kanäle insgesamt geringer. Dafür wurden die Messungen an den stabilen Betriebspunkten doppelt durchgeführt, so daß an diesen Punkten ein umfangreicherer Datenbestand zur Verfügung stand. Bei den Messungen mit Übergang in den instabilen Betriebsbereich ist das aber nicht der Fall

1.10.1 1. Meßkampagne

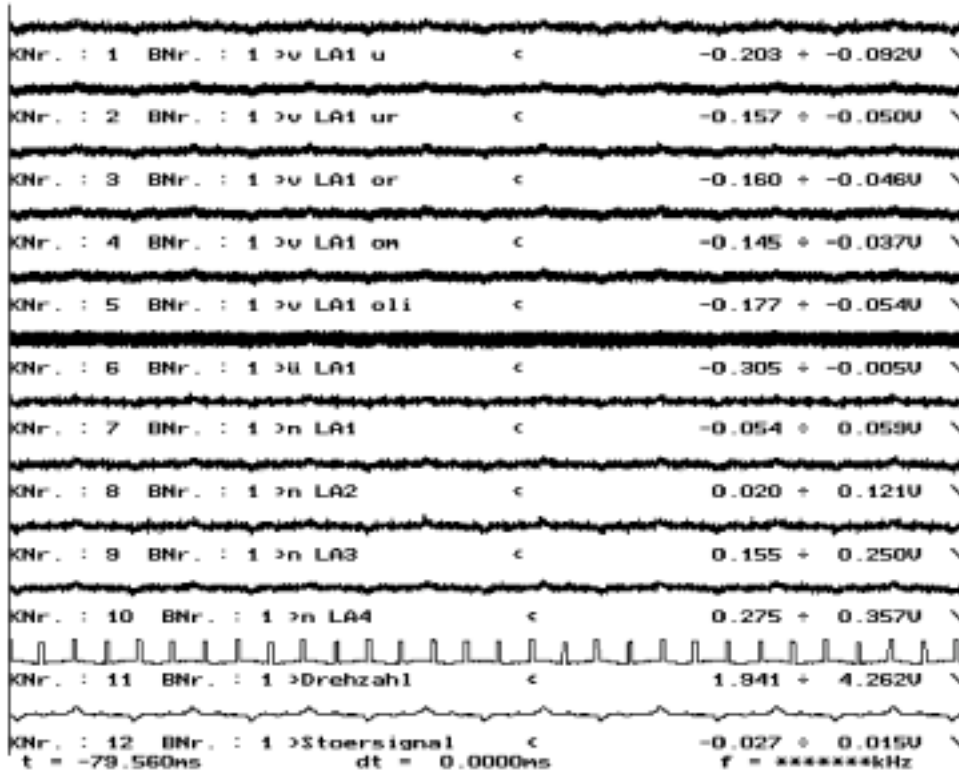


Abb. A.1:  $n/n_{Nenn}:60\%$ ,  $\dot{m}_{red} = 6,67 \text{ kg/s}$ , Konfiguration 1

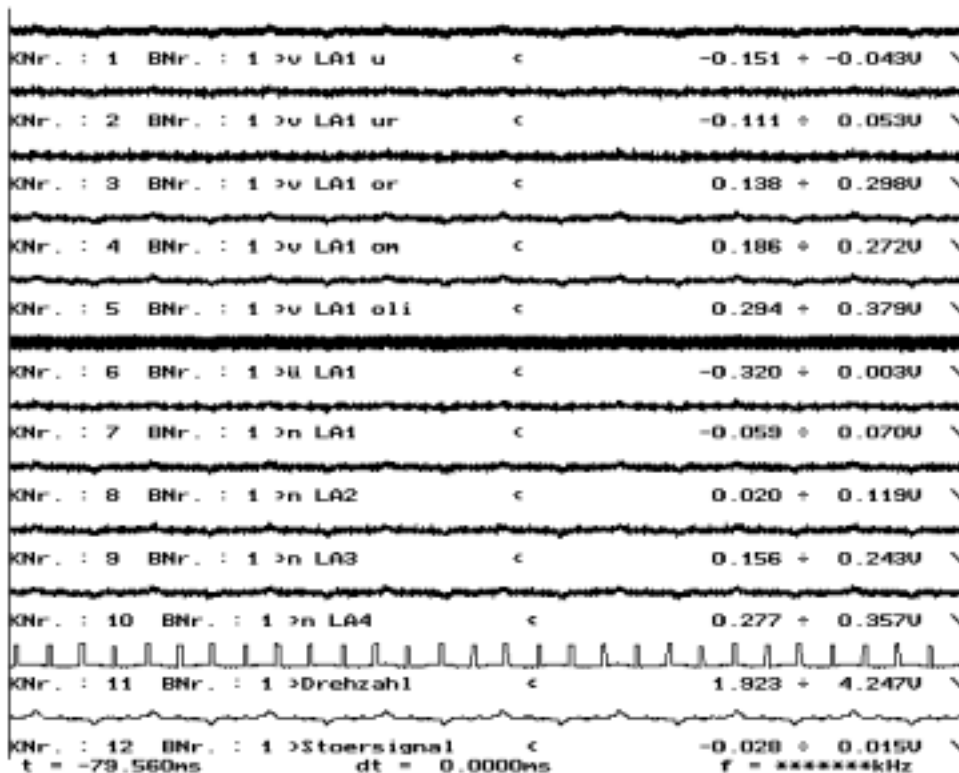
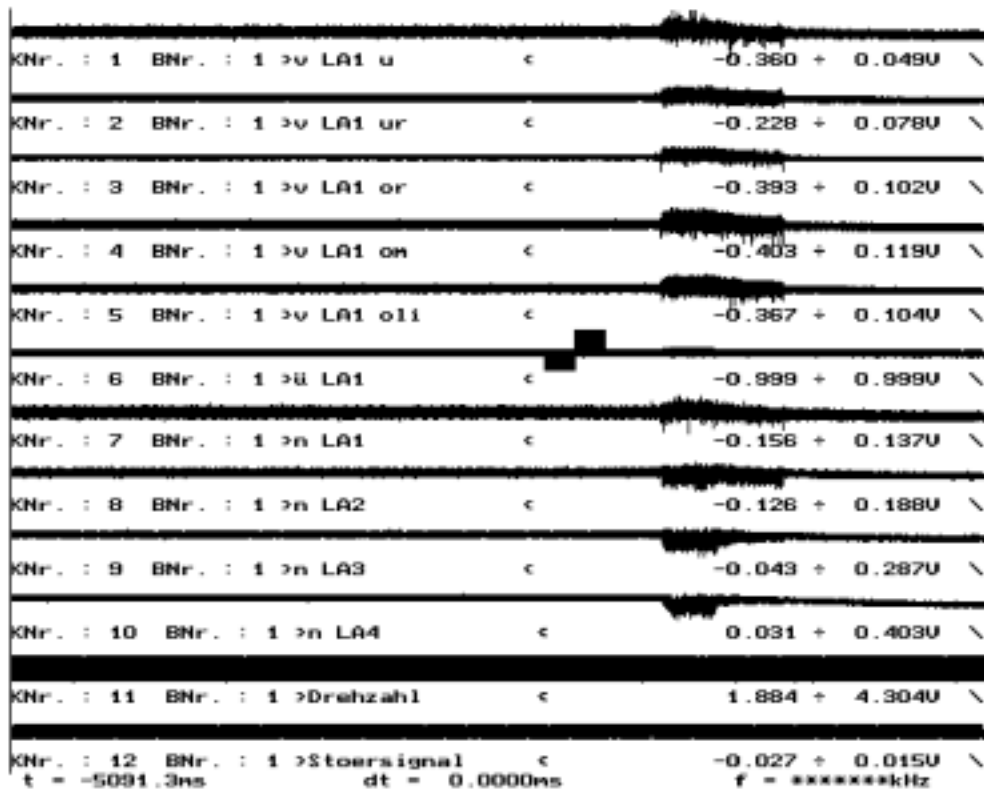
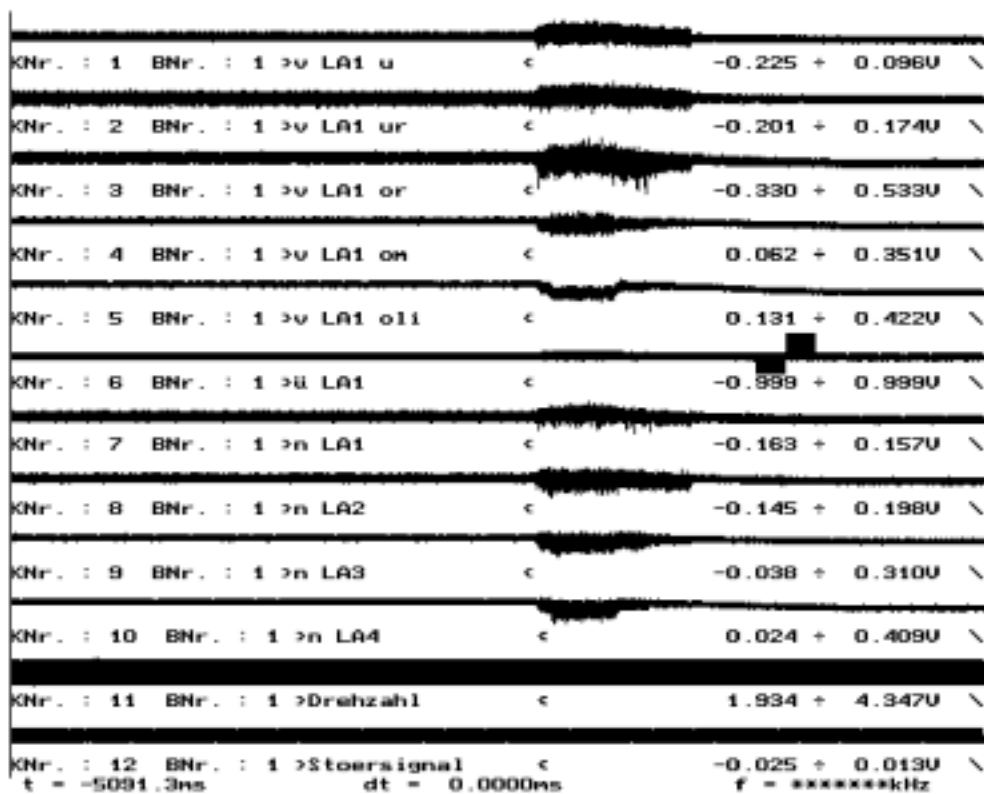


Abb. A.2:  $n/n_{Nenn}:60\%$ ,  $\dot{m}_{red} = 6,67 \text{ kg/s}$ , Konfiguration 2

Abb. A.3:  $n/n_{\text{Nenn}}$ :60%, instabiler Betrieb, Konfiguration 1Abb. A.4:  $n/n_{\text{Nenn}}$ :60%, instabiler Betrieb, Konfiguration 2



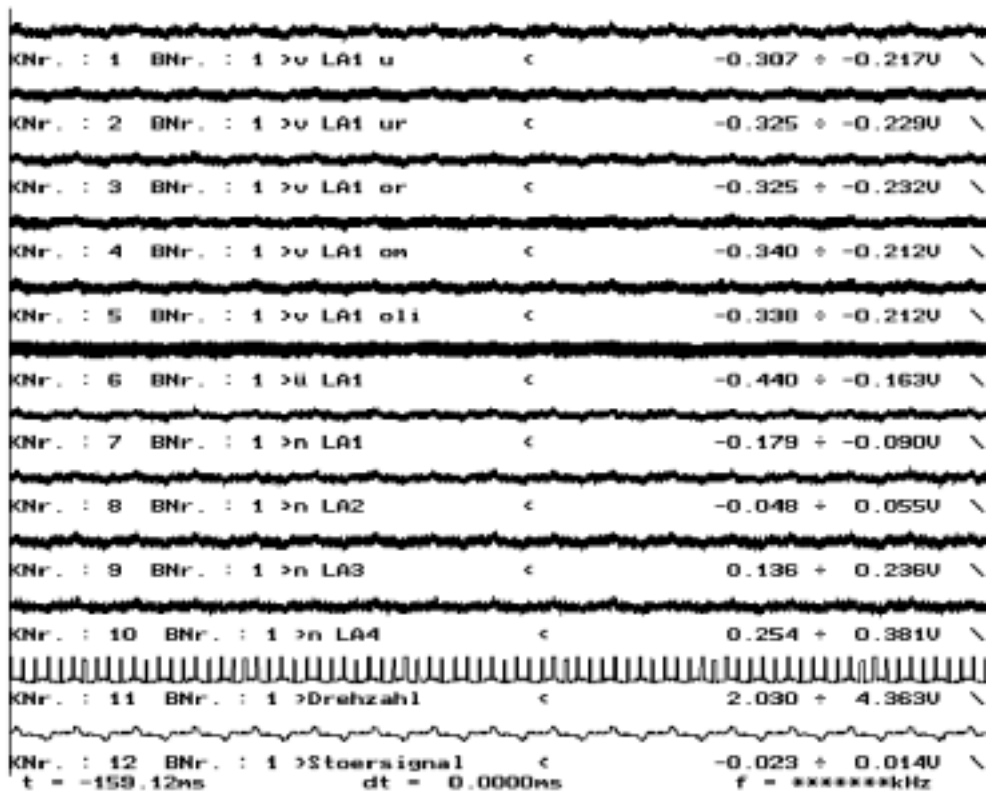
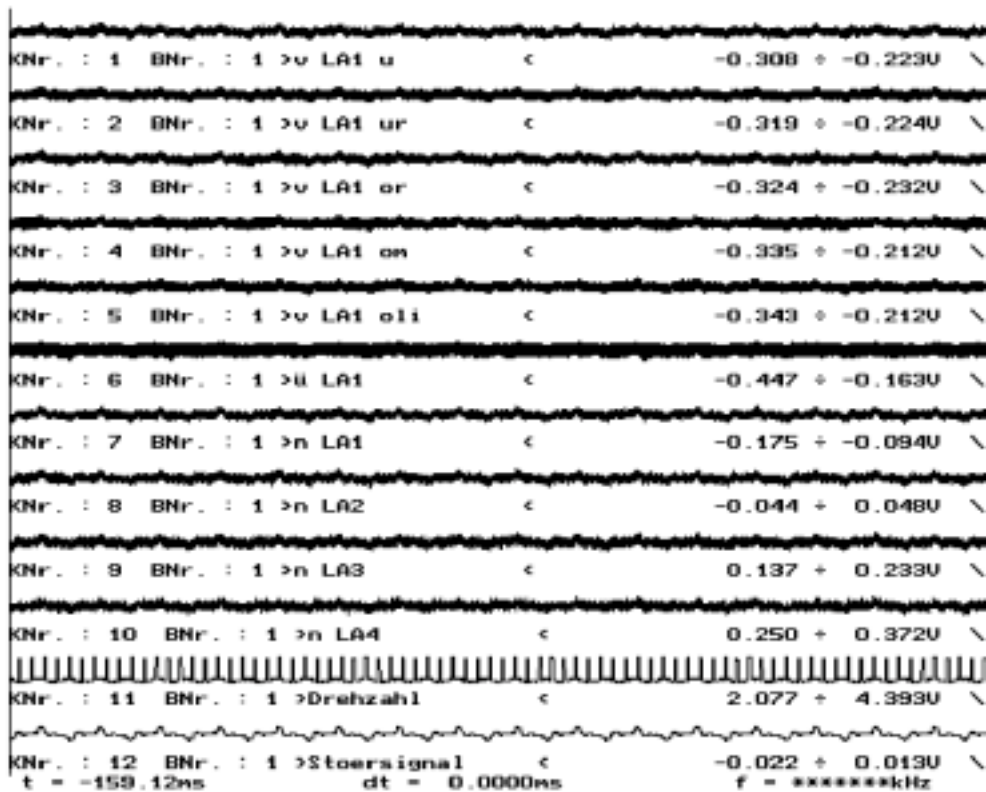
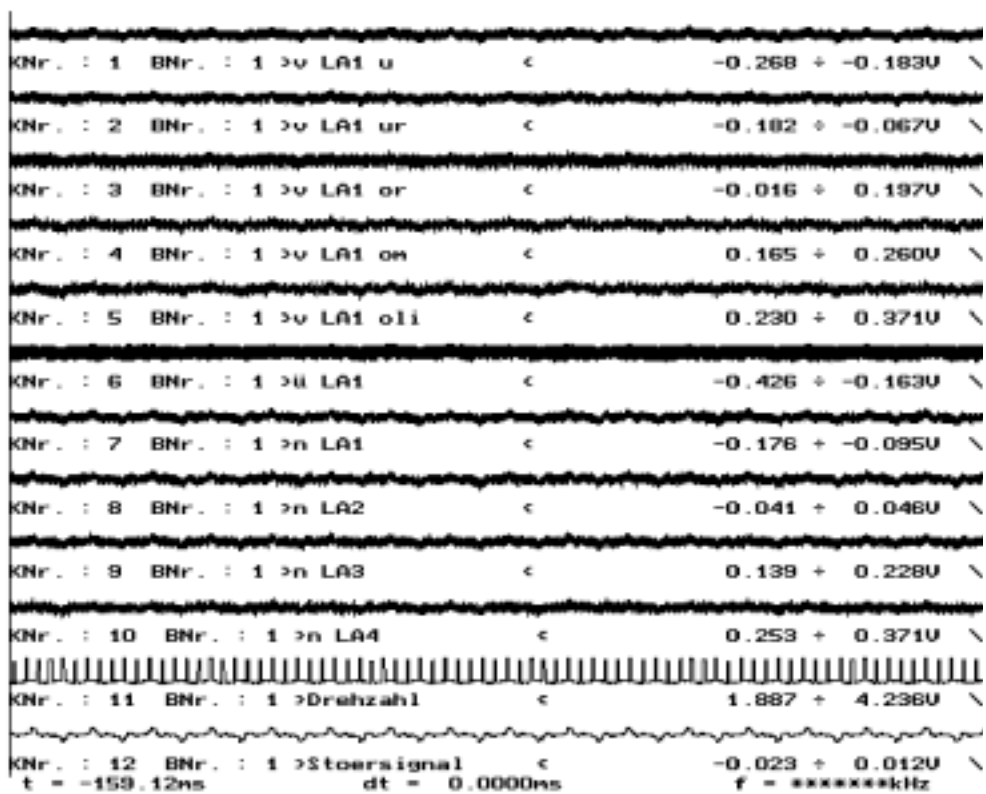
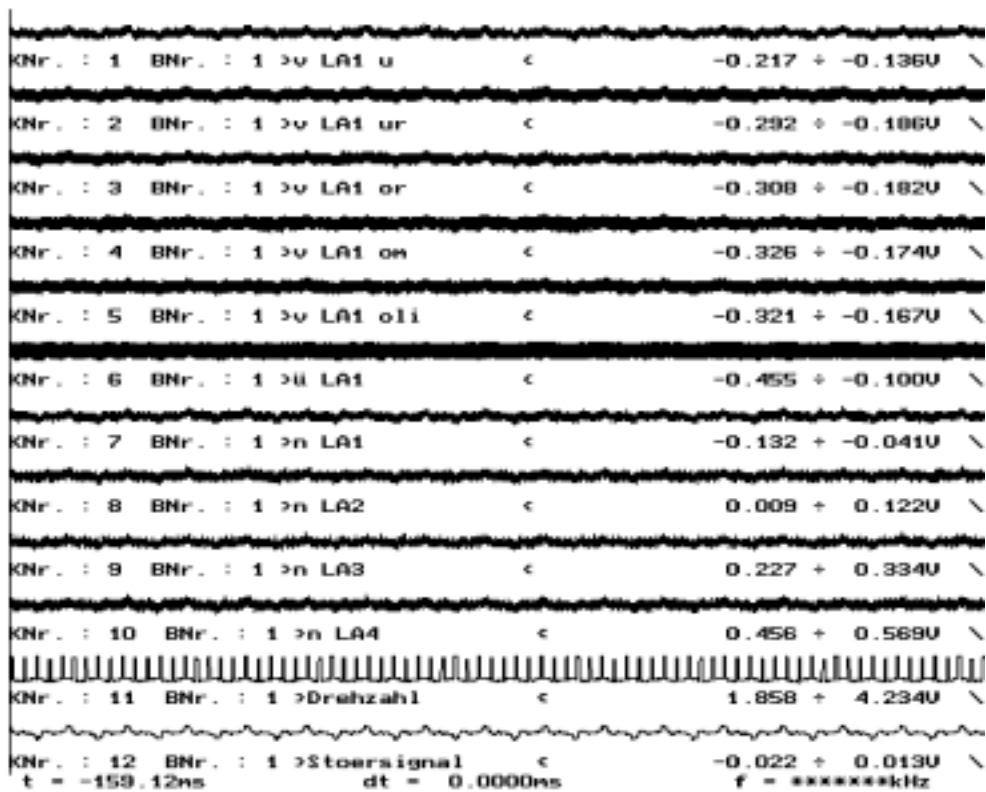
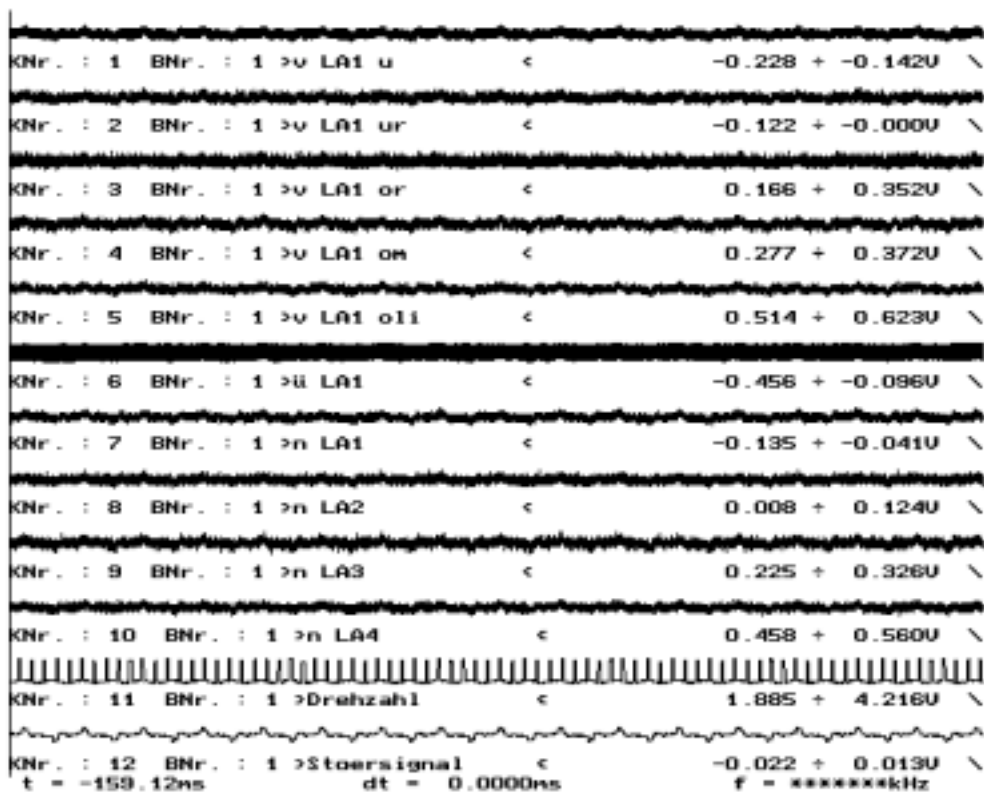


Abb. A.5:  $n/n_{\text{Nenn}}:80\%$ ,  $\dot{m}_{\text{red}} = 11,46 \text{ kg/s}$ , Konfiguration 1

Abb. A.6:  $n/n_{\text{Nenn}}:80\%$ ,  $\dot{m}_{\text{red}} = 11,4 \text{ kg/s}$ , Konfiguration 1Abb. A.7:  $n/n_{\text{Nenn}}:80\%$ ,  $\dot{m}_{\text{red}} = 11,4 \text{ kg/s}$ , Konfiguration 2

Abb. A.8:  $n/n_{\text{Nenn}}:80\%$ ,  $\dot{m}_{\text{red}} = 10,57 \text{ kg/s}$ , Konfiguration 1Abb. A.9:  $n/n_{\text{Nenn}}:80\%$ ,  $\dot{m}_{\text{red}} = 10,57 \text{ kg/s}$ , Konfiguration 2

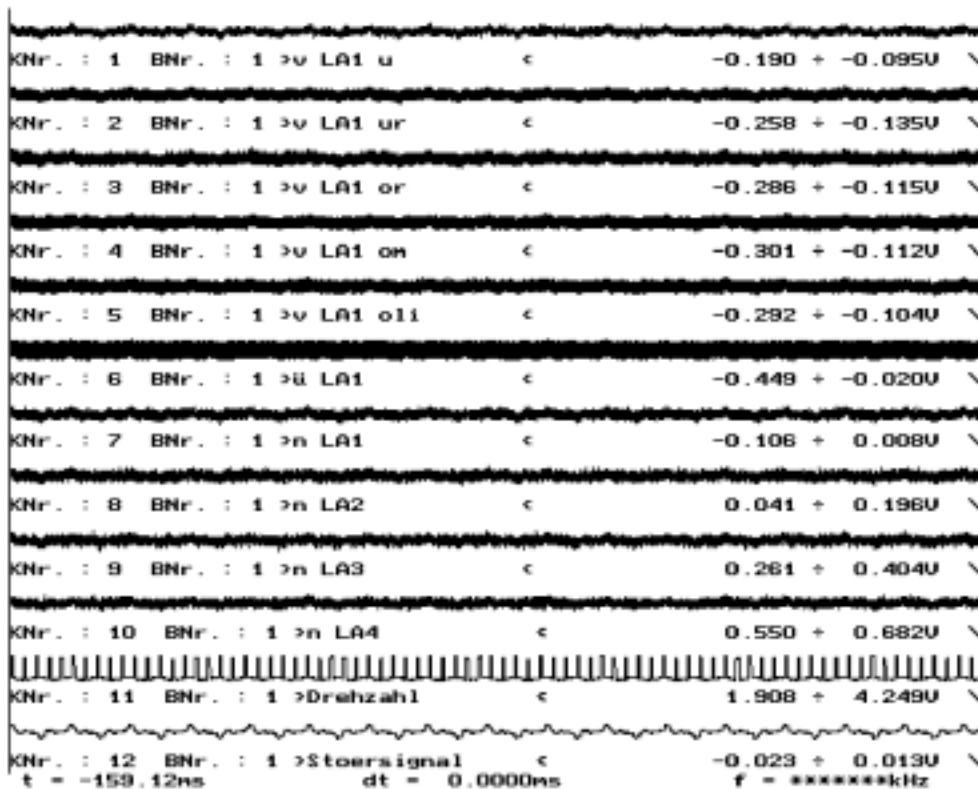


Abb. A.10:  $n/n_{\text{Nenn}}:80\%$ ,  $\dot{m}_{\text{red}} = 9,54 \text{ kg/s}$ , Konfiguration 1

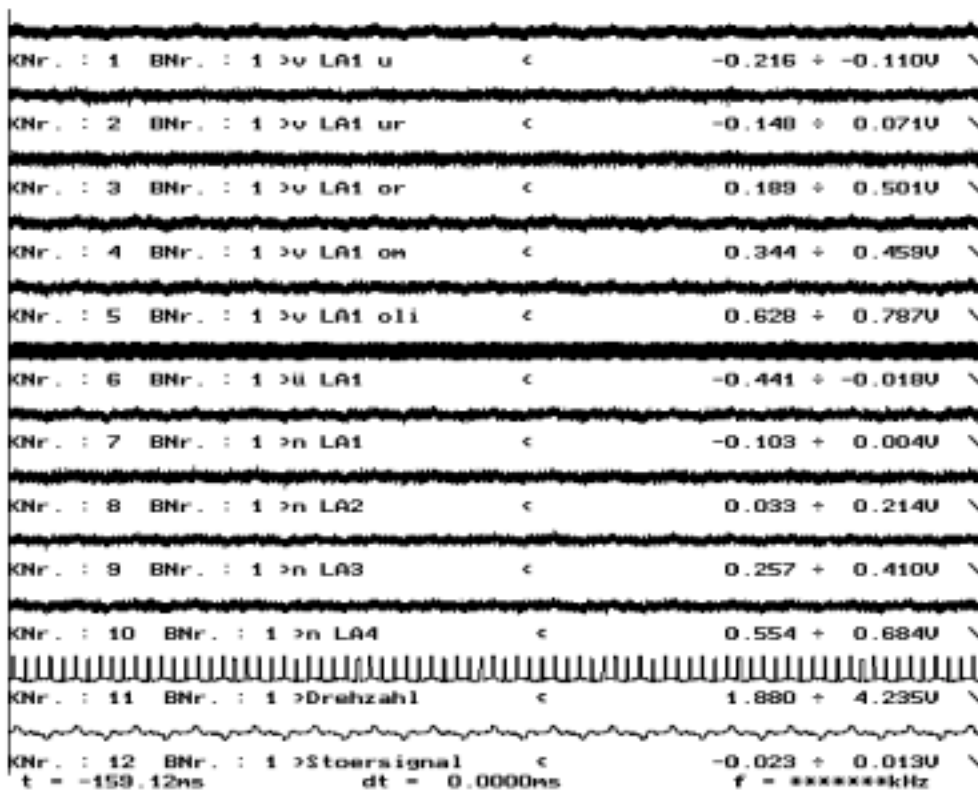
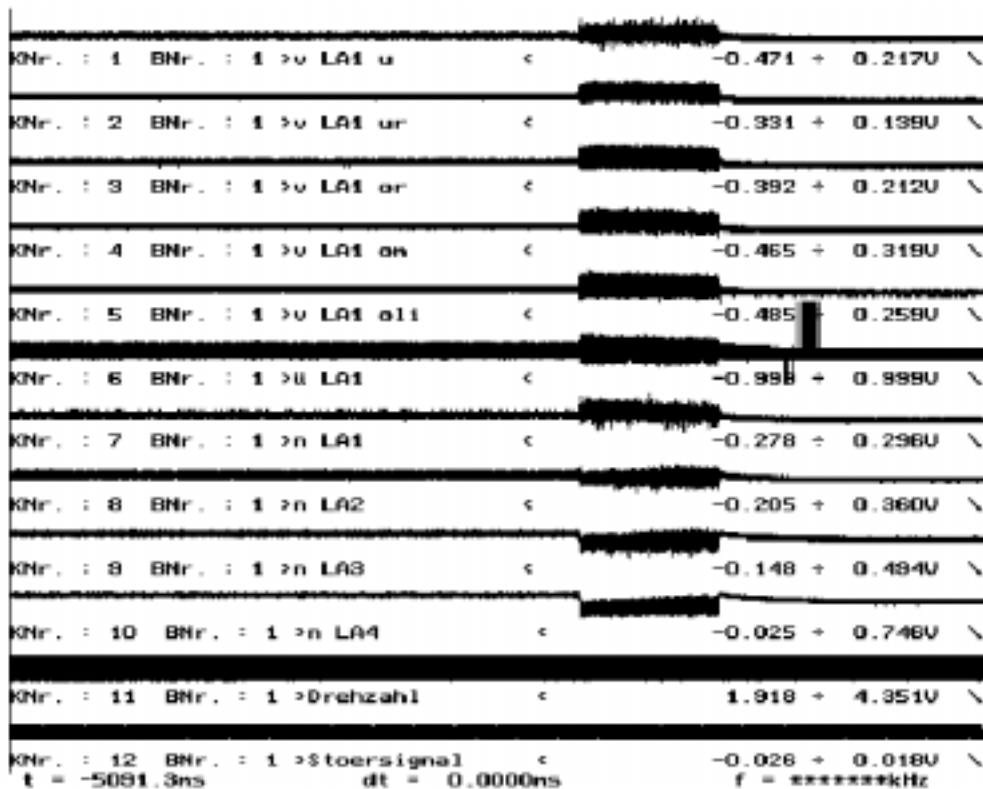
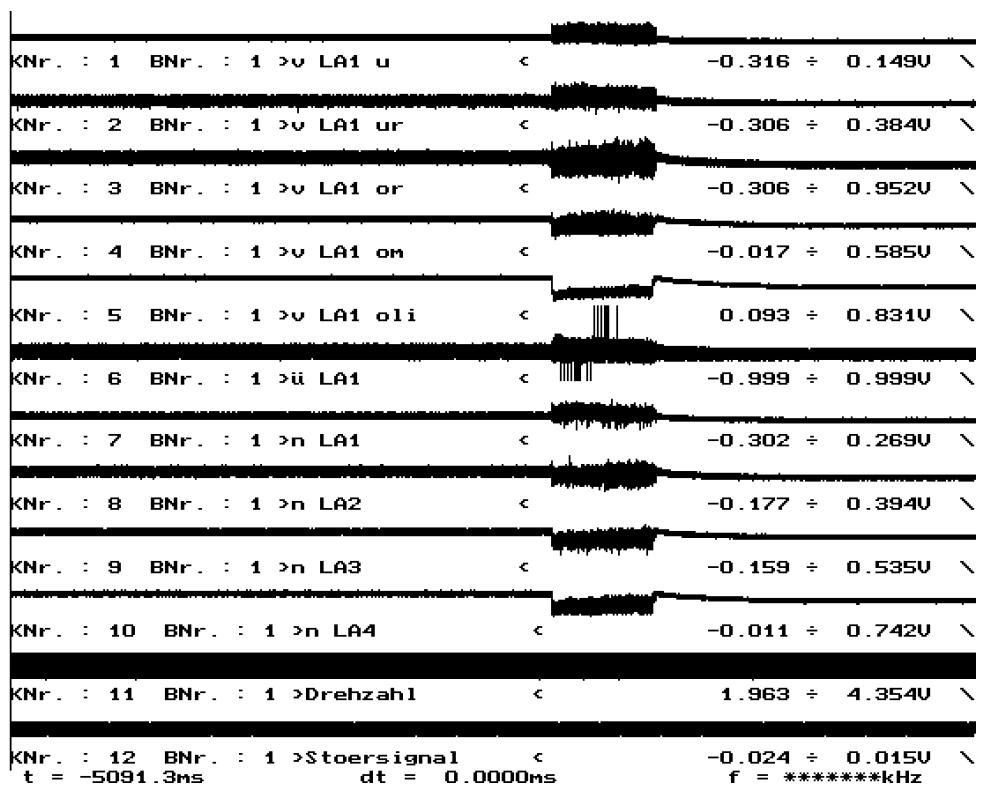


Abb. A.11:  $n/n_{\text{Nenn}}:80\%$ ,  $\dot{m}_{\text{red}} = 9,54 \text{ kg/s}$ , Konfiguration 2

Abb. A.12:  $n/n_{\text{Nenn}}$ :80%, instabiler Betrieb, Konfiguration 1Abb. A.13:  $n/n_{\text{Nenn}}$ :80%, instabiler Betrieb, Konfiguration 2

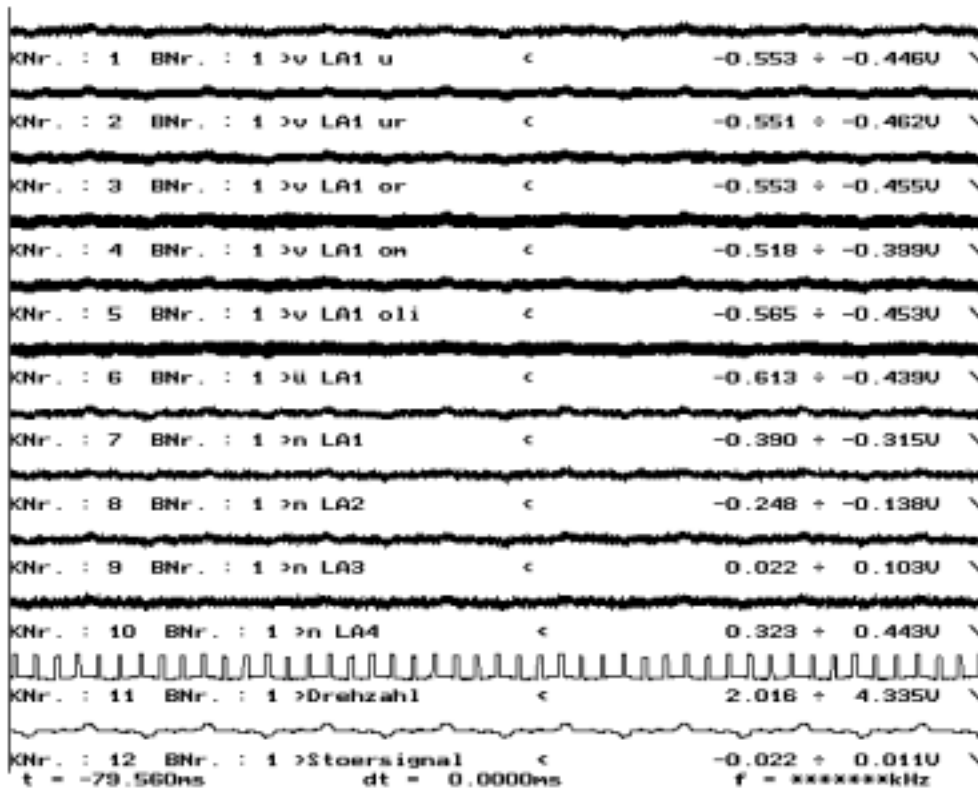


Abb. A.14:  $n/n_{Nenn}:95\%$ ,  $\dot{m}_{red} = 13,5 \text{ kg/s}$ , Konfiguration 1

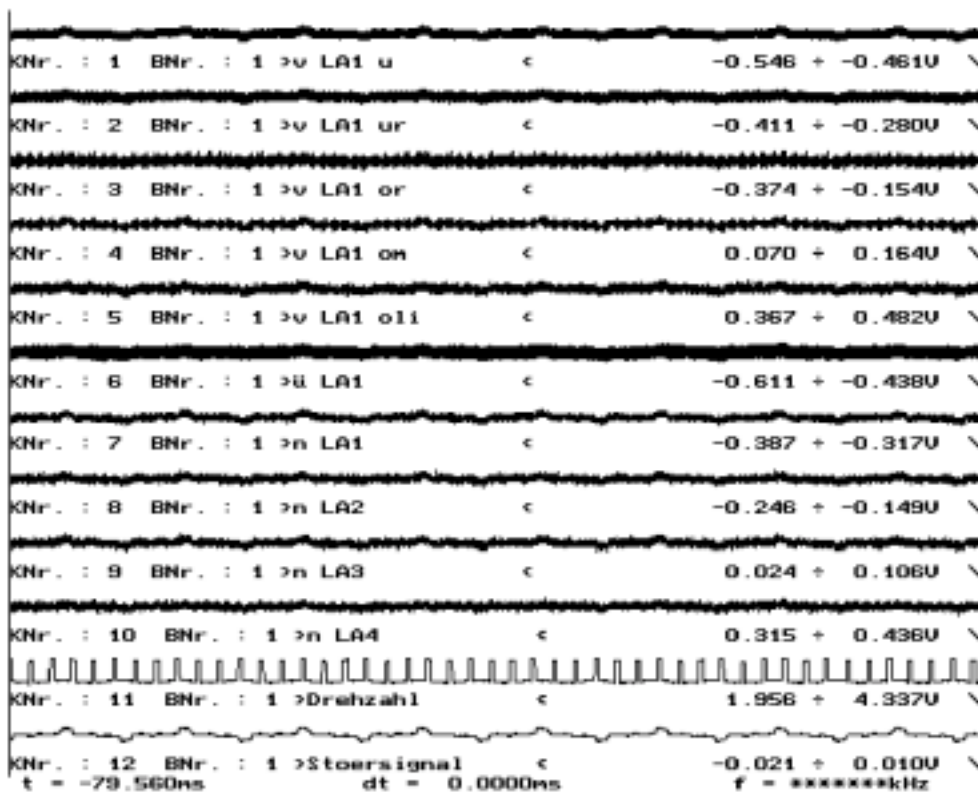


Abb. A.15:  $n/n_{Nenn}:95\%$ ,  $\dot{m}_{red} = 13,5 \text{ kg/s}$ , Konfiguration 2

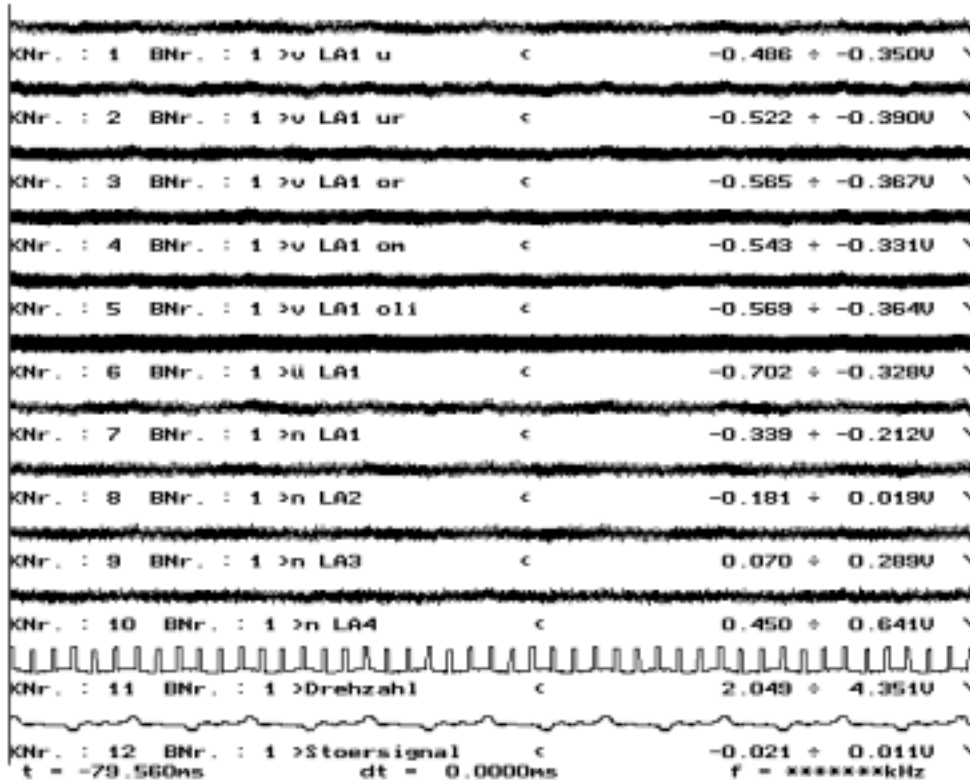


Abb. A.16:  $n/n_{Nenn}:95\%$ ,  $\dot{m}_{red} = 12,5 \text{ kg/s}$ , Konfiguration 1

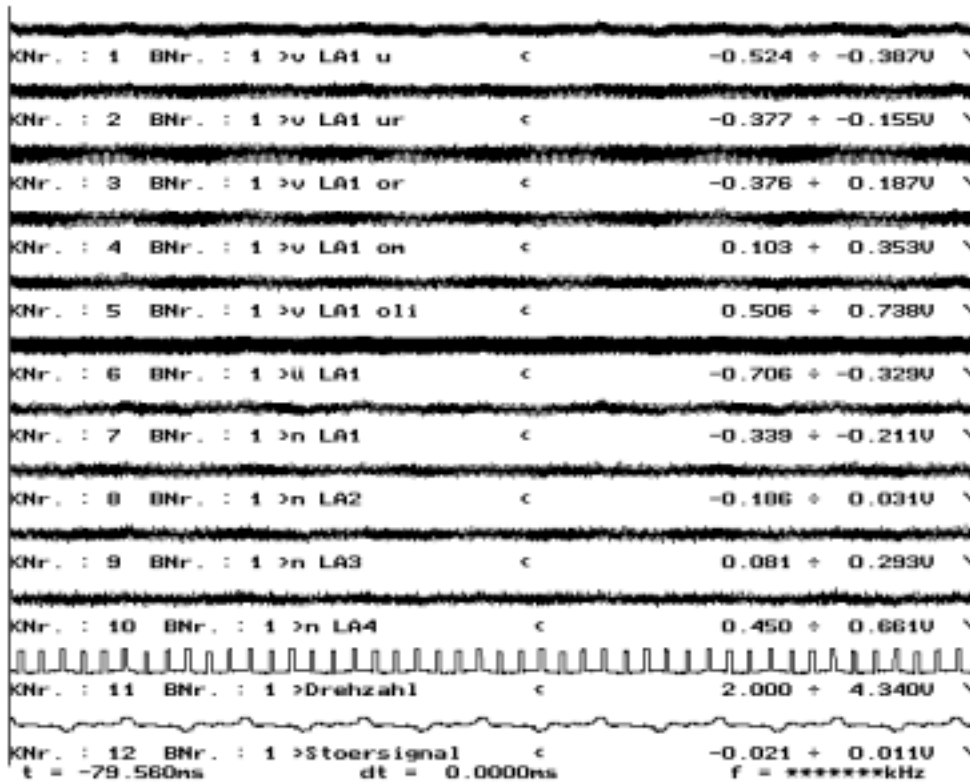


Abb. A.17:  $n/n_{Nenn}:95\%$ ,  $\dot{m}_{red} = 12,5 \text{ kg/s}$ , Konfiguration 2

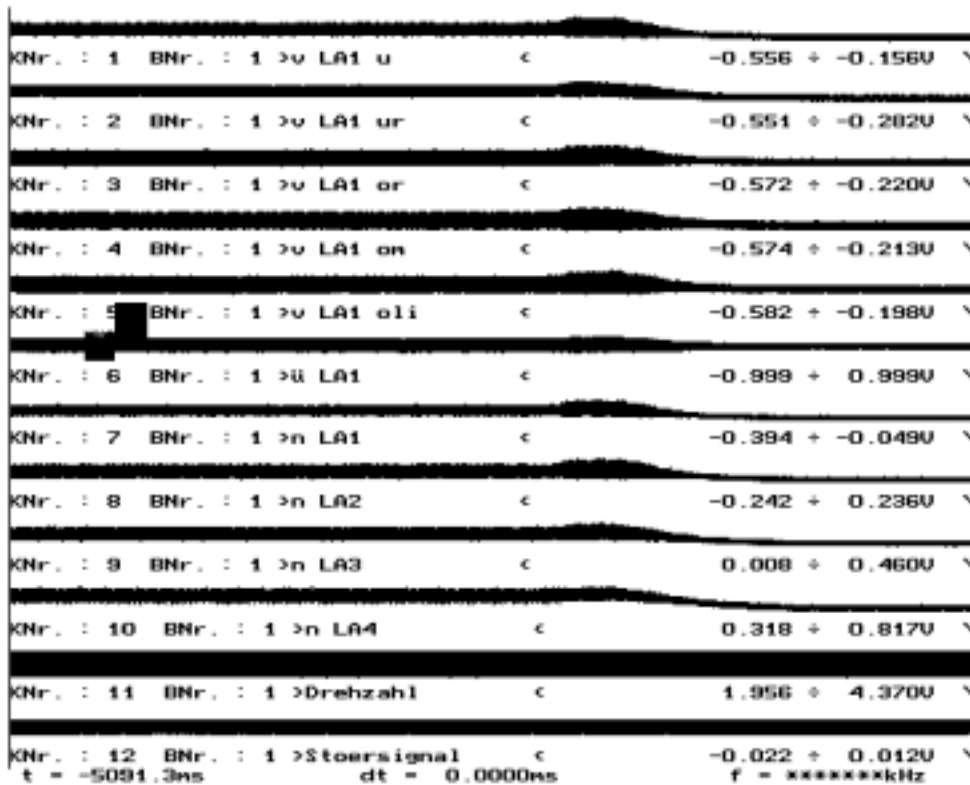


Abb. A.18:  $n/n_{Nenn}$ :95%, instabiler Betrieb, Konfiguration 1

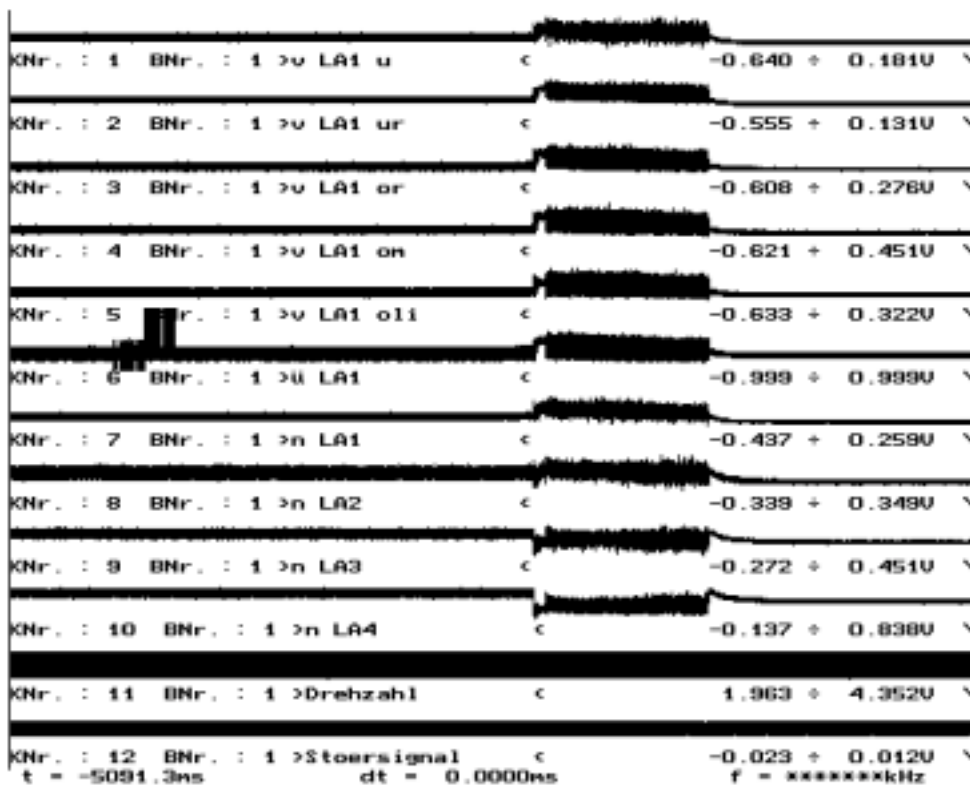
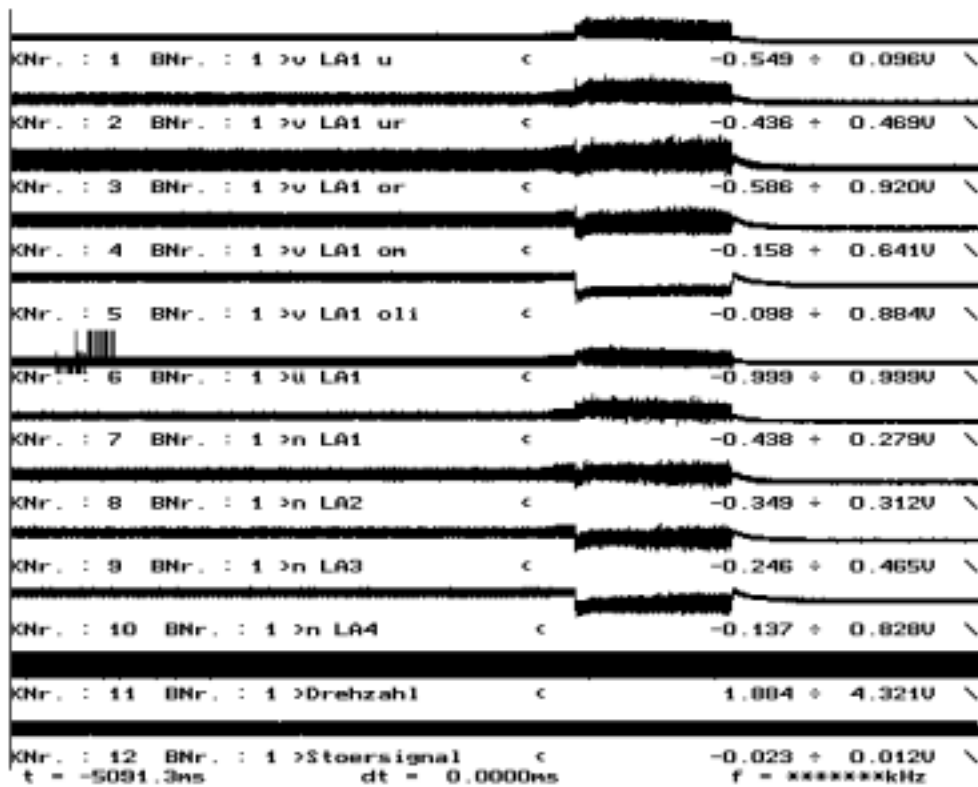


Abb. A.19:  $n/n_{Nenn}$ :95%, instabiler Betrieb, Konfiguration 1



Abb. A.20:  $n/n_{\text{Nenn}}$ :95%, instabiler Betrieb, Konfiguration 2

## 1.10.2 2. Meßkampagne

```

KNr. : 1  BNr. : 1 >ü La1      <          -1.017 + -0.731U  \
KNr. : 2  BNr. : 1 >v La1ur   <          -1.110 + -0.995U  \
KNr. : 3  BNr. : 1 >vLa1 or   <          -1.108 + -0.998U  \
KNr. : 4  BNr. : 1 >vLa1 o    <          -1.110 + -0.991U  \
KNr. : 5  BNr. : 1 >vLa1 ol   <          -1.102 + -0.984U  \
KNr. : 10 BNr. : 1 >Stör      <          -0.043 +  0.033U  \
KNr. : 11 BNr. : 1 >Drehzahl  <          -0.748 +  1.989U  \
t = -5228,5ms      dt = 0.0000ms      f = *****kHz

```

Abb. A.21:  $n/n_{\text{Nenn}}:50\%$ ,  $\dot{m}_{\text{red}} = 6,1 \text{ kg/s}$ , 2-fach vorhanden

```

KNr. : 1  BNr. : 1 >ü La1      <          -1.058 + -0.773U  \
KNr. : 2  BNr. : 1 >v La1ur   <          -1.151 + -1.033U  \
KNr. : 3  BNr. : 1 >vLa1 or   <          -1.146 + -1.034U  \
KNr. : 4  BNr. : 1 >vLa1 o    <          -1.149 + -1.030U  \
KNr. : 5  BNr. : 1 >vLa1 ol   <          -1.142 + -1.024U  \
KNr. : 10 BNr. : 1 >Stör      <          -0.044 +  0.034U  \
KNr. : 11 BNr. : 1 >Drehzahl  <          -0.818 +  1.961U  \
t = -5228,5ms      dt = 0.0000ms      f = *****kHz

```

Abb. A.22:  $n/n_{\text{Nenn}}:50\%$ ,  $\dot{m}_{\text{red}} = 5,9 \text{ kg/s}$ , 2-fach vorhanden

```

KNr. : 1  BNr. : 1  >ü La1      <      -1.046 + -0.765V  \
KNr. : 2  BNr. : 1  >v La1ur   <      -1.148 + -1.023V  \
KNr. : 3  BNr. : 1  >vLa1 or   <      -1.147 + -1.029V  \
KNr. : 4  BNr. : 1  >vLA1 o    <      -1.145 + -1.022V  \
KNr. : 5  BNr. : 1  >vLA1 ol   <      -1.139 + -1.018V  \
KNr. : 10 BNr. : 1  >Stör      <      -0.044 +  0.034V  \
KNr. : 11 BNr. : 1  >Drehzahl  <      -0.775 +  1.984V  \
t = -5228,5ms      dt = 0.0000ms      f = *****kHz

```

Abb. A.23:  $n/n_{\text{Nenn}}:50\%$ ,  $\dot{m}_{\text{red}} = 5,7 \text{ kg/s}$ , 2-fach vorhanden

```

KNr. : 1  BNr. : 1  >ü La1      <      -1.029 + -0.750V  \
KNr. : 2  BNr. : 1  >v La1ur   <      -1.143 + -1.014V  \
KNr. : 3  BNr. : 1  >vLa1 or   <      -1.142 + -1.019V  \
KNr. : 4  BNr. : 1  >vLA1 o    <      -1.140 + -1.011V  \
KNr. : 5  BNr. : 1  >vLA1 ol   <      -1.135 + -1.007V  \
KNr. : 10 BNr. : 1  >Stör      <      -0.044 +  0.034V  \
KNr. : 11 BNr. : 1  >Drehzahl  <      -0.788 +  1.984V  \
t = -5228,5ms      dt = 0.0000ms      f = *****kHz

```

Abb. A.24:  $n/n_{\text{Nenn}}:50\%$ ,  $\dot{m}_{\text{red}} = 5,5 \text{ kg/s}$ , 2-fach vorhanden

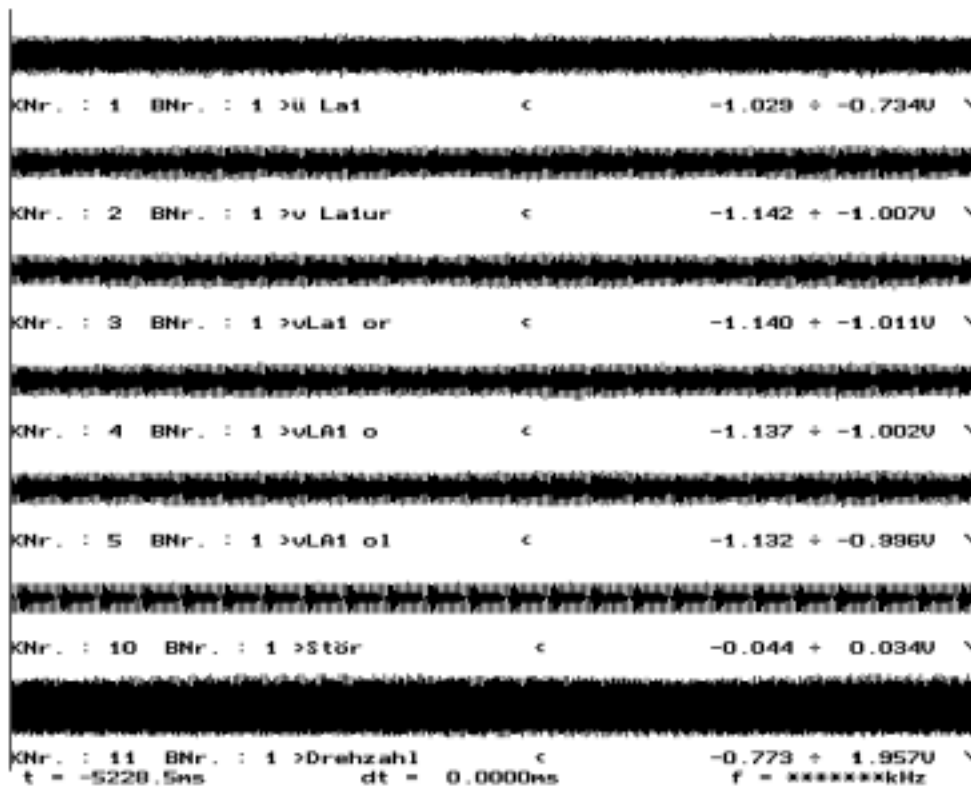


Abb. A.25:  $n/n_{\text{Nenn}}:50\%$ ,  $\dot{m}_{\text{red}} = 5,3 \text{ kg/s}$ , 2-fach vorhanden

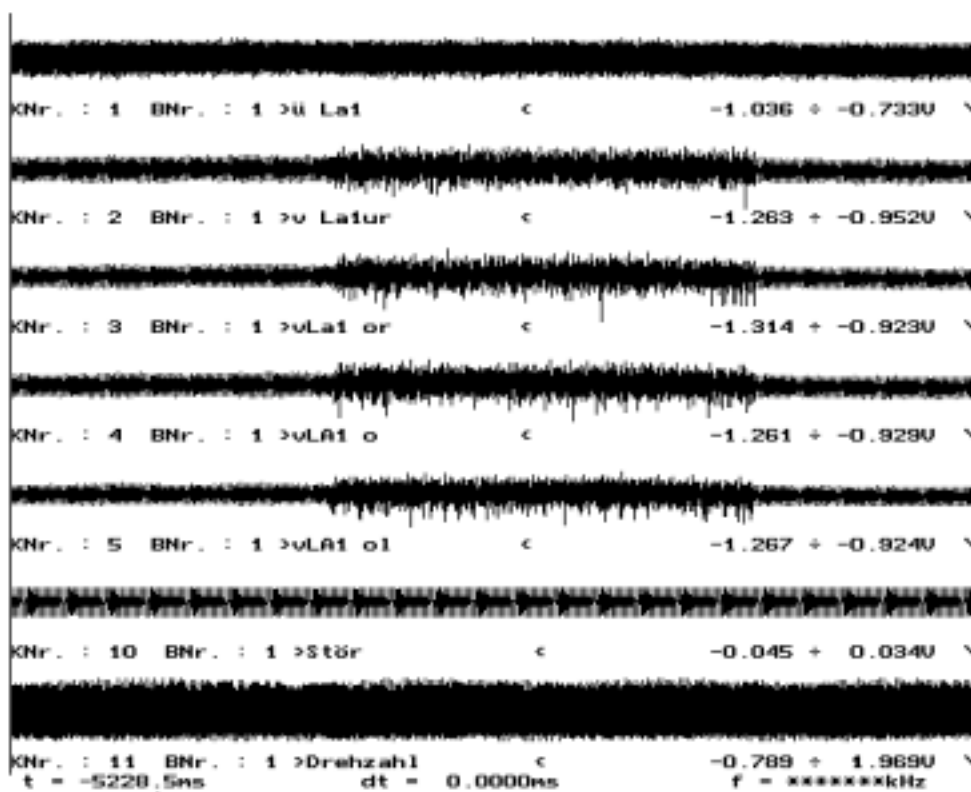


Abb. A.26:  $n/n_{\text{Nenn}}:50\%$ , instabiler Betrieb

```

KNr. : 1  BNr. : 1  >ü La1      <      -1.216 + -0.842V  \
KNr. : 2  BNr. : 1  >v La1ur   <      -1.285 + -1.148V  \
KNr. : 3  BNr. : 1  >vLa1 or   <      -1.285 + -1.141V  \
KNr. : 4  BNr. : 1  >vLA1 o    <      -1.286 + -1.122V  \
KNr. : 5  BNr. : 1  >vLA1 ol   <      -1.275 + -1.126V  \
KNr. : 10 BNr. : 1  >Stör     <      -0.044 +  0.034V  \
KNr. : 11 BNr. : 1  >Drehzahl  <      -0.807 +  1.958V  \
t = -5228,5ms      dt = 0.0000ms      f = *****kHz

```

Abb. A.27:  $n/n_{\text{Nenn}}:70\%$ ,  $\dot{m}_{\text{red}} = 9,3 \text{ kg/s}$ , 2-fach vorhanden

```

KNr. : 1  BNr. : 1  >ü La1      <      -1.213 + -0.832V  \
KNr. : 2  BNr. : 1  >v La1ur   <      -1.278 + -1.137V  \
KNr. : 3  BNr. : 1  >vLa1 or   <      -1.280 + -1.138V  \
KNr. : 4  BNr. : 1  >vLA1 o    <      -1.283 + -1.119V  \
KNr. : 5  BNr. : 1  >vLA1 ol   <      -1.270 + -1.117V  \
KNr. : 10 BNr. : 1  >Stör     <      -0.045 +  0.035V  \
KNr. : 11 BNr. : 1  >Drehzahl  <      -0.800 +  1.951V  \
t = -5228,5ms      dt = 0.0000ms      f = *****kHz

```

Abb. A.28:  $n/n_{\text{Nenn}}:70\%$ ,  $\dot{m}_{\text{red}} = 9,1 \text{ kg/s}$ , 2-fach vorhanden

```

KNr. : 1  BNr. : 1  >ü La1      <          -1.205 + -0.798V  \
KNr. : 2  BNr. : 1  >v La1ur   <          -1.270 + -1.117V  \
KNr. : 3  BNr. : 1  >vLa1 or   <          -1.277 + -1.113V  \
KNr. : 4  BNr. : 1  >vLA1 o    <          -1.277 + -1.099V  \
KNr. : 5  BNr. : 1  >vLA1 ol   <          -1.266 + -1.094V  \
KNr. : 10 BNr. : 1  >Stör     <          -0.045 +  0.035V  \
KNr. : 11 BNr. : 1  >Drehzahl  <          -0.785 +  1.955V  \
t = -5228,5ms          dt = 0.0000ms          f = *****kHz
    
```

Abb. A.29:  $n/n_{\text{Nenn}}:70\%$ ,  $\dot{m}_{\text{red}} = 8,75 \text{ kg/s}$ , 2-fach vorhanden

```

KNr. : 1  BNr. : 1  >ü La1      <          -1.203 + -0.783V  \
KNr. : 2  BNr. : 1  >v La1ur   <          -1.261 + -1.099V  \
KNr. : 3  BNr. : 1  >vLa1 or   <          -1.269 + -1.092V  \
KNr. : 4  BNr. : 1  >vLA1 o    <          -1.271 + -1.080V  \
KNr. : 5  BNr. : 1  >vLA1 ol   <          -1.262 + -1.072V  \
KNr. : 10 BNr. : 1  >Stör     <          -0.046 +  0.035V  \
KNr. : 11 BNr. : 1  >Drehzahl  <          -0.784 +  1.962V  \
t = -5228,5ms          dt = 0.0000ms          f = *****kHz
    
```

Abb. A.30:  $n/n_{\text{Nenn}}:70\%$ ,  $\dot{m}_{\text{red}} = 8,3 \text{ kg/s}$ , 2-fach vorhanden

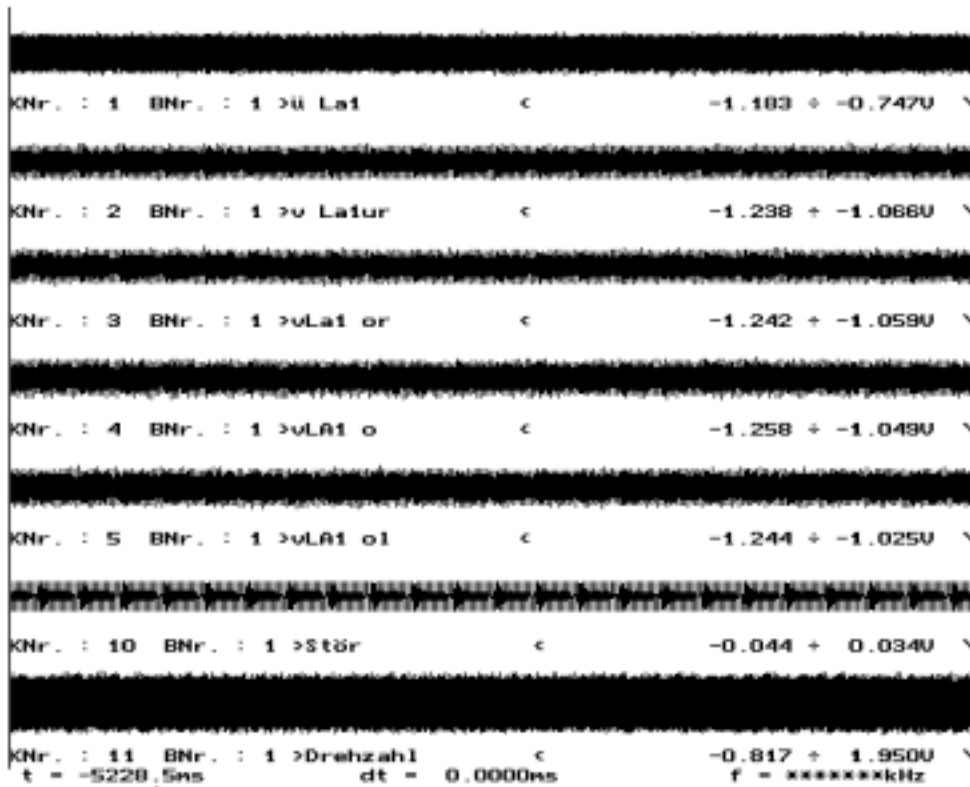


Abb. A.31:  $n/n_{\text{Nenn}}:70\%$ ,  $\dot{m}_{\text{red}} = 7,8 \text{ kg/s}$ , 2-fach vorhanden

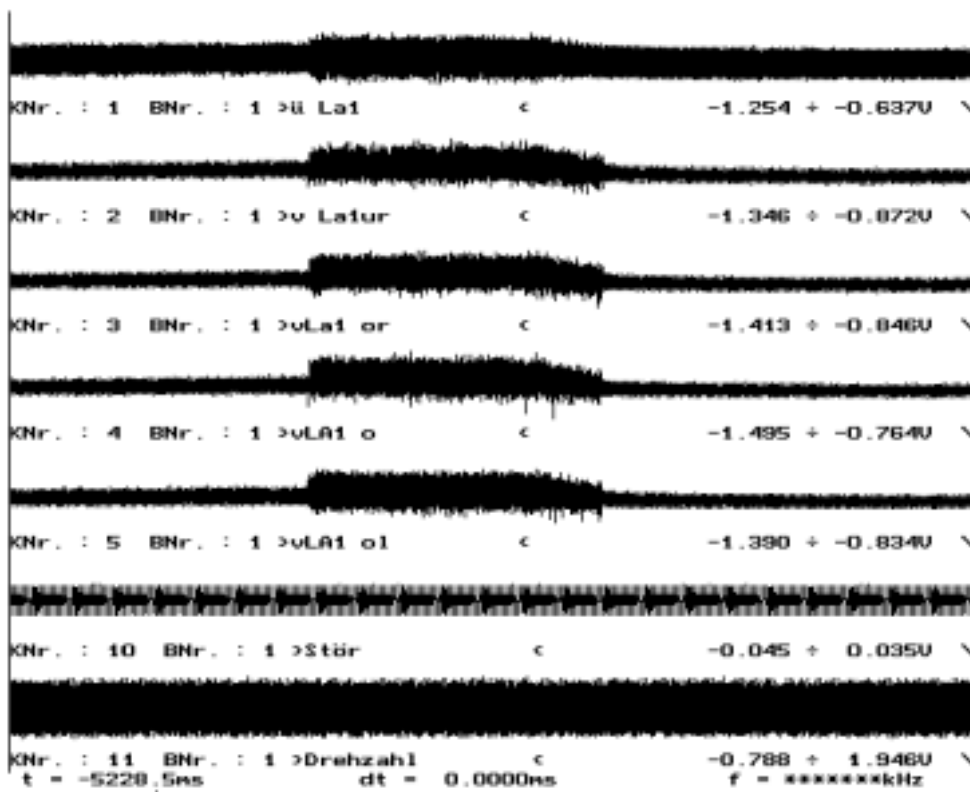


Abb. A.32:  $n/n_{\text{Nenn}}:70\%$ , instabiler Betrieb

KNr. : 1	BNr. : 1	>ü La1	<	-1.260 + -0.920V \
KNr. : 2	BNr. : 1	>v La1ur	<	-1.357 + -1.212V \
KNr. : 3	BNr. : 1	>vLa1 or	<	-1.353 + -1.223V \
KNr. : 4	BNr. : 1	>vLA1 o	<	-1.371 + -1.186V \
KNr. : 5	BNr. : 1	>vLA1 ol	<	-1.346 + -1.183V \
KNr. : 10	BNr. : 1	>Stör	<	-0.042 + 0.033V \
KNr. : 11	BNr. : 1	>Drehzahl	<	-0.784 + 1.957V \
t = -5228,5ms		dt = 0.0000ms		f = *****kHz

Abb. A.33:  $n/n_{\text{Nenn}}:80\%$ ,  $\dot{m}_{\text{red}} = 11,0 \text{ kg/s}$ , 2-fach vorhanden

KNr. : 1	BNr. : 1	>ü La1	<	-1.273 + -0.825V \
KNr. : 2	BNr. : 1	>v La1ur	<	-1.331 + -1.147V \
KNr. : 3	BNr. : 1	>vLa1 or	<	-1.336 + -1.148V \
KNr. : 4	BNr. : 1	>vLA1 o	<	-1.370 + -1.140V \
KNr. : 5	BNr. : 1	>vLA1 ol	<	-1.341 + -1.117V \
KNr. : 10	BNr. : 1	>Stör	<	-0.042 + 0.077V \
KNr. : 11	BNr. : 1	>Drehzahl	<	-0.680 + 1.753V \
t = -4503,4ms		dt = 0.0000ms		f = *****kHz

Abb. A.34:  $n/n_{\text{Nenn}}:80\%$ ,  $\dot{m}_{\text{red}} = 10,5 \text{ kg/s}$ , 2-fach vorhanden



KNr. : 1	BNr. : 1	>ü La1	<	-1.285	÷	-0.833V	\
KNr. : 2	BNr. : 1	>v La1ur	<	-1.322	÷	-1.167V	\
KNr. : 3	BNr. : 1	>vLa1 or	<	-1.328	÷	-1.168V	\
KNr. : 4	BNr. : 1	>vLA1 o	<	-1.358	÷	-1.145V	\
KNr. : 5	BNr. : 1	>vLA1 ol	<	-1.344	÷	-1.137V	\
KNr. : 10	BNr. : 1	>Stör	<	-0.035	÷	0.025V	\
KNr. : 11	BNr. : 1	>Drehzahl	<	-0.778	÷	1.912V	\
t = -5228,5ms			dt = 0.0000ms			f = *****kHz	

Abb. A.35:  $n/n_{\text{Nenn}}:80\%$ ,  $\dot{m}_{\text{red}} = 10,1 \text{ kg/s}$ , 2-fach vorhanden

KNr. : 1	BNr. : 1	>ü La1	<	-1.275	÷	-0.823V	\
KNr. : 2	BNr. : 1	>v La1ur	<	-1.322	÷	-1.157V	\
KNr. : 3	BNr. : 1	>vLa1 or	<	-1.322	÷	-1.154V	\
KNr. : 4	BNr. : 1	>vLA1 o	<	-1.366	÷	-1.132V	\
KNr. : 5	BNr. : 1	>vLA1 ol	<	-1.330	÷	-1.117V	\
KNr. : 10	BNr. : 1	>Stör	<	-0.034	÷	0.025V	\
KNr. : 11	BNr. : 1	>Drehzahl	<	-0.723	÷	1.974V	\
t = -5228,5ms			dt = 0.0000ms			f = *****kHz	

Abb. A.36:  $n/n_{\text{Nenn}}:80\%$ ,  $\dot{m}_{\text{red}} = 9,8 \text{ kg/s}$ , 2-fach vorhanden

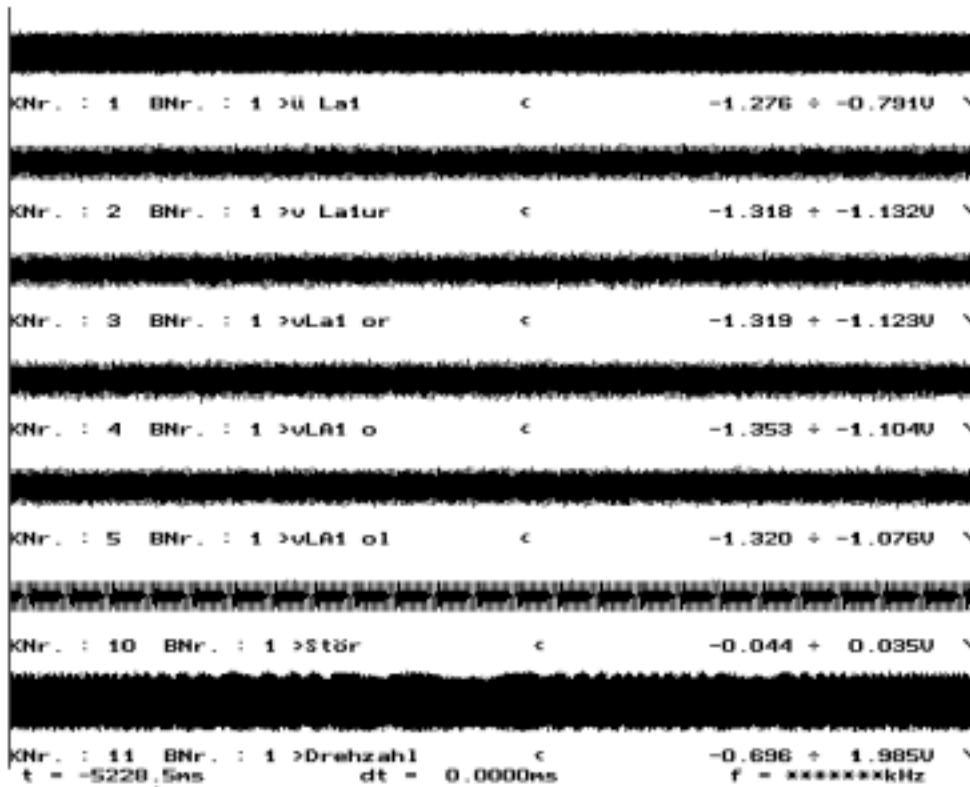


Abb. A.37:  $n/n_{\text{Nenn}}:80\%$ ,  $\dot{m}_{\text{red}} = 9,5 \text{ kg/s}$ , 2-fach vorhanden

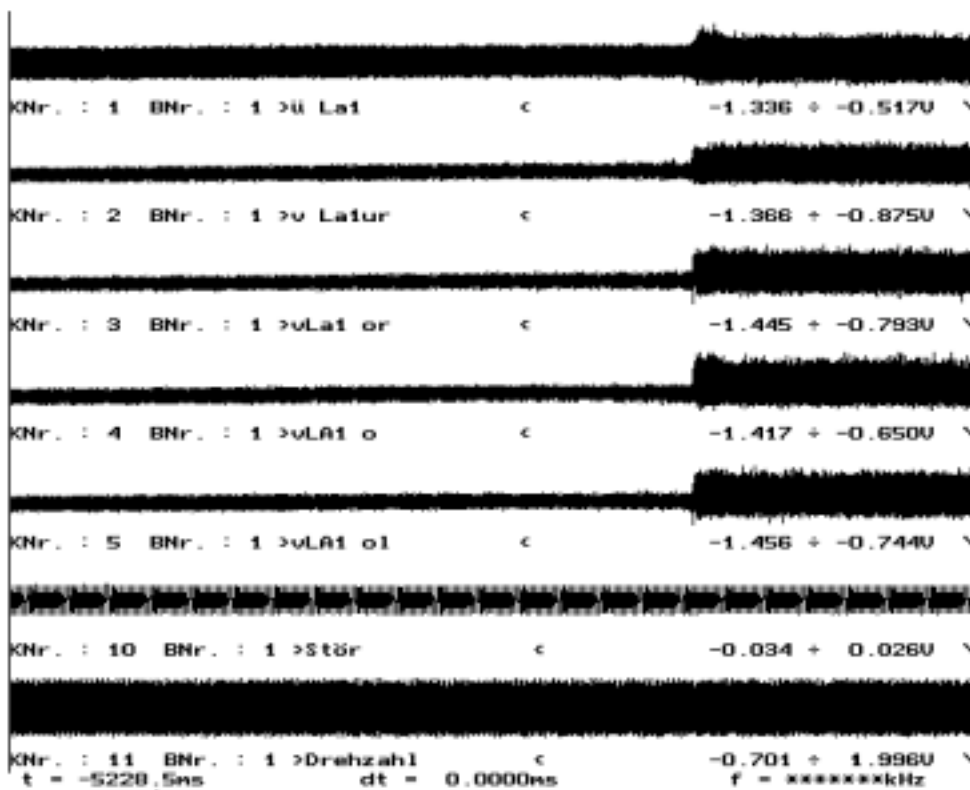


Abb. A.38:  $n/n_{\text{Nenn}}:80\%$ , instabiler Betrieb

KNr. : 1	BNr. : 1	>ü La1	<	-1.416	÷	-1.215V	\
KNr. : 2	BNr. : 1	>v La1ur	<	-1.598	÷	-1.469V	\
KNr. : 3	BNr. : 1	>vLa1 or	<	-1.593	÷	-1.460V	\
KNr. : 4	BNr. : 1	>vLA1 o	<	-1.603	÷	-1.440V	\
KNr. : 5	BNr. : 1	>vLA1 ol	<	-1.586	÷	-1.434V	\
KNr. : 10	BNr. : 1	>Stör	<	-0.035	÷	0.028V	\
KNr. : 11	BNr. : 1	>Drehzahl	<	-0.711	÷	2.003V	\
t = -5228,5ms		dt = 0.0000ms				f = *****kHz	

Abb. A.39:n/n<sub>Nenn</sub>:95%,  $\dot{m}_{red} = 13,56$  kg/s, 2-fach vorhanden

KNr. : 1	BNr. : 1	>ü La1	<	-1.417	÷	-1.176V	\
KNr. : 2	BNr. : 1	>v La1ur	<	-1.585	÷	-1.451V	\
KNr. : 3	BNr. : 1	>vLa1 or	<	-1.588	÷	-1.445V	\
KNr. : 4	BNr. : 1	>vLA1 o	<	-1.598	÷	-1.423V	\
KNr. : 5	BNr. : 1	>vLA1 ol	<	-1.583	÷	-1.424V	\
KNr. : 10	BNr. : 1	>Stör	<	-0.035	÷	0.027V	\
KNr. : 11	BNr. : 1	>Drehzahl	<	-0.657	÷	2.034V	\
t = -5228,5ms		dt = 0.0000ms				f = *****kHz	

Abb. A.40:n/n<sub>Nenn</sub>:95%,  $\dot{m}_{red} = 13,2$  kg/s, 2-fach vorhanden

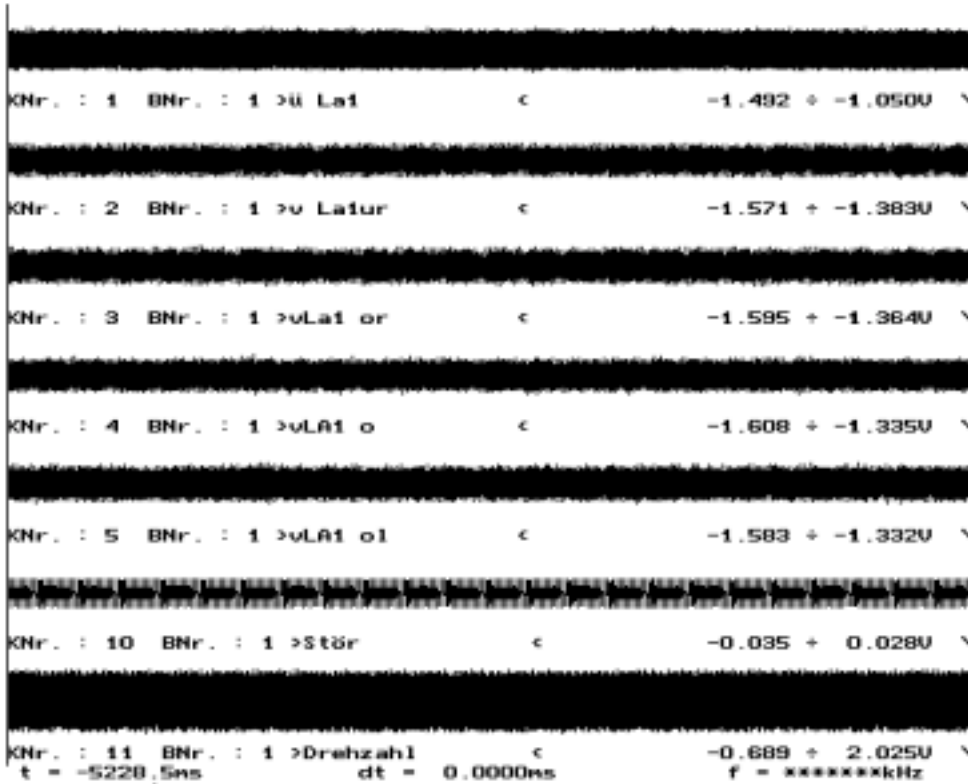


Abb. A.41:  $n/n_{\text{Nenn}}:95\%$ ,  $\dot{m}_{\text{red}} = 12,5 \text{ kg/s}$ , 2-fach vorhanden

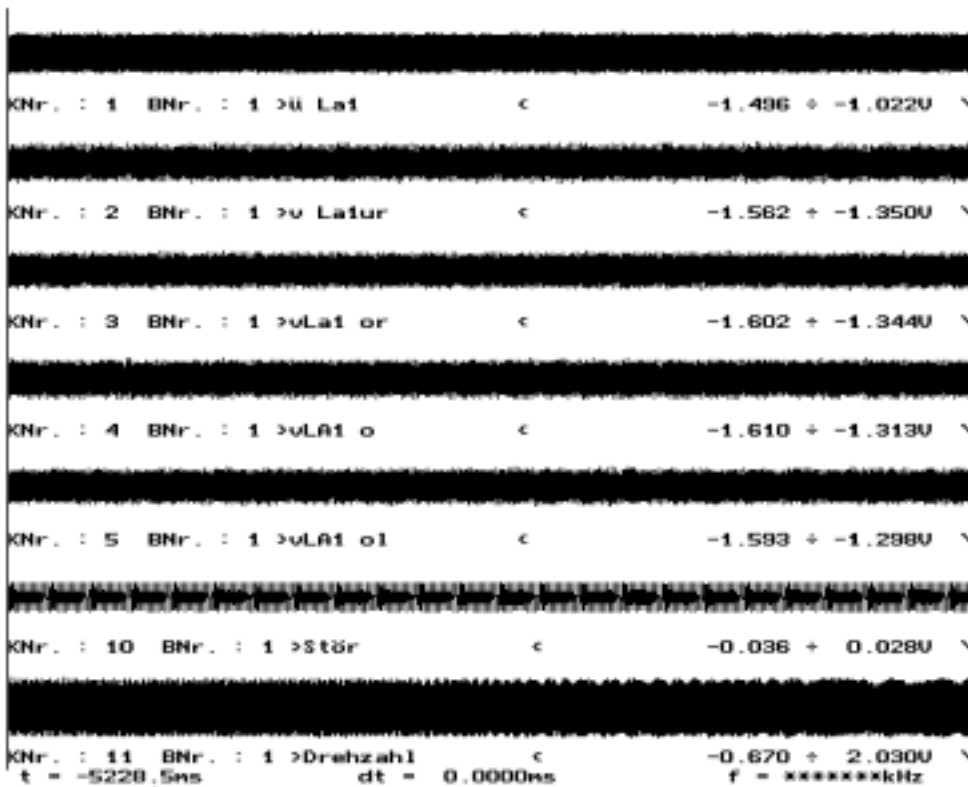


Abb. A.42:  $n/n_{\text{Nenn}}:95\%$ ,  $\dot{m}_{\text{red}} = 12,0 \text{ kg/s}$ , 2-fach vorhanden

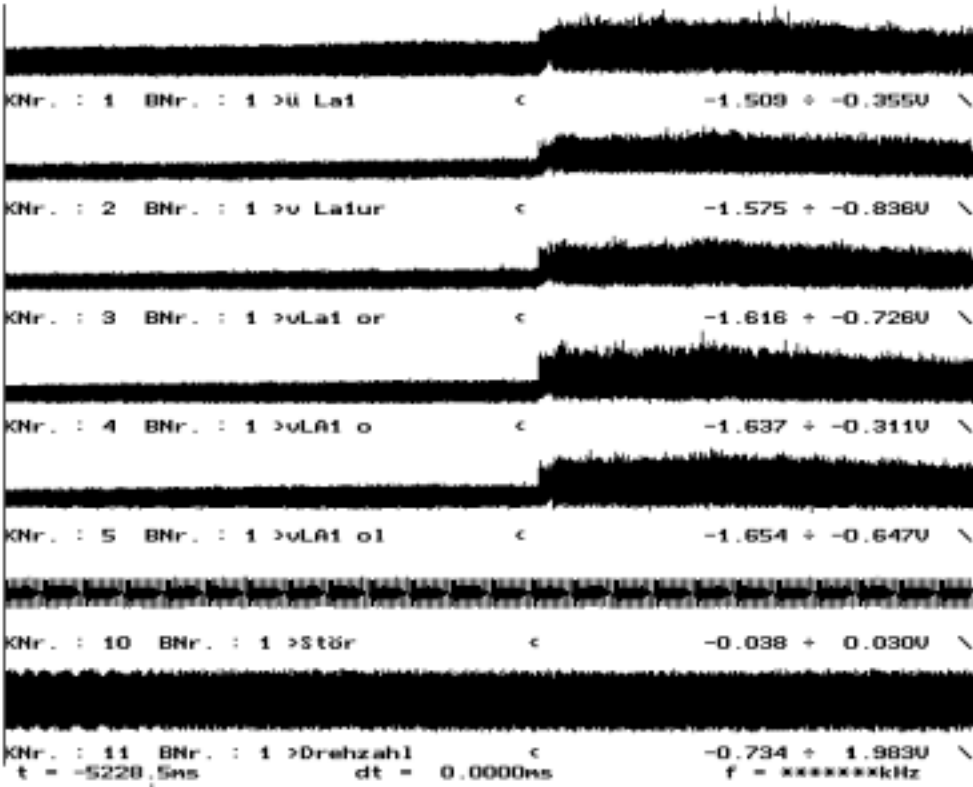


Abb. A.43:  $n/n_{Nenn}$ :95%, instabiler Betrieb

## **2 Erfolgskontrollbericht**

### **2.1 Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms**

Ziel des Vorhabens 1.1 ist eine Ausweitung des sicheren Verdichter-Betriebsbereichs in Richtung auf die Stabilitätsgrenze. Dies ist gleichzeitig mit einer Erhöhung der Wirkungsgrade verbunden. Das bedeutet aber eine bessere Ausnutzung der aufgewendeten Energieträger (im Allgemeinen Erdgas) und damit zum einen eine Schonung der vorhandenen Ressourcen und zum anderen eine Reduzierung der Umweltbelastungen erzielt.

Das Teilvorhaben 1.1.4, das am Institut f. Strömungsmaschinen der Universität Hannover durchgeführt worden ist, lieferte die notwendigen Daten, mit denen die Projektpartner Verfahren entwickeln konnten, die dieses Ziel erreichen können. Insofern stellt dieses Teilprojekt einen positiven Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms AG Turbo II dar.

### **2.2 Wissenschaftlicher und Technischer Erfolg**

Es ist im Rahmen dieses Vorhabens gelungen, eine Datenbasis zu erstellen, mit Hilfe derer Analyseverfahren zur frühzeitigen Detektion beginnender Instabilitäten in Axialverdichterströmungen entwickelt, überprüft und miteinander verglichen werden konnten. Es handelt sich dabei um die erste Datenbasis, die als Grundlage für die Entwicklung mehrerer unterschiedlicher Analyseverfahren dient:

Teilprojekt Nr	Stichwort	Firma/Prof.	wiss. Bearbeiter	Status
1.1.2	Überwachungssystem zur Pumpgrenzdetektion	Prof. Niehuis	Dr. Hönen	in Arbeit
1.1.3	Vergleich und Weiterentwicklung	MTU	Dr. Grauer	in Arbeit
1.1.5	Aktive Stabilitätsverbesserung	Prof. Stoff	Methling	abgeschlossen
1.1.6	Übertragung und Weiterentwicklung von Signalanalyseverfahren	Prof. Hennecke	Wagner	abgeschlossen
1.1.7	Aktive Stabilitätsverbesserung - Weiterentwicklung von Signalanalyseverfahren	Prof. Kau/Rick	Uhlmann	abgeschlossen

Tab. 1.2: Projektpartner und Projektstatus

Erkenntnisse konnten auch über die Anforderungen an eine derartige Datenbasis gewonnen werden. Es hat sich bei der Konzeptionierung der Datenbasis erwiesen, daß eine hohe Abtastrate trotz der niedrigen Frequenz der Umlaufenden Instabilität von Bedeutung ist. So ergeben sich z.B. durch Oversampling kürzere Ansprechzeiten und damit geringere Zeitverzüge nach dem Auftreten von Störungen in Strömungen bis zum Auslösen einer Meldung durch ein Analyseverfahren.

### **2.3 Einhaltung des Finanzierungs- und Zeitplans**

Der Finanzierungsplan des Teilvorhabens 1.1.4 wurde in vollem Umfang eingehalten. Eine Überschreitung des Finanzierungsplans trat nicht ein. Auch der Zeitplan des Vorhabens wurde eingehalten. Das Teilvorhaben konnte also planmäßig abgeschlossen werden.

### **2.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Die im Rahmen des Vorhabens erhaltenen Daten sind dazu geeignet, die von den Vorhaben-Partnern geplante Entwicklung von verschiedenen Analyseverfahren zu ermöglichen. Die Ergebnisse dieser Entwicklungen werden in den Berichten der jeweiligen Projektpartner beschrieben und erläutert. Eine weitere Nutzung der Daten zur weiteren Entwicklung von Verfahren zur frühzeitigen Detektion von Verdichterinstabilitäten ist denkbar.

### **2.5 Gemachte bzw. in Anspruch genommene Erfindungen / Schutzrechte**

Es wurden im Rahmen des Vorhabens keine Erfindungen oder Schutzrechte dritter in Anspruch genommen. Eigene Erfindungen oder Schutzrechte konnten aus diesem Vorhaben nicht geltend gemacht werden.

### **2.6 Arbeiten ohne konkrete Lösungen**

Dieses Vorhaben ist in vollem Umfang erfolgreich abgeschlossen, d.h. es sind keine der zu bearbeitenden Punkte offengeblieben. Eine größere Anzahl von Messungen im Übergang von stabilen zu instabilen Betriebspunkten für die Drehzahlverhältnisse, bei denen Messungen vorliegen, wären vorteilhaft, um die Funktionalität der entwickelten Verfahren noch konkreter verifizieren zu können. Zusätzlich wären es vorteilhaft, die Position der Drossel im Austritt des Verdichters instationär mitzumessen, da so der jeweilige Betriebspunkt des Versuchsverdichters zu den verschiedenen Zeitpunkten genauer bekannt wäre.

Dieses Vorhaben war aufgrund seiner Auslegung, die ausschließlich den Aufbau einer Datenbasis beinhaltet, nicht geeignet, eigene wissenschaftliche Ergebnisse zu



erzielen. Die Datenbasis, die im Rahmen dieses Vorhabens erstellt wurde, dient aber als Ausgangspunkt für die zu erzielenden wissenschaftlichen Ergebnisse der Partnervorhaben der Vorhabengruppe 1.1.