

FH D

Fachhochschule Düsseldorf



Bachelor Thesis

Untersuchung der aerodynamischen Kenndaten eines Radialventilators

Bearbeiter:

Jawad Baidari

Matrikel-Nummer:

502392

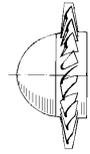
Düsseldorf, 2011

Betreuender Professor

Prof. Dr.-Ing. Frank Kameier
Strömungstechnik und Akustik
Fachbereich 4
Maschinenbau und Verfahrenstechnik
Josef-Gockeln-Str. 9
40474 Düsseldorf

Prüfer

Prof. Dr.-Ing. Frank Kameier
M.Sc.Eng Sophia Schönwald



Thema einer BachelorThesis (Abschlussarbeit)

für

Jawad Baidari

Matrikel-Nr. 503592

Prof. Dr.-Ing. Frank Kameier

Strömungstechnik und Akustik

Fachbereich 4

Maschinenbau und Verfahrenstechnik

Josef-Gockeln-Str. 9

40474 Düsseldorf

Phone (0211) 4351-848

Fax (0211) 4351-467

E-Mail Frank.Kameier@fh-duesseldorf.de

<http://ifs.muv.fh-duesseldorf.de>

Düsseldorf, den 23.04.2011

Untersuchung der aerodynamischen Kenndaten eines Radialventilators

An einem Ventilatorenprüfstand gemäß ISO 5136 sollen aerodynamische und akustische Messungen durchgeführt werden. Der Prüfstand wurde mit neuer Messtechnik ausgestattet, so dass alte und neue Messtechnik zu vergleichen sind. An einem bereits vermessenen Ventilator sollen die Ergebnisse der verschiedenen Messsysteme verglichen werden.

Zur Bestimmung der aerodynamischen Kenndaten müssen die verschiedenen Drücke vor und hinter dem Ventilator bestimmt werden, um Rückschluss auf die Totaldruckerhöhung, die Druckzahl und die Lieferzahl zu geben. Darüber hinaus soll eine Bewertung des Ventilators anhand seines Wirkungsgrades vorgenommen werden.

Die Erfassung der beschriebenen Messgrößen soll mit dem Softwaretool DasyLab erfolgen, in Kombination mit der Ansteuerung einer National Instruments Hardware. Hierzu soll ein entsprechendes Schaltbild erstellt werden, in dem auch iterative Bestimmung des Volumenstroms hinterlegt ist.

Folgende Schritte sind für die Bearbeitung erforderlich:

- Erarbeitung eines Projektzeitplans
- Einarbeitung in der Literatur zur Bestimmung der dimensionslosen Kennzahlen ψ , φ und Volumenstrombestimmung, Auswertung der aerodynamischen und aeroakustischen Messdaten.
- Einarbeitung in der Messung instationärer Messgrößen
- Erstellung eines neues Schaltbild mittels DasyLab 11
- Bestimmung des Alphawertes
- Auswertung der aeroakustischen Messdaten mittels Matlab
- Erstellung eines Posters zur Präsentation der Arbeit.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, Jawad Baidari, dass diese Arbeit von mir selbständig verfasst und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln erstellt wurde.

Bei dieser Arbeit handelt es sich um ein von Seiten der Fachhochschule Düsseldorf unredigiertes und nicht korrigiertes Exemplar.

Ort, Datum _____ Unterschrift _____

Danksagung

Im Namen Allahs, des Allerbarmers, des Barmherzigen

An dieser Stelle möchte ich meinen Dank an Frau M.Sc.Eng Sophia Schönwald und Herrn Professor Dr.-Ing. Frank Kameier ausdrücken, die die Betreuung dieser Arbeit auf sich genommen haben. Frau M.Sc.Eng Sophia Schönwald möchte ich für das Thema selbst und für ihr großes Engagement danken.

Bedanken möchte ich mich bei meiner großartigen Frau Rebekka und meinen wunderbaren Eltern Mina und Mustapha in Marokko, für Ihre Unterstützung während dieser Arbeit. Schließlich gilt mein Dank auch meinen Schwiegereltern Birgit und Peter.

Sehr dankbar bin ich auch bei meinem gesamten Mitarbeiter-Team des Instituts für Strömungstechnik an der FH Düsseldorf, für die lehrbare Zeit.

INHALTSVERZEICHNIS

1	<u>EINLEITUNG</u>	<u>4</u>
2	<u>EINFÜHRUNG</u>	<u>5</u>
2.1	STRÖMUNGSMASCHINEN.....	5
2.2	VENTILATOREN	6
2.3	BAUARTEN VON VENTILATOREN.....	7
2.4	RADIALVENTILATOREN.....	7
2.5	AXIALVENTILATOREN	8
2.6	DIAGONALVENTILATOREN.....	9
2.7	WIRKUNGSGRAD	9
3	<u>THEORIE.....</u>	<u>10</u>
3.1	AERODYNAMISCHE KENNGRÖßEN.....	10
3.1.1	FÖRDERSTROM	10
3.1.2	LUFTDICHTE	11
3.1.3	DRÜCKE UND DRUCKERHÖHUNG	11
3.1.4	STUTZENARBEIT / SCHAUFELARBEIT.....	12
3.1.5	AERODYNAMISCHE LEISTUNG	12
3.1.6	MECHANISCHE LEISTUNG	12
3.1.7	KENNLINIEN UND KENNFELDER	12
3.1.8	DIE AFFINITÄTSGESETZE	12
3.2	DIMENSIONSLOSE KENNGRÖßEN	14
3.2.1	DRUCKZAHL.....	14
3.2.2	LIEFERZAHL.....	14
3.2.3	WIRKUNGSGRAD	14
3.2.4	LEISTUNGSZAHL.....	14
4	<u>MODERNISIERUNG DES VENTILATORENPRÜFSTANDS</u>	<u>15</u>
4.1	<u>DER AUSGANGSZUSTAND.....</u>	<u>15</u>

4.2	MODERNISIERUNGSMABNAHMEN	18
4.3	VERWENDETE VENTILATOREN	19
4.4	VERWENDETE EINLAUFDÜSEN	20
5	<u>MESSUNG DER KENNGRÖßEN</u>	21
5.1	VOLUMENSTROM	21
5.2	DIE DREHZAHLMESSUNG	28
5.3	DREHMOMENTMESSUNG	30
5.4	TEMPERATURMESSUNG	31
5.5	KALIBRIERUNG DES DREHMOMENTSAUFNEHMERS Z3H3	31
6	<u>MESSDATENERFASSUNGSSYSTEM</u>	36
6.1	MESKARTE NI-CDAQ-9174	37
6.2	ERSTELLUNG DES DATENERFASSUNGSPROGRAMMS MITTELS DASYLAB	49
6.2.1	ALPHA-WERT UND KENNGRÖßENSCHWANKUNGEN SCHALTBILD	49
6.2.2	VOLLSTÄNDIGES SCHALTBILD	53
6.2.3	ERFASSUNG UND MITTELUNG DER MESSDATEN	55
6.2.4	BERECHNUNG DER LUFTWERTE	56
6.2.5	ITERATIVE BERECHNUNG DES VOLUMENSTROMS	57
6.2.6	AUSWERTUNG DER GEMITTELTEN UND ONLINE MESSDATEN.....	59
6.2.7	VOLUMENSTROM AN DER DÜSE	61
6.2.8	DOKUMENTATION UND WEGSCHREIBEN DER MESSDATEN.....	61
6.2.9	DAS LAYOUT	62
7	<u>EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN DER SCHWANKUNGEN</u>	66
8	<u>AUSWERTUNG DER AERODYNAMISCHEN MESSUNGEN</u>	75
8.1	DER RADIALVENTILATOR RV-722	75
8.2	RADIALVENTILATOR RV-680	79
8.2.1	ALPHA-WERTE BESTIMMUNG.....	82
8.2.2	VERGLEICH ZWISCHEN EINLAUFDÜSE UND MESSBLENDE	86
8.2.3	VERGLEICH ZWISCHEN EINLAUFDÜSEN MIT UND OHNE ÜBERLAPPUNG	89

8.2.4	DARSTELLUNG DER LEISTUNG	93
8.2.5	DARSTELLUNG DER OPTIMUM.....	94
9	<u>MESSUNG DER VON RADIALVENTILATOR ABGESTRAHLTEN SCHALLEISTUNG.....</u>	96
9.1	AEROAKUSTISCHE MODELGESETZE.....	96
9.2	VERSUCHSAUFBAU.....	96
9.3	DIE BENUTZTE BRÜEL&KJAER-SCHLITZROHRSONDE	98
9.4	BLATTFOLGEFREQUENZ (BFF)	100
9.5	DURCHFÜHRUNG UND AUSWERTUNG DER MESSUNGEN.....	101
10	<u>ZUSAMMENFASSUNG</u>	107
11	<u>LITERATURVERZEICHNIS</u>	108
	<u>ANHANG-A.....</u>	109
	<u>ANHANG-B.....</u>	111
	<u>ANHANG-C.....</u>	126
	<u>ANHANG-D.....</u>	136
	<u>ANHANG-E.....</u>	141

1 Einleitung

Im Rahmen der vorliegenden Bachelorarbeit wurden verschiedene Modernisierungsmaßnahmen zur Leistungsvermessung aerodynamischer und akustischer Kenngrößen des Prüfstandes, eines industriellen Radialventilators durchgeführt. Dabei sind neue Druckmessgeräte höherer Qualität (PR4000B der Firma MKS) zur Vermessung der aerodynamischen Kenngrößen $\Delta p_{\text{Außen}}$ und P_{baro} , sowie der Wirkdruck an der Blende Δp_{blende} zum Einsatz gekommen. Des Weiteren ist auch eine neue Messkarte NI cDAQ-9174 der Firma NATIONAL INSTRUMENTS angeschafft worden. Die bisher verwendete DASyLab-Software (Data Acquisition System Laboratory Dasylab 5) der Firma National Instruments mussten auf Dasylab 11 aktualisiert werden.

Ziel der Arbeit ist es, ein Programm zur Messdatenerfassung mittels Dasylab 11 für die aerodynamische Leistungsvermessung zu erstellen. Dabei sollen die Kenngrößen (Drücke: $\Delta p_{\text{Außen}}$, P_{baro} , Δp_{blende} , Temperatur, Luftfeuchte, Drehmoment, Drehzahl) als Spannungssignale über die Messkarte in dem PC aufbereitet werden, welche wiederum mit Hilfe des erstellten Messerfassungsprogramms und des Tabellenkalkulationsprogramms Excel weiterverarbeitet werden können.

Ziel ist auch die Untersuchung der aerodynamischen Kenndaten eines Radialventilators, nach dem der Prüfstand mit neuer Messtechnik ausgestattet wurde, so dass alte und neue Ergebnisse der verschiedenen Messsysteme verglichen werden können. Ferner werden unterschiedliche Einstellungen einer National Instruments Hardware (NI cDAQ-9174) geprüft. Ergänzend soll eine Bewertung des Ventilators anhand seines Wirkungsgrades vorgenommen werden.

Der Prüfstand soll auch unter Vorgabe eines dimensionslosen Volumenstroms gefahren werden können.

2 Einführung

2.1 Strömungsmaschinen

Strömungsmaschinen können nach verschiedenen Gesichtspunkten eingeteilt bzw. einander zugeordnet werden:

- nach dem durch die Maschine strömenden Fluid,
- nach dem Arbeitsprinzip,
- nach der äußeren, geometrischen Form des Laufrades, insbesondere der Beschau felung

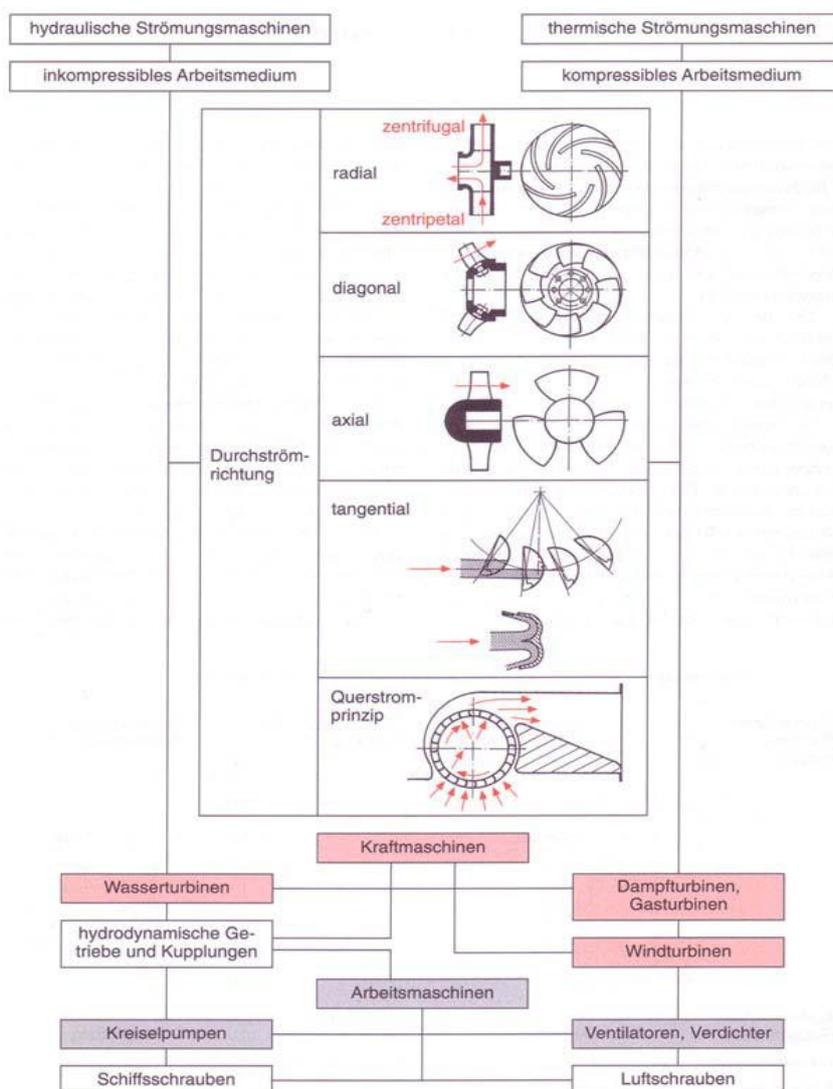


Bild 1: Einteilung der Strömungsmaschinen nach verschiedenen Merkmalen/1

2.2 Ventilatoren

Ventilatoren sind Strömungsmaschinen zur Förderung von gasförmigen Medien durch Anlagen und Geräte. Dabei wird Arbeit in Form von mechanischer Energie über die, von außen angetriebene Laufradwelle, zugeführt, um die entsprechenden Medien zu fördern. Dabei erfolgt die Energieübertragung über das Laufrad und das Gehäuse (Leitapparat) des Ventilators.

Ganz allgemein werden Ventilatoren gemäß DIN 24 163 durch die Druckerhöhung bzw. den Volumenstrom übertragene Arbeit Y abgegrenzt.

- a. Ventilatoren mit inkompressiblen Strömungsmaschinen $\Delta p < 3000 \text{ Pa}$
- b. Ventilatoren mit kompressiblen Strömungsmaschinen $\Delta p > 5000 \text{ Pa}$
- c. Verdichter $\Delta p > 10000 \text{ Pa}$

Ventilatoren sind Arbeitsmaschinen und bilden wie in Bild 2 dargestellt eine eigene Gruppe.

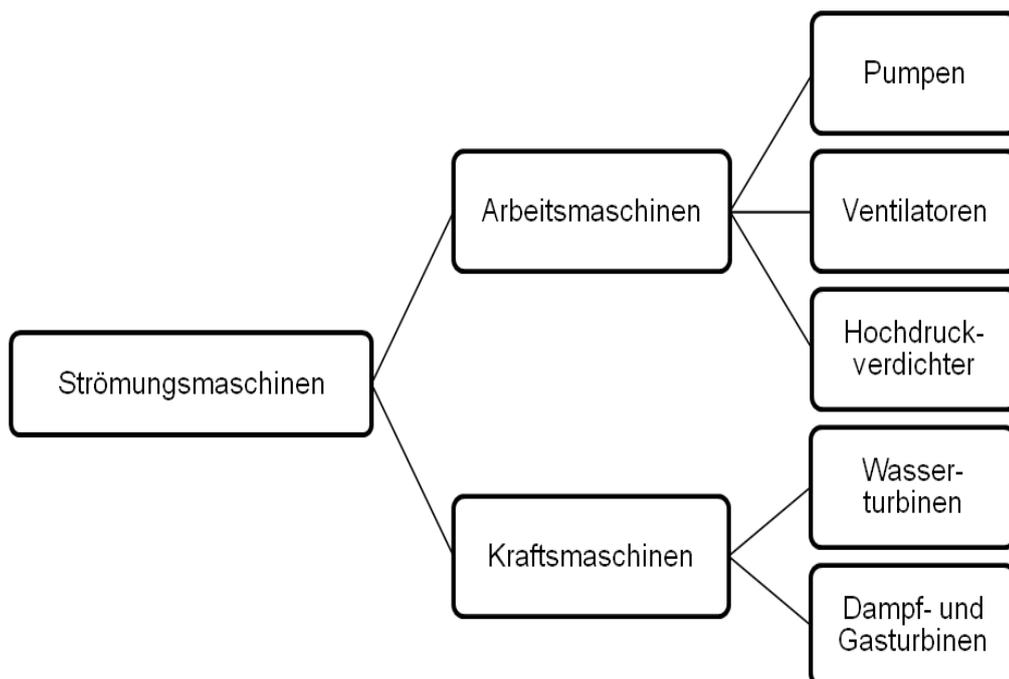


Bild 2: Anordnung der Kraft- und Arbeitsmaschinen

2.3 Bauarten von Ventilatoren

Ventilatoren werden je nach Aufbau in drei Hauptbauformen aufgeteilt: Axialventilatoren, Radialventilatoren und Diagonalventilatoren (Bild 3).

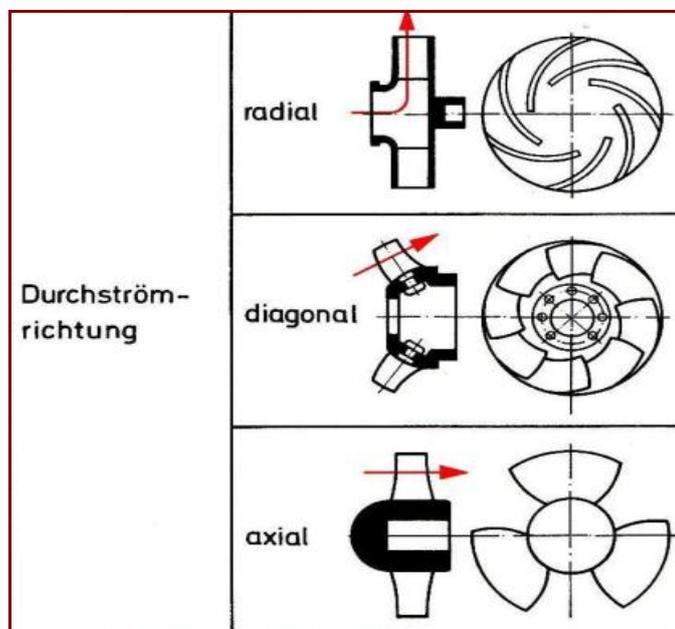


Bild 3: Ventilatorenbauarten/1

2.4 Radialventilatoren

Radialventilatoren (Bild 4) kennzeichnen sich dadurch aus, dass die Strömung durch die Laufradform radial umgelenkt und transportiert wird. Das heißt, die Meridiangeschwindigkeit hat eine radiale Komponente.

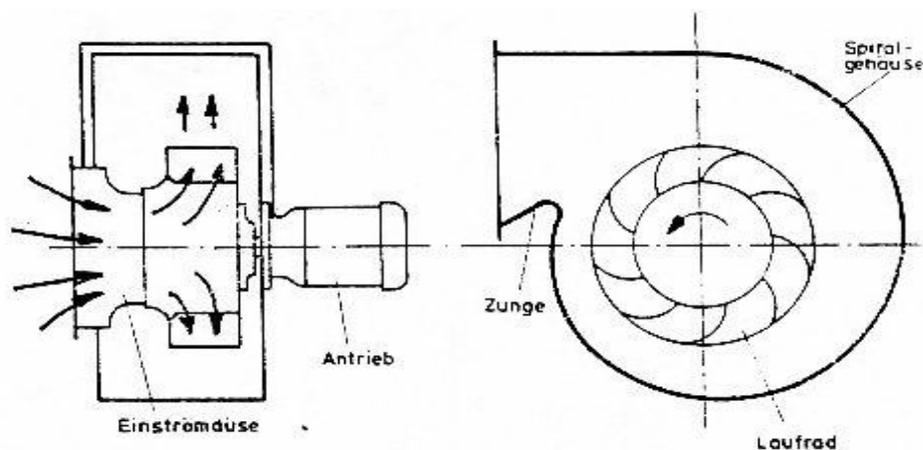


Bild 4: Schnittdarstellung eines Radialventilators mit Spiralgehäuse/2

Das Spiralgehäuse hat zwei Aufgaben zu erfüllen: Es sammelt die aus dem Laufrad ausströmende Luft, führt sie zu einem gemeinsamen Austritt und es wandelt einen Teil der Geschwindigkeitsenergie (dynamischen Druck) in Druckenergie (statischen Druck) durch die stetige Querschnittserweiterung in Strömungsrichtung um. Bei Radialventilatoren tritt das Arbeitsmedium axial durch den Saugstutzen ein, wird im Laufrad radial umgelenkt und verlässt die Maschine durch den tangential anliegenden Druckstutzen. Radialventilatoren kommen zum Einsatz, wenn geringe Volumenströme, bei gleichzeitig starker Druckerhöhung gefördert werden müssen.

2.5 Axialventilatoren

Bei Axialventilatoren (Bild 5 und 6) wird das Fördermedium in axialer Richtung eingesaugt, wobei das Gehäuse koaxial durchströmt wird. Bei dieser Art der Bauform erfolgt keine Umlenkung der Strömung, daher verlässt das Fördermedium die Strömungsmaschine wieder in axialer Richtung.

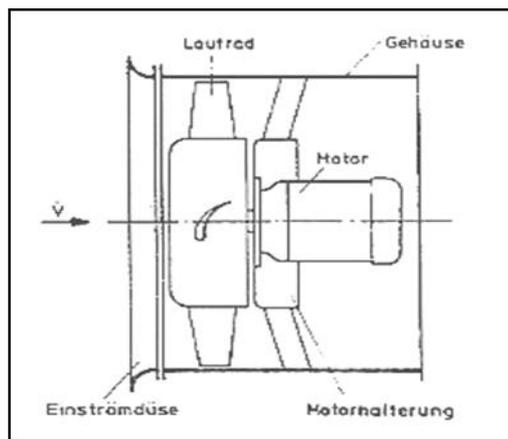


Bild 5: Schnitt Axialventilator/2

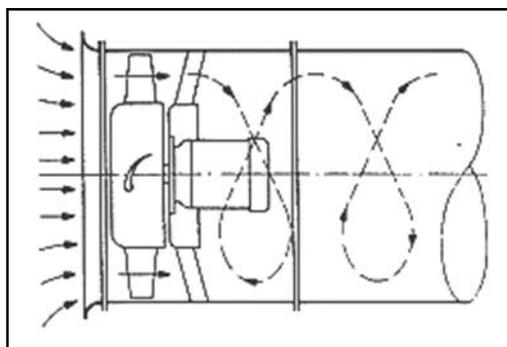


Bild 6: Schnitt Axialventilator mit Strömungslinien/2

Als Vorteil dieser Strömungsmaschine sind vor allem der hohe Wirkungsgrad, der große Betriebsbereich bei guten Teillastwirkungsgraden, die guten Anpassungsfähigkeiten bzw.

Regulierbarkeit an veränderliche Volumenströme und Drücke anzuführen. Weiterhin bieten Axialventilatoren den Vorteil einer hohen Lebensdauer, eines geringen Platzbedarfs, einer einfachen Rohrleitungsführung und des einfachen Aufbaus. Als Nachteil sind neben dem relativ hohen Geräusch vor allem die instabile Kennlinie links vom Auslegungspunkt anzuführen. Im Gegensatz zu Radialventilatoren werden Axialventilatoren bei Förderung hoher Volumenströme und geringer Druckerhöhung eingesetzt./1

2.6 Diagonalventilatoren

Diagonalventilatoren besitzen Räder, die bei der Durchströmung sowohl eine axiale als auch eine radiale Komponente haben (Bild 7). Halbaxialräder, meist ohne Deckscheibe, werden mit Spiralgehäuse, als Rohrventilatoren mit axialer Abströmung oder in Geräten (Bsp. zur Prozesskühlung bei hohen Strömungswiderständen) eingesetzt. Der Diagonalventilator schließt eine Lücke zwischen den Axial- und den Radialventilatoren.

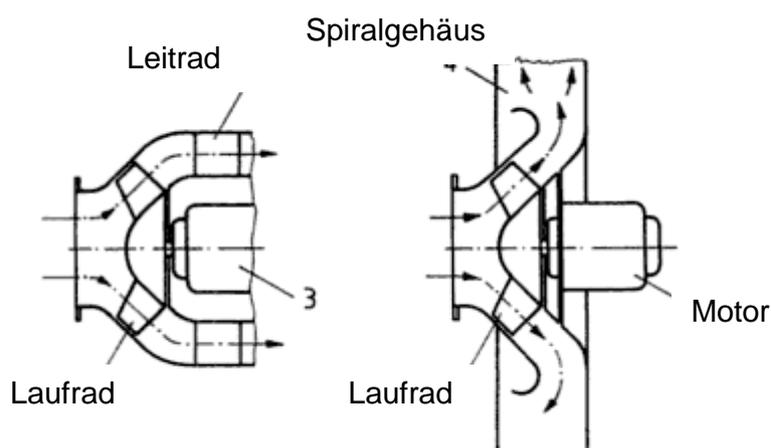


Bild 7: Ventilator mit vorwiegend diagonal (halbaxial) durchströmtem Laufrad./3

2.7 Wirkungsgrad

Radialventilatoren mit vorwärts gekrümmten Schaufeln (Bild 8a) haben aufgrund der stärkeren Umlenkung der Strömung im Laufradinneren geringere Wirkungsgrade als Laufräder mit rückwärts gekrümmten Schaufeln (Bild 8b). Dabei verändert sich der Wirkungsgrad je nach Bauart des Ventilators und dessen Schaufeln.

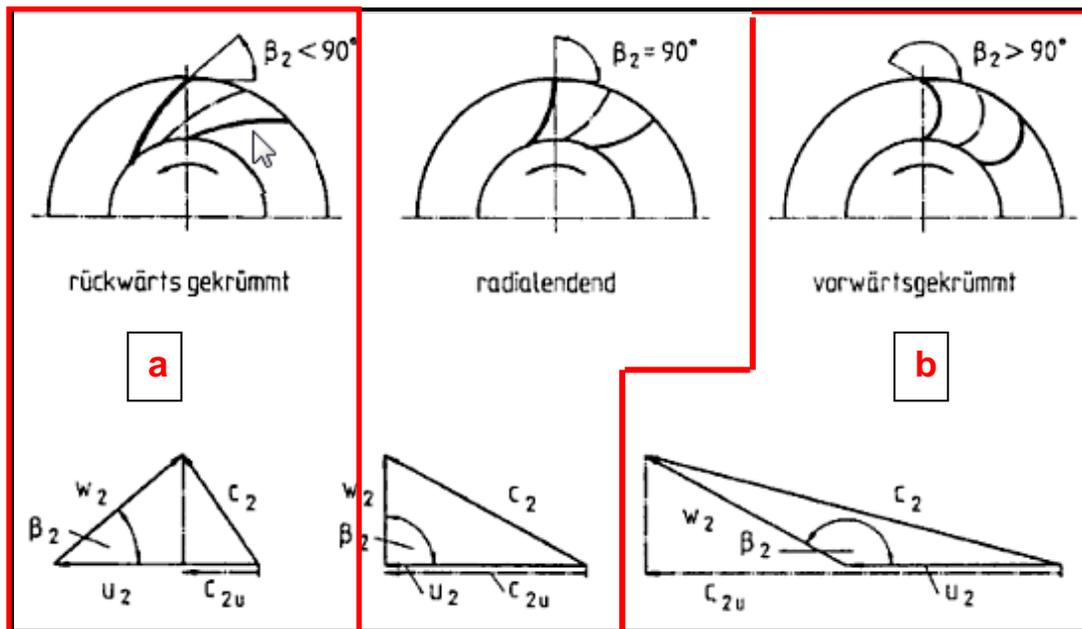


Bild 8: Schaufelformen und Geschwindigkeitsdreiecke am Laufradaustritt/4

a) :Radialventilator mit rückwärts gekrümmten Schaufeln ($\eta_{\max} = 0,85$)

b) :Radialventilator mit vorwärts gekrümmten Schaufeln ($\eta_{\max} = 0,65$)

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Laufräder mit rückwärts gekrümmten Schaufeln verwendet.

3 Theorie

3.1 Aerodynamische Kenngrößen

3.1.1 Förderstrom

Der Förderstrom ist der Quotient aus geförderter Gasmenge V in einem definierten Zeitraum t . In Anlehnung an VDI 2044 und DIN 24 163 wird für den Volumenstrom \dot{V} die Einheit m^3/s verwendet.

$$\dot{V} = \frac{V}{t} = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (1)$$

3.1.2 Luftdichte

Die Luftdichte gibt an, wie viel Masse an Luft in einem Kubikmeter enthalten ist. Bei der Bestimmung der Dichte von der Luft aus dem Gasdruck und der Gastemperatur geht man von der thermischen Zustandsgleichung idealer Gase aus:

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T}$$

Ri : Gaskonstante bei trockener Luft = 287,2 [J/kg*K]

P : Luftdruck [N/m²]

T : Lufttemperatur [°K]

3.1.3 Drücke und Druckerhöhung

Die Druckerhöhung Δp_{fa} wird bei frei ausblasenden Ventilatoren als Druckdifferenz zwischen dem statischen Druck p_{st2} im freien Raum am Ventilatorenaustritt und den Totaldruck p_{t1} am Ventilatoreneintritt bestimmt.

Die Druckerhöhung Δp_{fa} und die Totaldruckerhöhung Δp_t lassen sich nach DIN 24163-Teil 1 durch die Funktionen:

$$\Delta p_{fa} = \Delta p_t - \rho \cdot \frac{c_1^2}{2} \quad (1)$$

Mit $p_2 = p_b$, $p_1 = p_b - \Delta p_t$ und $c_2 = 0$

Die Totaldruckerhöhung lässt sich wie folgendes ausdrücken

$$\Delta p_t = p_2 - p_1 + \rho \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} \quad (2)$$

Der dynamische Druck p_{d1} berechnet sich durch die Gleichung:

$$p_{d1} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c^2 \quad (4)$$

3.1.4 Stutzenarbeit / Schaufelarbeit

Unter der spezifischen Stutzenarbeit Y_t versteht man den spezifischen Energiezuwachs des Fluids, der ihm über die Laufradschaufeln von der Strömungsmaschine erteilt wird, oder der aus der Umwandlung mechanischer Energie, die dem Laufrad zugeführt wird, resultiert./5

Für inkompressible Fluid gilt:

$$Y_t = E_D - E_S = \frac{p_d - p_s}{\rho} + \frac{c_d^2 - c_s^2}{2} + \cancel{g \Delta h} = \frac{\Delta p_t}{\rho} \quad (5)$$

Bei Gasströmungen ist der Term $g \cdot \Delta h$ vernachlässigbar klein.

3.1.5 Aerodynamische Leistung

Die Aerodynamische Leistung wird auch als Nutzleistung bezeichnet, diese ergibt sich aus dem Produkt von Volumenstrom \dot{V} und Totaldruckerhöhung Δp_t :

$$P_n = \dot{V} \cdot \Delta p_t \quad (6)$$

3.1.6 Mechanische Leistung

Die Mechanische lässt sich über die Funktion:

$$P_{mech} = M \cdot \omega \quad (7)$$

berechnen.

3.1.7 Kennlinien und Kennfelder

Kennlinien sind die Darstellung des funktionellen Zusammenhanges zwischen den verschiedenen Betriebs- und Abmessungsgrößen einer Maschine. Kennfelder entstehen durch Zusammenfassen mehrerer Kennlinien in einem Diagramm.

3.1.8 Die Affinitätsgesetze

Die Affinitätsgesetze werden auch als Ähnlichkeitsbeziehungen (-verhältnisse) oder Modellgesetze bezeichnet. Sie verknüpfen die Betriebsdaten ΔY , Volumenstrom, Drehzahl n sowie die Leistung P und die Abmessungsgrößen, vor allem den Außendurchmesser D_2 , von geometrisch ähnlichen Laufrädern.

Sie dienen unter anderem der Übertragung von experimentell erarbeiteten Ergebnissen aus Modell oder Prototypversuchen auf Großausführungen. Hierzu sind allerdings gewisse Voraussetzungen notwendig, die da wären:

- geometrische Ähnlichkeit, sprich Proportionalität zwischen Abmessungen und Rauigkeiten, der zu vergleichenden Strömungsmaschinen,
- dynamische Ähnlichkeit, sprich Proportionalität zwischen den physikalischen Größen die den Strömungsverlauf bestimmen, wie mechanische Größen und Stoffwerte.

Des Weiteren müssen die Strömungen in den Kanälen der Strömungsmaschinen und besonders im Laufrad kinematisch proportional (ähnliche Geschwindigkeiten) und kinetisch ähnlich (gleiche Strömungskennzahlen wie Re , Ma) verlaufen. Dies ist allerdings nur näherungsweise erreichbar. Es gelingt meist nicht, dass alle Kennzahlen zwischen den zu vergleichenden Strömungsmaschinen übereinstimmen, jedoch muss die je nach Fall wichtigste Kennzahl übereinstimmen.

Der Erarbeitung solcher Affinitätsgesetze dienen die so genannten Kennzahlen. Einige dieser Kennzahlen charakterisieren die Laufrad- und Bauform der Strömungsmaschinen. Allerdings ist zu beachten, dass sich die Kennzahlen in der Regel immer auf die einzelne Stufe beziehen. Nur so ist das Vergleichen und Charakterisieren der Eigenschaften und Anwendungen möglich./6

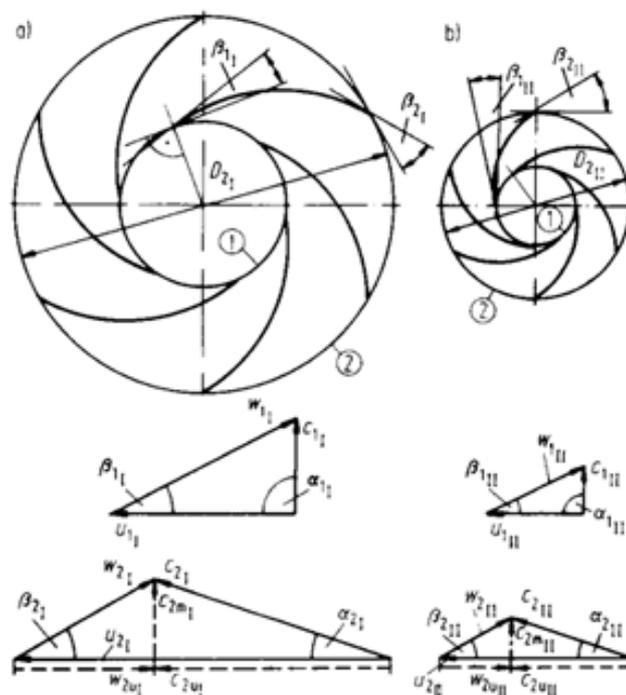


Bild 9: Ähnliche Läufer. Geometrisch proportionale Abmessungen und ähnliche Geschwindigkeitsdreiecke./6

- Laufrad 1 : Großausführung
- Laufrad 2 : Modellausführung

3.2 Dimensionslose Kenngrößen

Die dimensionslosen Kennzahlen werden für den Vergleich und die Beurteilung unterschiedlicher Ventilatoren hinsichtlich ihrer Eignung für bestimmte Einsatzfälle verwendet. Dazu zählen die Druckzahl, Lieferzahl, Wirkungsgrad und die Leistungszahl.

3.2.1 Druckzahl

$$\psi = \frac{2 \cdot \Delta p_t}{\rho \cdot U^2} = \frac{2 \cdot Y_t}{U^2} \quad (8)$$

Die Druckzahl ψ des Rades ergibt sich aus dem Verhältnis der vom Rad erzeugten Druckhöhe zum Staudruck der Umfangsgeschwindigkeit.

3.2.2 Lieferzahl

$$\varphi = \frac{\dot{V}}{U \cdot \frac{\pi \cdot D_2^2}{4}} = \frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi^2 \cdot \frac{n}{60} \cdot D_2^3} \quad (9)$$

mit n in U/min

Die Lieferzahl φ beschreibt das Verhältnis der tatsächlichen Fördermenge zur theoretisch möglichen Fördermenge.

3.2.3 Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_t}{P_i} \quad (10)$$

mit

$$P_{mech} = M \cdot \omega \quad (11)$$

Der Wirkungsgrad η beschreibt das Verhältnis der Förderleistung zur Wellenleistung.

3.2.4 Leistungszahl

Der Volumenstrom ist zur Durchflusszahl φ proportional und die spezifische Stutzenarbeit ist auch zur Druckzahl ψ proportional, somit kann die Leistung P der Arbeitsmaschine durch eine dimensionslose Kennzahl, nämlich der Leistungszahl λ ausgedrückt werden.

$$\lambda_l = \frac{\varphi \cdot \psi}{\eta} = \frac{8P_L}{\rho \cdot \pi \cdot D^5 \cdot n^3} \quad (12)$$

Für Kraftmaschinen gilt:

$$\lambda_l = \varphi \cdot \psi \cdot \eta \quad (13)$$

4 Modernisierung des Ventilatorenprüfstands

4.1 Der Ausgangszustand

Der verwendete Prüfstand ist ein druckseitiger Rohrprüfstand, welcher gemäß DIN 24163/Teil 2 aus folgenden Bauteilen besteht:

- Ventilator mit zugehöriger Einlaufdüse bzw. zugehörigen Anschluss-Rohrstücken
- Ausblasstrecke mit Gleichrichter und Druckabnahme
- Übergangsstücke zum Anschluss der Durchflussstrecke
- Volumenstrom-Messstrecke
- Regeldrossel mit Gleichrichter

Die Aufgabe des Prüfstandes ist die gezielte Einstellung eines definierten Betriebszustandes, um diesen dann messtechnisch zu erfassen. In den Bildern 10 und 11 sind die Prüfstandsabmessung, sowie die verwendeten Messgeräte dargestellt. Die Prüfstandskomponenten und die Messgeräte sind in der Tabelle 1 aufgelistet.

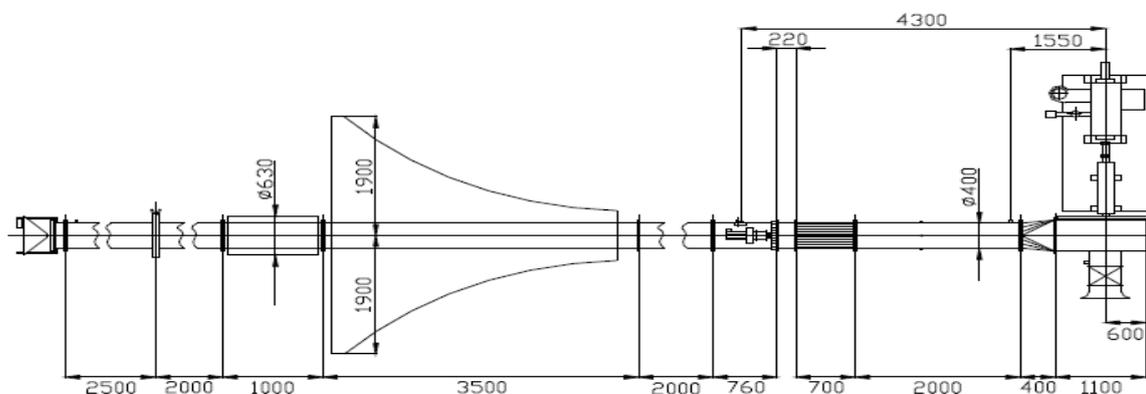


Bild 10: Prüfstandsabmessung /7

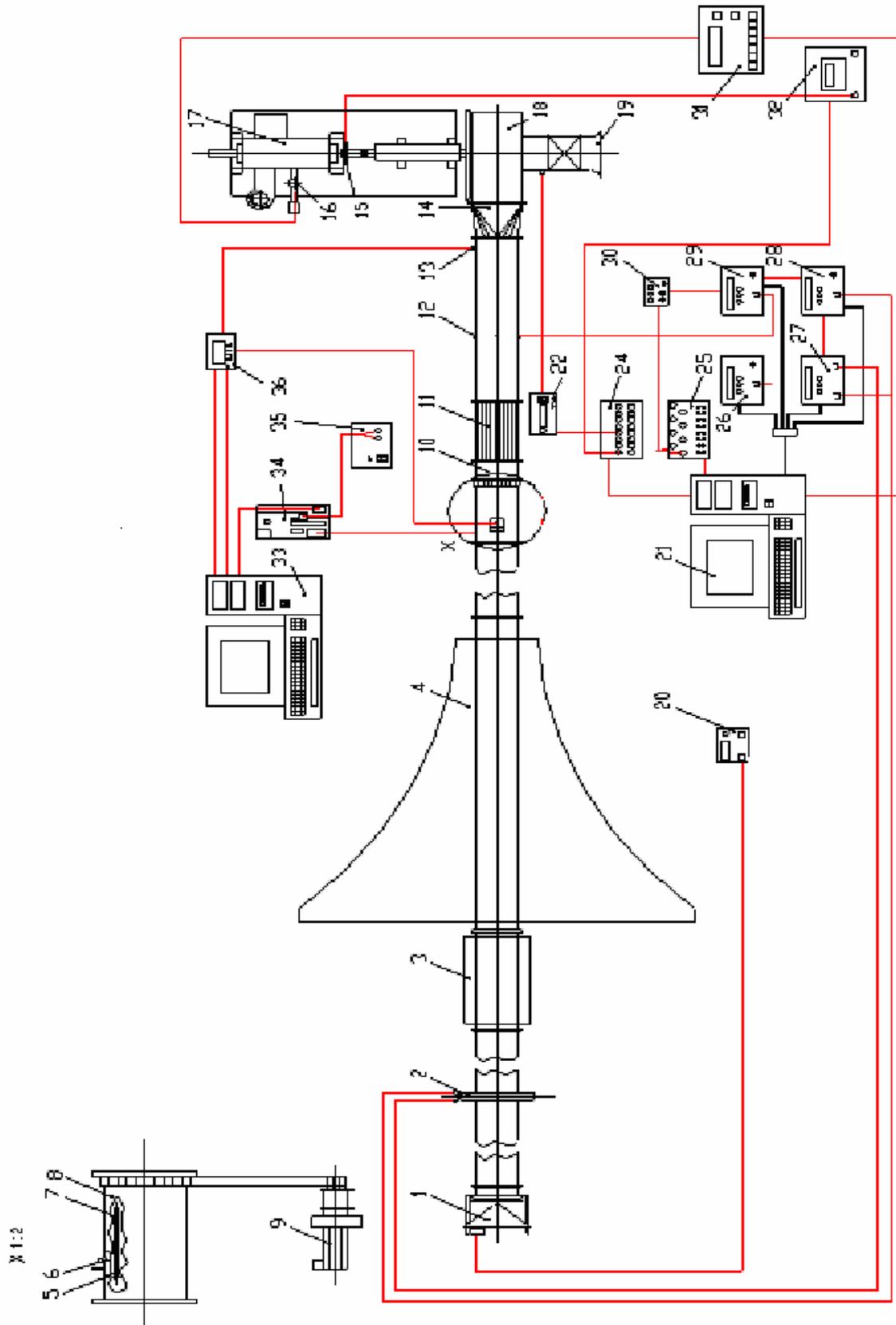


Bild 11: Alter Prüfstand und Messgeräte/7

Tabelle 1: Prüfstandskomponenten und Messgeräte

Nr.	Prüfstandskomponenten/ Messgerät	Bezeichnung	Hersteller	Sonstiges
1	Drosselkegel			
2	Normblende			$\beta = 0,82$
3	Schalldämpfer			
4	Reflexionsarmer Abschluss			
5	Kondensatormikrofon	Typ 4133	Brüel & Kjaer	
6	Zugangsklappe			
7	Schlitzrohrsonde Brüel&Kjaer		Brüel & Kjaer	
8	Drehkanal			
9	Schrittmotor	VRDM 397/50 LWC		
10	Manschette			
11	Strömungsgleichrichter			
12	Ringkanal			
14	Übergangsstück			
16	Wägezelle mit Messprozessor Z3H3	Z3H3	H B M	
17	Pendelmotor 30 KW			30 KW
18	Ventilator mit Gehäuse	VR-772	Pollrich GmbH	
19	Einlaufdüse	DN280/DN350		
20	Steuergerät			
21	Rechner			
22	Temperaturmessgerät		Saturn	
24	24 AD-Wandler			
25	25 AD-Wandler			
26	Digitalmanometer	Typ 2090	Tradinco	
27	Digitalmanometer	Typ 2091	Tradinco	
28	Digitalmanometer	Typ 2092	Tradinco	
29	Digitalmanometer	Typ 2093	Tradinco	
30	Initialisierung der Druckgeräte			
31	Drehmomentmessgerät			
32	Drehzahlmessgerät	MVD 2630A		
33	Rechner für akustische Messungen			

4.2 Modernisierungsmaßnahmen

Im Rahmen dieser Arbeit wurden einige Modernisierungsmaßnahmen durchgeführt. Dabei erfolgte der Austausch des alten Digitalmanometers vom Hersteller Tradinco Typ 2090 gegen einen Druckaufnehmer Baratron vom Hersteller MKS. Außerdem ist zur Datenerfassung die Messkarte NI-cDAQ-9174 von der Firma NATIONAL INSTRUMENTS angeschafft worden. Bild 12 stellt den Neuzustand des Prüfstands dar.

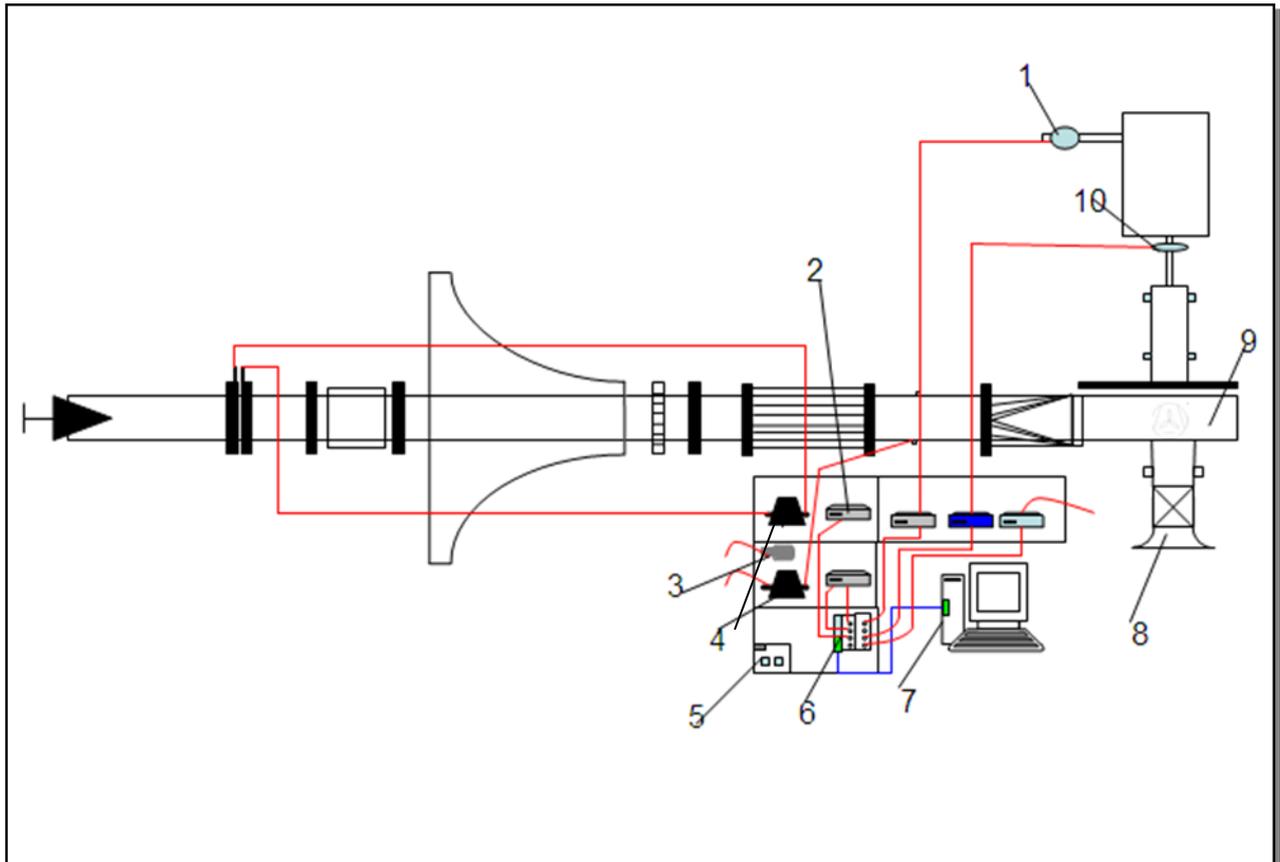


Bild 12 : Neuzustand des Prüfstands und Messgeräte

Tabelle 2: Neue Prüfstandskomponenten und dessen Messgeräte

Nr.	Prüfstandskomponenten	Bezeichnung	Hersteller	Sonstiges
1	Wägezelle	Z3H3	HBM	
2	Zweikanal- Betriebsgerät für Druckaufnehmer	PR-4000B-F	MKS	dp_{bl}, dp_a in [Pa] p_{baro} in [kPa]
3	Absolutdruckaufnehmer	Typ 622B	MKS	
4	2xPräzisionsdruckaufnehmer	Typ 120	MKS	
5	Steuergerät für die Drossel			
6	Messkarte	NI-DAQ-9174	NI	
7	Rechner			
8	Einlaufdüse	DN280/DN350	Ventec AG	
9	Ventilator mit Gehäuse	VR-668	Ventec AG	
10	Drehzahlaufnehmer			

Tabelle 3: Eigenschaften der neuen Prüfstandskomponenten

Nr.	Komponenten	Messbereich	Genauigkeit	Auflösung
2	PR-4000B-F	0-10 V	0,01 % \pm 1 Digit	4-stellig (12 Bit) 5-stellig (16 Bit)
3	MKS Baratron Typ 622B	0-10 V	0,25 % $1 < P < 1000$ mbar 0,5 %, $P < 1$ mbar	1×10^{-4} v. Endwert
4	Präzisionsdruckaufnehmer	0-10 V	$\pm 0,12\%$ v. Messwert	1×10^{-6} v. Endwert

4.3 Verwendete Ventilatoren

Es sind zwei Radialventilatoren zum Einsatz gekommen.

- Der Radialventilator RV-722 der Firma Pollrich GmbH.
Das Laufrad besteht aus zehn rückwärts gekrümmten Schaufeln mit einem Schaufelaustrittswinkel $\beta = 41^\circ$, einem Außendurchmesser von $D=772$ mm und einer Laufradbereite am Austritt von 92,7 mm
- Der Radialventilator RV-680 mit den in Tabelle 4 dargestellten Eigenschaften wurde von der Firma Ventec AG in Köln zur Verfügung gestellt.

Tabelle 4: Eigenschaften des RV-680

Name	Abmaße	Einheit
Schaufelinnendurchmesser	0,274	m
Schaufelaußendurchmesser	0,447	m
Ansaugdurchmesser	0,349	m
Laufradbreite am Austritt	0,110	m
Schaufelzahl	8	
Düsenüberlappung	12	mm
Düsenpalt	3	mm
Laufradabstand	35	mm

Die Ventilatoren werden mittels eines Pendelmotors über die Lauftradwelle angetrieben.

4.4 Verwendete Einlaufdüsen

Es werden zwei unterschiedliche Einlaufmessdüsen verwendet. (Bilder 13 und 14).



Bild 13: Einlaufdüse DN280 mit nicht überdecktem Spalt



Bild 14: Einlaufdüse DN350 mit überdecktem Spalt

5 Messung der Kenngrößen

Gemessen wurden folgende Messgrößen:

- Differenzdruck dp_{bl} mittels Normblende
- Differenzdruck $dp_{düse}$ mittels Normdüse
- Drehmoment M mittels Kraftaufnehmer Z3H3
- Drehzahl n mittels Induktiven Aufnehmer
- Temperatur T_{umg} mittels Thermoelement
- Feuchtigkeit φ

Die Erfassung diese Messgrößen erfolgt über eine Messkarte, welche mit einem Rechner über USB-Schnittstelle verbunden ist. Die Messgrößen werden als Spannungssignal aufgezeichnet, diese werden mittels eines programmierten Schaltbildes in physikalischen Größen umgewandelt und für weitere Berechnungen bereitgestellt. Die Messkette sowie die Einstellungen der Messkarte werden in den Kapiteln 6.1 ausführlich erläutert

5.1 Volumenstrom

Der Volumenstrom an der Durchflussmeseinrichtung wird durch Normblenden und Einlaufdüsen in Anlehnung an DIN EN ISO 5167 bestimmt.

- **Ringkammer-Messblende**

Die Volumenstrombestimmung erfolgt gemäß EN ISO 5167-2 durch Messung des Druckabfalls in der Messblende (Bild 15 und 16). Das Prinzip besteht darin, dass sich durch die Verengungen des Rohrquerschnittes die Strömungsgeschwindigkeit an der engeren Stelle, gegenüber der größeren Querschnittsfläche, vergrößert. Infolge dessen entstehen unterschiedliche Drücke in der Umgebung der Drosselstelle, die als Messgrößen dienen.

Um Kennlinienpunkte auch weit rechts im Kennfeld ohne Hilfsventilator erreichen zu können, wird eine Blende mit $\beta=0,8$ verwendet. Das verwendete Präzisionsmanometer kompensiert die größere Blendenöffnung und den damit niedrigeren Differenzdruck.

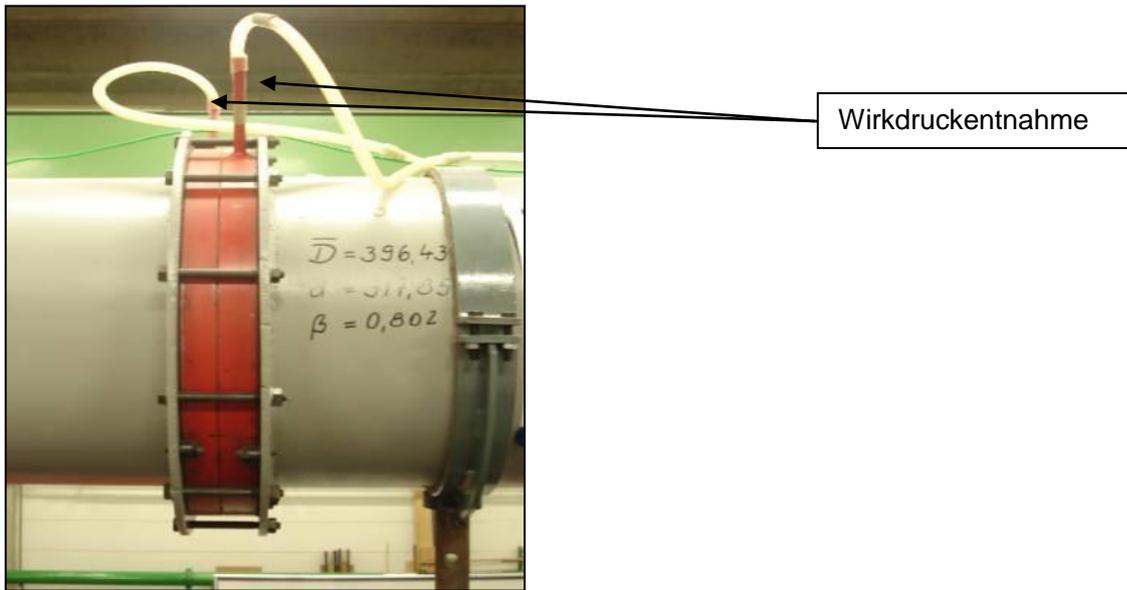


Bild 15: Verwendete Messblende

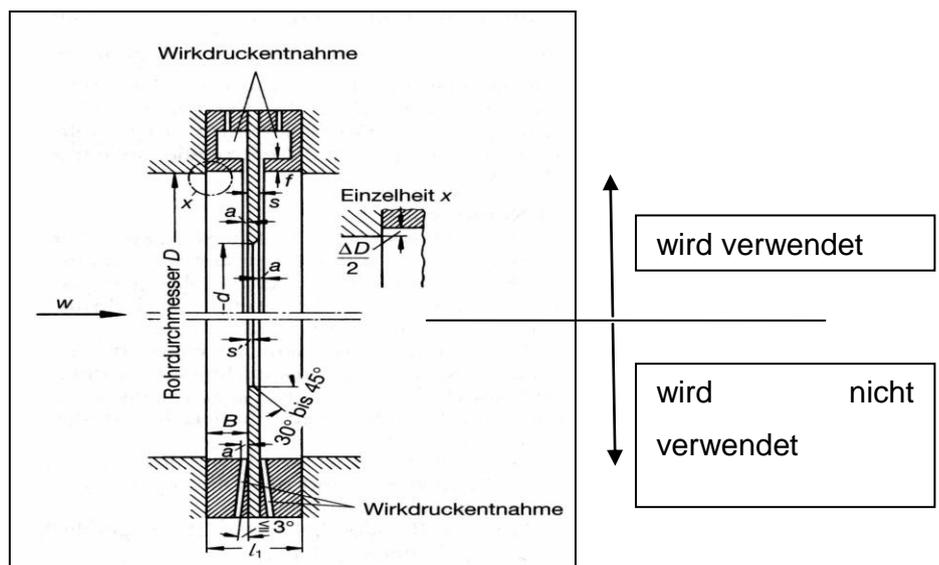


Bild 16: Genormte Messblende/7

Die Normblende besteht aus einer ebenen Scheibe mit kreisförmiger, scharfkantiger Einlauföffnung mit einem Durchmesser von $d = 317,15$ mm sowie zwei Fassungsringen, die Bohrungen zur Druckentnahme enthalten.

Zur Veranschaulichung des Messprinzips zeigen die Bilder 17 und 18 den Strömungs- und Druckverlauf an einer Messblende:

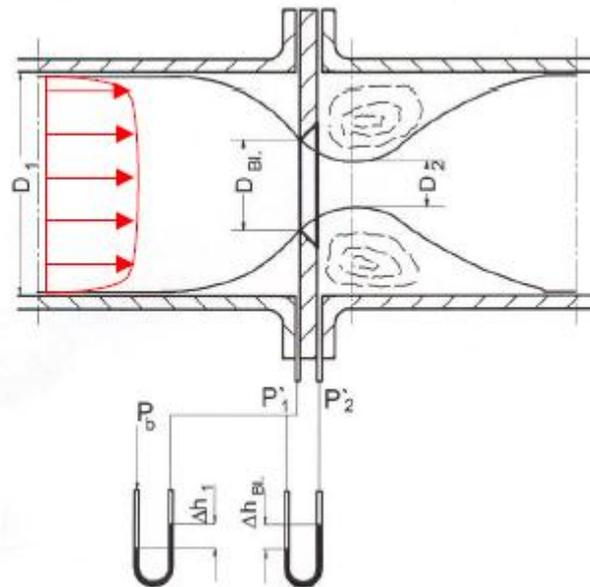


Bild 17: Strömungsverlauf in der Blende/8

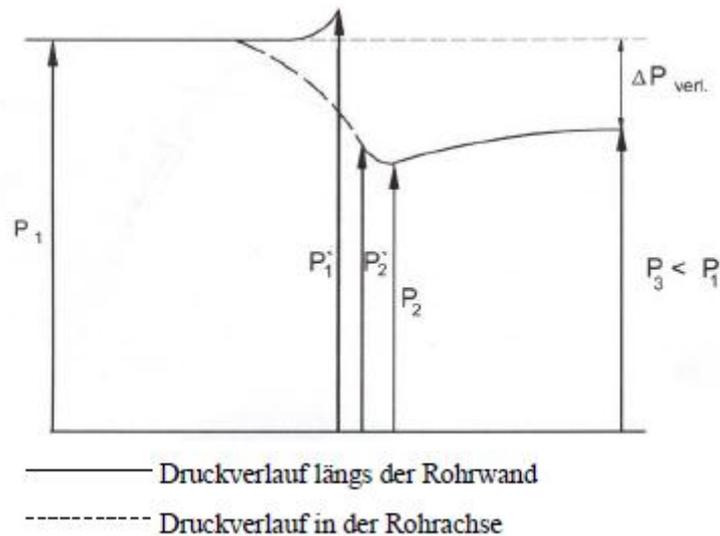


Bild 18: Druckverlauf in der Blende/8

Zur Bestimmung des Volumenstroms wurde die Wirkdruckdifferenz an der Blende gemessen. Dabei wird eine inkompressible Strömung vorausgesetzt, einer Umgebungstemperatur von ca. 20 °C und einem Atmosphärendruck von ca. 1000 mbar, da im Rahmen dieser Versuche eine maximale Strömungsgeschwindigkeit von ca. 28 m/s erreicht wird. Somit beträgt die maximale Dichteänderung der Luft ca 1%. /9

Für inkompressible Medien gilt:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} \quad (13)$$

\dot{V} Volumenstrom [m³/s]

C Durchflusskoeffizient

β Durchmesser Verhältnis

d Durchmesser der Drosselöffnung [m]

ρ Dichte des Fluids vor dem Drosselgerät [kg/m³]

Δp Wirkdruck [Pa]

Wird die Luft als ideales Gas betrachtet, so lässt sich die Luftdichte wie folgt berechnen:

$$\rho_{luft} = \frac{P}{R_f \cdot (T_u - 273,15)} \quad (14)$$

Mit

R_f Gaskonstante der feuchten Luft [J.K⁻¹.mol⁻¹]

T_u Umgebungstemperatur in [°C]

P Barometrischer Druck [mbar]

Für Luft mit einer relativen Feuchte gilt:

$$\rho_{luft(fe)} = \rho_{luft(tr)} \cdot \left(1 - 0,377 \cdot \varphi \cdot \frac{P_s}{P} \right) \quad (15)$$

mit

ρ_{fe} Dichte der feuchten Luft in [kg.m⁻³]

ρ_{tr} Dichte der trockenen Luft [kg.m⁻³]

φ relative Luftfeuchte [%]

P_s Sättigungsdruck [Pa]

P Barometrischer Druck [mbar]

Diagramm 1 stellt den Sättigungsdampfdruck in Abhängigkeit von der Temperatur dar.

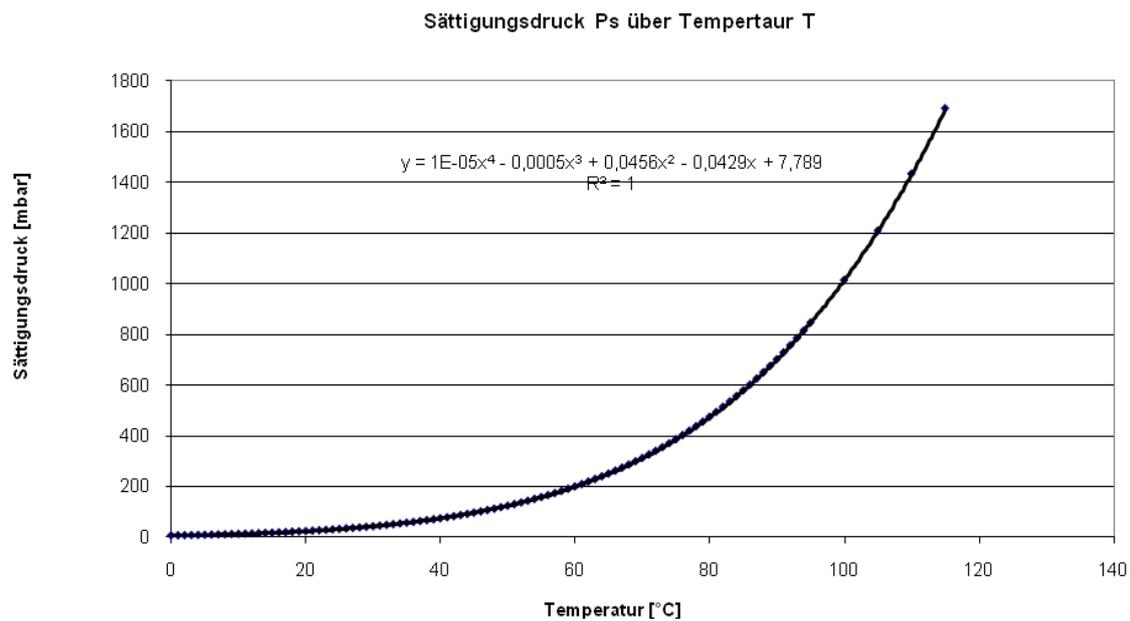


Diagramm 1: P-T Diagramm, Sättigungsdruck über Temperatur

Der Sättigungsdampfdruck hängt von der Temperatur T ab und lässt sich mit folgendem Polynom:

$$P_s = 10^{-5} \cdot T^4 - 0,0005 \cdot T^3 + 0,0456 \cdot T^2 - 0,0429 \cdot T + 7,789 \quad (16)$$

berechnen.

Dabei lässt sich die Gaskonstante der feuchten Luft wie folgt berechnen:

$$R_f = \frac{R_{tr}}{1 - \phi \cdot \frac{P_s}{P} \cdot \left(1 - \frac{R_{tr}}{R_d}\right)} \quad (17)$$

mit

R_{tr} Die Gaskonstante trockene Luft : $R_{tr} = 287,058 \text{ [J.mol}^{-1} \cdot \text{K]}$

ϕ relative Luftfeuchte [%]

P_s Sättigungsdruck [mbar]

P Barometrischer Druck [mbar]

R_d Die Gaskonstante von Wasserdampf : $R_d = 461 \text{ [J.mol}^{-1} \cdot \text{K]}$

Unter Berücksichtigung der Luftfeuchtigkeit wurden die Luftdichte um ca. 0,24 % und der Volumenstrom um 0,5% verändert. Diese Änderung hat keinerlei Einfluss auf die ausgewerteten Kenngrößen. Tabelle 5 stellt die Ergebnisse dar.

Tabelle 5: Einfluss der Luftfeuchtigkeit

[Kg/m ³]	[Kg/m ³]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[%]	[%]
rho_tr_luft	rho_fe_luft	q_v_bl_tr_luft	q_v_bl_fe_luft	rho_ab	q_v_ab
1,161	1,155	0,24	0,24	0,49	0,24
1,162	1,157	0,42	0,42	0,49	0,24
1,163	1,158	0,48	0,48	0,42	0,21
1,165	1,159	0,54	0,54	0,48	0,24
1,167	1,161	0,57	0,57	0,48	0,24
1,167	1,161	0,61	0,61	0,48	0,24
1,167	1,162	0,66	0,66	0,48	0,24
1,168	1,162	0,68	0,68	0,47	0,23
1,169	1,164	0,72	0,72	0,47	0,23

Der Durchflusskoeffizient C ist eine Funktion der Reynoldszahl und wird durch die Reader-Harris/Gallagher-Gleichung (1998) bestimmt.

$$C = 0,5961 + 0,0261 \cdot \beta^2 - 0,216 \cdot \beta^8 + 0,000512 \cdot \beta^{2,5} \cdot \left(\frac{10^6}{Re_{d1}} \right)^{0,7} + \left(0,0188 + 0,0063 \cdot \left(\frac{19000\beta}{Re_{d1}} \right)^{0,8} \right) \cdot \beta^{3,5} \cdot \left(\frac{10^6}{Re_{d1}} \right)^{0,3} \quad (18)$$

dabei ist:

β Durchmesser Verhältnis

Re_{d1} Reynoldszahl bezogen auf d_{Rohr}

Die Reynoldszahl bezogen auf d_{Rohr} wird wie folgt berechnet:

$$Re_d = \frac{c_{Rohr} \cdot d_{Rohr}}{\nu} \quad (19)$$

mit

c_{Rohr} mittlere Axialgeschwindigkeit des Fluids in der Rohrleitung

d_{Rohr} innerer Rohrdurchmesser

ν kinematische Viskosität des Fluids

- **Einlaufdüse**

Der Volumenstrom \dot{V} lässt sich mit Hilfe einer Viertelkreiseinlaufdüse (Bild 19) in Anlehnung an DIN EN ISO 5167-3:2003 berechnen. Das Prinzip besteht darin, dass die Strömung in einer Viertelkreisdüse durch einen abgerundeten Einlauf und ein langes zylindrisches Rohrstück gezwungen wird den Konturen zu folgen.



Bild 19: Die verwendete Viertelkreisdüse

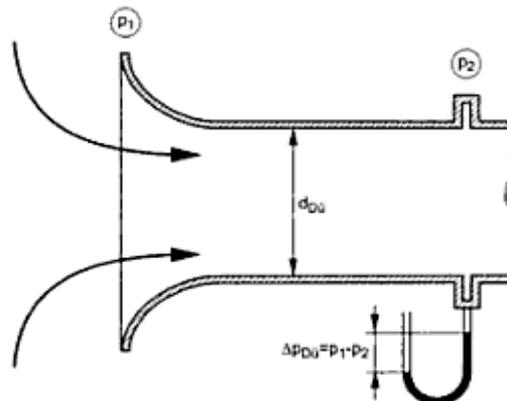


Bild 20: Schnitt der Einlaufdüse/9

Für den Volumenstrom gilt:

$$\dot{V} = A_{Rohr} \cdot c_{düse} \quad (20)$$

Mit

A_{Rohr} Fläche des Rohrs [m²]

$c_{düse}$ Die Strömungsgeschwindigkeit am Eintritt [m/s]

Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit an einer Viertelkreisdüse lässt sich gemäß der Bernoulli-Gleichung aus dem Unendlichen zu Position der Druckentnahme ermitteln:

$$\frac{c_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} = \frac{c_1^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} ; c_2 = 0 \quad (21)$$

Wurde die Gleichung nach Strömungsgeschwindigkeit umgestellt, so ergibt sich:

$$c_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_{düse}}{\rho}} \quad (22)$$

Unter Berücksichtigung der Reibungseffekt wird c_1 größer als die tatsächliche Geschwindigkeit im Rohr. Aus diesem Grund wird bei der Berechnung des Volumenstroms ein Durchflussfaktor berücksichtigt. Somit ist

$$\dot{V} = \alpha_{düse} A_{Rohr} \cdot c_{düse} \quad (23)$$

5.2 Die Drehzahlmessung

Zur Drehzahlerfassung eines 30 kW Pendelmotors wird ein magnetisch induktiver Drehzahlsensor benötigt. Der magnetisch induktive Drehzahlsensor (Bild 21) besteht aus einer Spule, einem Spulenkern und einem Permanentmagneten. Der Spulenkern und der Magnet sind magnetisch gekoppelt. Damit herrscht im Inneren der Spule ein konstanter Fluss.

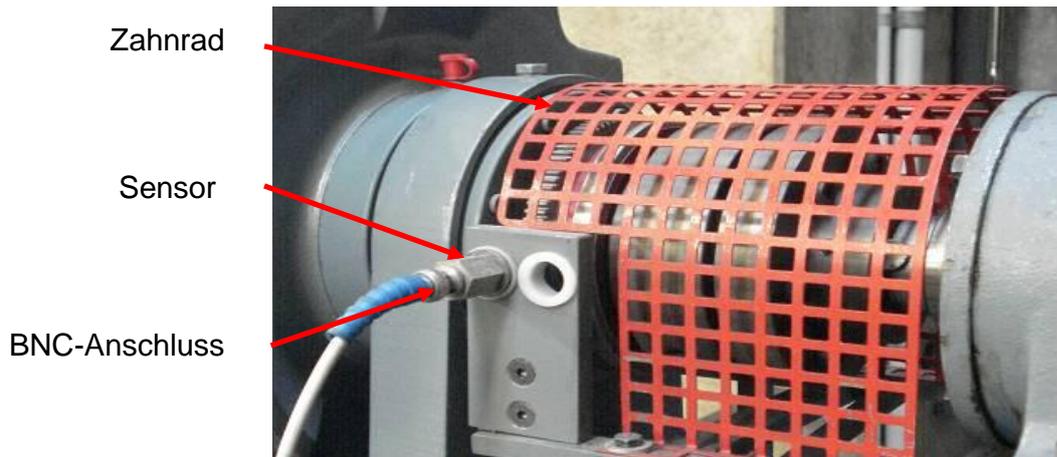


Bild 21: Magnetisch induktiver Drehzahlsensor

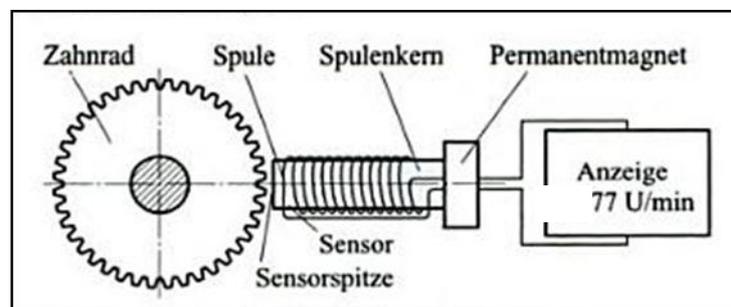


Bild 22: Prinzip eines magnetisch induktiven Drehzahlsensors

Das Prinzip (Bild 22) beruht auf dem Induktionsgesetz. Ein äußerer Permanentmagnet steht einem Zahnrad gegenüber, welches aus Eisen besteht. Das Magnetfeld greift durch den Luftspalt hindurch und schließt sich über den Körper des Zahnrads. Wenn sich das Zahnrad dreht, ändert sich der Luftspalt und damit die Flussdichte in der Spule. Dadurch wird in der Spule eine Spannung induziert, die umso größer ist, je schneller sich das Zahnrad dreht. Bild 23 zeigt schematisch die Partitionierung eines induktiven Drehzahlsensors.

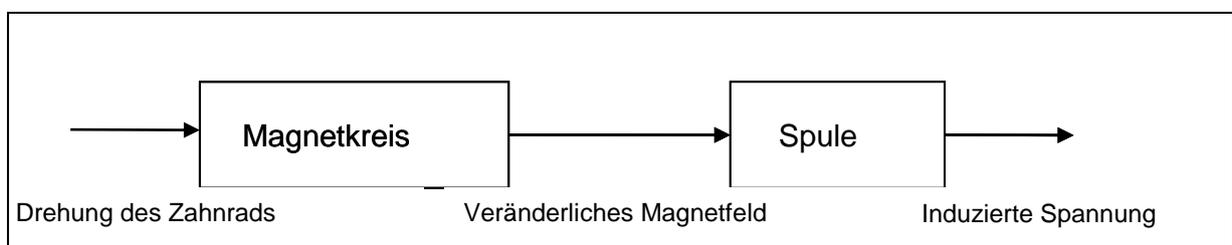


Bild 23: Schematische Partitionierung eines induktiven Drehzahlsensors

5.3 Drehmomentmessung

Zur Messung des Drehmoments wird die Wägezelle (Kraftdose) des Typs Z3H3 und der Messverstärker KWS-501-D der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik verwendet. Der Aufnehmer stützt hierbei den pendelnd gelagerten Motor über den 500 mm langen Hebelarm ab und transformiert die rotierende Bewegung in eine Zug-/Druckkraft (Bild 24). Der Messverstärker ist notwendig, um dem Aufnehmer die Brückenspeisungsspannung zu liefern und das Messsignal zu verstärken. Der Drehmomentaufnehmer kann bis zu einem maximalen Wert von $M_{\max} = 95,5 \text{ Nm}$ belastet werden. Bild 25 zeigt die prinzipielle Darstellung einer Messkette.

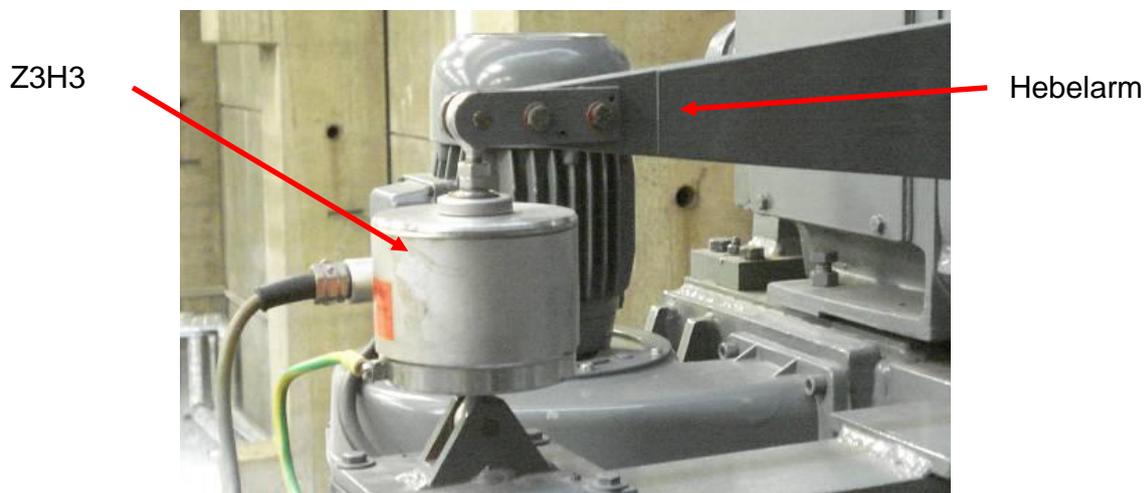


Bild 24: Kraftdose Z3H3

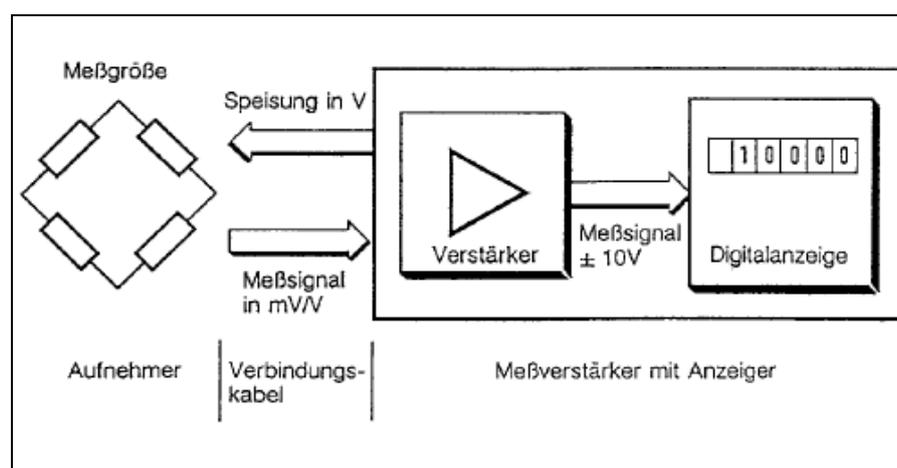


Bild 25: Darstellung einer Messkette

5.4 Temperaturmessung

Die Temperatur wird mittels eines Thermoelementsensors am Eintritt des Ventilators gemessen. Die Temperatur am Austritt wird in Abhängigkeit von der Antriebsleistung rechnerisch ermittelt.

5.5 Kalibrierung des Drehmomentsaufnehmers Z3H3

Die verwendete Messkette besteht aus einer Wägezelle (Bild 27) als Aufnehmer mit einer Nennlast (Maximallast) von 20 kg (95 Nm) und dem 5 kHz-Trägerfrequenz-Messverstärker K50 mit Digitalanzeige (Bild 26).

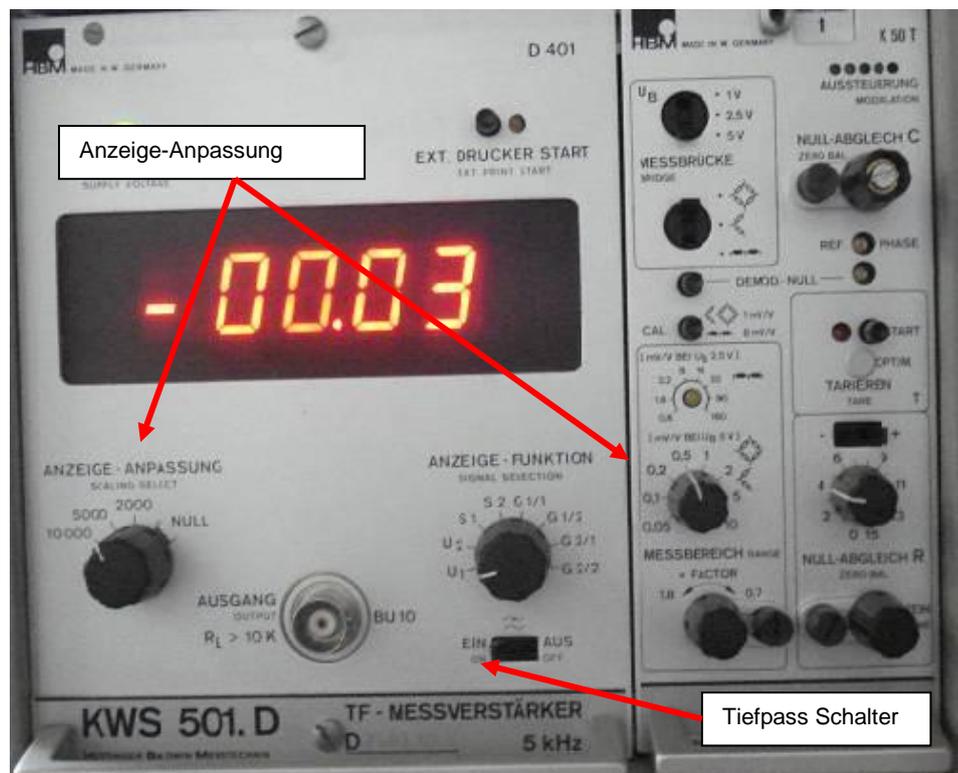


Bild 26: Frontplatte des Verstärkers



Bild 27: Wägezelle Z3H3

Der Messgrößenaufnehmer Z3H3 der Firma HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK wurde mit einer definierten mechanischen Last beaufschlagt. Hierbei wurde der Aufnehmer mit 2 kg, 5 kg und schließlich mit 10 kg beaufschlagt. Zunächst wurden die Bereiche des Verstärkers so eingestellt, dass die Messwertanzeige auf einen Wert mit der Messgröße in einem zahlenmäßig leicht überschaubaren Zusammenhang steht. Bei den Belastungen 2 kg, 5 kg und 10 kg zeigt die Verstärkeranzeige einen definierten Wert an. Die Digital-Anzeige lässt sich ziffernmäßig an den physikalischen Nennbereich des Aufnehmers anpassen. Tabelle 4 zeigt die drei einstellbaren Empfindlichkeiten des Verstärkers:

Tabelle 6: Verstärker Einstellung

mV/V	[kg]	[dig]
Empfindlichkeit	Belastung	Anzeigebereich
0,2	2	2000
0,5	5	5000
2	10	10000

Wurden die Empfindlichkeiten und der Anzeigebereich nicht angepasst, so werden die Werte verfälscht aufgezeichnet. Diagramm 2 zeigt ein Beispiel in dem die Einstellung nicht ordnungsgemäß angepasst wurde.

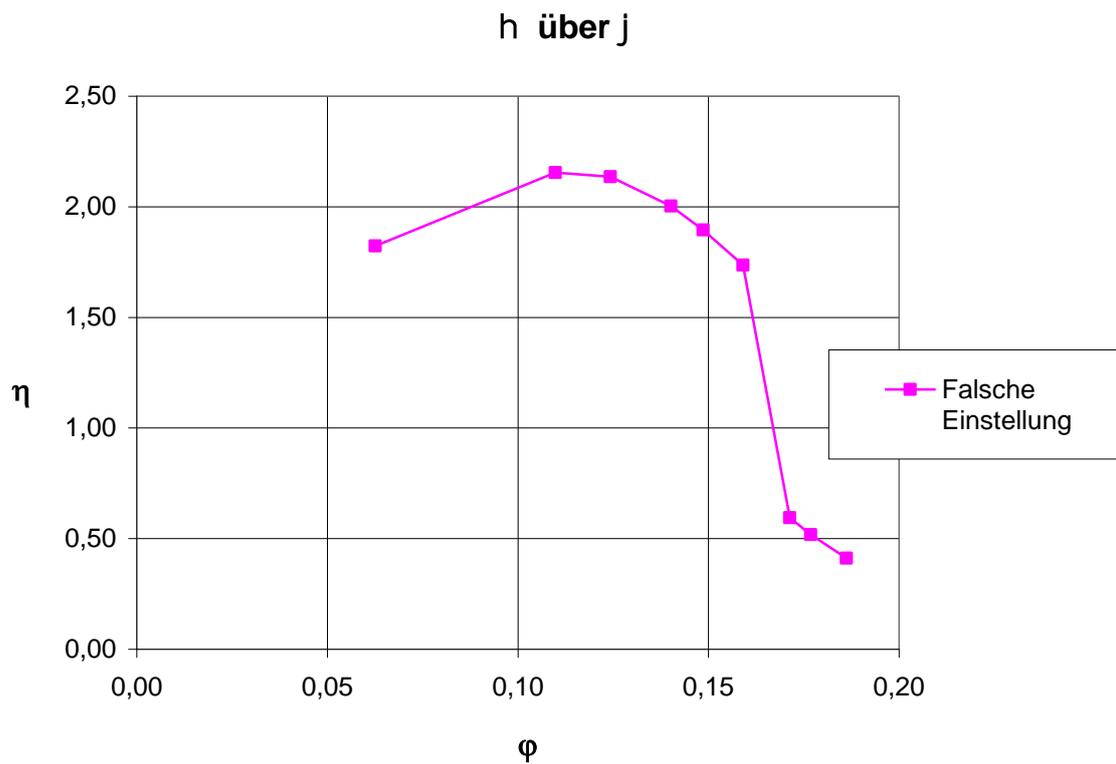


Diagramm 2: Wirkungsgrad über Durchflusszahl bei falschen Einstellungen

Nach der genauen Einstellung des Messverstärkers wurde die Wägezelle für die drei einstellbaren Empfindlichkeiten kalibriert. Dabei wurden definierte Massen mit einem Haken an dem Aufnehmer befestigt. Durch die Zugkraft wird ein schwaches Spannungssignal erzeugt, welches unter dem Einsatz eines Trägerfrequenzmessverstärkers verstärkt und wiederum ausgegeben wird. Die folgenden Diagramme 3, 4 und 5 fassen die Ergebnisse zusammen.

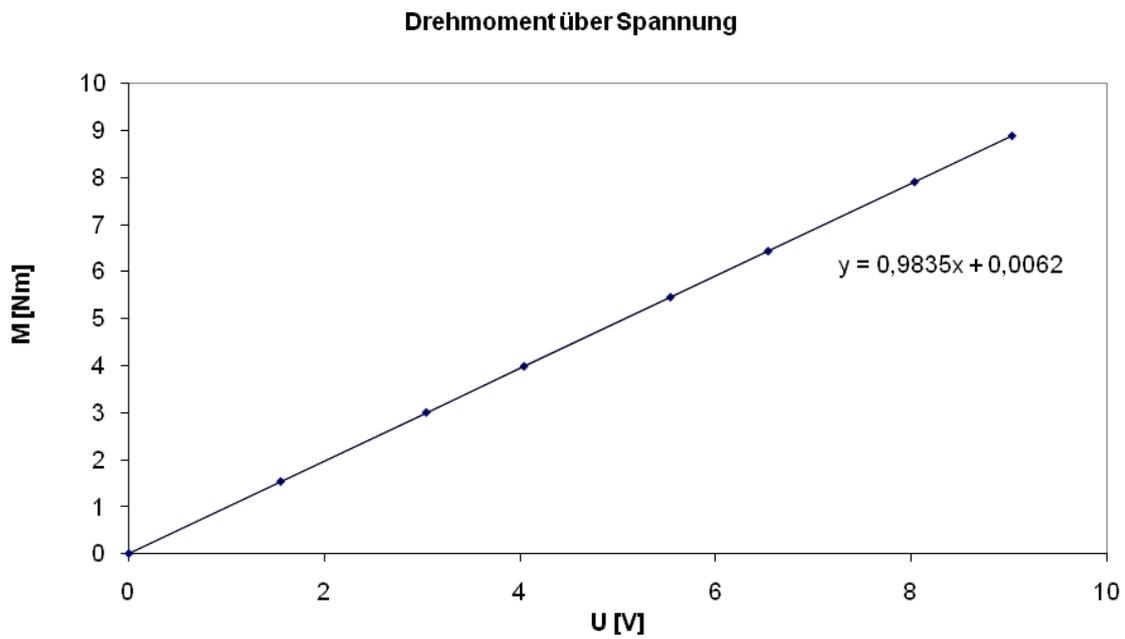


Diagramm 3: Drehmoment über Spannung für die Empfindlichkeit 0,2 mV/V

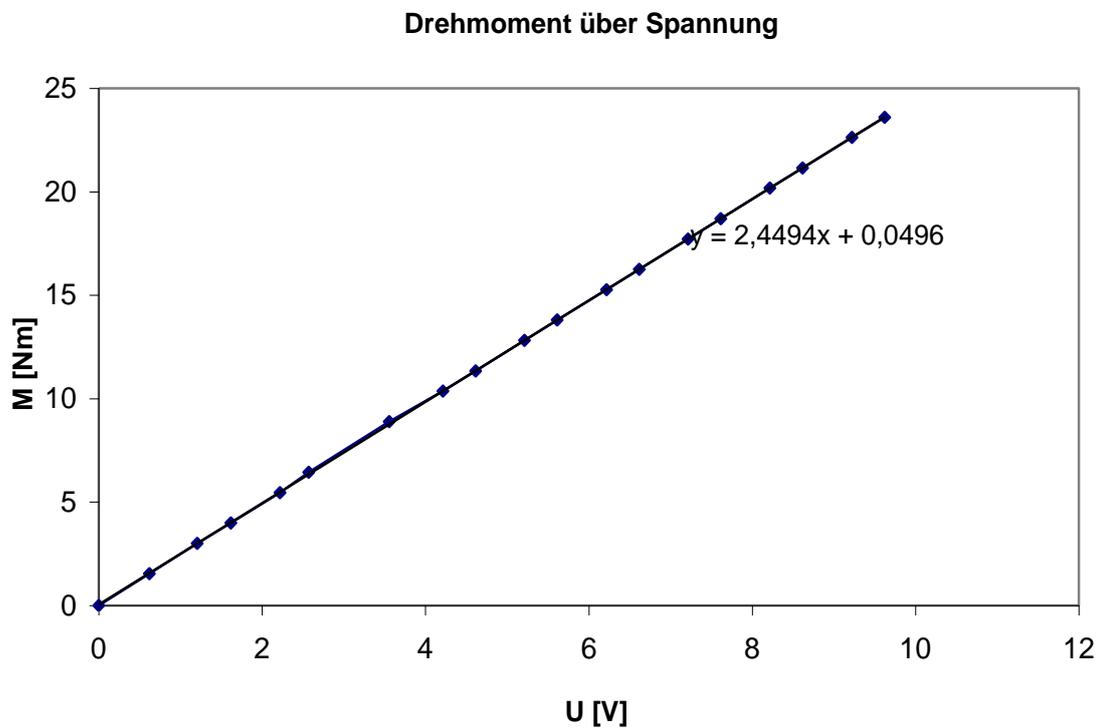


Diagramm 4: Drehmoment über Spannung für die Empfindlichkeit 0,5 mV/V

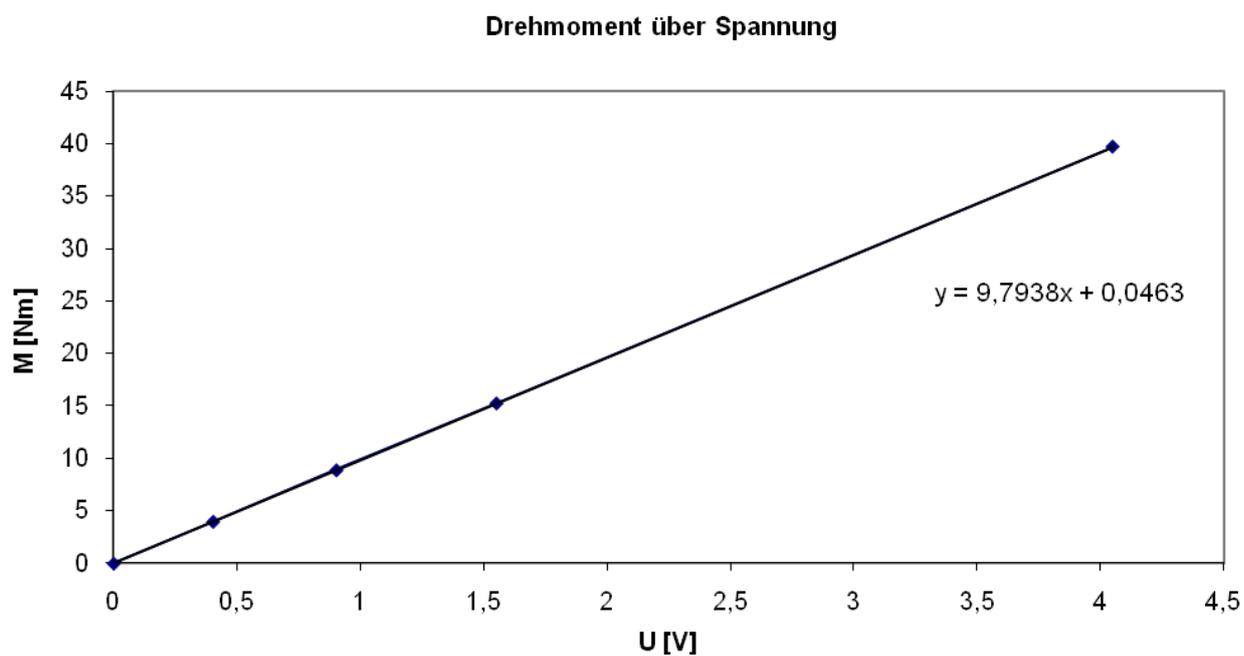


Diagramm 5: Drehmoment über Spannung für die Empfindlichkeit 2 mV/V

6 Messdatenerfassungssystem

Für die aerodynamische Leistungsvermessung an einem Radialventilatorprüfstand werden Datenerfassungssysteme eingesetzt, welche die Messdaten von verschiedenen analogen Sensoren in geeigneter Weise verarbeiten und in digitale Werte umwandeln. Das Messdatenerfassungssystem besteht aus einer Messkette und einem Rechner. Anhand der im Bild 28 dargestellten Komponenten, wird die Messkette realisiert.

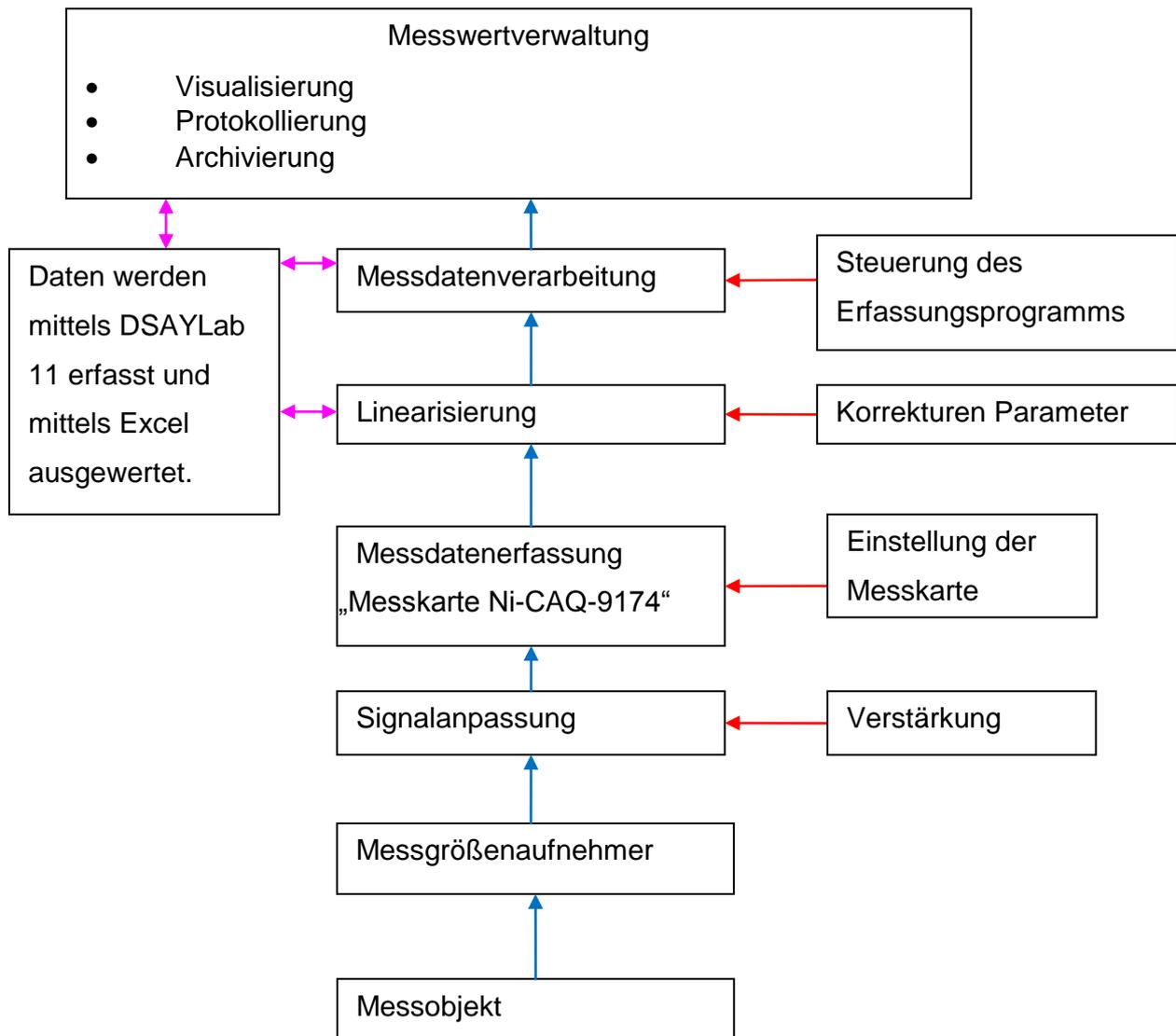


Bild 28: Messdatenerfassungssystem

6.1 Messkarte NI-cDAQ-9174

Die Messkarte ist ein NI-CompactDAQ-Chassis (Bild 29) mit vier Steckplätzen, das sich für kompakte Prüfsysteme mit gemischten Signalen eignet. Dies ermöglicht Messungen mit unterschiedlichen Sensoren bei verschiedenen Abtastraten, anstatt mit nur einer Abtastrate für alle Kanäle. Hinsichtlich der Funktion wird die Programmierung vereinfacht, denn Messungen mit geringer Geschwindigkeit können so von Hochgeschwindigkeitsmessungen getrennt werden. Demzufolge entfällt ein mehrfaches Abtasten oder das Löschen nicht benötigter Daten.

Mit Hilfe der Messkarte werden die Messgeräte über eine USB-Schnittstelle mit dem Rechner verbunden.

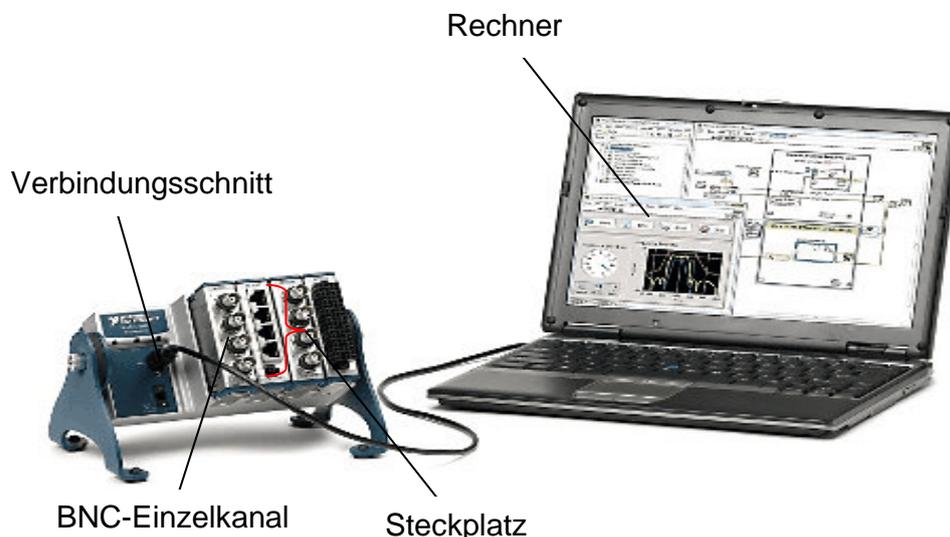


Bild 29: Messkarte mit Rechner

Zur Konfiguration und Überprüfung der Messkarte kommt die Software Measurement & Automation Explorer (MAX) zum Einsatz. Das Bild 30 zeigt die Frontseite der Software. Zunächst wird im Measurement & Automation Explorer für die Messkarte eine neue NI-DAQmx TASK [1] (Bild.30) erzeugt. Diese besteht aus zwei Slots, wobei jeder Slot 4 Kanäle beinhaltet. Unter [2] (Kanaleinstellungen) lassen sich die einzelnen Kanäle hinzufügen bzw. löschen. Der Hauptvorteil besteht darin, dass eine separate Einstellung der einzelnen Kanäle erfolgen kann. Im Gegensatz zu der alten Messkarte, welche im Rechner integriert war, werden die erfassten Kenngrößen bei der neuen Messkarte einzeln modifiziert. Somit kann man für jeden Kanal die passende Einstellung eingeben werden (den spezifischen Signaleingangsbereich [3]). Außerdem müssen die Timing-Einstellung [4] und [5] im Vorfeld

gewählt werden. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass diese Einstellung mit denen im Datenerfassungsprogramm übereinstimmen.

Je nach Konfiguration stehen unterschiedliche Timing-Modi zur Verfügung:

- 1 Sample (on Demand): es wird nur ein Wert erfasst oder ausgegeben.
- 1 Sample (HW-getaktet) : es wird eine bestimmte Taktflanke erfasst oder ausgegeben.
- N Sample: legt fest, dass die Sample-Anzahl der Einstellung von zu lesende bzw. zu schreibende Samples entsprechen soll.
- Kontinuierlich: die Daten werden erfasst oder ausgegeben, bis die Task angehalten wird.

Der Treiber NI-DAQmx übernimmt aus der Measurement & Automation Explorer (MAX) alle gültigen Tasks und stellt diese den Modulen zur Verfügung. Der Vorteil ist, dass die nicht mehr gültigen Tasks zu keiner Unterbrechung der Messung führen, sondern nicht übernommen und stattdessen in der Treiber-Information aufgelistet werden. Ganz wichtig ist es, dass nach jeder Änderung der Einstellungen unter dem Measurement & Automation Explorer (Bild 30), zunächst die DASyLab Software zu schließen und neuzustarten. Falls kein Neustart durchgeführt wurde, bleiben die alten Einstellungen in DASyLab hinterlegt bzw. die neuen Einstellungen werden nicht übernommen.

Im Bild 31 wurden die Positionen der einzelnen angeschlossenen Kanäle dargestellt.

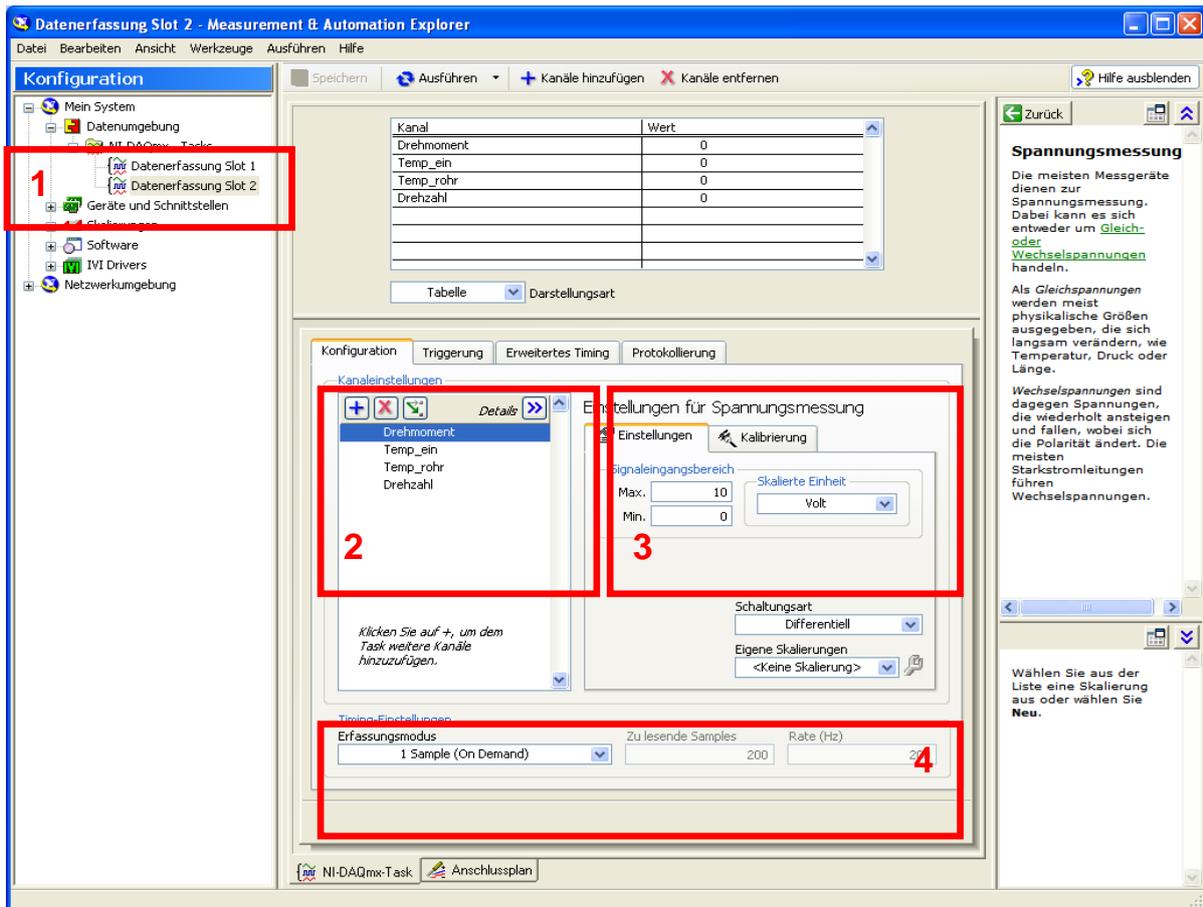


Bild 30: Frontseite der Measurement & Automation Explorer

- | | |
|--------------------------------|-----------------------|
| 1. Die erzeugte NI-DAQmx-Tasks | 2. Kanaleinstellungen |
| 3. Signaleingangsbereich | 3. Erfassungsmodus |

Slot 1

1. dp_{Blende}
2. dp_{Baro}
3. $dp_{düse}$
4. dp_{aus}



Slot 2

1. Drehmoment
2. T_{ein}
3. T_{Rohr}
4. Drehzahl

Bild 31 Anschluss der einzelnen Kanäle an der Messkarte

Die Messgrößen dp_{Blende} , dp_{aus} , wurden über das Zweikanal- Betriebsgerät (PR 4000B-F) (Bilder 32) als gefiltertes Signal jeweils über den EXTERN-Anschluss (Pin 6: Signaleingang) ausgegeben (Bild 33). Diese wird vorher im Aufnehmer verstärkt, demoduliert und in ein

stabiles 0-10 V DC Ausgangssignal umgewandelt. Des Weiteren wird der barometrische Druck dp_{Baro} als Rohsignal über den EXTERN-Anschluss (Pin 4: Monitorausgang) an die Messkarte weitergegeben (Bild 33).

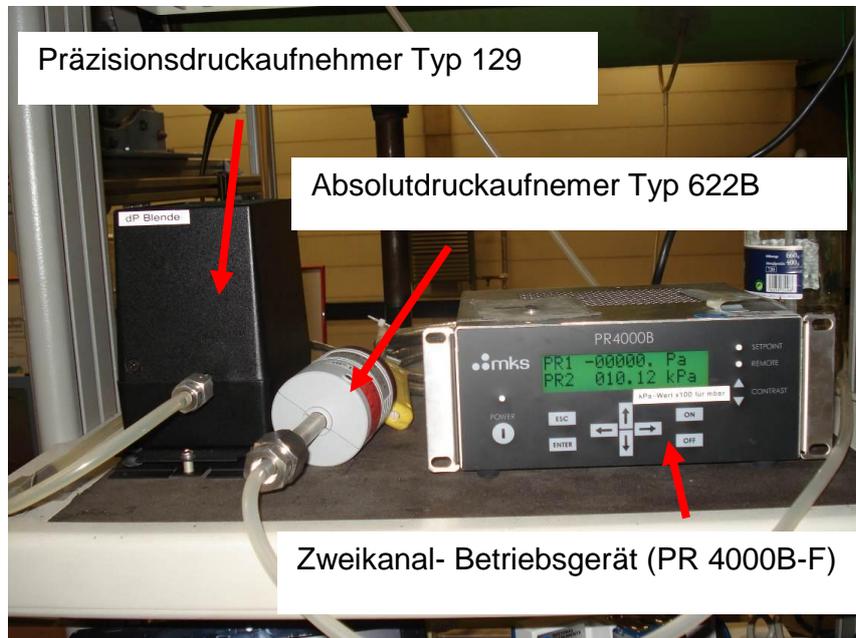


Bild 32: MKS Messgeräte

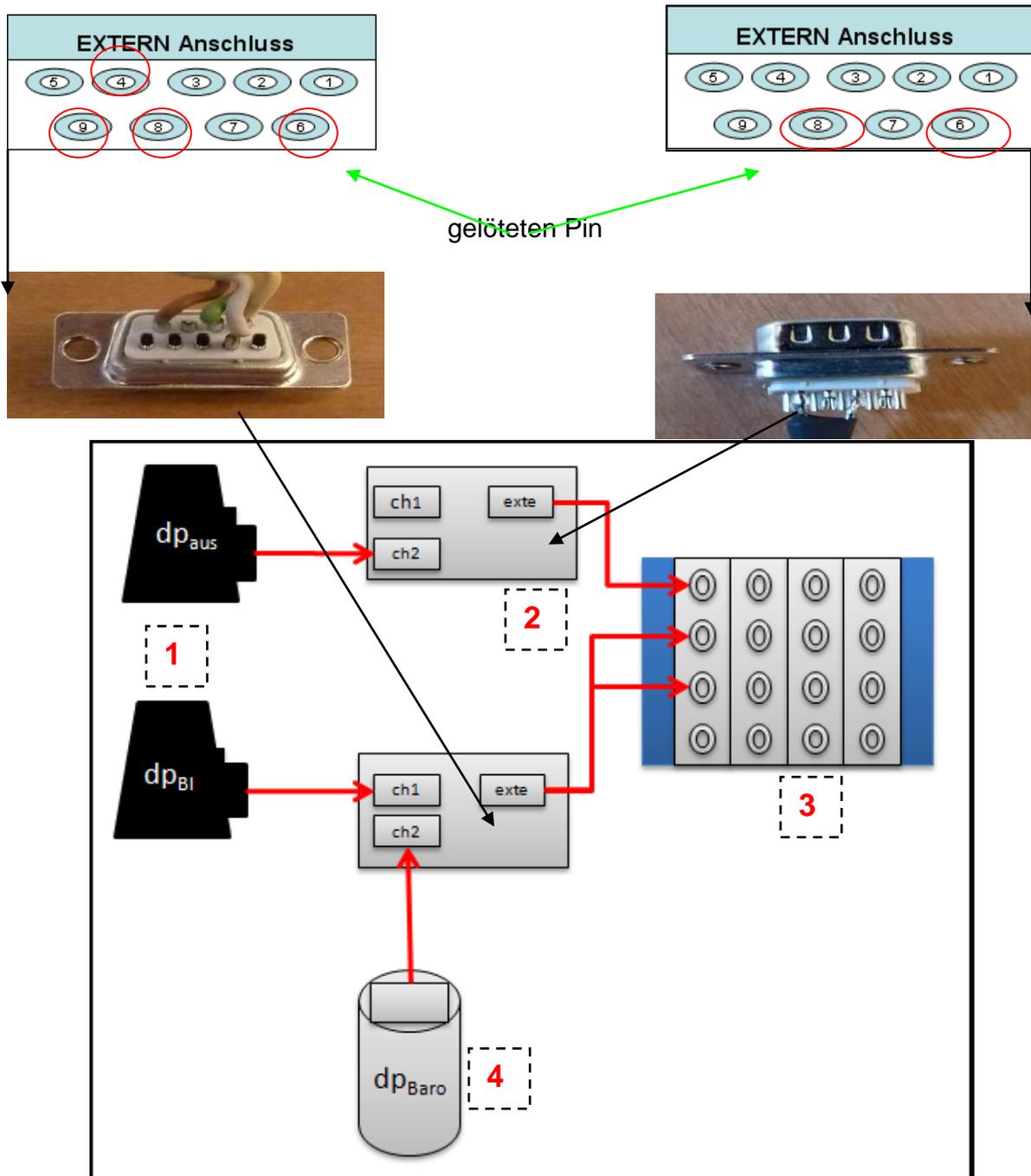


Bild 33: Messkette der Druckerfassung

1. Präzisionsdruckaufnehmer Typ 120
2. Druckaufnehmermonitor PR 4000B-F
3. Messkarte NI-cDAQ-9174
4. Absolutdruckaufnehmer Typ 622B

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die unterschiedlichen Erfassungsmodi untersucht. Dafür wird zur Messdatenerfassung eine Digital-Analogmesskarte (NI USB-6008) der Firma National Instruments verwendet, diese bietet 8 analoge Eingänge(12 bit) und 2 analoge Ausgänge mit jeweils 12 Bit Auflösung, daneben 12 digitale Ein/Ausgänge und einen Zähler- bzw. Triggereingang (Bild 34).Die zusätzliche Messkarte wird dazu verwendet die Einstellungen zu verifizieren, um die Schwankungen der Messgröße rauszumitteln. Hierzu wird die D/A Wandlerkarte über eine USB-Schnittstelle angeschlossen. Durch die Messkarte wird ein Wechselsignal generiert, welches an die BNC Breakout-Box übergeben wird. Der entsprechende Versuchsaufbau wird in Bild 35 dargestellt.



Bild 34: Datenerfassungssystem NI USB-6008 /12

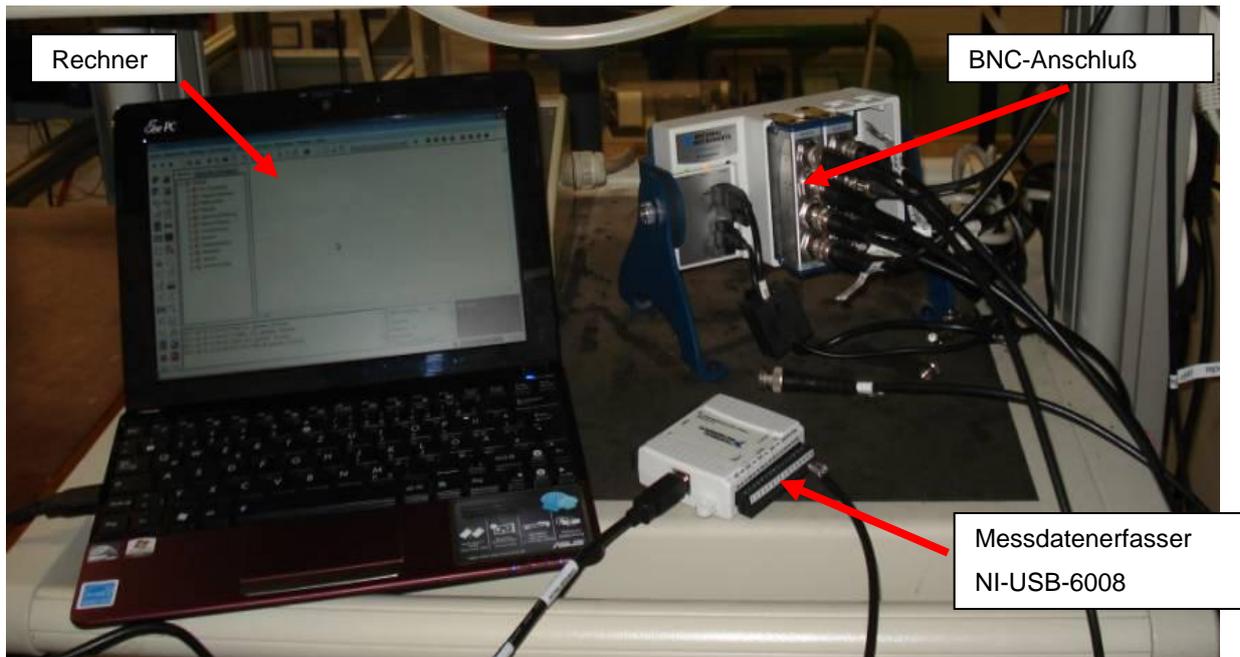


Bild 35: Versuchsaufbau zur Ausgabe von Analogensignal

Nach dem Einrichten der Geräte wird mittels DasyLab 11 ein Schaltbild zur analogen Signalausgabe angefertigt (Bild 36). Zu Simulationszwecken wird zunächst ein Rauschen mit einer Amplitude von 0,5 V und einem Offset von 3 V mit Hilfe eines Generators erzeugt. Das generierte Spannungssignal wird zunächst als Zeitrohsignal eingelesen und dann mit Hilfe eines Formelinterpreters zu einer physikalischen Größe umwandelt.

Die Messdaten werden im Anschluss gemittelt und dann direkt in Excel wergeschrieben.

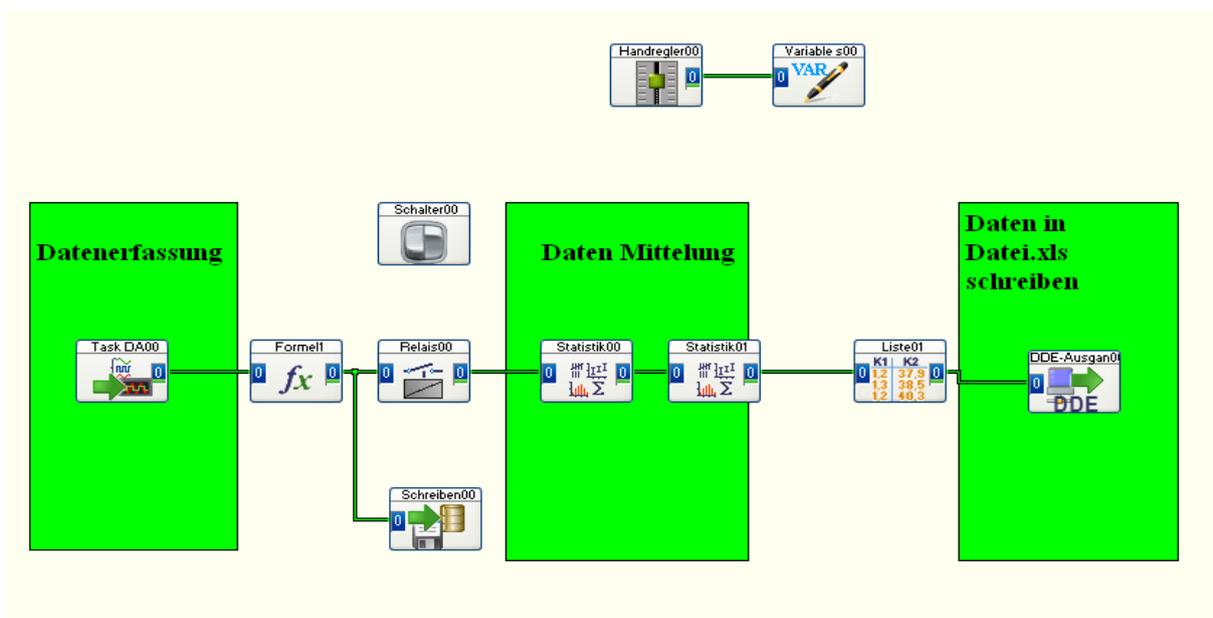


Bild 36: Untersuchungen der Erfassungsmodi

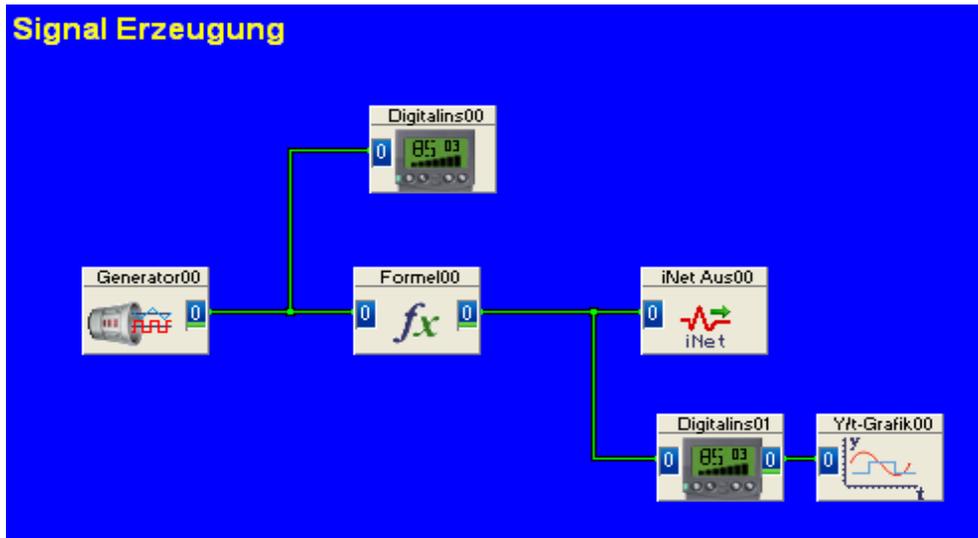


Bild 37: Erzeugung des Rauschens

Untersucht werden folgende Einstellungen:

Tabelle 7: Erfassungsmodus

Erfassungsmodus	Zu lesende Samples	Rate	Anzahl der Mittelungen
1Sample (on Demand)	1	1	10-120
1Sample (on Demand)	200	200	10-120
Kontinuierlich	200	200	10-120
Kontinuierlich	1000	1000	10-120

Die folgenden Diagramme stellen die Ergebnisse der Untersuchungen dar:

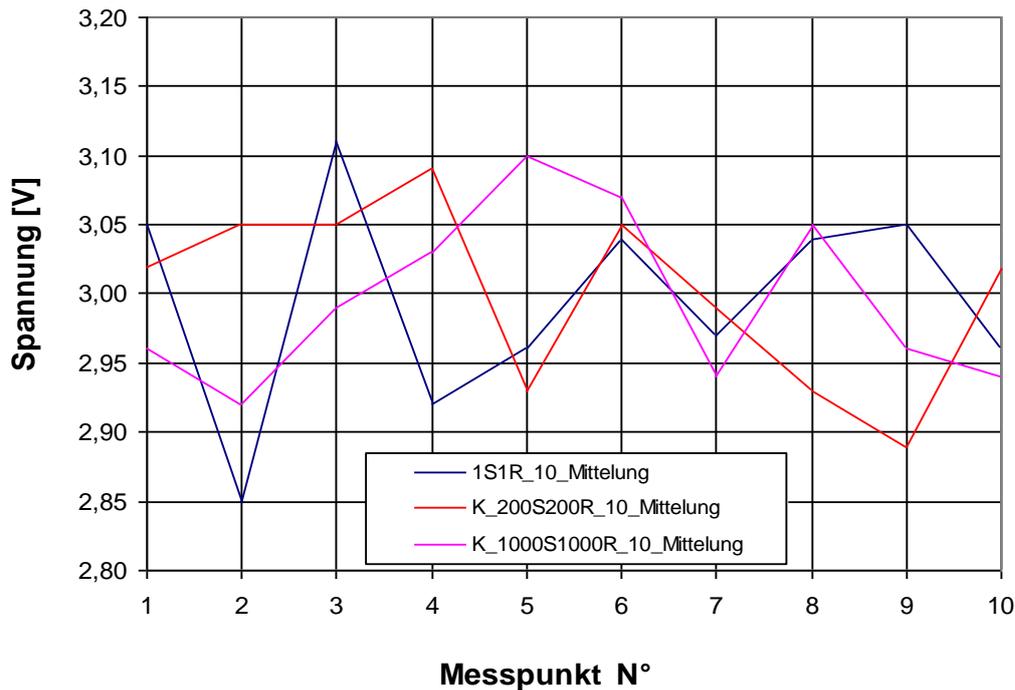


Diagramm 6: Schwankungen der gemittelten Werte (10 Mittelungen)

Im Diagramm 6 sind die gemittelten Spannungswerte aufgetragen bei unterschiedlichen Erfassungsmodi, wobei die Messdaten jeweils über zehn Blöcke gemittelt wurden.

Erfassungsmodus 1 Sample (on Demand) bedeutet, dass ein Wert innerhalb einer Sekunde abgetastet wird, also 1 Sample bei einer Rate.

Bei dieser Einstellung ist klar zu erkennen, dass der Schwankungsbereich der Messgröße ca. $\pm 0,15$ V beträgt, somit konnte die eingestellte Amplitude auf ein Viertel reduziert werden. Außerdem wurde festgestellt, dass unter dem Erfassungsmodus 1 Sample on Demand die Einstellung der Ratezahl ohne Bedeutung ist. Denn es wird einfach immer nur derselbe Wert entsprechend der Rate ausgegeben. Wird der Erfassungsmodus kontinuierlich und die Einstellung 200 Sample, 200 Rate verwendet, so wird ein Schwankungsbereich der Amplitude von ca. $\pm 0,1$ V erreicht. Im Gegensatz zur vorherigen Einstellung werden hierbei 200 Werte innerhalb einer Sekunde erfasst und wieder ausgegeben. Ferner wird die Abtastrate in einem weiteren Schritt von 200 auf 1000 erhöht. Die Schwankungsbreiten bei den jeweiligen Erfassungsmodi kann aus Diagramm 6 entnommen werden. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die eingestellten Mittelungszeiten bzw. die Anzahl der Blöcke ungenügend waren, um die eingestellte Schwankung von 0,5 V rauszumitteln.

Aus diesem Grund werden im Folgenden Messungen bei einer höheren Mittelungsanzahl bzw. eine größere n Anzahl von Blöcken durchgeführt. Bei Gleicher Einstellung der Abtastrate und der Blockgröße wird dadurch die die Mittelungsdauer erhöht.

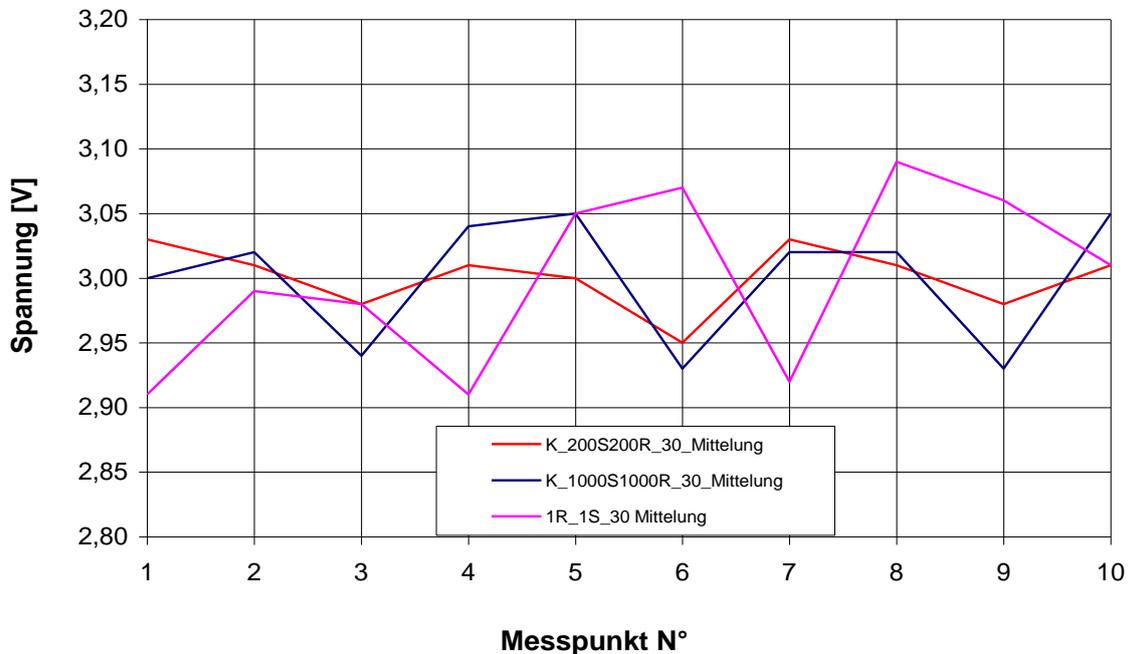


Diagramm 7: Schwankungen der gemittelten Werte (30 Mittelungen)

Durch die Veränderung der Mittelungszeit konnte der Streuungsbereich der gemittelten Spannungswerte, wie in Diagramm 7 zu erkennen, reduziert werden. In diesem Zusammenhang konnte bei dem Erfassungsmodus 1 Sample on Demand der Schwankungsbereich der Amplitude (1Rate_1Sample_30_Mittelung) von 0,5 V auf $\pm 0,09$ V reduziert werden. Hingegen wurde die Amplitude bis auf $\pm 0,04$ V verringert, wenn die Anzahl der erfassten Werte innerhalb einer Sekunde erhöht wurde. Bsp. (Kontinuierlich_200Rate_200Sample_30Mittelung aus dem Diagramm 7).

Zunächst wurde die Anzahl der zu mittelnden Werte innerhalb eines Blocks variiert, um die optimale Einstellung herauszufinden. Im Anschluss daran wurde eine Variierung der Blockanzahl untersucht, wodurch die erforderliche Mittelungszeit verifiziert wurde. Die Diagramme 8 und 9 zeigen deutlich, dass je größer die eingestellte Anzahl der Blöcke ist, desto geringer wird der Streuungsbereich der gemittelten Messgrößen. Weitere Überprüfungen werden im Anhang B dargestellt.

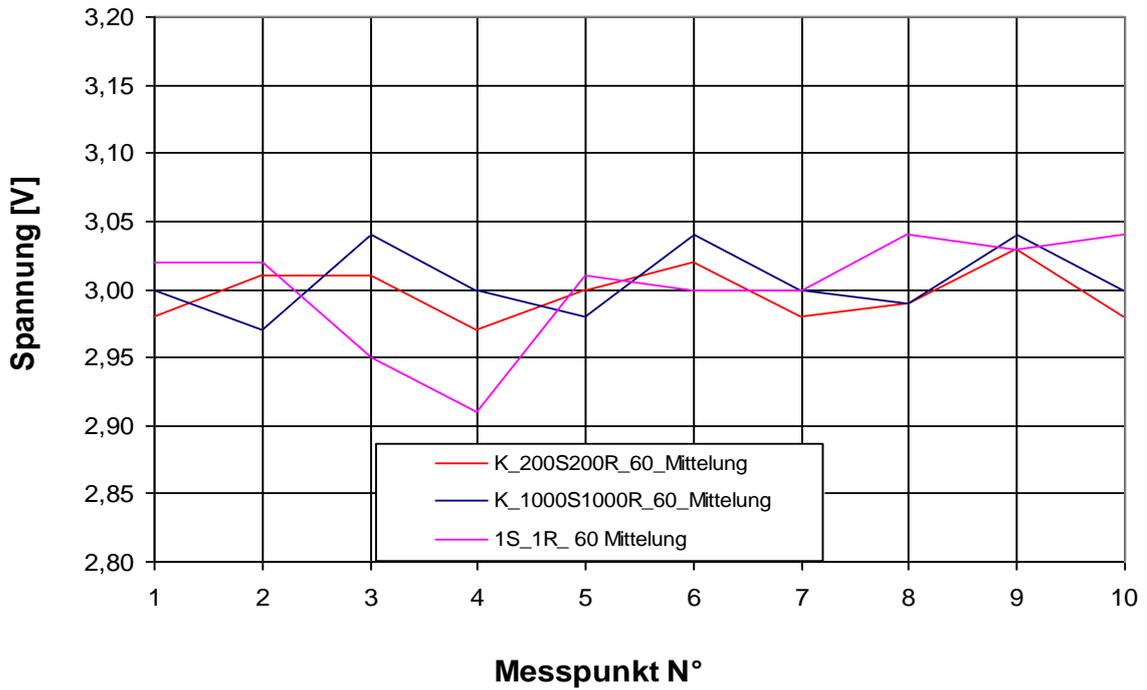


Diagramm 8: Schwankungen der gemittelten Werte (60 Mittelungen)

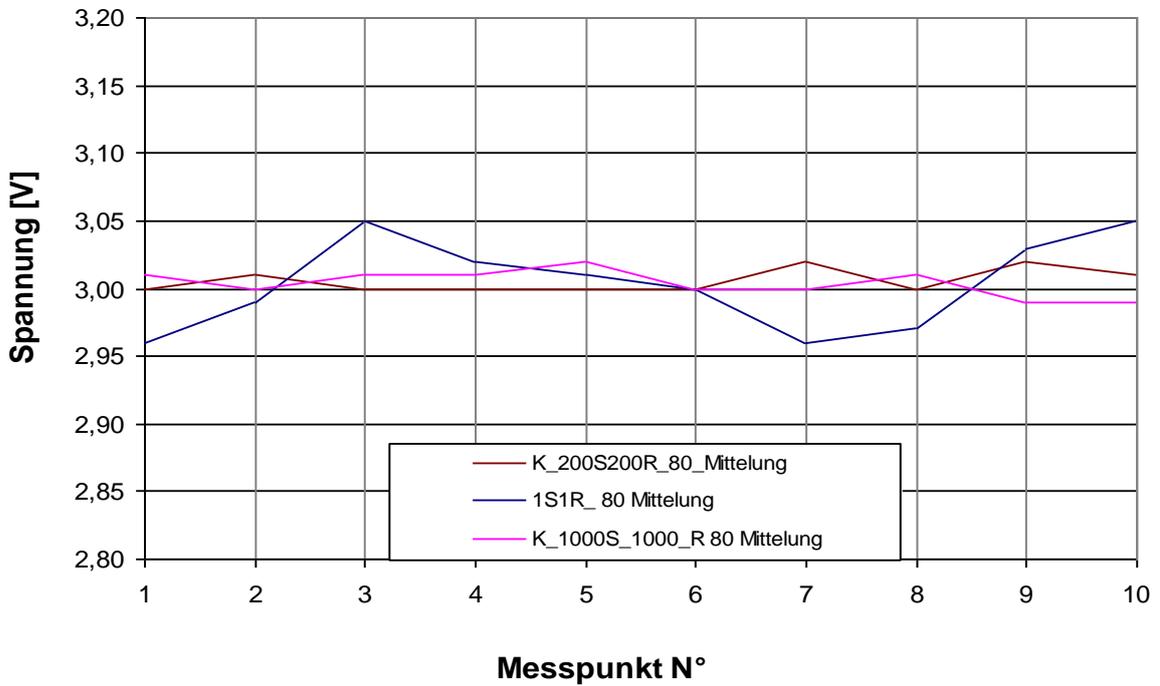


Diagramm 9: Schwankungen der gemittelten Werte (80 Mittelungen)

Zusätzlich zu der Überprüfung der Einstellungen für die Anzahl der Messpunkte und der zu mittelnden Blöcke respektive der Mittelungsdauer wurde auch untersucht, ob die ausgelesenen Messdaten nicht aus dem Puffer erfasst werden. Dieser Aspekt wurde insbesondere analysiert unter dem Erfassungsmodus „Kontinuierlich“. Aus diesem Grund wurden die erfassten Messgrößen vor und nach der Mittelung weggeschrieben. Die reinen Zeitrohdaten wurden unter dem Modul Datei schreiben erfasst. Hingegen die gemittelten Daten werden direkt in Excel unter Verwendung des DDE-Moduls weggeschrieben. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass sofort nachdem das Modul Relais eingeschaltet wurde, die aktuellen Daten durch die NI-Karte bereitgestellt und weitergeleitet wurden. Folglich variierte man das Eingangssignal, um den Unterschied zwischen den einzelnen Versuchen aufzuklären. Die Bilder 38 und 39 zeigen, dass die erhaltenen Mittelwerte mit den entsprechenden Rohdaten der aktuell eingestellten Schwankungsgröße übereinstimmten. Somit konnte ausgeschlossen werden, dass Wertepaare aus dem Puffer mit in die Mittelung einfließen. Weitere Darstellungen wurden im Anhang A beigefügt.

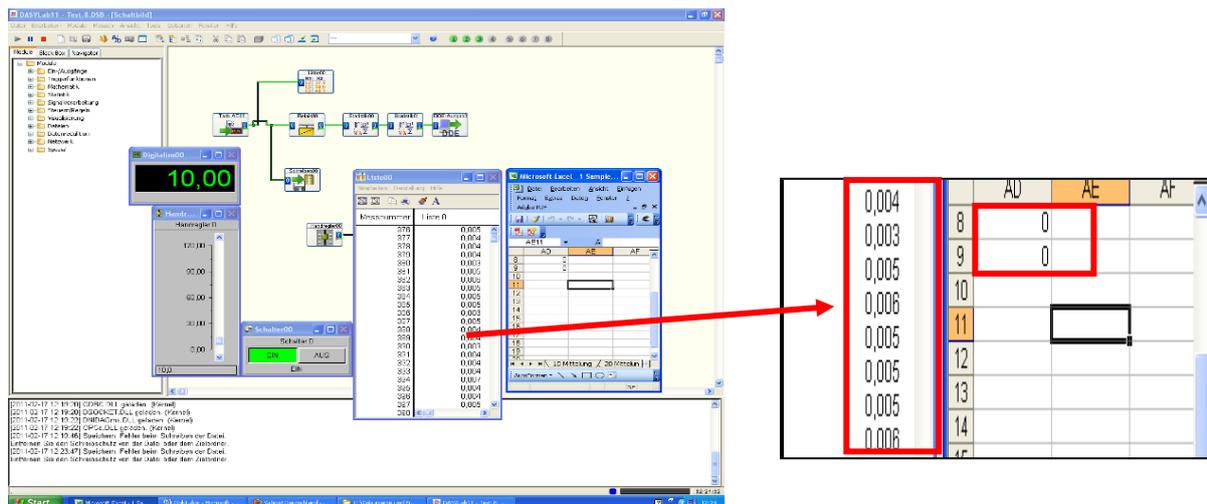


Bild 38: Vergleich zwischen Rohdaten und der Mittelwert (0 V)

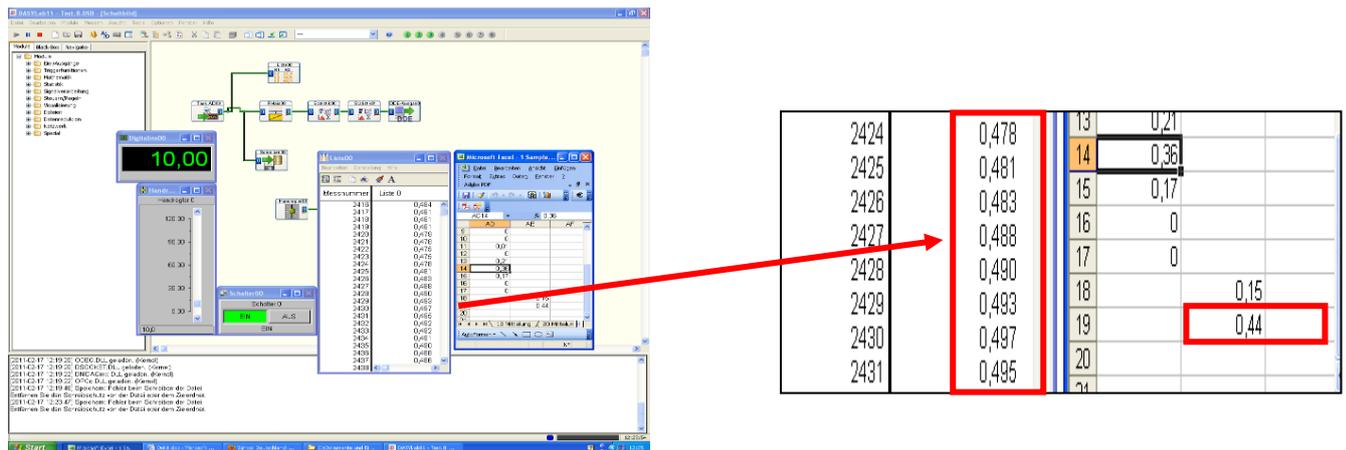


Bild 39: Vergleich zwischen Rohdaten und der Mittelwert (0,5 V)

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine ausreichende Anzahl der Mittelungen vor der Auswertung der Messgrößen und der optimale Erfassungsmodus notwendig sind, um eine entsprechende Verlässlichkeit der Daten zu gewährleisten. In unseren Fall bedeutet dies eine Mittelung über 30 Blöcke, wobei 200 Messwerte mit einer Abtastrate von 200 Hz innerhalb des Erfassungsmodus „Kontinuierlich“ aufgezeichnet werden. Diese Einstellungen wurden entsprechend gewählt, da der Mittelungszeitraum eine wichtige Rolle spielt also „lange genug“.

6.2 Erstellung des Datenerfassungsprogramms mittels DASYLAB

6.2.1 Alpha-Wert und Kenngrößenschwankungen Schaltbild

Zur Erfassung der aerodynamischen Kenngrößen ist ein Schaltbild mittels der Software DasyLab erstellt worden. Die Hauptaufgabe von DasyLab ist die Darstellung der Basis des virtuellen Instruments, welches uns erlaubt, die Verarbeitung der erfassten aerodynamischen Kenngrößen frei zu bearbeiten. Bedingt des modularen Aufbaus von DasyLab wird diese in vielfältigen Messsituationen eingesetzt. Außerdem fällt die komplizierte Programmierung der Messerfassung nicht an, wie sie häufig bei anderen professionellen Programmen vorkommt. Im Rahmen dieser Arbeit sind zwei Datenerfassungsprogramme erstellt worden. Das erste Schaltbild (Bild 40) dient zur Alpha-Wert-Bestimmung sowie zur Schwankungsuntersuchung der Messgrößen (Ausführungen zur Alpha-Wert Bestimmung wird in Kapitel 9 detailliert erläutert). Die Schwankungsuntersuchungen werden vor der Mittelung durchgeführt, d.h. nach dem die Messwerte aufgezeichnet und in physikalische Größen, mit Hilfe eines Formelinterpreters, umgewandelt wurden.

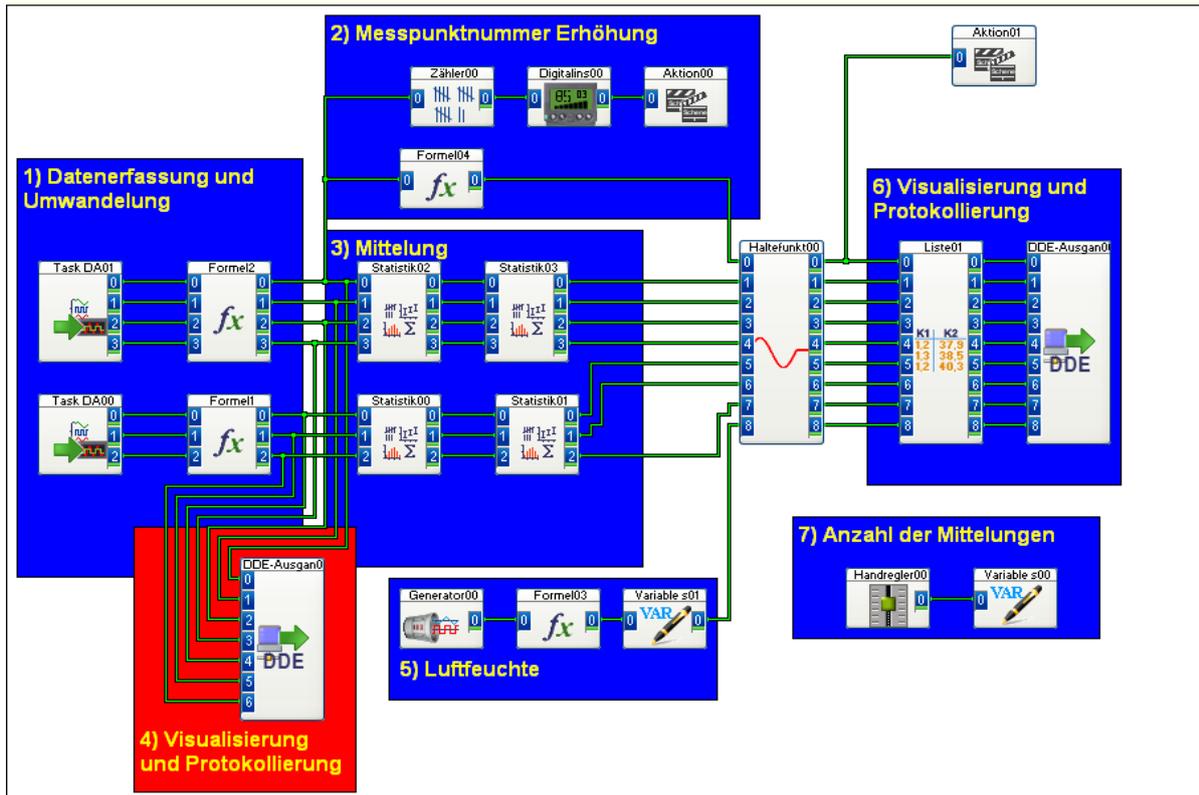


Bild 40: Alpha-Wert und Schwankungsuntersuchungsprogramm

1. Datenerfassung und Umwandlung in physikalischen Größen
2. Messpunktnummer Erhöhung
3. Messdaten Mittelungen
4. Messdaten Übergabe an Excel von kalibrierte Rohdaten
5. Berechnung der Gaskonstante
6. Messdaten Übergabe an Excel (gemittelte Messdaten)
7. Anzahl der Mittelungen bzw. Dauer der Messung einstellen

Die gemittelten Messgrößen werden durch das Modul DDE-Ausgang zu anderen Windows-Anwendungen (Excel), über die DDE-Schnittstelle (**D**ynamic **D**ata **E**xchange) übergeben. Dabei muss die Kommunikation zwischen DasyLab 11 und Excel als erstes eingerichtet werden. Im nachfolgenden werden die notwendigen Einstellungen, welche zur Kommunikationseinrichtung notwendig sind, ausführlich dargestellt.

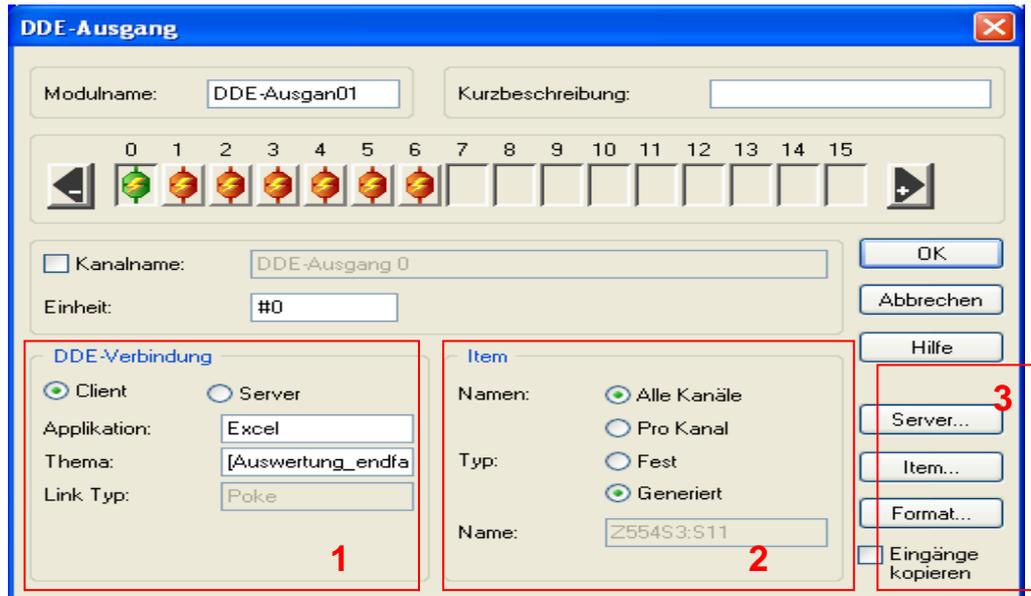


Bild 41: Einstellung des Moduls DDE-Ausgang

Unter DDE-Verbindungen [1] in Bild 41 wird der Empfänger der zu sendenden Messwerte festgelegt. Ist DasyLab als DDE-Client gewählt worden, so muss zuerst der Server eingerichtet werden. Dies wird im Bild 42 dargestellt.

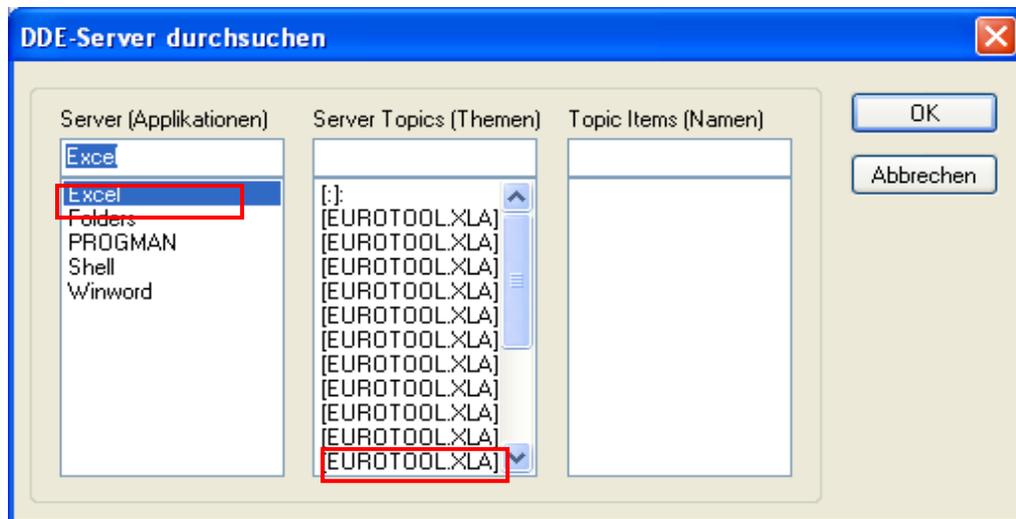


Bild 42: Einstellung des Servers

Nachdem der Server eingerichtet wurde, werden die Zielspalten bzw. Zielzeilen in Excel festgelegt. Über den Button **Item** [3] im Bild 41 öffnet sich die Dialogbox DDE-Item (Bild 43).

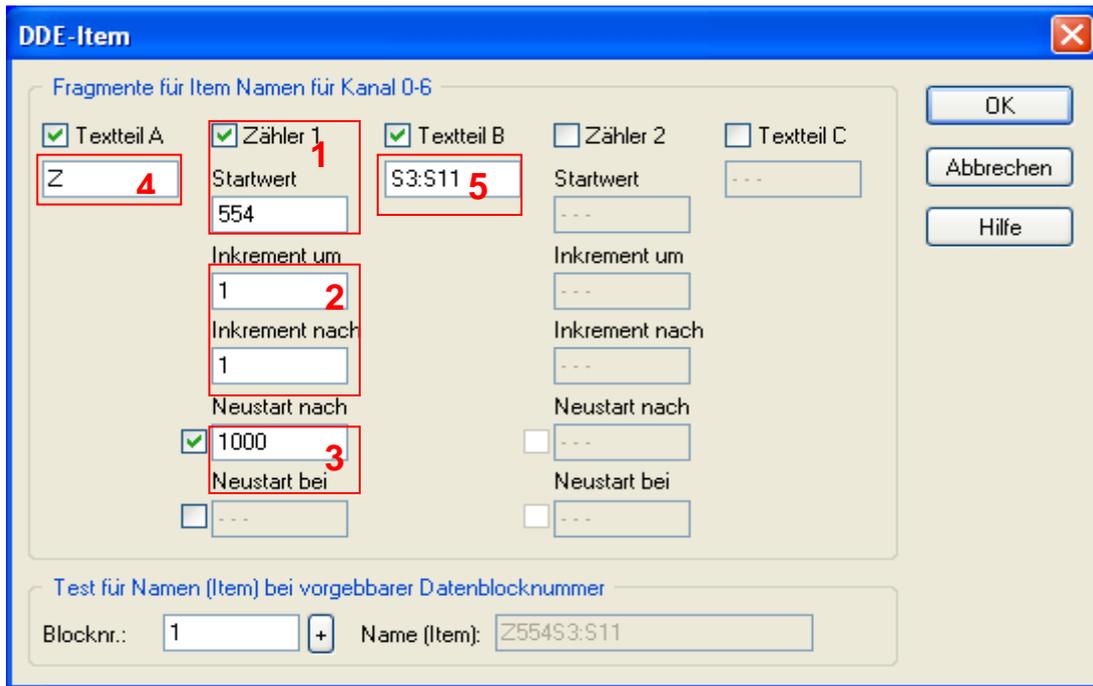


Bild 43: Einstellung des DDE-Items

Hier können pro Zähler die Startwerte für den Anfang der Messung angegeben werden [1]. Zusätzlich ist eine Angabe der Datenblockanzahl, um wie viel diese den Zähler erhöhen soll (Inkrement um / Inkrement nach), möglich. Außerdem kann die Einstellung erfolgen, ob der Zähler nach Erreichen der Anzahl an Messpunkten neu gestartet werden soll [3]. Als nächstes werden die Zielzeilen [4] und die Zielspalten [5] definiert. Es ist eine entsprechende Formatierung der Datenausgabe (Bild 44) möglich, hierbei werden die Daten spaltenweise sortiert, wobei auf eine Spezifizierung der Nachkommastellen geachtet werden muss.



Bild 44: Einstellung der Formatierung

6.2.2 Vollständiges Schaltbild

Die Einstellungen, der im α -Wertprogramm verwendeten Module werden im Anhang-B ausführlich erläutert.

Durch Erweiterung des Alpha-Wert-Schaltbilds wird ein professionelles Messdatenerfassungssystem erstellt. Die Besonderheit hierbei ist die Online-Anzeige des Volumenstroms. Bei dem neuen Messdatenerfassungsprogramm kommen die Black-Boxen zum Einsatz, diese sind vor allem bei der Unterteilung der Schaltbilder sehr wichtig. Mit Hilfe dieses Konzepts lassen sich in DasyLab auch sehr komplizierte Programme klar und übersichtlich gestalten. Da die Black-Box-Module die Anzahl der sichtbaren Elemente drastisch reduzieren, wird viel Zeit gespart, weil Standardaufgaben nicht dauernd wieder von neuem angelegt werden müssen. In einem Black-Box-Modul kann auch ein komplettes Teilschaltbild mit Ein- und Ausgängen zum übergeordneten Schaltbild "versteckt" werden. Dies kann sowohl das Hauptschaltbild, als auch eine übergeordnete Black-Box sein.

Die Messdaten werden nicht wie im alten Versuchsaufbau einzeln über die seriellen Schnittstellen übergeben. Es werden vier Messgrößen des NI-Tasks über einen USB-Anschluss eingelesen. Auf die einzelnen Teilschaltbilder innerhalb der Black-Box wird im Laufe dieses Kapitels ausführlich eingegangen. Bild 45 zeigt das programmierte Schaltbild, welches sich in neun grundlegende Bausteine unterteilt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden folgende Programme erstellt:

1. Messdatenerfassungsprogramm mit α -Wert Bestimmung
2. Messdatenerfassungsprogramm ohne α -Wert Bestimmung

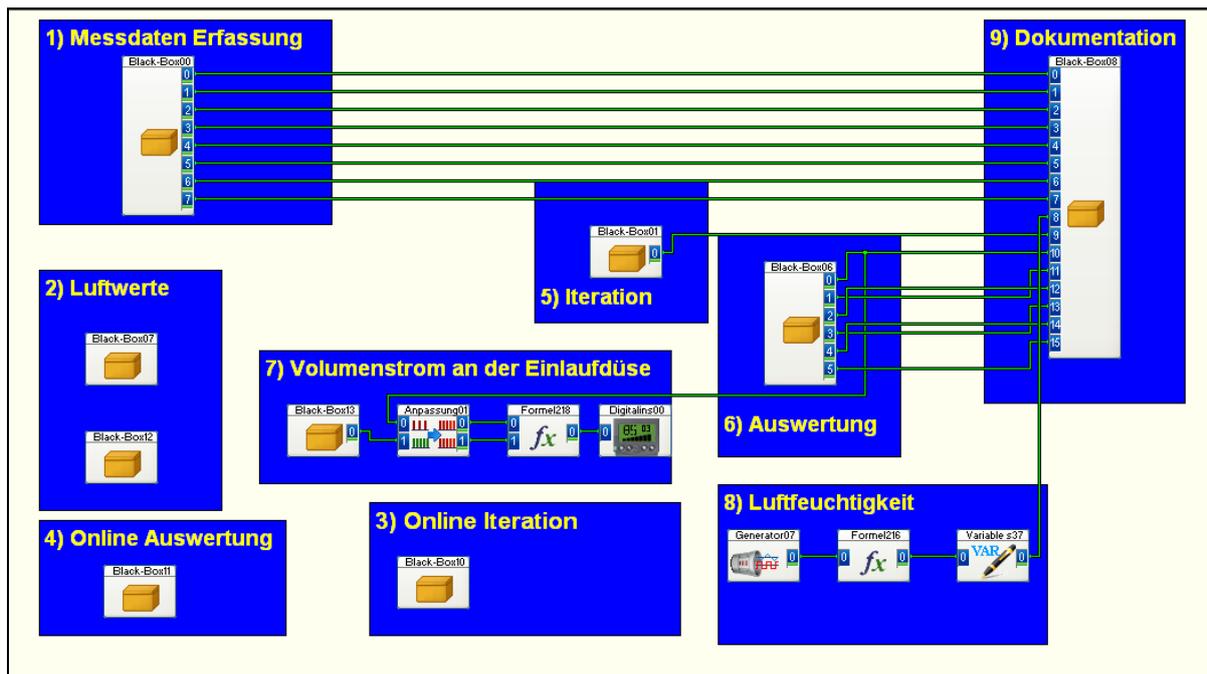


Bild 45: Vollständiges Schaltbild

1. Erfassung und Mittelung der Messdaten
2. Berechnung der Luftwerte sowohl für online, als auch für gemittelte Messdaten
3. Iterative Volumenstromberechnung der Online Messdaten
4. Auswertung der Online Messdaten
5. Iterative Volumenstromberechnung der gemittelten Messdaten
6. Auswertung der gemittelten Messdaten
7. Berechnung des Volumenstroms an der Einlaufdüse
8. Luftfeuchtigkeit
9. Darstellung und Dokumentation der Kenngrößen

Die Kommunikation zwischen den einzelnen Black-Boxen bzw. Teilschaltbildern erfolgt durch die globalen Variablen, welche im Vorfeld definiert wurden. Infolge der Vordefinition ist es jetzt möglich, spezifische Kenngrößen zwischen den unterschiedlichen Schaltbildern, welche nacheinander ausgeführt werden, auszutauschen.

6.2.3 Erfassung und Mittelung der Messdaten

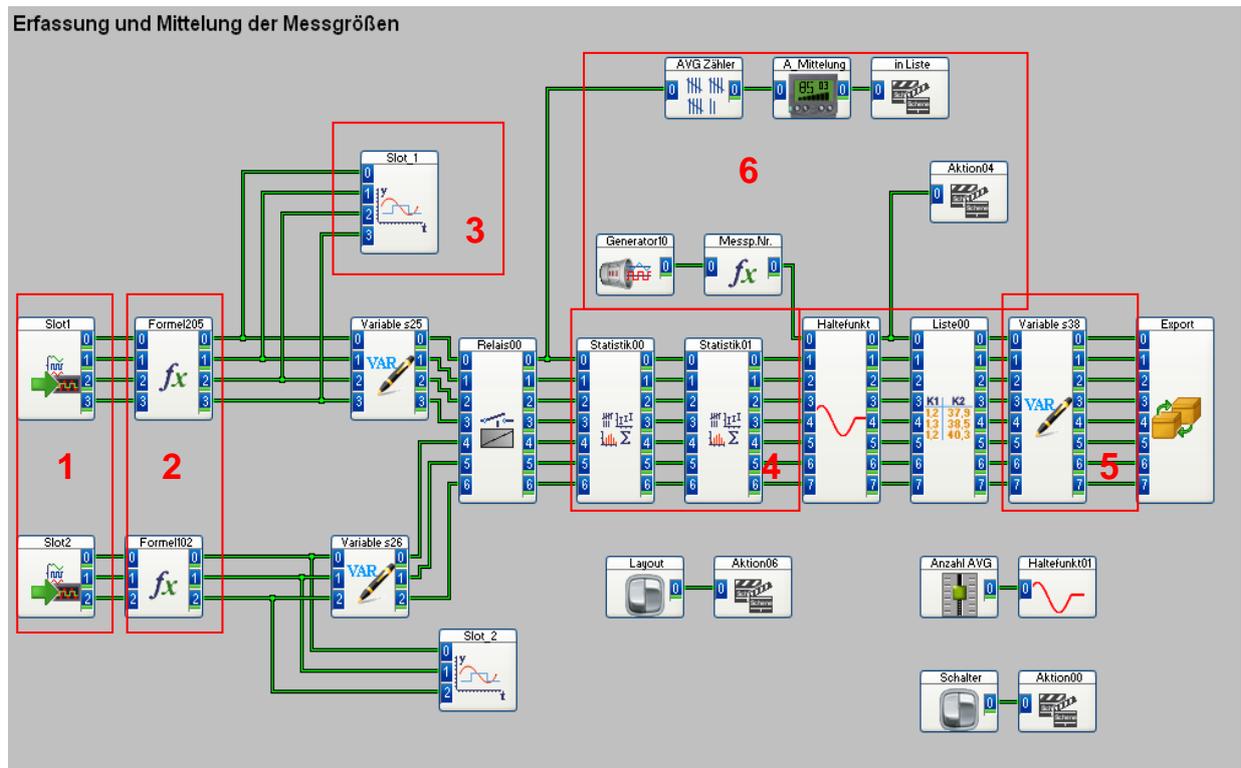


Bild 46:Erfassung und Mittelung der Messgrößen

Bei diesem Teilschaltbild Bild 46 wurden die Messdaten durch das Modul NI-DAXmx-Eingang [1] eingelesen. Die Einstellungen von der NI-DAQmx-Task werden im Anhang A ausführlich erläutert. Zunächst werden die eingelesenen Spannungswerte durch einen Formelinterpretierer [2] zu physikalischen Größen umgerechnet. Die physikalischen Größen lassen sich jetzt anzeigen und als globale Variablen speichern. Diese werden später für die Online Auswertung benötigt. Für die Überwachung der Schwankungen werden die Messgrößen online in einer Y/t Grafik [3] dargestellt. Danach werden die Messgrößen gemittelt, das geschieht durch das Modul **statistische Werte**, dabei wurden zwei Module hintereinander geschaltet. Bei dem ersten Modul werden die Werte innerhalb eines Blocks gemittelt und ausgegeben. Im Anschluss daran werden dann die einzelnen Blöcke gemittelt und die entsprechenden Messwerte ausgegeben. Die gemittelten Kenngrößen werden auch als globale Variable gespeichert und für die Auswertung der berechneten Messgrößen bereitgestellt. Die Anzahl der Mittelungen kann sowohl mittels eines Handreglers definiert, als auch als globale Variable gespeichert werden und wird vor jede Messung im Startfenster neu eingegeben.

Die Module Messp.Nr. (Generator), Messp.Nr (Formel-Interpreter) und Nr.erhöhen (Aktion) dienen zur Zählung und Steuerung der Messpunktnummer [6]. Die Einstellungen der einzelnen Module werden im Anhang-B ausführlicher dargestellt.

6.2.4 Berechnung der Luftwerte

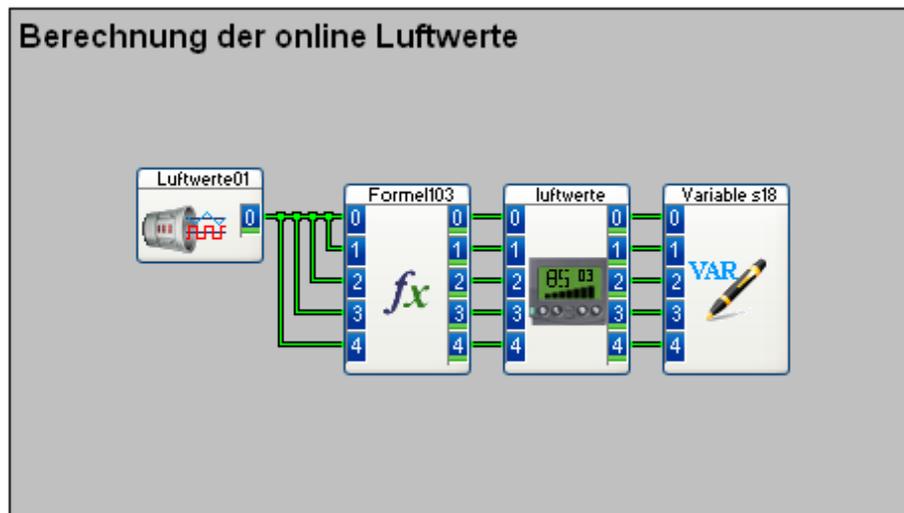


Bild 47: Online Luftwerte

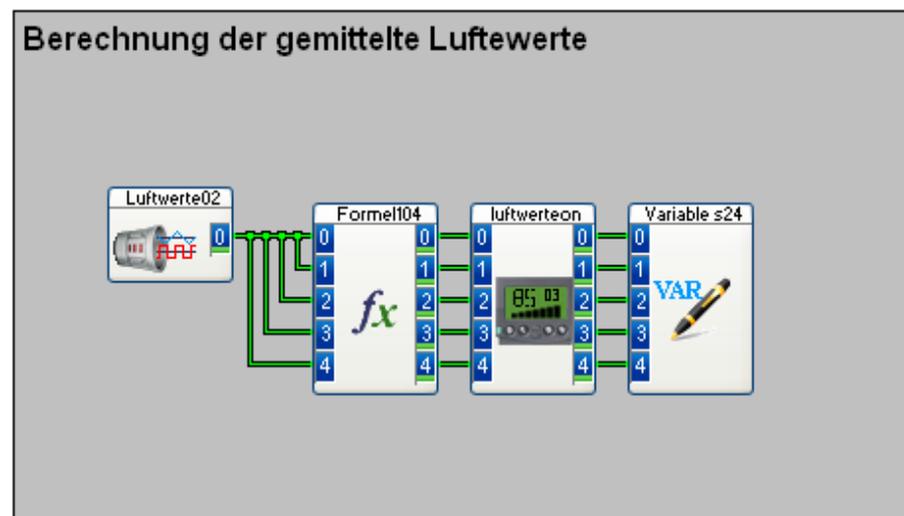


Bild 48: Gemittelte Luftwerte

In den beiden Schaltbildern (Bilder 47 und 48) werden die Größen (Sättigungsdruck P_s , die Gaskonstante der feuchten Luft R_{fe} , die Dichte ρ , sowie die kinematische und die dynamische Viskosität) ausgerechnet. In dem Formelinterpreter werden die Formeln zur Berechnung der Luftwerte (siehe Kapitel 3) eingegeben. Die ausgerechneten Luftwerte werden jetzt als Konstanten betrachtet und für die nächste auszuführende Auswertung

bereitgestellt. Die Bereitstellung erfolgt durch die globale Variable. Die Luftfeuchtigkeit wird durch das Generator Modul generiert. Da die Feuchtigkeit der Luft für jede Messung neu eingegeben werden muss, wird diese als globale Variable abgespeichert und kann vor dem Starten der Messung in dem Startfenster eingegeben werden. Im Anhang-B sind die Einstellungen der Module verdeutlicht.

6.2.5 Iterative Berechnung des Volumenstroms

Die Schaltbilder (Bilder 49 und 50) stellen die iterative Berechnung des Volumenstroms sowohl aus den gemittelten Messgrößen, als auch aus den online Messgrößen dar.

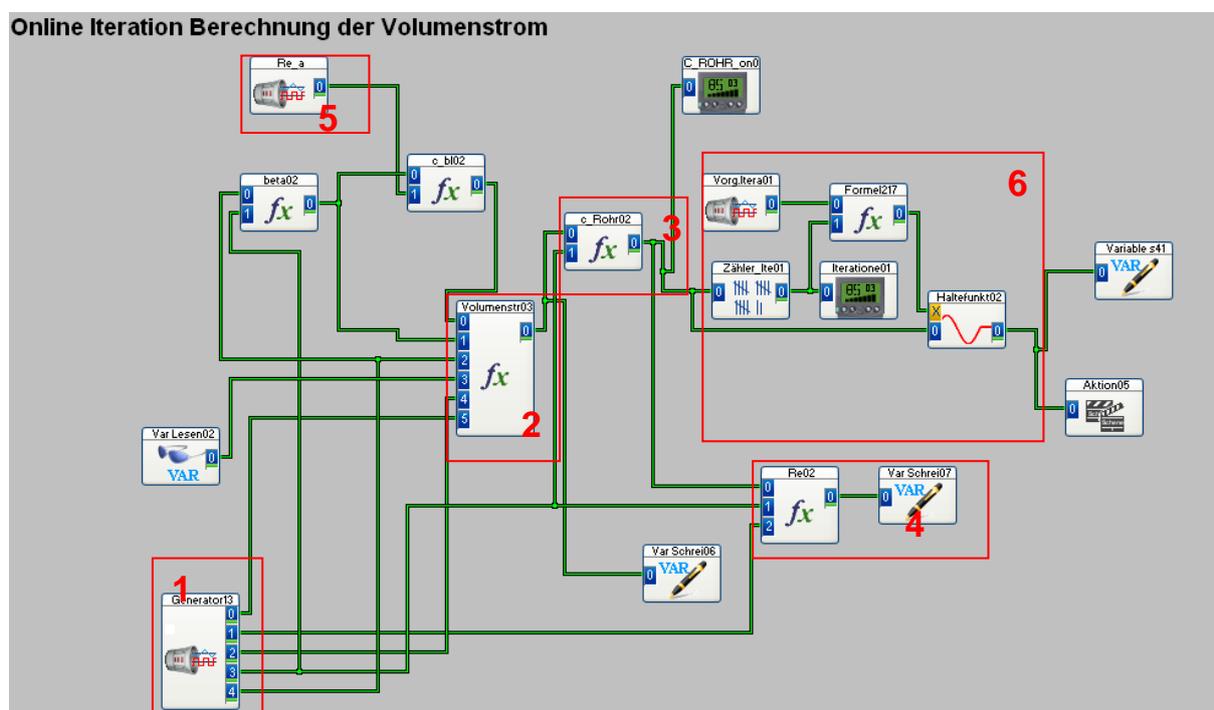


Bild 49 Online Iteration Berechnung des Volumenstroms

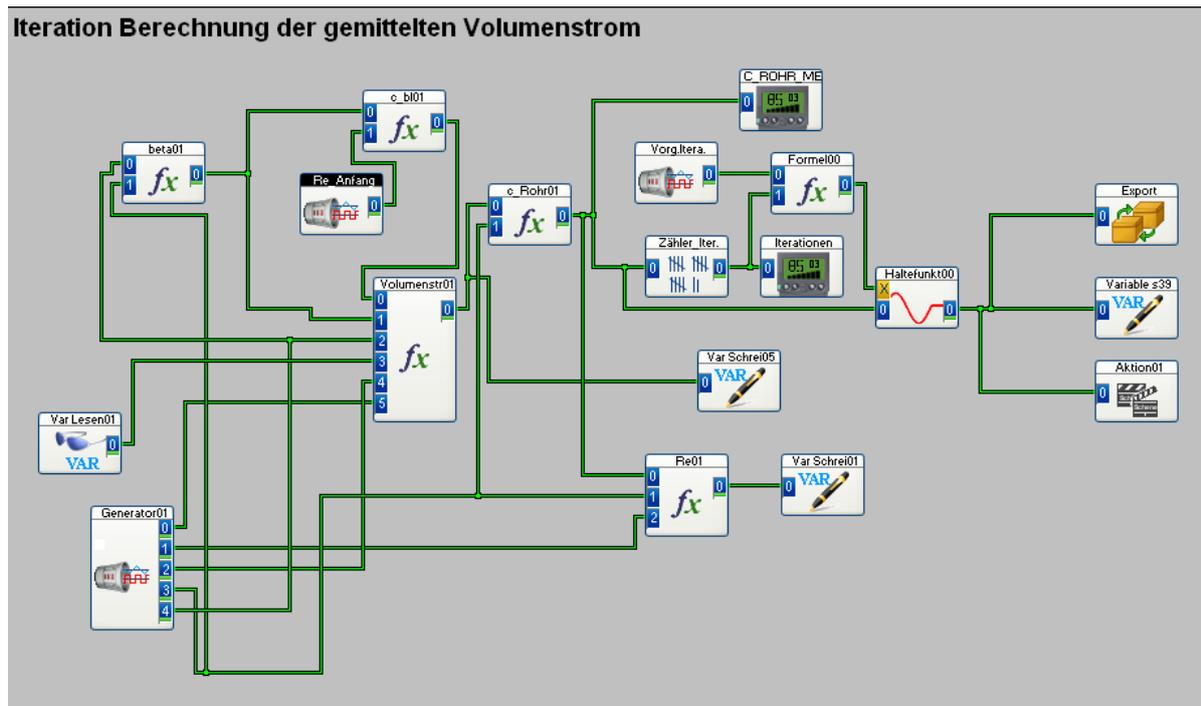


Bild 50: Iteration Berechnung der Volumenstrom aus gemittelte Messgrößen

Das Modul **Generator Globale Variable auslesen** [1] wird verwendet, um die Konstante Durchmesser d_{bl} , sowie d_{Rohr} , die berechnete Dichte ρ_{luft} und kinematische Viskosität ν , kanalweise auszulesen und auszugeben. In dem Formelinterpretierer [2] wird als erstes der Volumenstrom durch die Formel (13) ermittelt und bereitgestellt. Aus diesem kann die Rohrgeschwindigkeit berechnet werden [3], welche für die Berechnung der Reynolds-zahl benötigt wird [4]. Die erhaltene Reynoldszahl wird zunächst als globale Variable abgespeichert, die wiederum von dem Generatormodul mit der Einstellung „Globale Variable auslesen“ eingelesen wird [5]. Die Ausgabe wird automatisch in Echtzeit gewählt, (Bild 51).

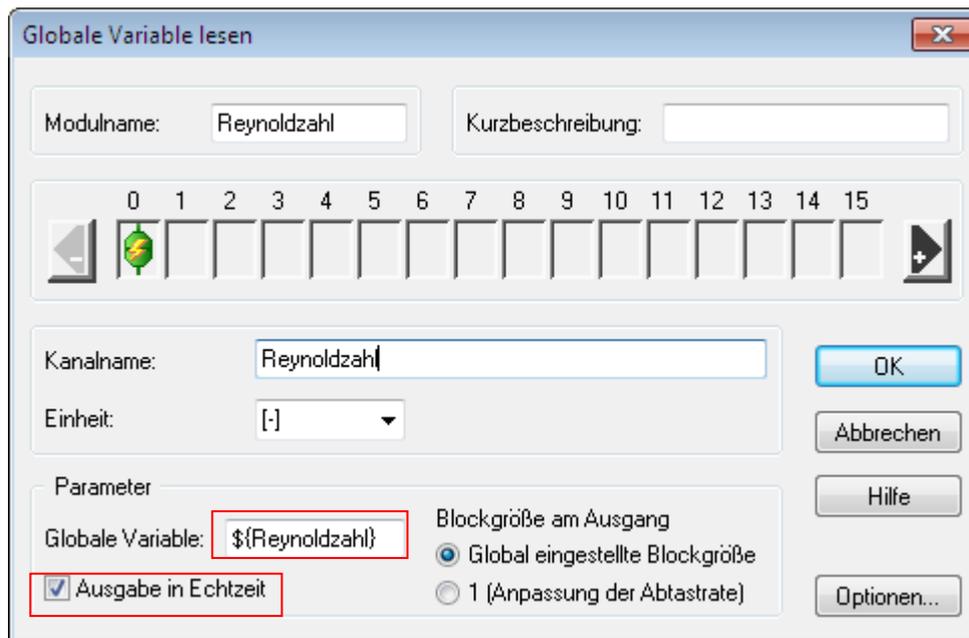


Bild 51: Einstellung des Globalen Variablen Moduls

Die Anzahl der Iterationen wird in dem Modul Generator festgelegt. Mit dem Zählermodul werden die Iterationsschritte aufgezählt, nach dem die Anzahl der Durchläufe erreicht ist, kann die Rohrgeschwindigkeit ausgerechnet und mittels des Exportmoduls weitergegeben werden. Darüber hinaus setzt die Haltefunktion die Zähler zurück. Die Einstellungen der im Schaltbilder 1 und 2 verwendeten Module werden im Anhang-B dargestellt.

6.2.6 Auswertung der gemittelten und online Messdaten

In folgenden Teilschaltbildern (Bilder 52 und 53) werden die Kenngrößen: Totaldruckerhöhung Δp_{tot} , der Volumenstrom Q_{bl} , Wellenleistung und hydraulische Leistung aus den gemittelten Messgrößen, sowie aus den online Messgrößen mit Hilfe der Formeln, welche im Kapitel 3 erläutert wurden, berechnet. Die erhaltenen Kenngrößen werden als globale Variable abgespeichert, die wiederum dazu dienen, die dimensionslosen Kenngrößen Durchflusszahl φ , die Druckzahl ψ und den Wirkungsgrad η zu ermitteln. Diese werden nicht als globale Variable abgespeichert, sondern werden durch das Exportmodul, direkt in das übergeordnete Modul weitergegeben und in einem Diagramm als dimensionslose Kennlinien dargestellt. Die dimensionslosen Kenngrößen werden nicht für weitere Berechnungen verwendet. In dem Anhang-B sind die Formeln, welche für die Ermittlung der aerodynamischen Kenngrößen benötigt werden, ausführlich aufgelistet.

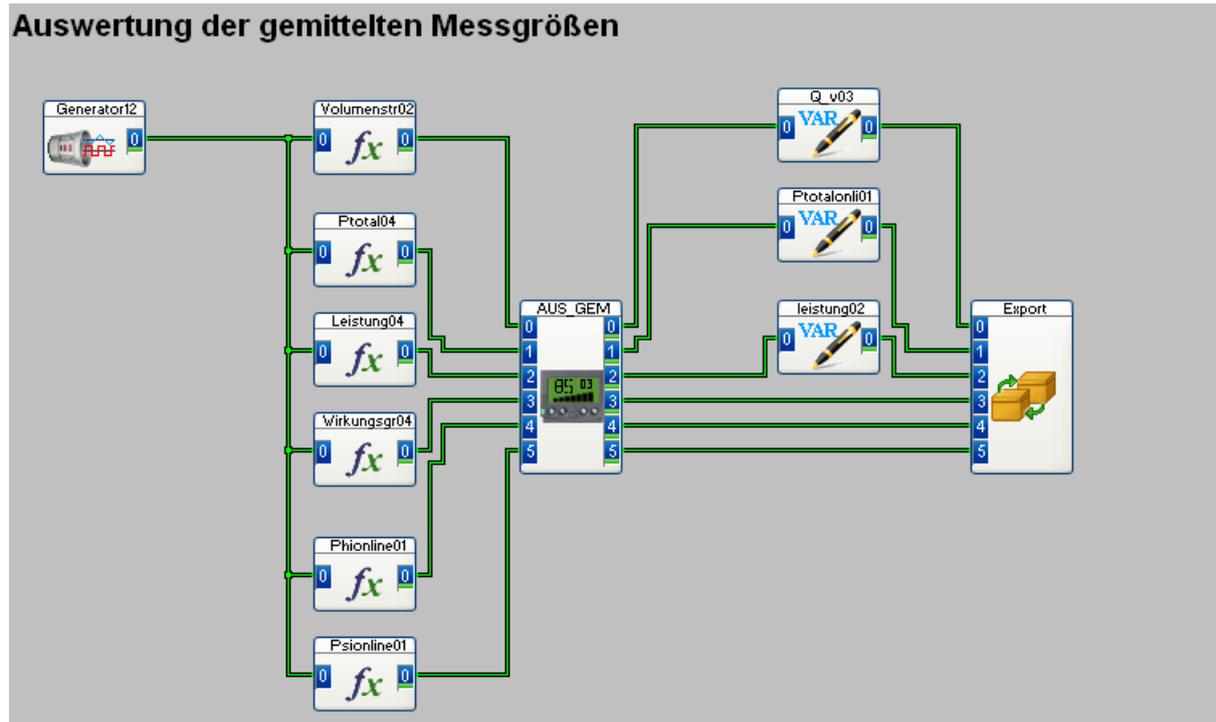


Bild 52: Auswertung der gemittelten Messgrößen

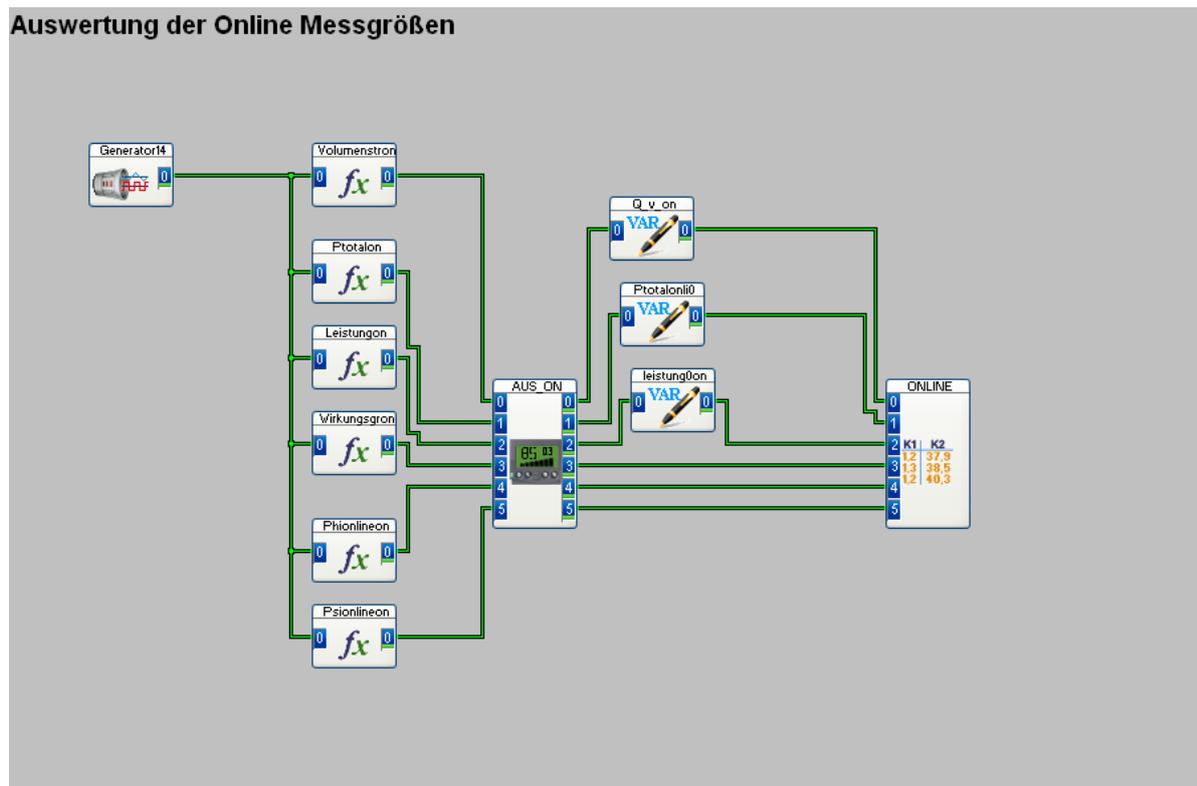


Bild 53: Auswertung der Online Messgrößen

6.2.7 Volumenstrom an der Düse

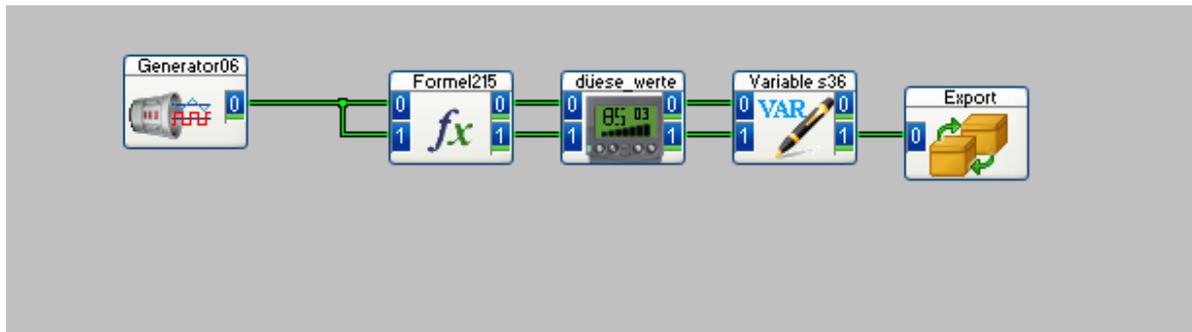


Bild 54: Bestimmung des Volumenstroms an der Düse

Der in Bild 54 dargestellte Teil des Programmes, dient zur Berechnung des Volumenstroms an der Einlaufdüse. Dabei wurden die Konstanten, sowie $dp_{düse}$, durch den Generator ausgelesen. Aus diesem lässt sich die Geschwindigkeit an der Düse ausrechnen, die wiederum dazu benötigt wird, den Volumenstrom zu ermitteln. Der ausgerechnete Volumenstrom wird zunächst als globale Variable gespeichert. Die Quotienten aus dem Volumenstrom an der Blende und an der Düse bildet die Durchflusszahl α .

6.2.8 Dokumentation und Wegschreiben der Messdaten

Nach den Mittelungen und den Auswertungen wurden die Messgrößen, welche im Laufe der Messung als globale Variable abgespeichert wurden, mit Hilfe des Moduls Import [1] eingelsen. Anschließend ist das Modul Signalanpassung [2] zum Einsatz gekommen, um Eingangskanäle mit unterschiedlichen Startzeitpunkten der Blöcke, Abtastraten oder Blockgrößen, nach verschiedenen Methoden zu synchronisieren und auszugeben. Die Synchronisation muss hierbei auf „Linear Interpolation“ eingestellt sein. Sie bestimmt, dass DasyLab alle Eingangskanäle auf die Blockgröße des ersten Kanals 0 durch Interpolation anpasst. Erst jetzt können die Kenngrößen in Excel mit Hilfe des Modul-DDE geschrieben werden [3]. Aus den erhaltenen Kenngrößen lassen sich die dimensionslosen Kennlinien auftragen [4].Bild 55 stellt das Teilschaltbild dar.

Darstellung der Kenngrößen

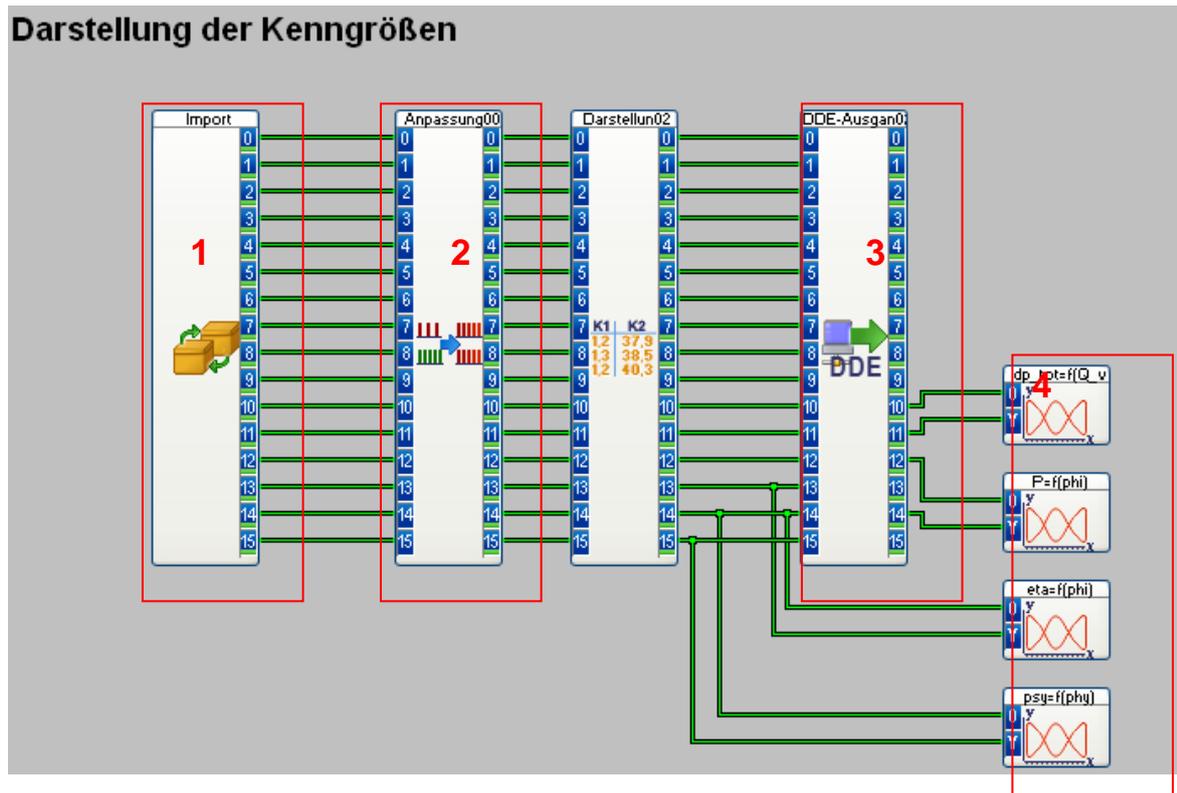


Bild 55: Anpassung und Darstellung der Kenngrößen

6.2.9 Das Layout

DasyLab ermöglicht es, auf einfache Weise Seitenlayouts zu entwerfen. Dabei besteht die Möglichkeit, verschiedene grafische Objekte im Layout selbst zu generieren, beliebige Grafiken einzubinden oder über verknüpfte Objekte den direkten Bezug zum erstellten Schaltbild zu schaffen. Die Bilder 56 ,57 ,58 und 59 zeigen die angefertigten Layouts.

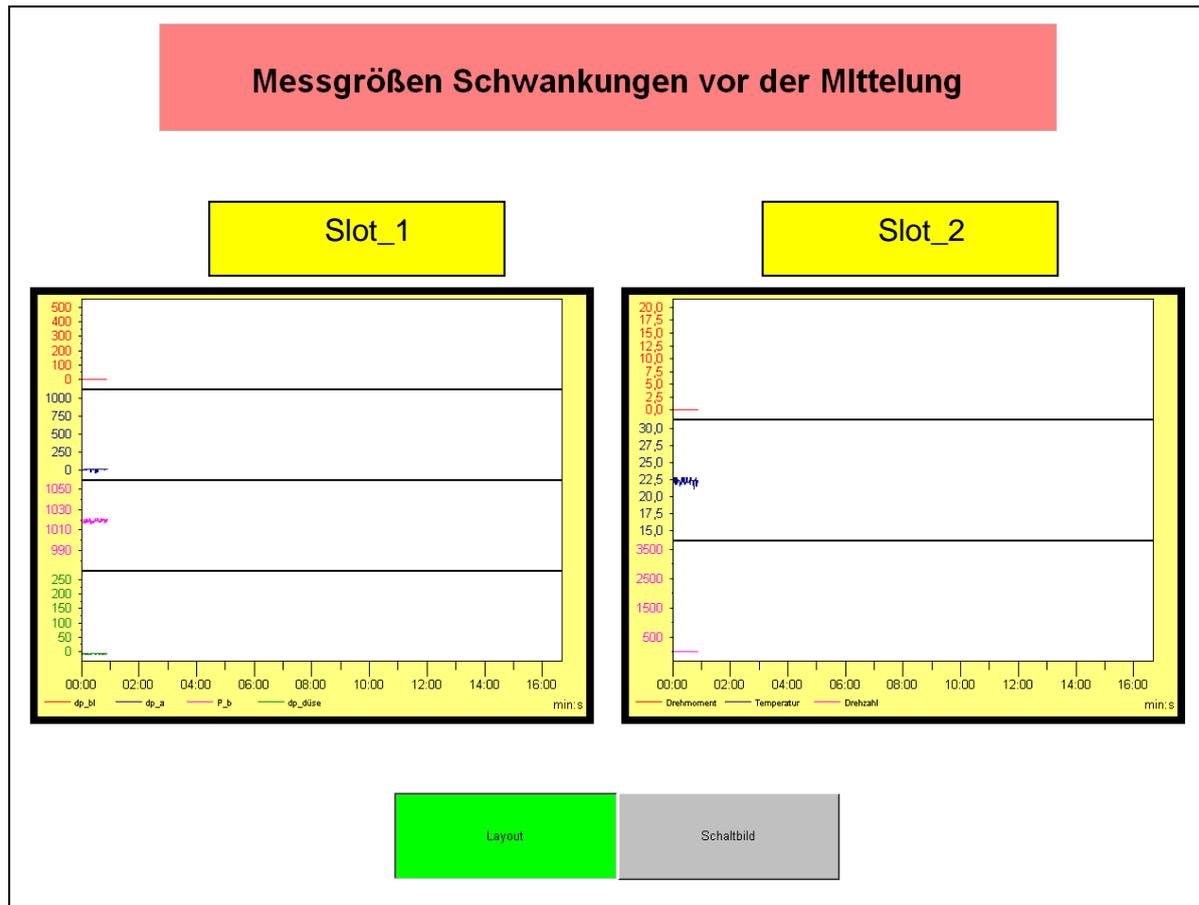


Bild 56: Layout zur Schwankungen-Beobachtung der Messgrößen

Durch das im Bild 56 dargestellte Layout, kann während der Messung beobachtet werden, ob bestimmte Messgrößen sehr stark schwanken. Des Weiteren wird durch den Schalter [1] zwischen Schaltbild und Layout umgeschaltet. Hierbei wurde die Messzeit so eingestellt, dass die Schwankungen für eine Kennlinie mit einer bestimmten Anzahl an Messpunkten zu einer sinnvollen Mittelung führen.

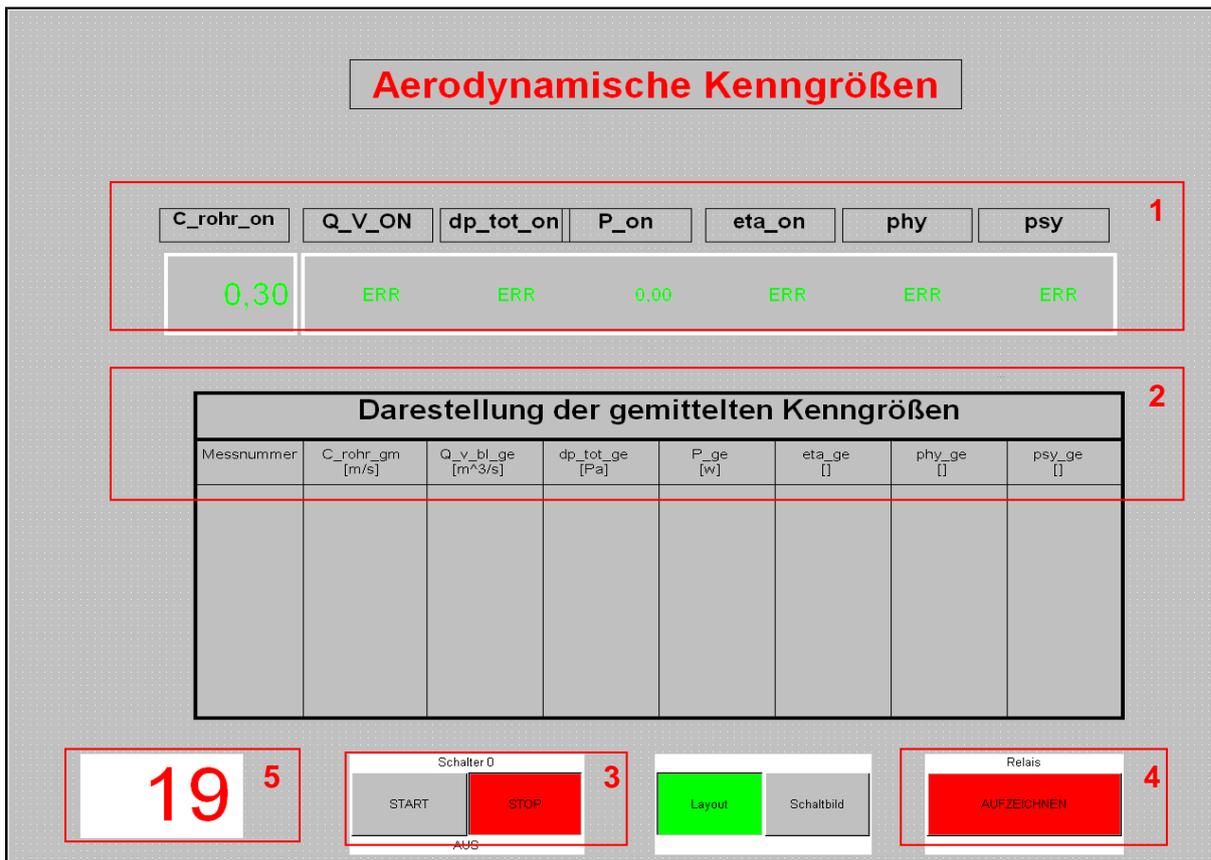


Bild 57: Darstellung der online- , sowie die gemittelten Kenngrößen

Das in dem Bild 57 ausgeschnittene Layout dient sowohl zur Online Darstellung [1] der aktuellen aerodynamischen Kenngrößen als auch der gemittelten Kenngrößen [2]. Zudem kann das Schaltbild durch den Schalter [3] gesteuert werden. Die Messgrößen werden nicht transient aufgezeichnet, so dass die Messwerte erst durch betätigen den Relais-Moduls aufgezeichnet werden. Dieses Moduls zeichnet solange auf bis die eingestellte Anzahl der Mittelungen erreicht wird.

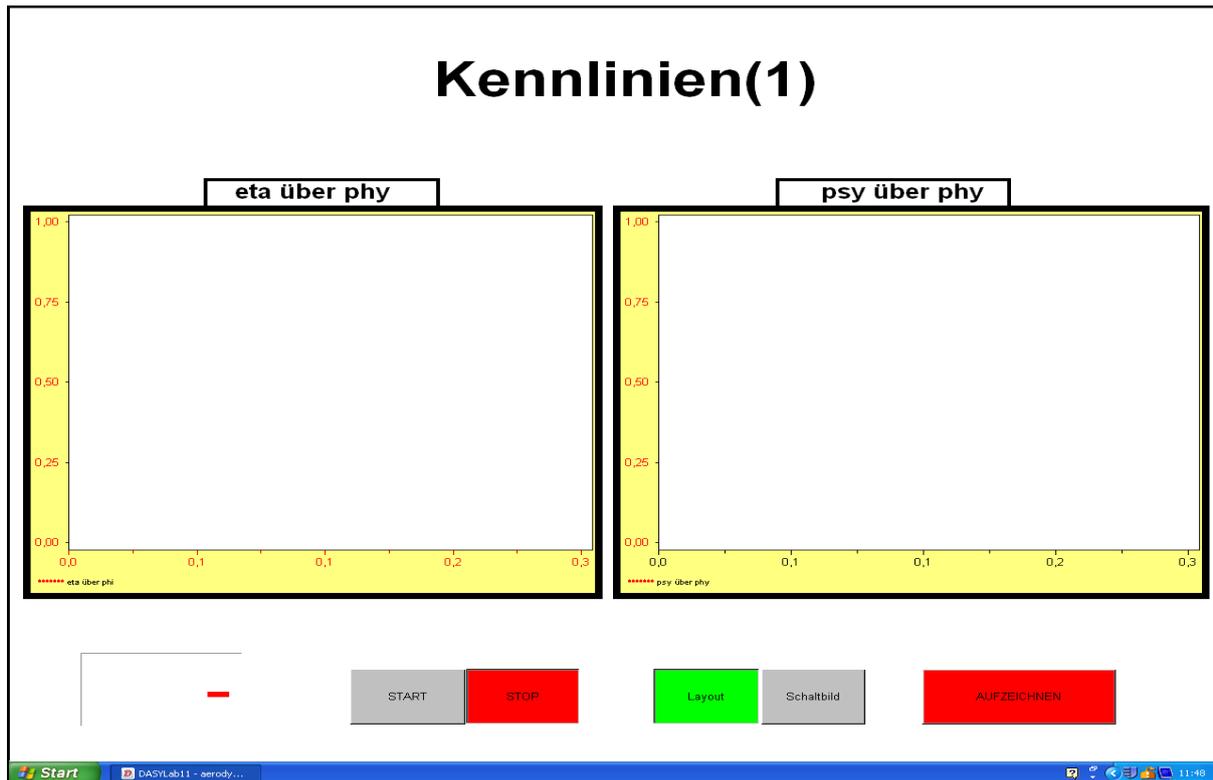


Bild 57: Darstellung der dimensionslosen Kennlinien

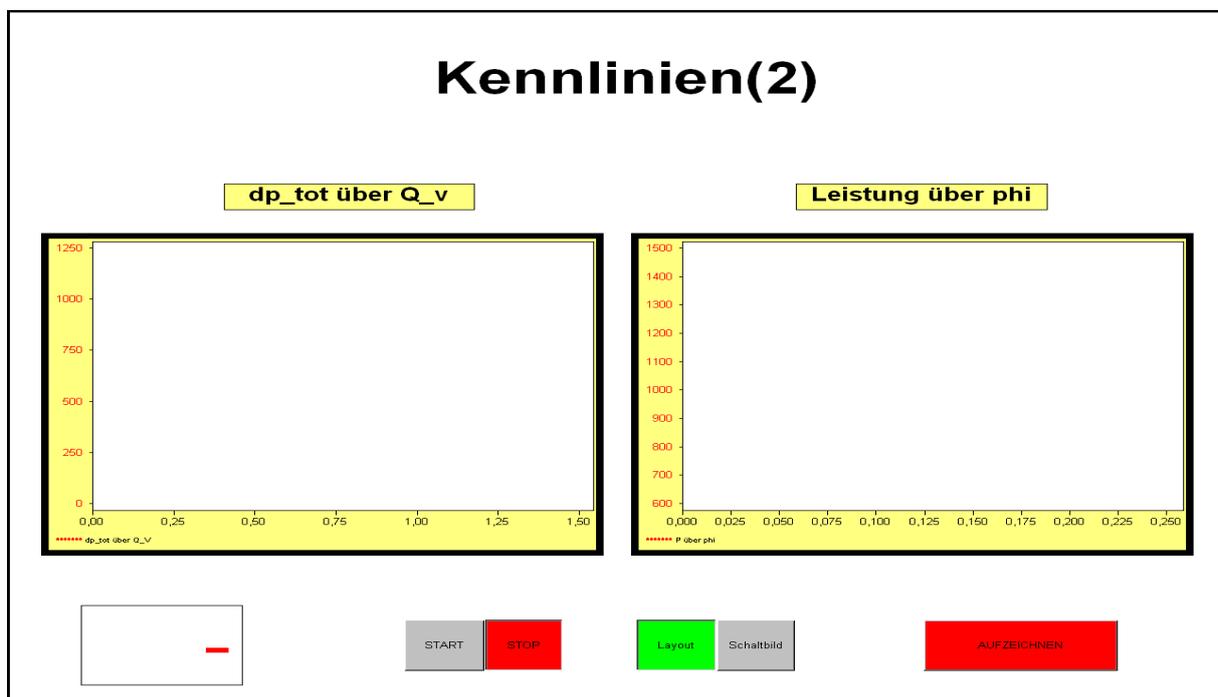


Bild 58: Darstellung der dimensionsbehaftete Kennlinien

In den Layouts Bild 57 und 58 werden die Kennlinien aufgetragen: Wirkungsgrad über Durchflusszahl, Druckzahl über Durchflusszahl, Totaldruckerhöhung über Volumenstrom,

sowie Leistung über Durchflusszahl. Dadurch lässt sich das Verhalten des Ventilators gut beobachten. Darüber hinaus kann im Laufe der Aufzeichnung beobachtet werden, ob die ausgewerteten Werte stark abweichen. Somit können Messpunkte, welche sehr stark streuen, einfach wiederholt werden. Ebenfalls kann hier mit Hilfe eines Schalters sowohl zwischen den Layouts umgeschaltet werden, als auch die Messung gestartet und beendet werden.

7 Experimentelle Untersuchungen der Schwankungen

Schwankungen der aerodynamischen Messwerte eines Radialventilators (RV-680) führen im allgemeinen zu unerwünschten Ergebnissen. Die während dieser Arbeit zu untersuchenden Schwankungen, soll zeigen, dass die erhaltenen Messunsicherheiten der Norm DIN 24163 (Tabelle 1 und 2), entspricht. Natürlich sind die Messunsicherheiten der zu untersuchenden Kenngrößen von dem Messverfahren, von den verwendeten Messgeräten und deren Kalibrierung abhängig. Aus diesem Grund sind Druckmessgeräte mit höherer Qualität eingesetzt worden. Neben dem genauem Ergebnis stellt sich die Frage, wie genau die Messungen waren. Die Messunsicherheit lässt sich in Anlehnung an DIN 1319 durch die Formel:

$$\Delta x = \frac{S}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_i^n v_i^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (23)$$

berechnen.

Die Größe S ist die Standardabweichung, diese wird auch in der Anlehnung an DIN 1319 durch die Formel:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_i^n v_i^2}{(n-1)}} \quad (24)$$

ausgedrückt.

Mit v_i ist die Abweichung des wahren Wertes x_w vom Mittelwerte x_m :

$$v_i = x_w - x_m \quad (25)$$

Die Genauigkeit einer Messung wird hierbei durch den Quotienten der Standardabweichung und dem maximalen Wert der entsprechenden Messreihe gebildet.

Erfasst wurden 120 Werte der einzelnen Messgrößen bzw. Blöcke über eine Dauer von 120 Sekunden, d.h. nach jeder Sekunde wurde ein Wert ausgegeben. Dies geschah bei einer Abtastrate von 200 Hz und einer Blockgröße von 200. Bei der Messung des Drehmoments mittels der Z3H3 Kraftaufnehmer, wurden 2 Varianten benötigt. Die eine Messung wird mit einem ausgeschalteten Tiefpass durchgeführt, die andere ist mit einem eingeschalteten Tiefpass durchgeführt worden. Die Diagramme 10 bis 16 stellen die Ergebnisse dar.

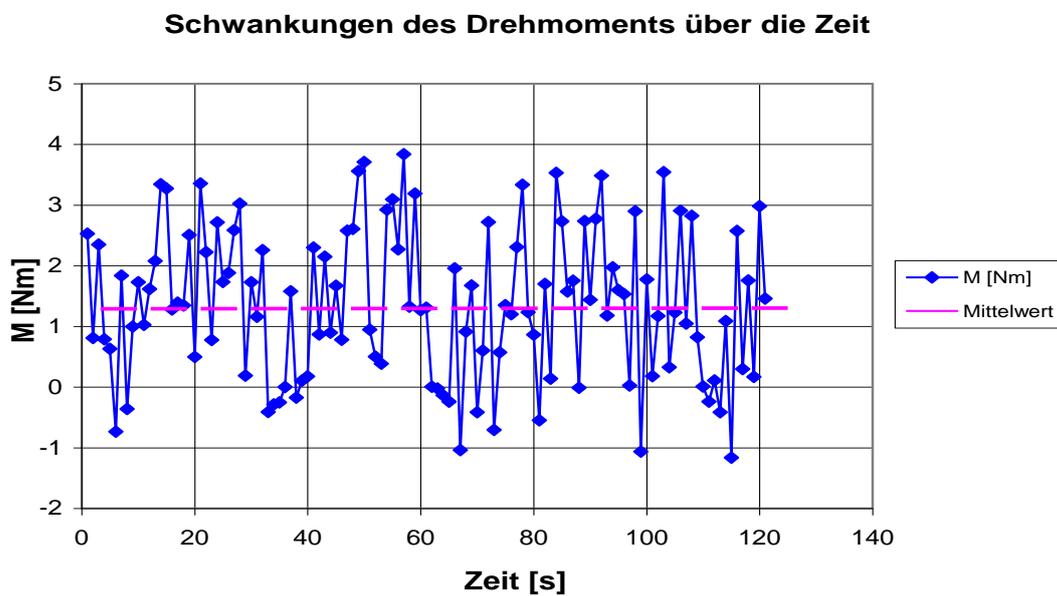


Diagramm 10 : Schwankungen des Drehmoments bei ausgeschaltetem Tiefpass.

	Werte
Standardabweichung	1,229
Messunsicherheiten	0,112
Genauigkeit	32%
Schwankungsbereich	$\pm 2,503$

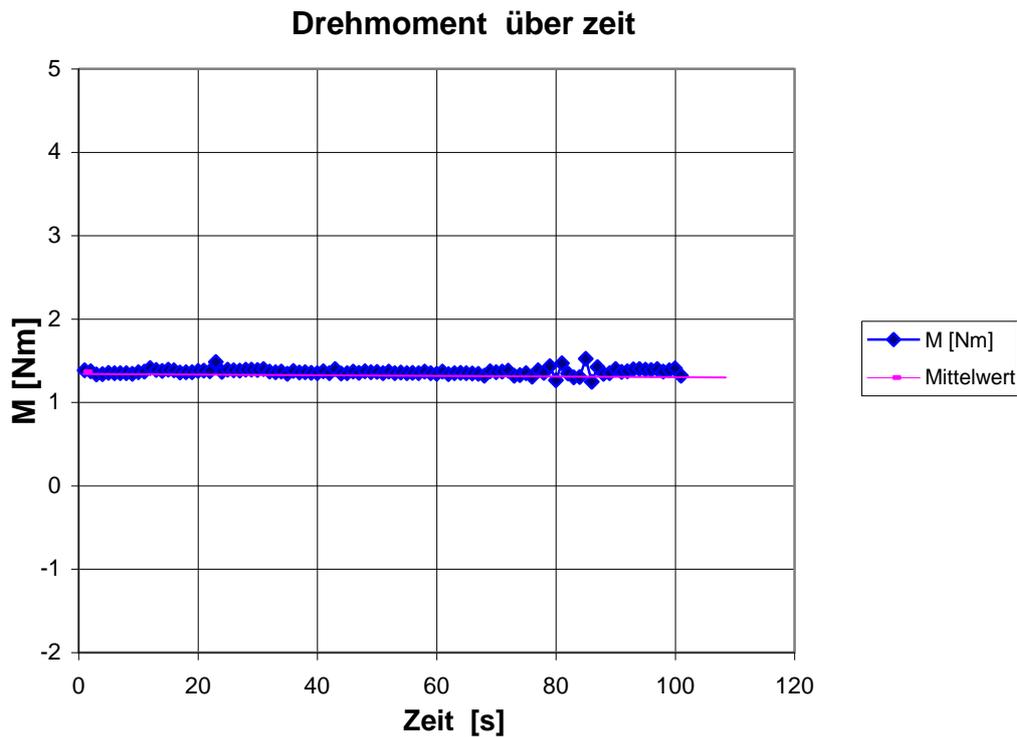


Diagramm 11: Schwankungen des Drehmoments mit einem eingeschalteten Tiefpass.

	Werte
Standardabweichung	0,034
Messunsicherheiten	0,003
Genauigkeit	2,3%
Schwankungsbereich	$\pm 0,14$

Das Diagramm 10 zeigt, wie sich das Drehmoment innerhalb einer Messdauer von 120 Sekunden verhält. Hierbei ist der Tiefpass des verwendeten Messverstärkers ausgeschaltet, was zu einem großen Schwankungsbereich von $\pm 2,503$ Nm und einer Messgenauigkeit von 32% führt. In der Anlehnung an der DIN 24163-2 ist eine Messgenauigkeit von ± 1 zur Drehmoment-Messung eines 30 kW Pendelmotors zugelassen, welche in diesem Versuch (Tiefpass ist ausgeschaltet) überschritten wurde.

Um den Einfluss des Tiefpasses zu überprüfen, werden zunächst Messungen mit einem eingeschalteten Tiefpass durchgeführt. Diagramm 11 stellt das Ergebnis dieser

Untersuchung dar. Hier wurde ein Schwankungsbereich von $\pm 0,14$ [Nm] und einen Messgenauigkeit von 2,3 [%] erhalten.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass durch Einschalten des Tiefpasses Störsignale von Nutzsignalen gut getrennt werden konnten. Zunächst wurden, für unterschiedliche Betriebspunkte, auch die Schwankungen der Temperatur (Diagramm 12) und der Drehzahl (13) untersucht. Die Ergebnisse zeigten sehr geringe Schwankungen.

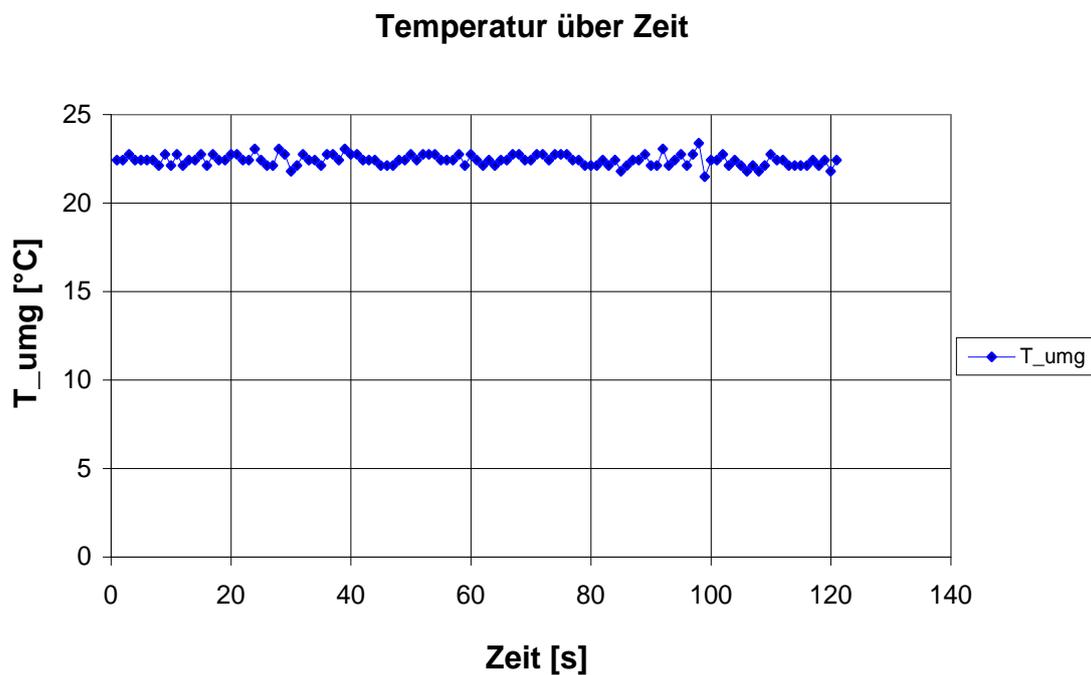


Diagramm 12: Schwankungen der Temperatur

	Werte
Standardabweichung	0,452
Messunsicherheiten	0,04
Genauigkeit	1,5%
Schwankungsbereich	± 1

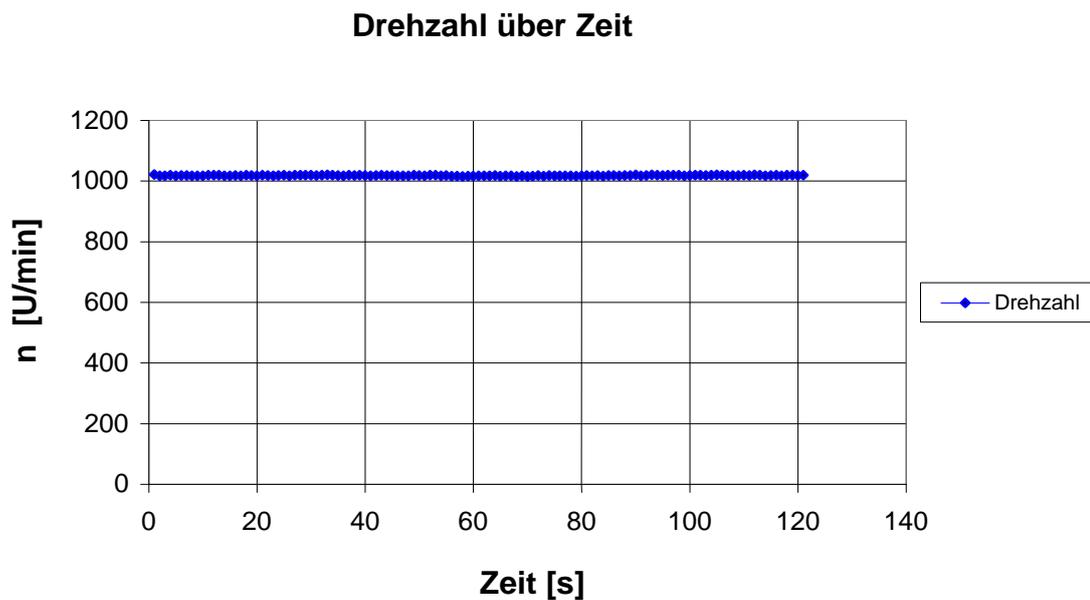


Diagramm 13: Schwankungen der Drehzahl

	Werte
Standardabweichung	1,033
Messunsicherheiten	0,1
Genauigkeit	0,1%
Schwankungsbereich	± 3

Während dieser Arbeit sind, wie bereit in der Einleitung erwähnt, neue Druckmessgeräte der Firma MKS angeschafft worden, diese sollten auch auf ihre Genauigkeit geprüft werden.

Dabei werden die Schwankungen der Messgrößen: Wirkdruck an der Blende (p_{bl}), der Außendruck (p_{aus}) und der barometrische Druck (P_b) untersucht. Die Diagramme 14, 15 und 16 stellen die erhaltenen Ergebnissen dar.

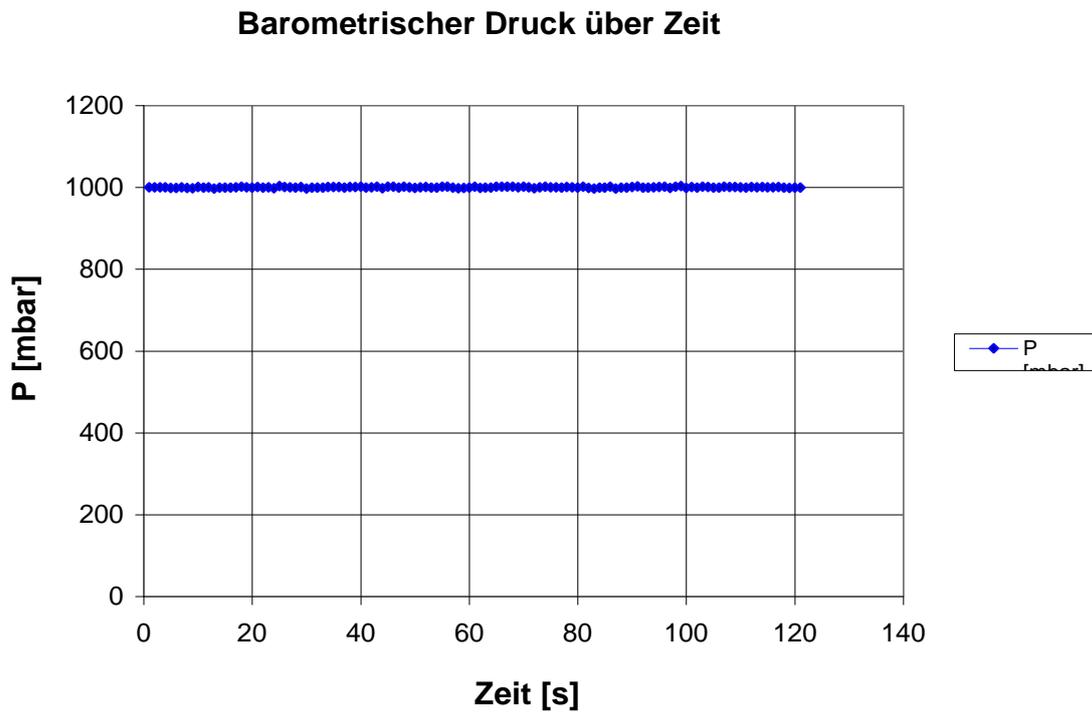


Diagramm 14: Schwankungen des barometrischen Drucks

	Werte
Standardabweichung	1,212
Messunsicherheiten	0,1
Genauigkeit	0,1%
Schwankungsbereich	± 3.187

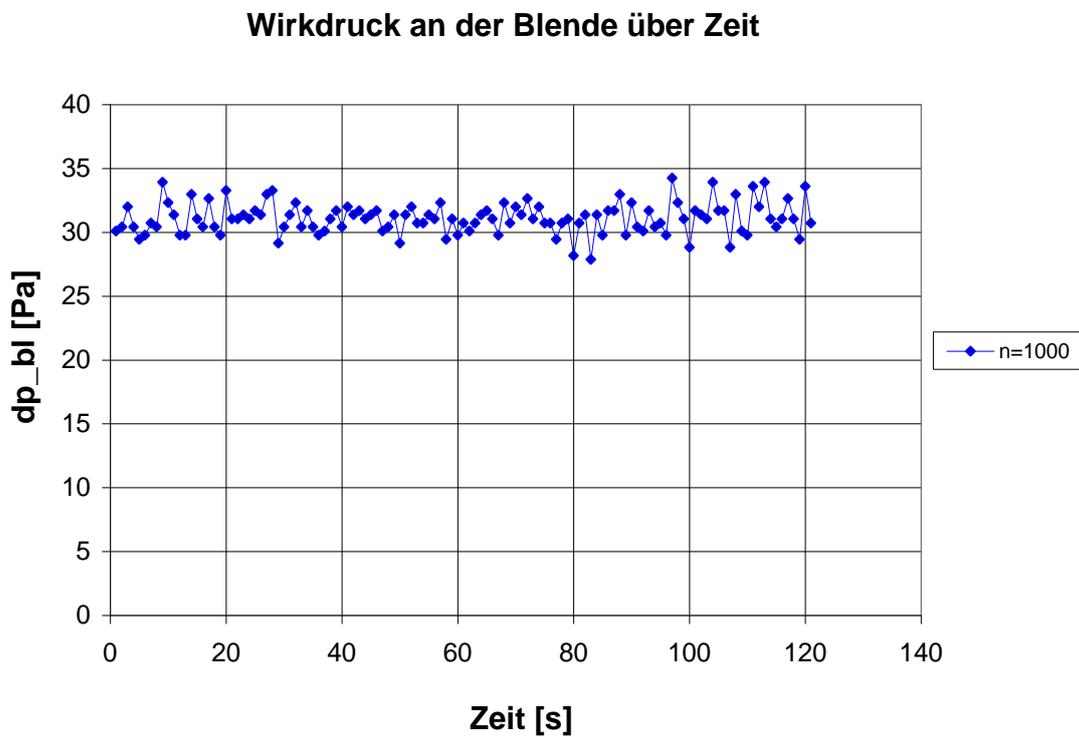


Diagramm 15: Schwankungen des Wirkdruckes an der Blende

	Werte
Standardabweichung	1,2
Messunsicherheiten	0,1
Genauigkeit	3,5
Schwankungsbereich	± 3.188

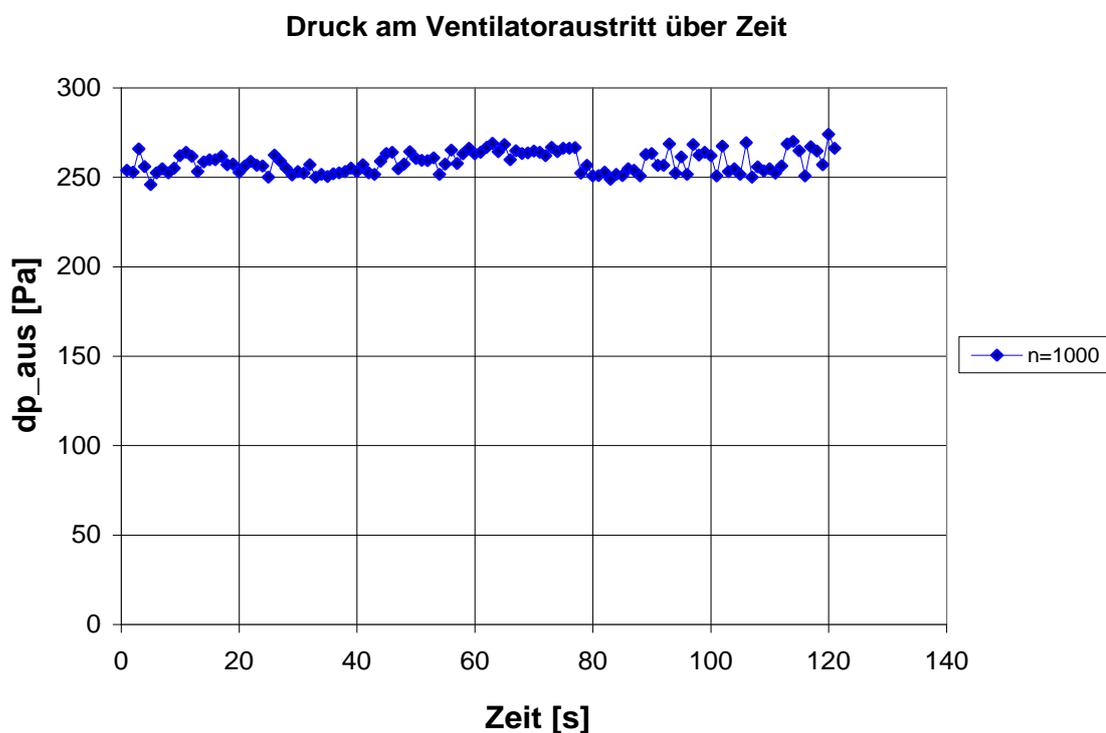


Diagramm 16: Schwankungen des Drucks am Ventilatoraustritt

	Werte
Standardabweichung	6,018
Messunsicherheiten	0,6
Genauigkeit	2,2%
Schwankungsbereich	±15

Das daraus resultierende Fazit ist, dass außer bei den Drehmomentmessungen mit einem ausgeschalteten Tiefpass, alle anderen Schwankungen der Messgrößen vor der Mittelung der Norm entsprochen haben. Außerdem lässt sich erkennen, dass die neuen Messgeräte höher Genauigkeit auch bei der Erfassung geringer Druckwerte bewiesen haben. Die Tabellen 6 und 7 fassen die gesamten Ergebnisse zusammen.

Tabelle 7: Berechnung der Messunsicherheiten bei n=1000 U/min

Drehzahl	Messunsicherheiten	Messgrößen					
		M [Nm]	T_umg [°C]	n [U/min]	dp_blende [Pa]	dp_aus [Pa]	p_baro [mbar]
n=1000 mit eingeschalteten Tiefpass	Mittelwerte	1,368	22,24	1018	31	258	1000,04
	Standardabweichung	0,034	0,452	1,033	1,2	6,018	1,212
	Messunsicherheiten	0,003	0,04	0,1	0,1	0,6	0,1
	Genauigkeit	2,30%	1,50%	0,10%	3,5	2,20%	0,10%
	Schwankungsbereich	±0,14	±1	±3	±3.188	±15	±3.187
n=1000 mit ausgeschalteten Tiefpass	Mittelwerte	1,365	21,78	1019	31	260	1000,06
	Standardabweichung	1,229	0,312	1,169	1,215	6,043	1,217
	Messunsicherheiten	0,112	0,03	0,107	0,111	0,552	0,111
	Genauigkeit	32%	1,30%	0,10%	3,5	2,2	0,121
	Schwankungsbereich	±2,503	±1	3,14	3,188	1,05	3,187

Tabelle 8 : Berechnung der Messunsicherheiten bei n=1500 U/min

Drehzahl	Messunsicherheiten	Messgrößen					
		M [Nm]	T_umg [°C]	n [U/min]	dp_blende [Pa]	dp_aus [Pa]	p_baro [mbar]
n=1500 mit eingeschalteten Tiefpass	Mittelwerte	3,106	20,754	1506	48,24	706,21	1005,3
	Standardabweichung	0,038	0,37	1,115	1,3	4,25	1,27
	Messunsicherheiten	0,003	0,033	0,1	0,112	0,388	0,117
	Genauigkeit	1,18%	1,70%	0,10%	2,30%	0,60%	0,10%
	Schwankungsbereich	±0,1	±1	±1	±4	±10	±3
n=1500 mit ausgeschalteten Tiefpass	Mittelwerte	3,281	20,8	1506	130	294	1000,8
	Standardabweichung	1,059	0,459	1,053	3,09	4,933	1,306
	Messunsicherheiten	0,097	0,041	0,096	0,282	0,45	0,119
	Genauigkeit	20%	2,10%	0,10%	2,2%	1,60%	0,13%
	Schwankungsbereich	±2,2	±2,2	±3,14	±8,13	±12,78	±3,82

Weitere Ergebnisse werden im Anhang-C beigefügt.

8 Auswertung der aerodynamischen Messungen

8.1 Der Radialventilator RV-722

Im Rahmen dieser Arbeit sind nach den Modernisierungsmaßnahmen Messungen für die Radialventilatoren RV-722 durchgeführt worden, welche mit den Kennlinien der alten Messgeräte verglichen wurden.

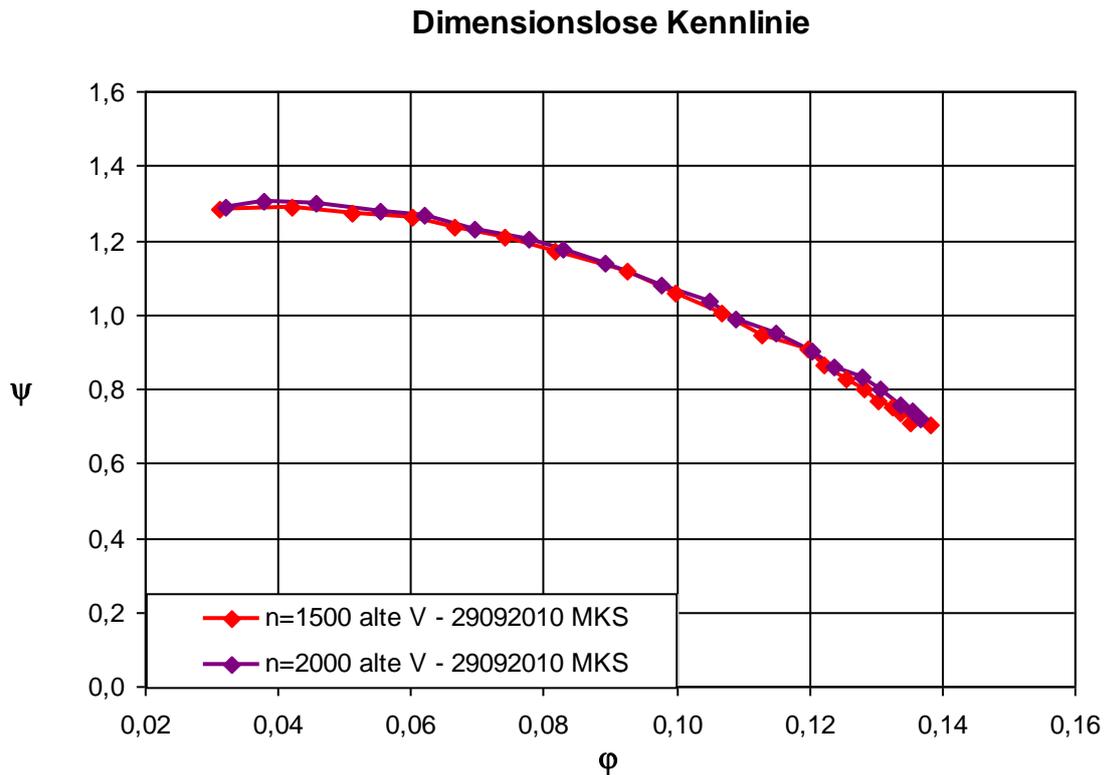


Diagramm 17: Druckzahl über Durchflusszahl

Im Diagramm 17 sind die dimensionslosen Kennzahlen ψ über ϕ aufgetragen. Diese wurden aus den dimensionsbehafteten Messdaten berechnet. Wie erwartet, zeigen die bei verschiedenen Drehzahlen ($n=1500$ U/min, $n=2000$ U/min) dargestellten Kurven auch durch den Einsatz neuer Druckmessgeräte, eine gute Übereinstimmung.

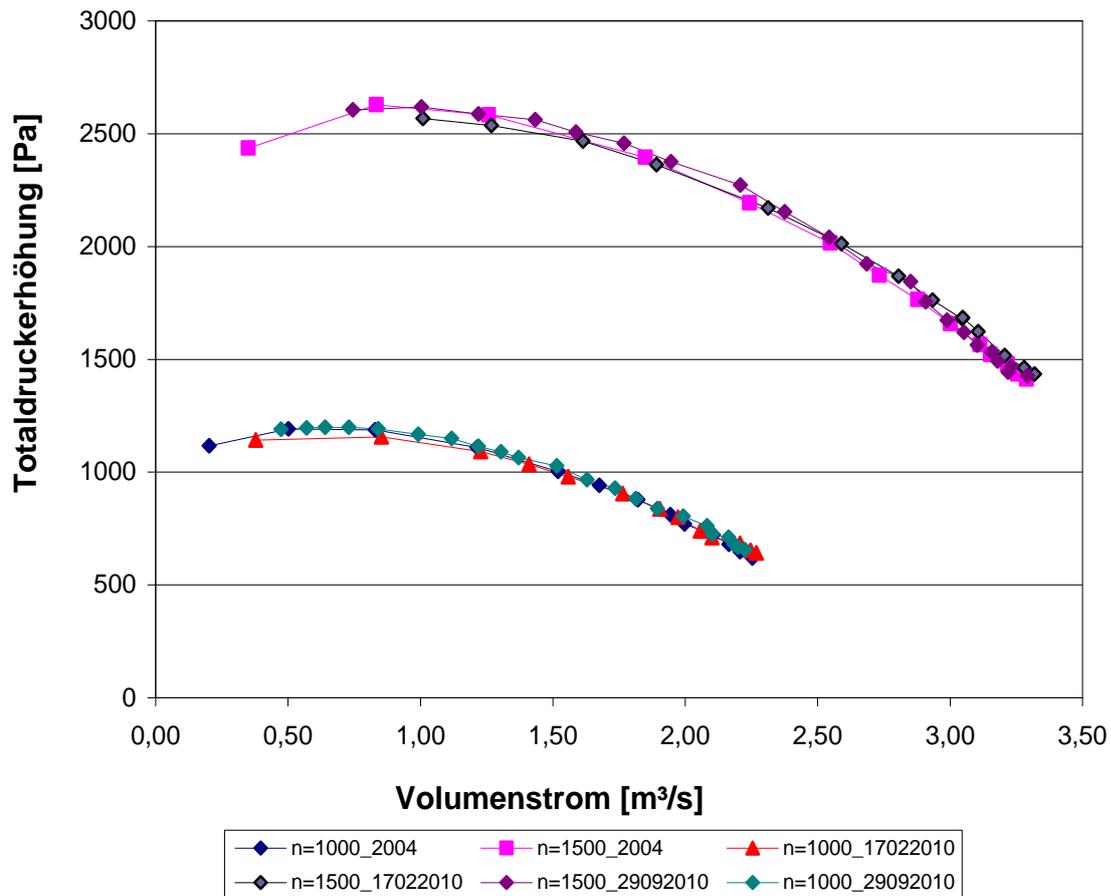


Diagramm 18: Totaldruckerhöhung über Volumenstrom

Im Diagramm 18 ist die Totaldruckerhöhung über den Volumenstrom aufgetragen. Wie erwartet verhält sich die Totaldruckerhöhung proportional zu den Drehzahlen. Die Kennlinien, welche mit den neuen Druckmessgeräten erfasst wurden, stimmen mit denen der alten Geräte überein. Somit könnten weitere Messungen mit anderen Ventilatoren durchgeführt, da die Messkette validiert ist.

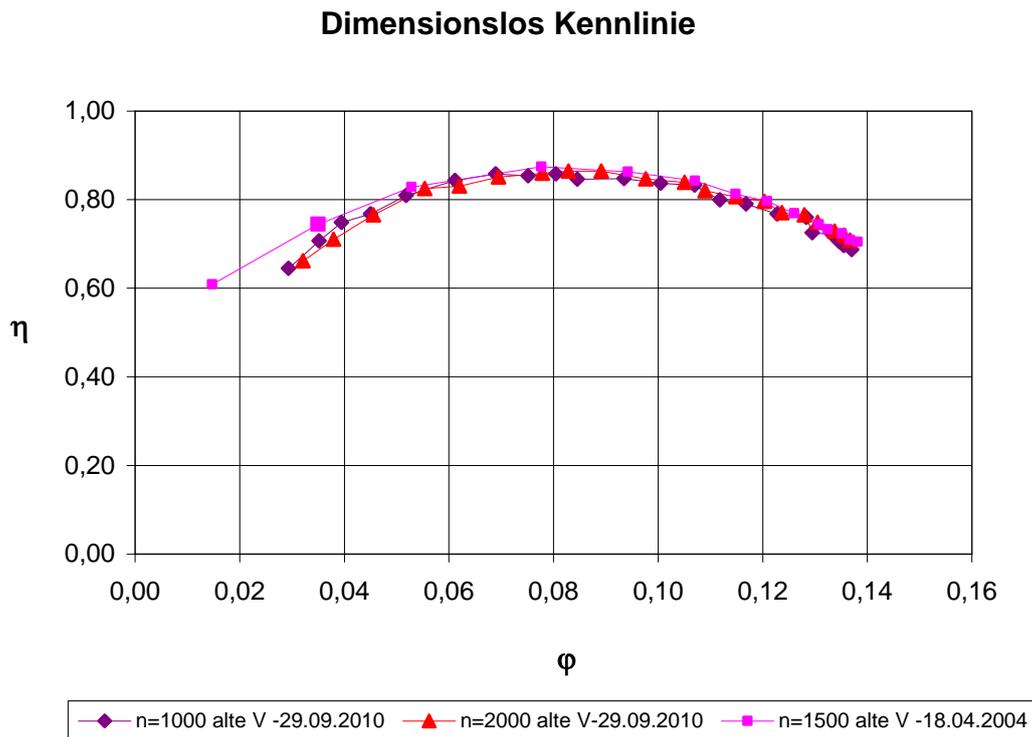


Diagramm 19: Wirkungsgrad über Durchflusszahl

Im Diagramm 19 sind die dimensionslosen Kennzahlen ψ über ϕ aufgetragen. Hierbei wurden die alten Kennlinien von 2004, welche im Rahmen der Diplomarbeit von Herrn Sariasalan aufgezeichnet wurden, mit den neuen Kennlinien von 2010 verglichen. Dieser Vergleich zeigt, dass trotz Modernisierungsmaßnahmen, welche die verwendeten Messgeräte betroffen hat, eine gute Übereinstimmung der Kennlinien bewahrt wurde. Außerdem wurde ein maximaler Wirkungsgrad von 86 % erreicht.

8.2 Darstellung der Optimum

Im Diagramm 20 sind sowohl der Wirkungsgrad η als auch die Druckzahl ψ und ihr Optimum über die Durchflusszahl ϕ aufgetragen.. Aus der Tabelle 9 ist das Erreichen des optimalen Wirkungsgrades von $\eta = 0,86$ % abzulesen.

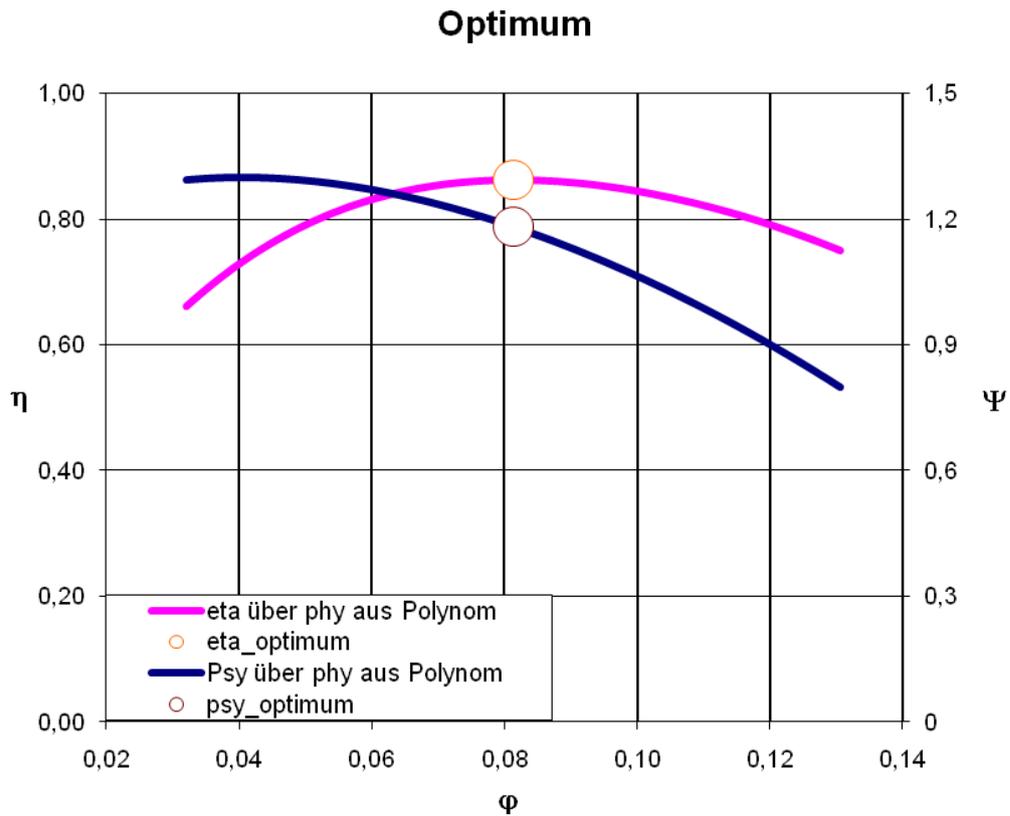


Diagramm 20: Wirkungsgrad und Druckzahl über Durchflusszahl

Tabelle 9: Optimum der erhaltenen Kennzahlen VR-772

Optimum:			
ϕ	0,08		
Ψ	1,18		
η	0,86		
σ	0,25		
λ	0,11		
Polynomkoef.		grad	
y	4	h	4
m6	0,00	m6	0,00
m5	0,00	m5	0,00
m4	-1276,90	m4	-2560,92
m3	553,17	m3	1197,33
m2	-137,02	m2	-249,25
m1	8,75	m1	22,31
b	1,16	b	0,19

8.3 Radialventilator RV-680

Das Betriebsverhalten des Radialventilators wird durch seine Kennlinien charakterisiert. Ferner werden die Kenngrößen Volumenstrom, die Leistung oder der Wirkungsgrad zur Beschreibung herangezogen. Für die Darstellungen dient der Volumenstrom als Bezugsgröße, während die Leistung, die Druckerhöhung oder der Wirkungsgrad als Parameter auftreten. Für die durchgeführten aerodynamischen Messungen werden zunächst die Drosselkennlinien aufgezeichnet. Die zu den dargestellten Diagrammen gehörenden Tabellen werden elektronisch im Anhang archiviert.

Ausgangspunkt für die Vermessung des Radialventilator RV-680 ist, dass die Firma Ventec AG keine Übereinstimmung zwischen der Auslegung bzw. den approximierten Kenngrößen und den gemessenen Daten erzielen konnte. Aus diesem Grund dienen die Messungen an der FHD zur Validierung der Ventec-Messung.

Im Diagramm 21 sind sowohl der Wirkungsgrad η als auch die Totaldruckerhöhung über den Volumenstrom aufgetragen, jeweils bei der Drehzahl 1500 U/min bzw. 1530 U/min.

Zunächst werden die dimensionslosen Kennzahlen η und ψ als Parameter über φ als Bezugsgröße für unterschiedliche Drehzahlen dargestellt (Diagramm 22). Die Erfassungen wurden bei den Drehzahlen 1500 U/min und 2000 U/min durchgeführt. Wie erwartet steigt die Totaldruckerhöhung quadratisch mit der Drehzahl an. Dabei wurde eine Übereinstimmung der dimensionslosen Kennlinien erreicht.

Es ist auch gut zu erkennen, dass der Wirkungsgrad bei den Messungen einen maximalen Werte von $\eta_{\max} = 0,85$ erreicht hat.

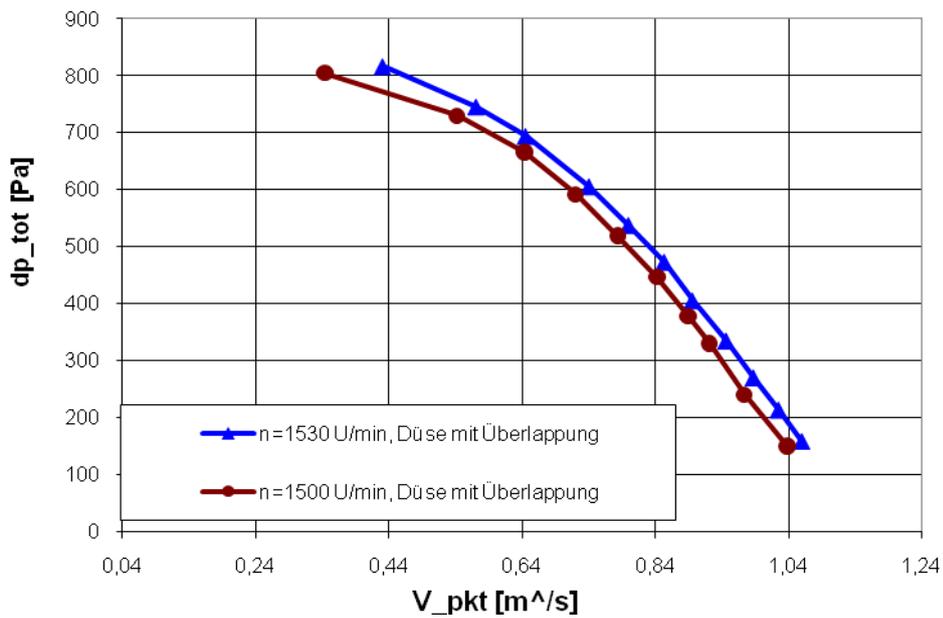
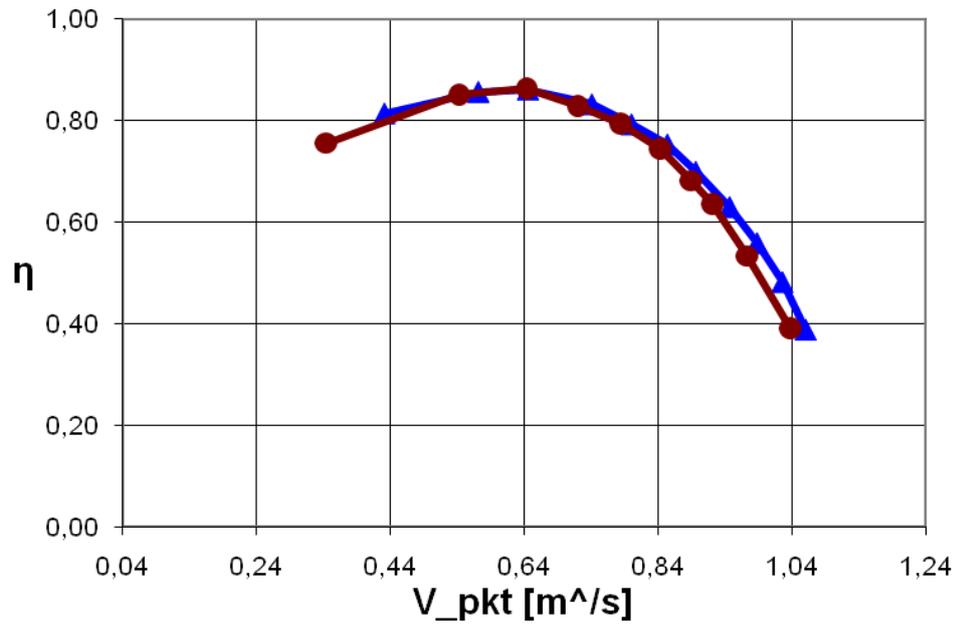


Diagramm 21 a-b: Dimensionsbehaftete Kennlinien, RV-680 mit überlappende Einlaufdüse

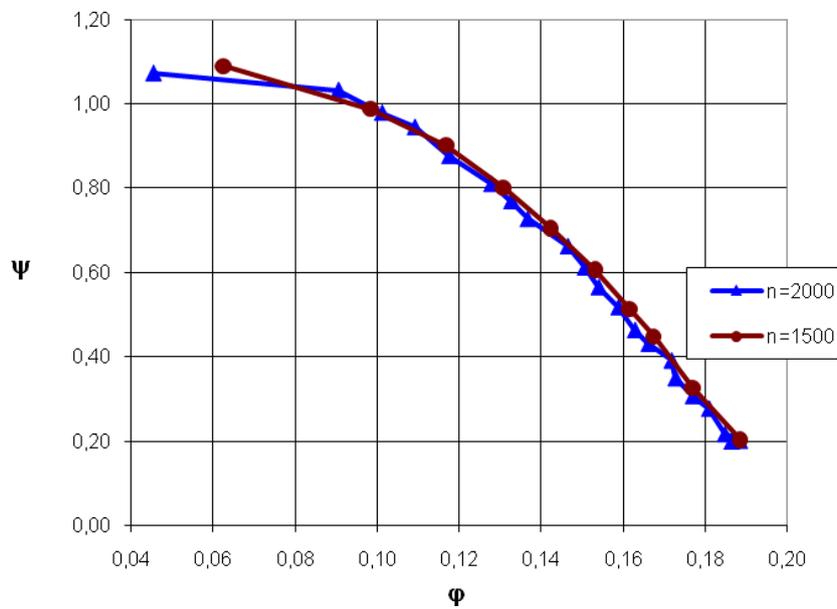
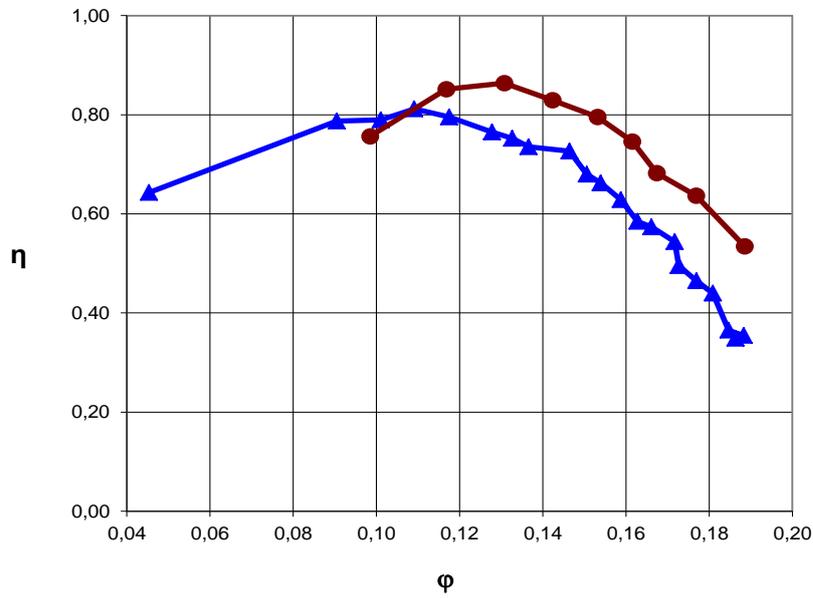


Diagramm 22 a-b: Dimensionslose Kennlinien, Drehzahlvariation, RV-680 mit überlappenden Düse.

Aus Diagramm 22 -b ist klar zu erkennen, dass die Übereinstimmung der dimensionslosen Kennlinien erreicht wurde.

8.3.1 Alpha-Werte Bestimmung

Zur Bestimmung des Durchflussfaktors wurde der Wirkdruck vor und hinter dem Radialventilator gemessen. Aus diesem lassen sich die Volumenströme (\dot{Q}_{Blende} und $\dot{Q}_{\text{Düse}}$) berechnen. Der Durchflussfaktor α beschreibt das Verhältnis des Volumenstroms an der Blende zum Volumenstrom an der Düse.

Unter Vernachlässigung der Reibungseffekte in der Bernoulli-Gleichung zur Berechnung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit gilt:

$$\frac{c_{\infty}^2}{2} + \frac{p_{\infty}}{\rho} = \frac{c_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} \quad (25)$$

Hiernach wäre die berechnete Geschwindigkeit größer als die tatsächliche Geschwindigkeit im Rohr. Daher ist der Durchflussfaktor α der Quotient aus dem Volumenstrom im Rohr, bzw. an der Blende und dem Volumenstrom an dem Eintritt der Einlaufdüsen. Somit ist

$$\dot{V} = \alpha_{\text{düse}} \cdot A_{\text{Rohr}} \cdot c_1 \quad (26)$$

Daraus folgt:

$$\alpha_{\text{düse}} = \frac{\dot{V}_{\text{Rohr}}}{\dot{V}_{\text{düse}}} \quad (27)$$

\dot{V}_{rohr} Volumenstrom an der Blende

$\dot{V}_{\text{düse}}$ Volumenstrom an der Einlaufdüse

Der Durchflussfaktor α einer Einlaufdüse ist experimentell über eine Kalibrierung zu bestimmen und liegt in der Regel zwischen 0,96 und 0,98./10

Bei dieser Arbeit wurden zwei Messverfahren zur α -Wert Bestimmung angewendet. Im ersten Fall wird die Drehzahl variiert, während ein fester Betriebspunkt durch die Drossel eingestellt ist.

Bei dem zweiten Verfahren wird mit Hilfe der Drossel der entsprechende Betriebspunkt eingestellt, parallel wird die Drehzahl konstant gehalten. Es wird also im übertragenen Sinne eine Anlagenkennlinie in Referenz gesehen zu einer Drosselkennlinie. Um auch den Einfluss der Messgenauigkeit der verwendeten Druckmessgeräte aufzuzeigen wurden Messgeräte unterschiedlicher Genauigkeitsklassen verwendet. In diesem Zusammenhang wird das Druckmessgerät DP 205 der Firma MECOTEC und entsprechend Typ PR 4008 der Firma MKS eingesetzt.

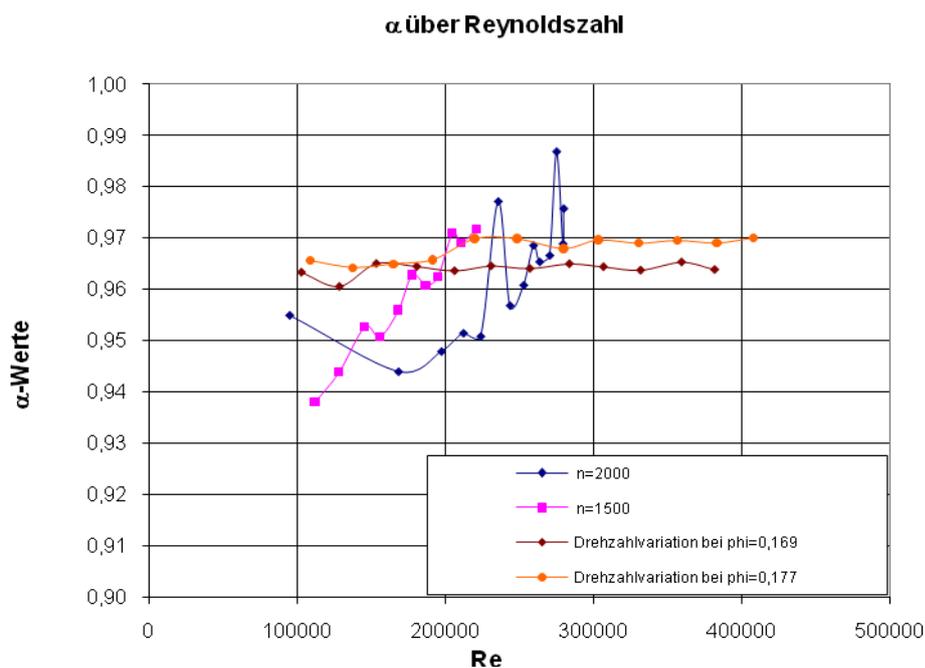


Diagramm 23: Alphawertverlauf über Reynoldszahl.

Bei den Messungen im Diagramm 23 mit den Drehzahlen $n = 1500$ und 2000 U/min ist zu erkennen, dass die α -Werte durch die Drosselung mit zunehmender Reynoldszahl steigen. Grund hierfür könnte eventuell die nicht störungsfreie Zuströmung gewesen sein. Dadurch wird die Drallkomponente am Eintritt des Laufrades zu groß und verstärkt sich entsprechend bei der Drosselung des Ventilators. Dagegen haben Messungen mit Drehzahlvariation relativ konstante α -Werte gezeigt. Die α -Wert-Grenze von 0,96 wurde in den beiden Fällen erreicht.

Darüber hinaus wurden zwei Versuche durchgeführt. Bei einem wird die Einlaufdüse direkt an dem Ventilatoreintritt angebracht, bei dem anderen Versuch ist eine ca. zwei Meter lange Leitung zwischen der Einlaufdüse und den Ventilatoreintritt zum Einsatz gekommen, um zu überprüfen, ob eine Drallkomponente vorliegt und in einer unmittelbar am Ventilatorgehäuse angeflanschte Düse die Messwerte beeinflusst. Diagramm 24 stellt die Ergebnisse dar.

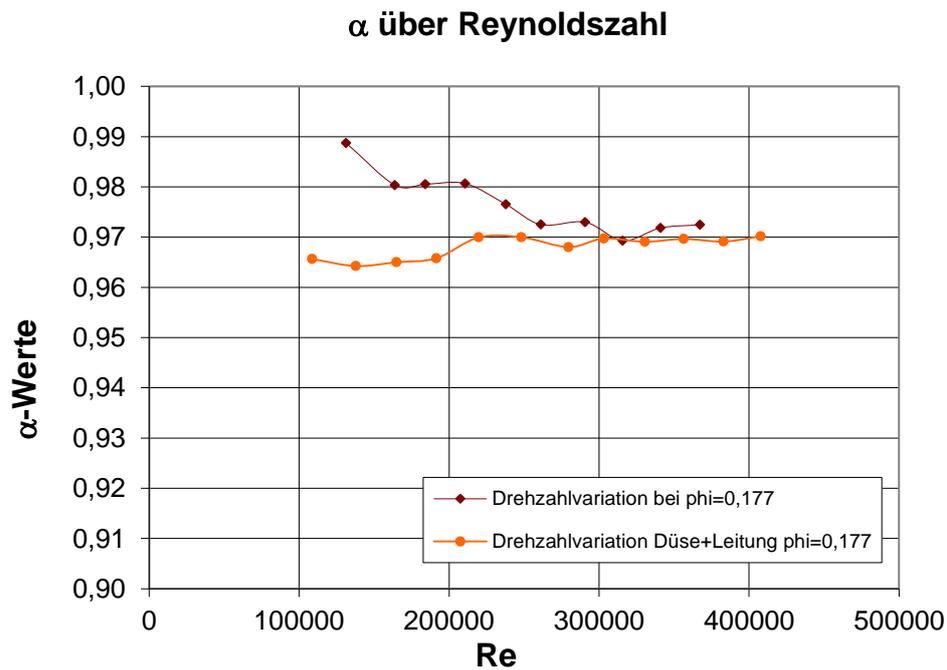


Diagramm 24: Alphawertverlauf über Reynoldszahl.

Diagramm 24 zeigt den Unterschied zwischen den Messungen mit und ohne Leitung zwischen Einlaufdüse und Ventilatoreintritt. Hierbei ist klar zu erkennen, dass die Messung mit Leitung bessere Werte gezeigt haben. Die Schwankungen der Alphawerte (Düse ohne Leitung) sind dadurch zu begründen, dass die statischen Druckbohrungen der Einlaufdüse zu nah am Laufrad sind.

Weitere Messungen haben gezeigt, dass das neue Messgerät MKS im Vergleich zum Mecotec Messgerät genauere Messwerte liefert. (siehe Diagramm 25).

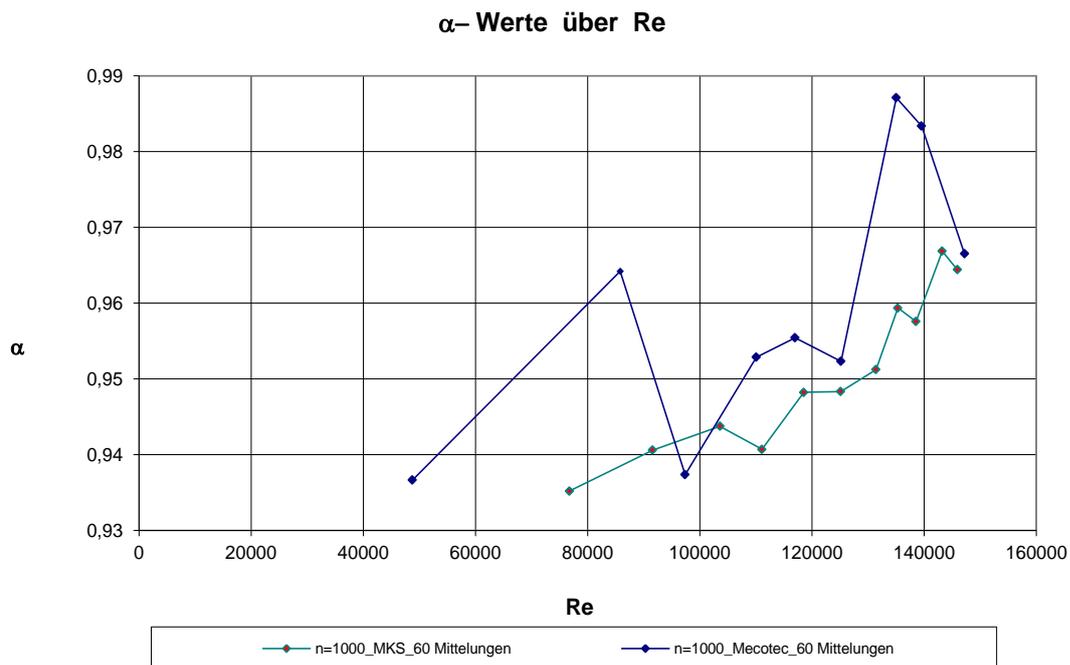


Diagramm 25: Vergleich der MKS und Mecotec Messgeräte

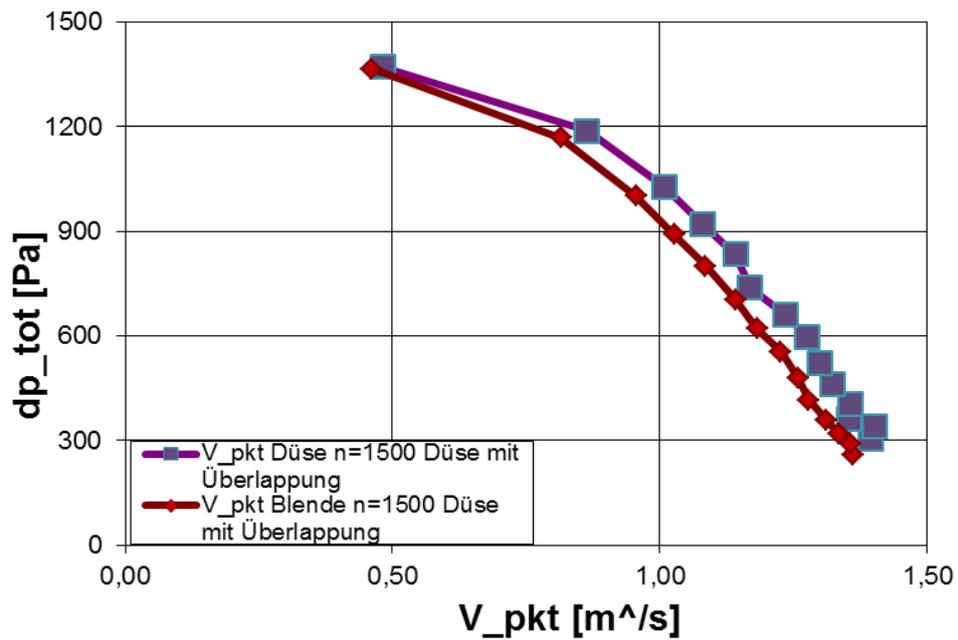
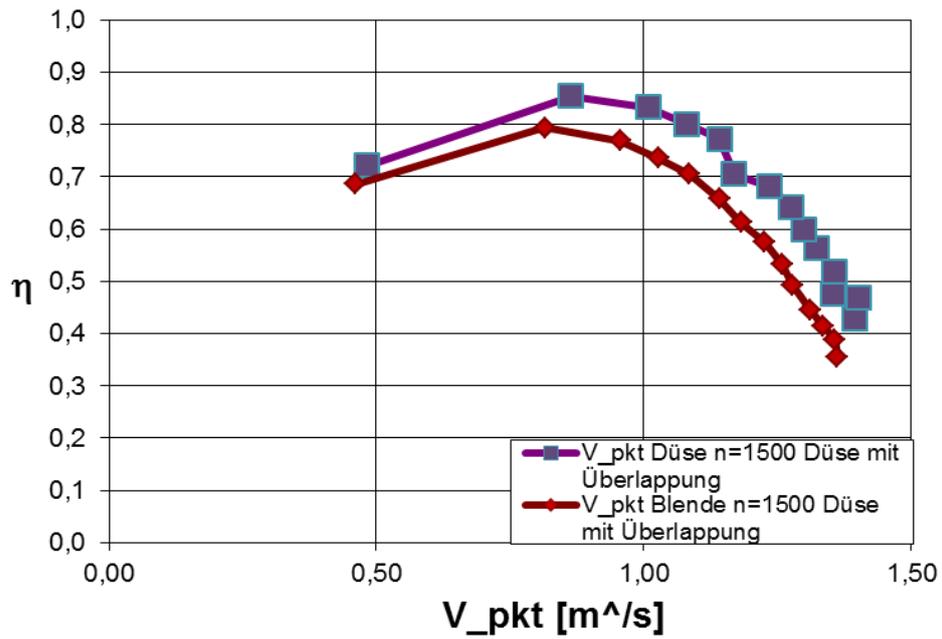
Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Einlaufdüse sensibel auf Drall des Ventilators reagiert. Durch Verlängerung der Zuströmleitung wurde der Einfluss des Dralls zwar reduziert aber er bleibt weiterhin vorhanden.

8.3.2 Vergleich zwischen Einlaufdüse und Messblende

Im Diagramm 26 sind die dimensionsbehaftete Kennlinien für zwei Messverfahren aufgetragen. Hierbei werden der Wirkungsgrad und die Totaldruckerhöhungen über den Volumenstrom bei gleicher Drehzahl aufgetragen. Wie erwartet steigt die Totaldruckerhöhung quadratisch mit der Drehzahl an.

Zunächst werden die dimensionslosen Kennzahlen η und ψ als Parameter über φ als Bezugsgröße für unterschiedliche Drehzahlen dargestellt (Diagramm 26). Die Erfassungen wurden bei der Drehzahl 1500 U/min durchgeführt. Wie erwartet wurde keine Übereinstimmung der Kennlinien erreicht. Grund hierfür ist der Verlust, welche durch Strömungsumlenkung verursacht wurde.

Es ist auch gut zu erkennen, dass der Wirkungsgrad bei den Messungen die maximalen Werte von $\eta_{\text{düse}} = 0,85$ und $\eta_{\text{Blende}} = 0,81$ erreicht haben. (Diagramm 26 und 27)

Diagramm 26: Dimensionsbehaftet Kennlinien, $n=1500$ U/min , RV-680 mit Überlappende Düse

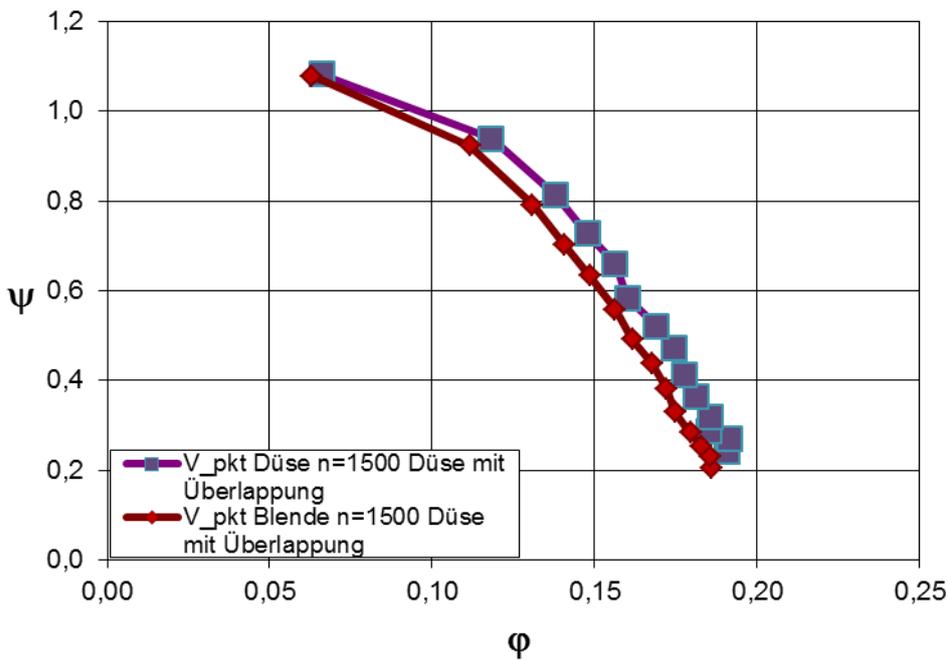
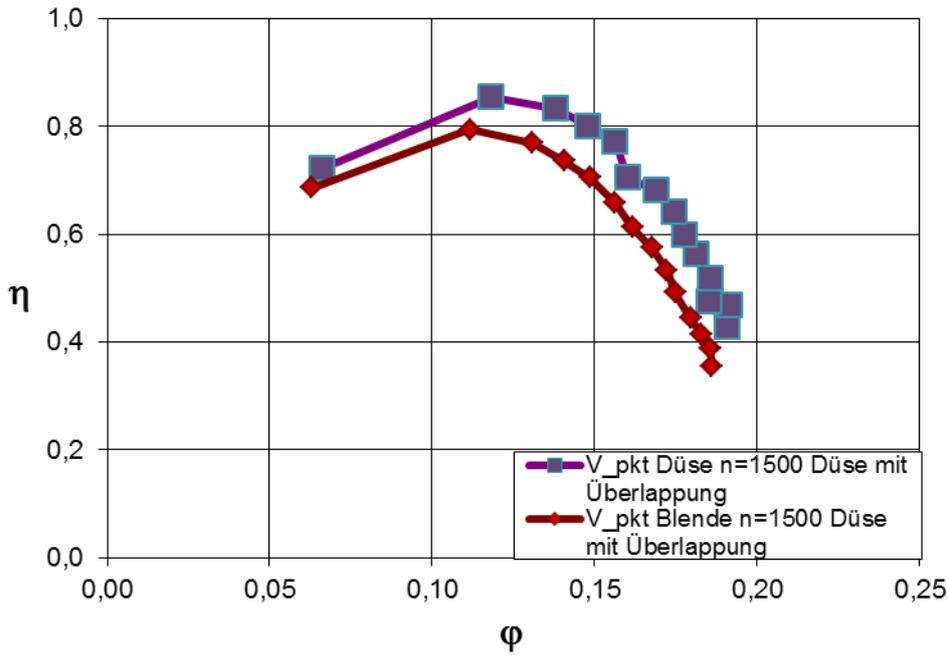


Diagramm 27 : Dimensionslose Kennlinien, n=1500 U/min , RV-680 mit Überlappende Düse

8.3.3 Vergleich zwischen Einlaufdüsen mit und ohne Überlappung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Arten von Einlaufmessdüsen miteinander verglichen:

- Einlaufdüse mit überdeckten Spalt Bild 63.a
- Einlaufdüse ohne überdeckten Spalt Bild 63.b

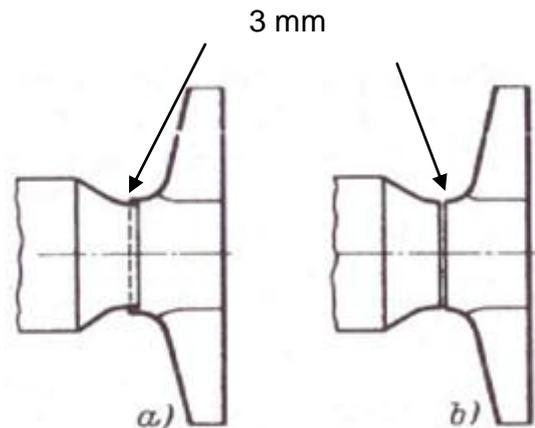


Bild 59: Skizze des überdeckten Spalts (a) und nicht überdeckten Spalts (b) der Düse

In Diagramm 28 sind die Kennlinien des Radialventilators mit überlappender Düse in dimensionsbehafteter und dimensionsloser Form dargestellt. η und Totaldruckerhöhung über Volumenstrom aufgetragen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Drosselkennlinien der Einlaufdüse mit überdecktem Spalt im Bereich $V_{\text{pkt}_{bl}} \geq 0,75 \text{ m}^3/\text{s}$ oberhalb der anderen liegt. Dagegen im Bereich $V_{\text{pkt}_{bl}} \leq 0,75 \text{ m}^3/\text{s}$ liegt diese unterhalb der Kurve der Einlaufdüse, welche mit nicht überdecktem Spalt ausgestattet ist. Darüber hinaus sind bei der Einlaufdüse mit nicht überdecktem Spalt ungünstige Rückführungen der Spaltluft eingetreten, obwohl das richtige Verhältnis zwischen Krümmungsradien und Saugdurchmesser des Laufrades eingestellt waren. Dies führte zur Abweichung der Druckzahl ψ von den Sollwerten. Durch den überdeckenden Spalt wird die Spaltluft so konstruiert, dass energiearme Grenzschichten durch zusätzliche Blasluft angereichert werden und sich die Strömung während der Umlenkung stabilisiert. Hierbei werden Verzögerungen ohne Strömungsablösung an der Umlenkkontur erzielt und ungünstige Abweichungen der Druckzahl vermieden. Die Ergebnisse aus dem Diagramm 28 entsprechen nicht den Ergebnissen aus der Literatur (Bild 66). Dabei sollten die gemessenen Kennlinien übereinander liegen und nicht sich kreuzen.

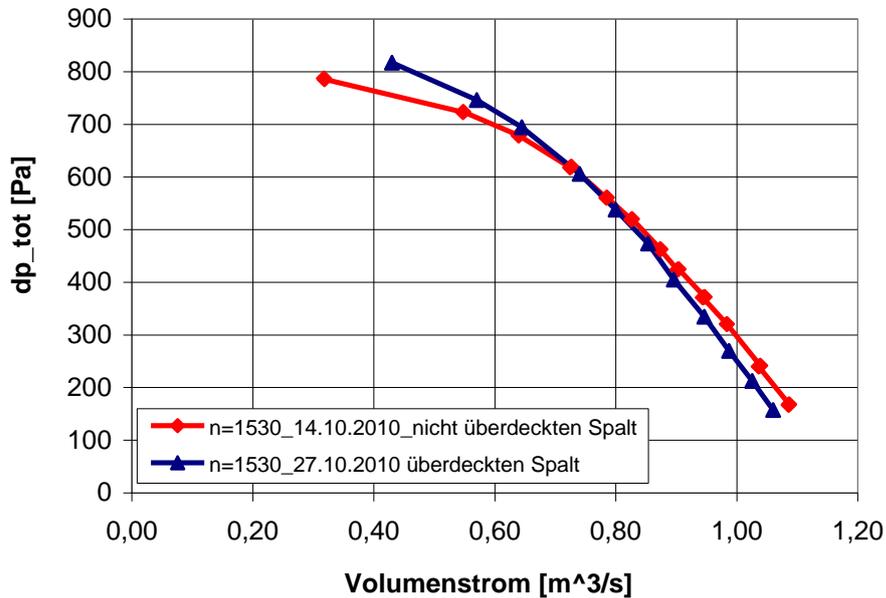
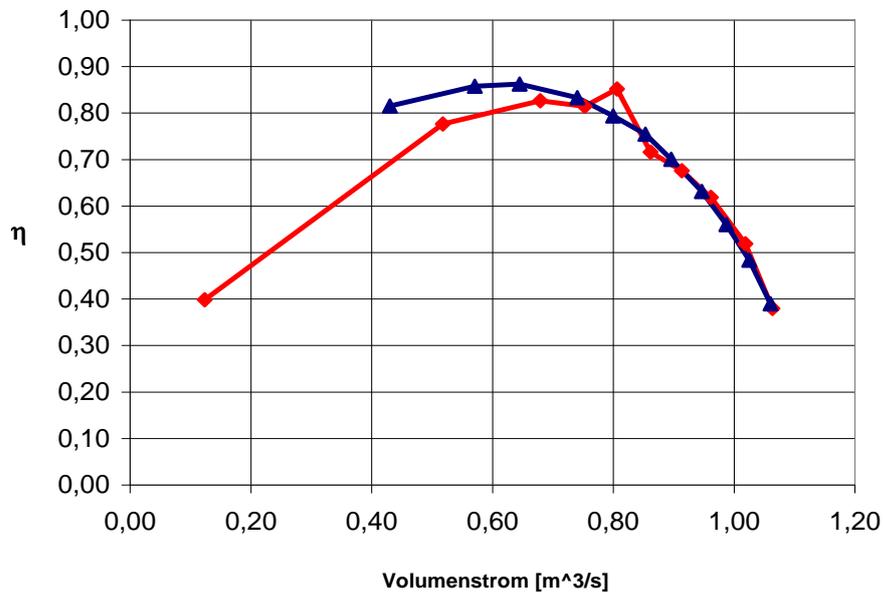


Diagramm 28: Kennlinien des Radialventilators mit überlappender Düse

Im Diagramm 29 sind Kennlinien des Radialventilators mit überlappender Düse in dimensionsloser Form η und ψ über ϕ aufgetragen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die

Kennlinien für die Düse ohne Überlappung bei der Aufzeichnung gestreut hat. Grund hierfür war die Störsignale, welche durch die Ausschaltung des Tiefpasses entstanden haben. Da diese Düse nur für kurze Zeit zur Verfügung gestellt wurde, konnten keine neuen Kennlinien aufgezeichnet werden.

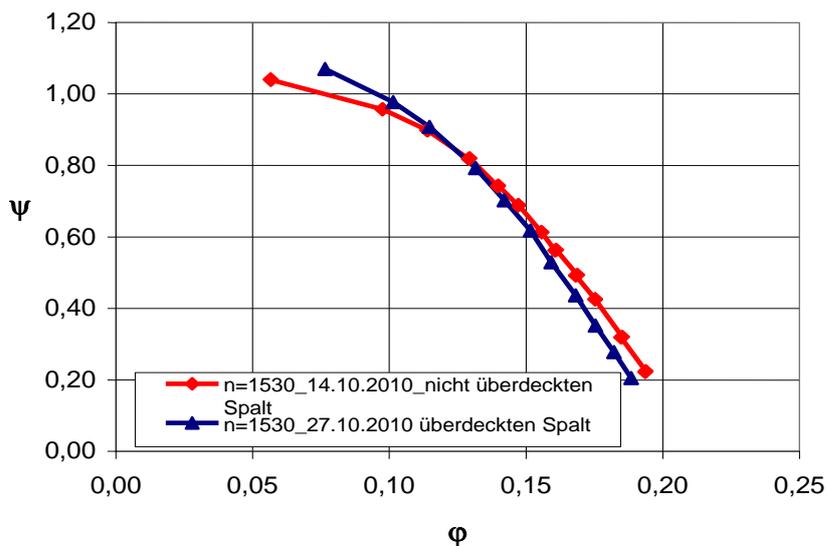
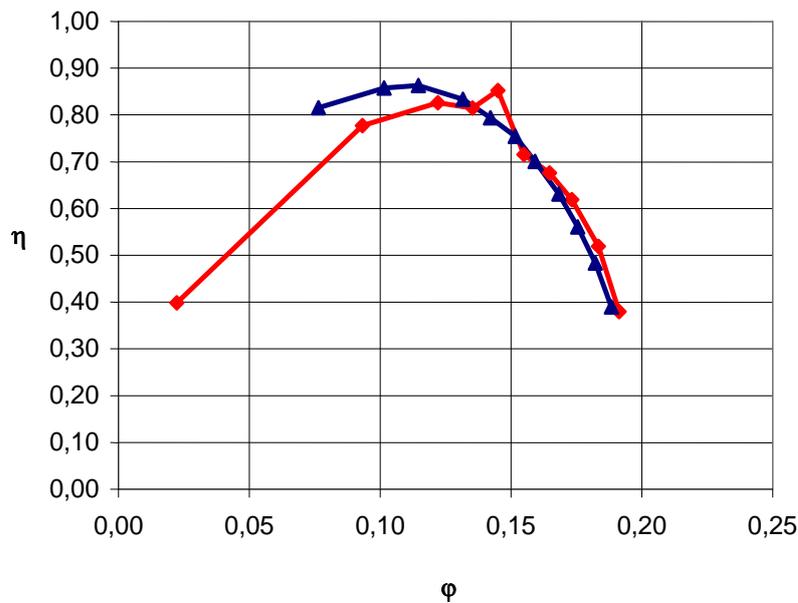


Diagramm 29: Dimensionlos Kennlinien des Radialventilators mit überlappender Düse

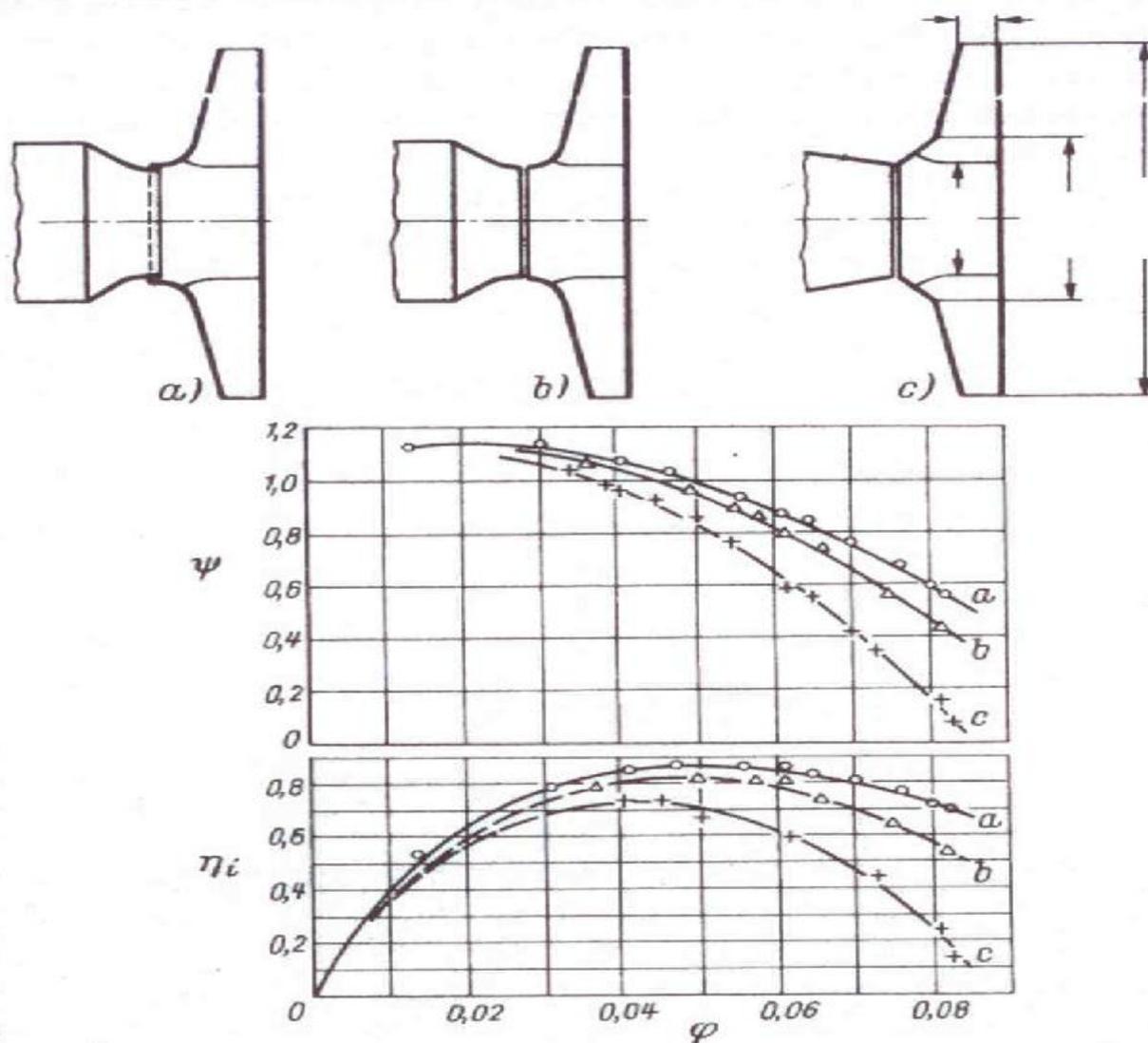


Bild 60: Dimensionslose Kennlinien eines Radialventilators mit verschiedenen Radeinläufen

- a) gerundete Umlenkkontur mit sich überdecktem Spalt
- b) gerundete Umlenkkontur mit sich nicht überdecktem Spalt
- c) eckige Umlenkkontur mit sich nicht überdecktem Spalt

8.3.4 Darstellung der Leistung

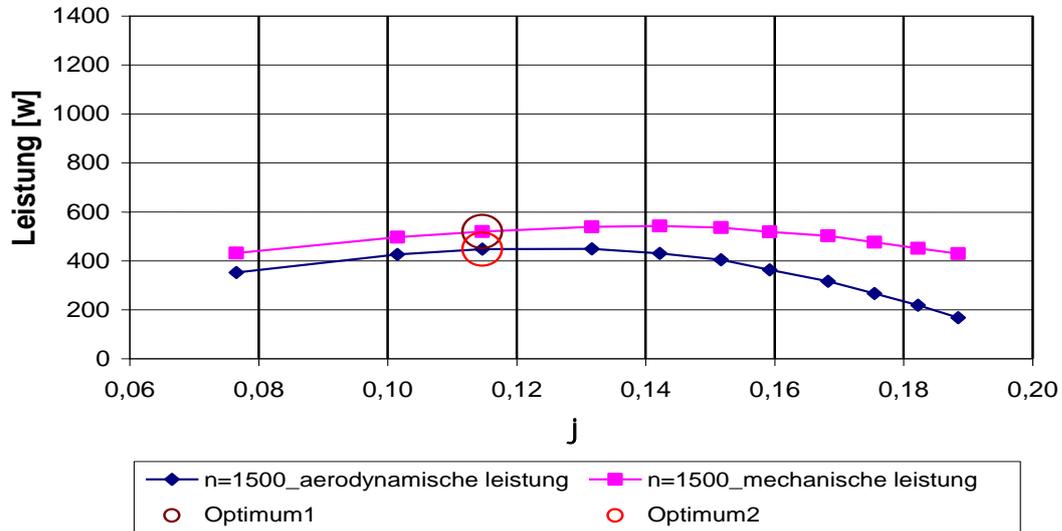


Diagramm 30: Leistung in Abhängigkeit von der Durchflusszahl

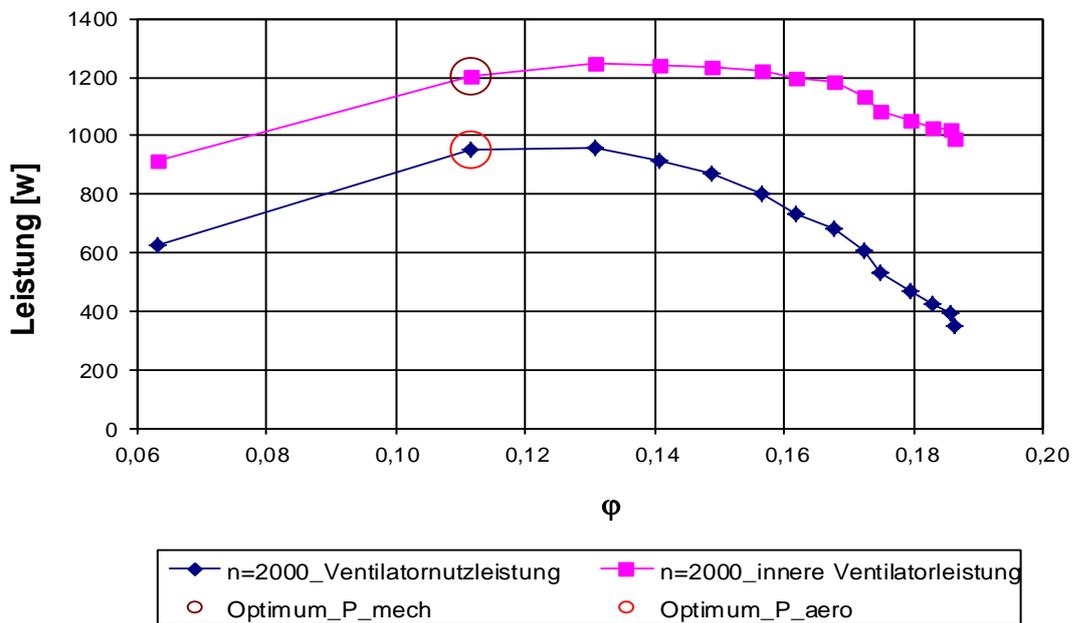


Diagramm 31: Leistung in Abhängigkeit von der Durchflusszahl

Mit $P_{aero} \text{ (Nutzleistung)} = Q_{bl} \cdot dp_{tot}$ und $P_{Antrieb} \text{ (innere Leistung)} = \omega \cdot M$

In den Diagrammen 30 und 31 wurden die mechanische- und die aerodynamische Leistung des Radialventilators über der Durchflusszahl für die Drehzahlen $n = 1500 \text{ U/min}$ und $n = 2000 \text{ U/min}$ aufgetragen. Wie zu erwarten gewesen ist, liegt die mechanische Leistung oberhalb der aerodynamischen Leistung. Ferner wird deutlich, dass die Differenz der Leistungen größer wird, je stärker gedrosselt wurde.

8.3.5 Darstellung des Optimums

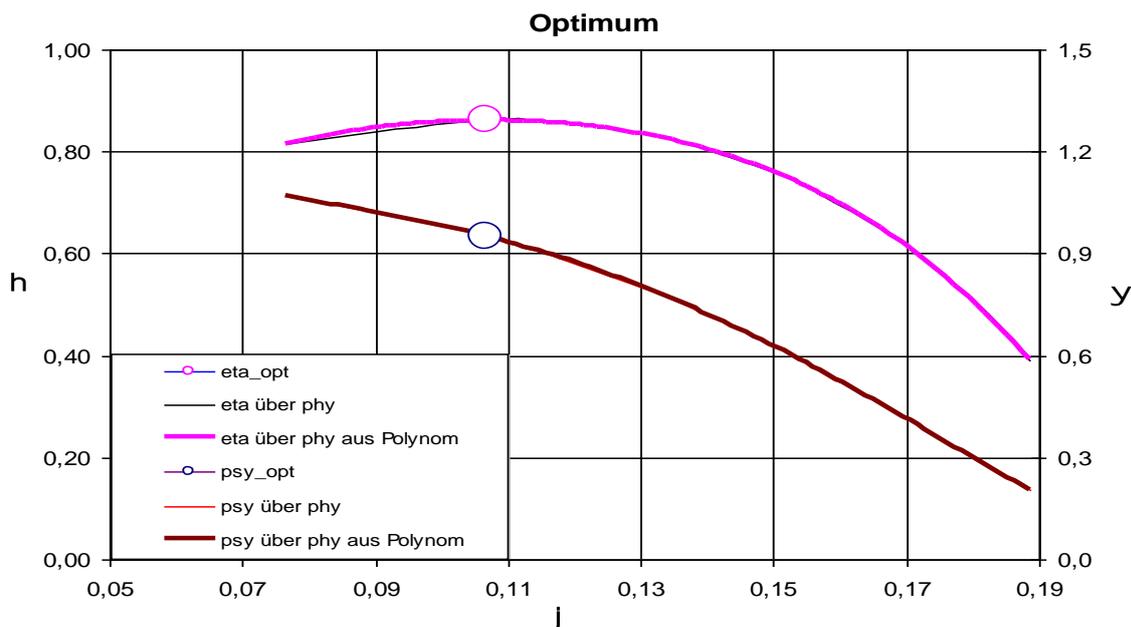


Diagramm 32: Optimum des RV-680

Tabelle 10: Optimum der erhaltenen Kennzahlen RV-680

Optimum	
φ	0,10
ψ	0,95
η	0,86
σ	0,33
λ	0,11

Im Diagramm 32 sind sowohl der Wirkungsgrad η als auch die Druckzahl ψ und ihr Optimum über die Durchflusszahl φ aufgetragen. Dies geschah mit Hilfe einer Excel-Tabelle, welche von der Firma Ventec AG erzeugt und im Rahmen dieser Arbeit erweitert wurde. Aus der

Tabelle 10 ist das Erreichen des optimalen Wirkungsgrades von $\eta = 0,86 \%$ abzulesen. Weitere Darstellungen der Optima werden im Anhang-D beigefügt.

9 Messung der von Radialventilator abgestrahlten Schalleistung

9.1 Aeroakustische Modelgesetze

Die von dem Radialventilator in Kanal abgestrahlte Schalleistung hängt im gewissen Maß von der Art des Kanals ab, aufgrund seiner akustischen Impedanz. Der Messkanal besteht gemäß EN ISO 5136 aus einem kreisförmigen Querschnitt und einem reflexionsarmer Abschluss.

Das Verfahren (DIN EN ISO 5136) ist auf Ventilatoren anwendbar, die breitbandigen, schmalbandigen oder tonalen Dauerschall aussenden. Sie gilt für Lufttemperaturen von -50 °C bis $+70$ °C. Der Bereich des Messkanaldurchmessers erstreckt sich von $0,15$ m bis 2 m.

Das Geräuschspektrum eines Ventilators ist im Allgemeinen breitbandig und wird je nach Ventilortyp mehr oder weniger stark von einem diskreten Spektrum überlagert.

Grundsätzlich kann im Geräuschspektrum eines Ventilators ein primär aerodynamischer Anteil, verursacht durch die Fluidströmung im rotierenden Laufrad und zwischen den feststehenden Gehäusewänden, sowie ein sekundärer Anteil, bestehend aus mechanischen Schwingungen fester Ventilatorbauteile und Hohlraumresonanzen, festgelegt werden./13

9.2 Versuchsaufbau

Die akustischen Messungen werden in einem Drehkanal durch das Kondensatormikrofon der Hersteller Brüel&Kjær durchgeführt. Das Mikrofon ist in einer Schlitzrohrsonde eingeschraubt. Der Drehkanal wird über einen Schrittmotor, durch einen sogenannten BRECOFLEX-Zahnriemen der Firma Breco angetrieben. Der Kanal dreht sich mit einer Umdrehungsgeschwindigkeit von 1 U/min. Der Schrittmotor wurde von einer TLC 511-F Positioniersteuerung, welche an einen Rechner angeschlossen ist, gesteuert. Bedient wurde die Positioniersteuerung am Rechner mit einem Programm, das in LabVIEW von Klitz /14/ geschrieben wurde. Die erfassenden Signale wurden mittels Brüel&Kjær-Verstärker verstärkt. Durch den Drehkanal werden mögliche Signale 60 Sekunden lang aufgenommen. Die gespeicherten Wave-Files wurden durch ein vorprogrammiertes Programm unter Matlab ausgewertet. Bild 61 stellt den Versuchsaufbau dar und in Tabelle 11 wurden die dazugehörigen Messgeräte aufgelistet.

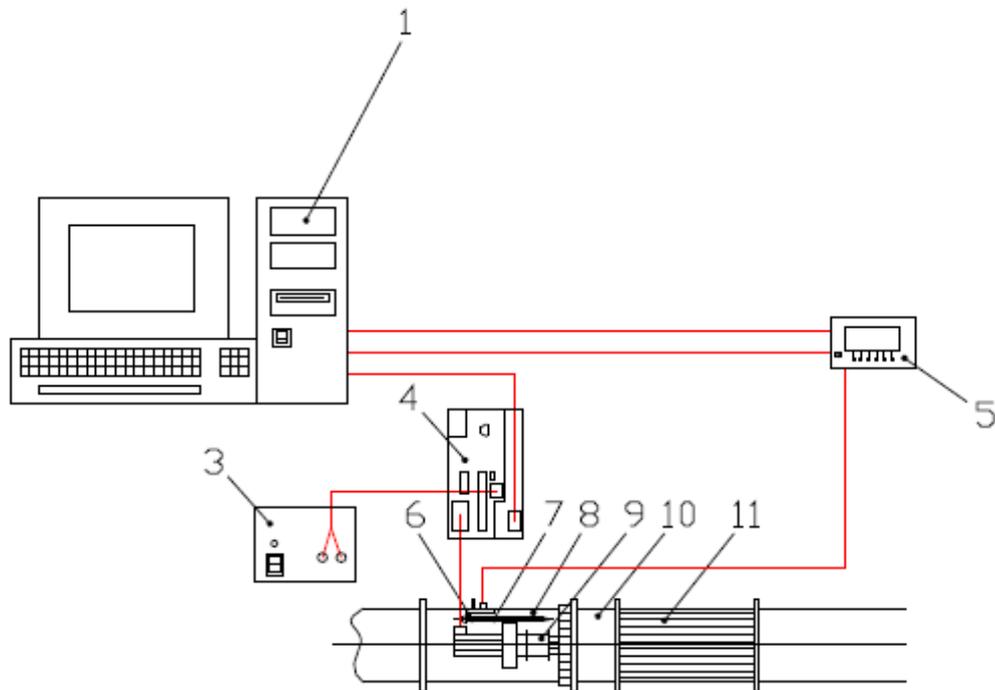


Bild 61: Schematische Darstellung des aeroakustischen Prüfstandes und deren Messtechnik/15

Tabelle 11: Prüfstandkomponenten

N°	Prüfstandkomponente	Typ
1	Rechner	Pentium 3
3	Netzteil	Typ 2133
4	Positioniersteuerung	TLC 511-F
5	Signalverstärker	Brüel&Kjaer-Verstärker „Nexus“ Typ 2690
6	Kondensatormikrofon	Brüel&Kjaer Typ 4133
7	Schlitzzrohrsonde	Brüel&Kjaer Typ UA0436
8	Drehkanal	
9	Schrittmotor	SIG positec VRDM 397/50 LWC
10	Manschette	
11	Strömungsrichter	

9.3 Die benutzte Brüel&Kjaer-Schlitzrohrsonde

Der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Schlitzrohrsonde ist ein Metallrohr mit einem Längsschlitz, hinterlegt mit einem offenporigen Material, in welches das Mikrofon eingebracht wird, und das so ausgelegt ist, dass das Mikrofon nur in geringerem Maße auf das selbstinduzierte Strömungsgeräusch und auf durch Turbulenz hervorgerufene Schwankungen des Luftdrucks im Kanal anspricht. Mit der Verwendung dieses Verfahren ist eine maximale Strömungsgeschwindigkeit von 40 m/s zulässig.

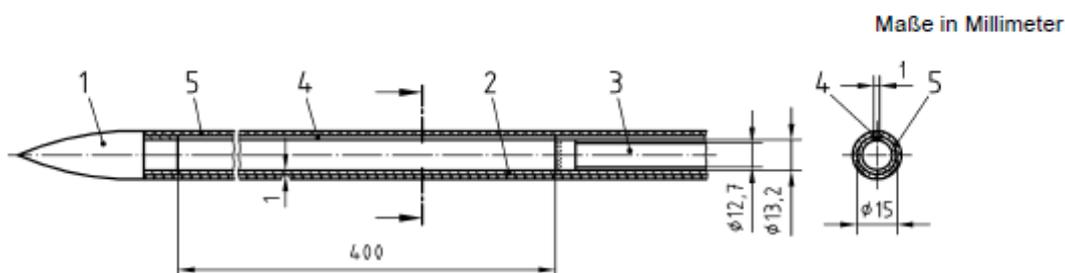


Bild 62: Schematische Darstellung einer Schlitzrohrsonde für ein 13-mm- (1/2-Zoll-) Mikrofon/16

1. Nasenkonus
2. Schlitzrohr
3. Mikrofon
4. Schlitz
5. Poröses Material

Der Turbulenzschirm wurde wie im Bild 62 angeordnet.

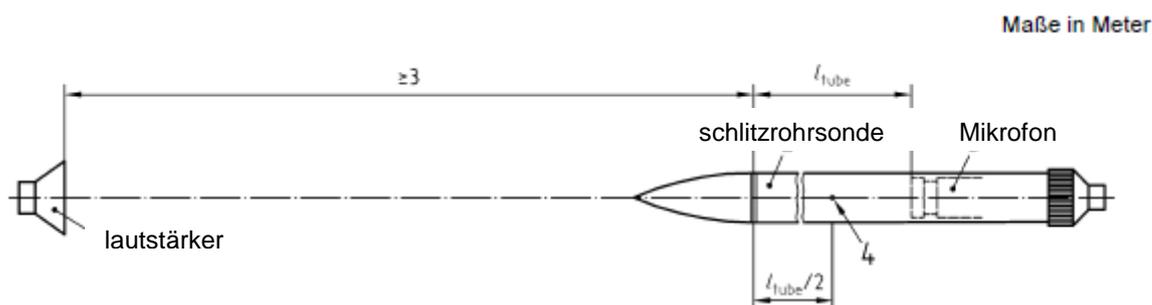


Bild 63: Anordnung des Bezugsmikrofons/16

Nach [11] wird empfohlen, die Messmikrofone jeweils vor und nach jeder Messreihe zu kalibrieren. Mindestens sind sie jedoch vor jeder Messreihe zu kalibrieren. Dabei ist es besonders wichtig, bei der Kalibrierung die gesamte während der eigentlichen Messung zur Anwendung kommenden Messkette zu berücksichtigen. Im Falle der akustischen Messung mit dem Drehkanal und dem Messprogramm wird von einer nachträglichen Kalibrierung des Systems ausgegangen, d.h. es werden vor Messbeginn die Kalibriersignale aufgezeichnet und es erfolgen dann die Messungen. Erst nachdem die Messreihe beendet ist, werden aus den Kalibriersignalen die Kalibrierfaktoren berechnet, die dann bei der Analyse der akustischen Messdaten angewendet werden. Dies macht noch einmal deutlich, warum die Kalibriersignale bei komplett angeschlossener Messkette aufgenommen werden müssen. Im Folgenden wird die Berechnung der Kalibrierfaktoren beschrieben, wie sie bei der Analyse der akustischen Messungen am Drehkanal, im Rahmen dieser Arbeit, durchgeführt wurde. Es wird davon ausgegangen, dass die Kalibrierung mit einem der beiden nachfolgenden Signalen durchgeführt wird:

1. 1000 Hz mit 94 dB/Schallpegelkalibrator
2. 250 Hz mit 124 dB/Pistenphon

Für den Pistonfon-Kalibrierpegel von $L_p = 124$ dB muss – um eine Übersteuerung zu vermeiden und einen genügend großen Rauschabstand zu gewährleisten – die Regelverstärkerstufe auf 0 dB und der Nexus-Verstärker-Outputwert auf 3,16 mV/Pa eingestellt werden. Bei der Kalibrierung mit dem Brüel&Kjaer-Kalibrator $L_p = 94$ dB ergibt sich die Einstellung der Regelverstärkerstufe ebenfalls mit 0 dB und der Verstärker-Outputwert jedoch mit 100 mV/Pa.

Die Kalibriersignale liegen in Form von WAV-Dateien vor. Das MATLAB-Programm berechnet zunächst unter Anwendung des Flat-Top Fensters das lineare Autopowerspektrum. Anschließend sucht es in der Nähe von 250 Hz und 1000 Hz das Maximum im Autopowerspektrum.

Anhand eines Vergleiches der beiden Maximalwerte wird festgestellt mit welchem der beiden Kalibriersignale kalibriert wurde. Damit steht der Sollschalldruckpegel fest (94 dB oder 124 dB)./14

Im Bild.64 ist ein Beispiel einer Programmausgabe nach Berechnung des Kalibrierfaktors dargestellt.

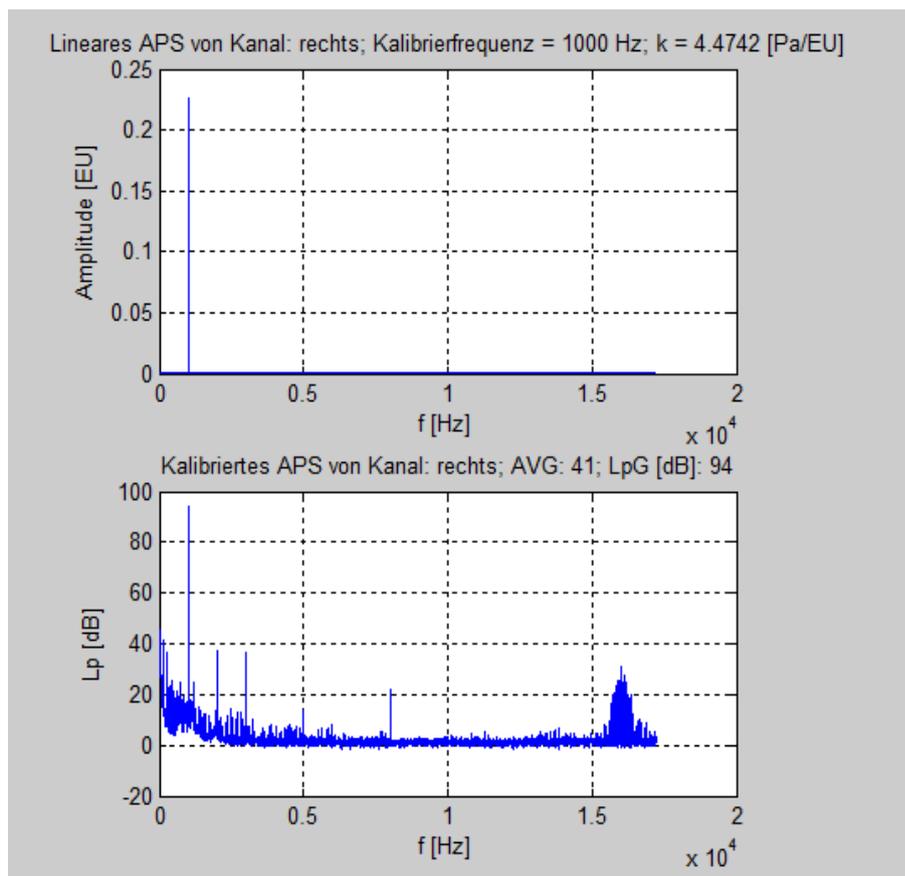


Bild 64: Ausgabe des MATLAB-Programms zur Berechnung des Kalibrierfaktors

9.4 Blattfolgefrequenz (BFF)

Im Frequenzbereich fallen vor allem die Frequenzen auf, mit der die Schaufeln Wechseldrücke erzeugen. Passiert eine Schaufel das Mikrofon, so erzeugt die vorbeistreichende Schaufel einen Wechseldruck, der vom Mikrofon erfasst wird. Die so entstehende Frequenz nennt man

Blattfolgefrequenz:

$$BFF = n \cdot Z$$

mit der Drehzahl n in 1/s und der Schaufelzahl Z des Rotors.

9.5 Durchführung und Auswertung der Messungen

Es wurden während dieser Arbeit akustische Messungen eines Radialventilators bei unterschiedlichen Drehzahlen durchgeführt. Als erstes wurden Leerlauf Messungen sowohl für stillstehende, als auch für drehende Drehkanäle durchgeführt. Die Leerlaufmessungen mussten vor allem zeigen, ob Störgeräusche vorhanden waren.

Dargestellt sind in den Diagramme 33-40 die Schalldruckspektren von 0 – 12.5 kHz. diese beinhalten die Auswertung der Geräusche des Ventilators mit 1000,1010,1460,1470,1500und 2000 U/min jeweils mit drehendem Drehkanal und unterschiedlichen Kalibriergerät.

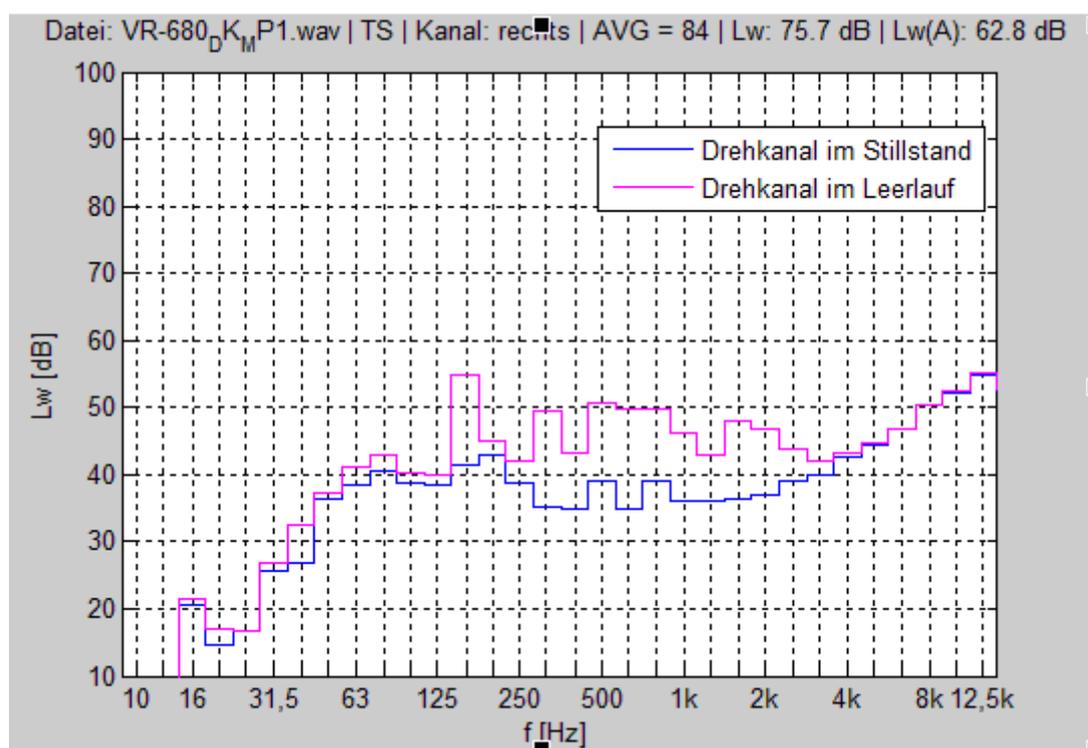


Diagramm 33:Gegenüberstellung der Terzspektrum bei n= 0 U/min

Wie erwartet liegen im Terzspektrum die Pegel im stillstehenden Drehkanal unter den Schalldruckpegeln, welche bei drehendem Drehkanal entstanden sind. Grund hierfür sind eventuell die Geräusche, welche durch die undichten Stellen des Prüfstandes verursacht wurden.

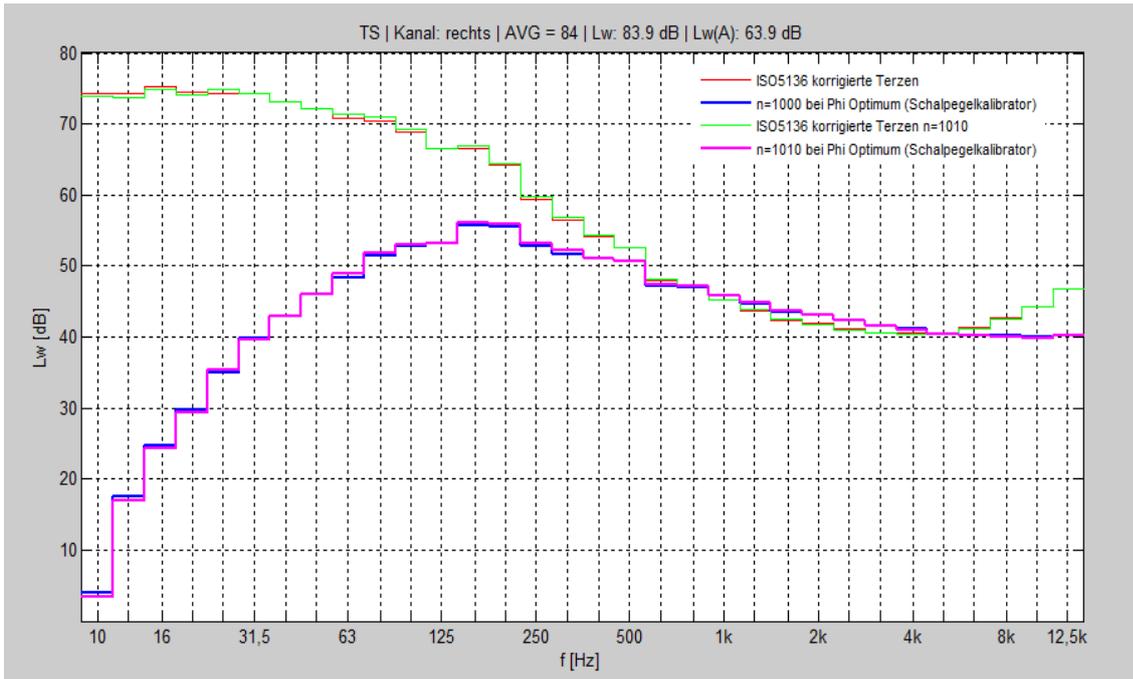


Diagramm 34: Gegenüberstellung der Terzspektren bei Drehzahländerung(10 Schritte)

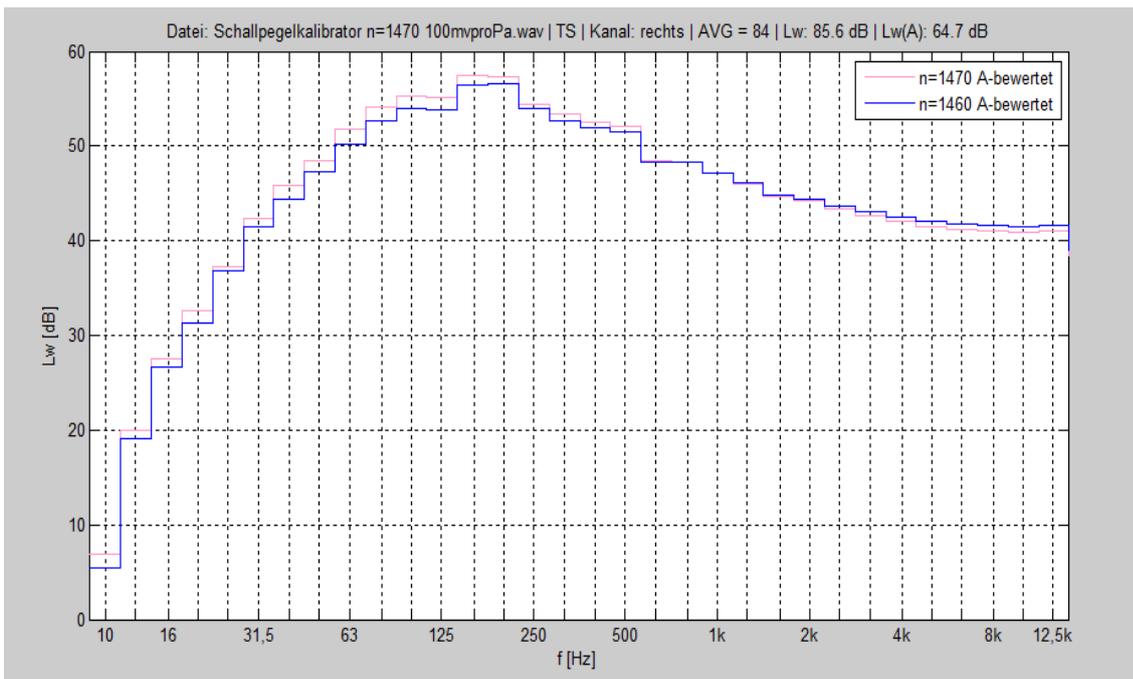


Diagramm 35: Gegenüberstellung der Terzspektren bei Drehzahländerung (10 Schritte)

Die Gegenüberstellung der Terzspektren verschiedene Drehzahlen sind in Diagramme 34 und 35 dargestellt. Das Mikrophon wurde mit einem schallpegelkalibrator (94 dB) und einer Aussteuerung von 100 mv/Pa kalibriert. Die Terzpegel der Geräusche des Ventilators bei unterschiedlichen Drehzahlen weisen vernachlässigbar kleine

Abweichungen voneinander im gesamten Bereich der Terzmittenfrequenzen auf. Im unteren Frequenzbereich ist die Pegelabnahme in Richtung höherer Frequenz recht gering.

Zunächst wird das Mikrophon mit Pistenphon kalibriert. Die dargestellten Terzpegel der Geräusche des Ventilators bei unterschiedlichen Drehzahlen weisen kleine Abweichungen voneinander im gesamten Bereich der Terzmittenfrequenzen auf. Im unteren Frequenzbereich ist die Pegelabnahme in Richtung höherer Frequenz recht gering. Betrachtet man sich den Frequenzbereich über 2 kHz, so ist eine Pegelsteigerung zu erkennen.

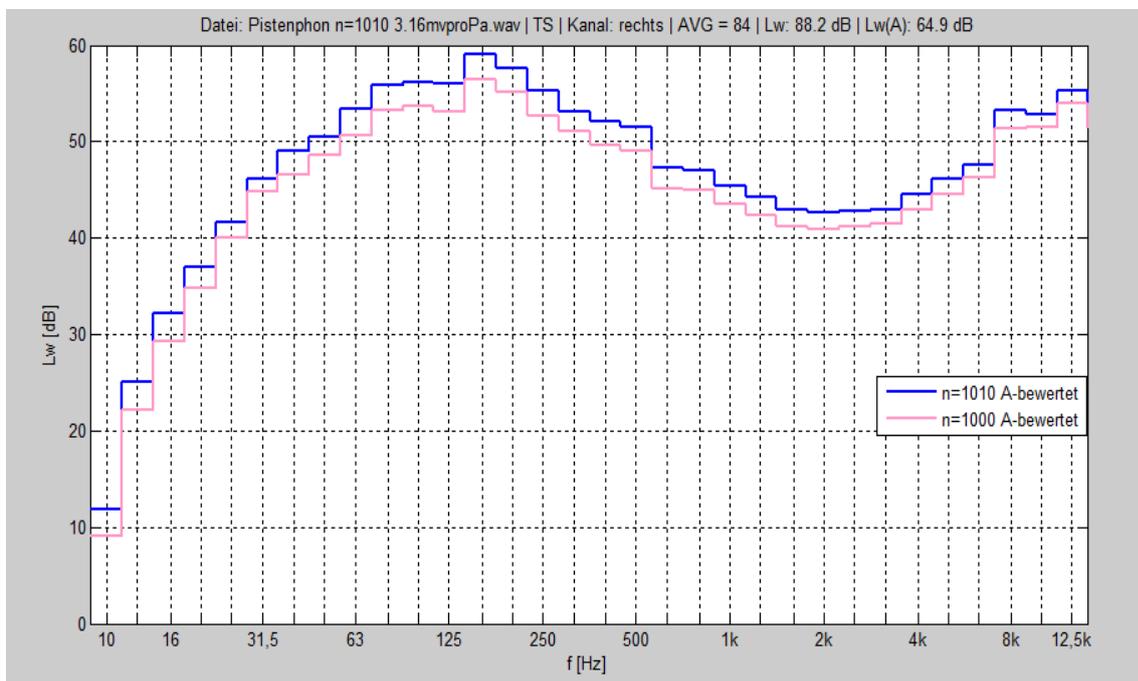


Diagramm 36: Gegenüberstellung der Terzspektren bei Drehzahländerung(10 Schritte)

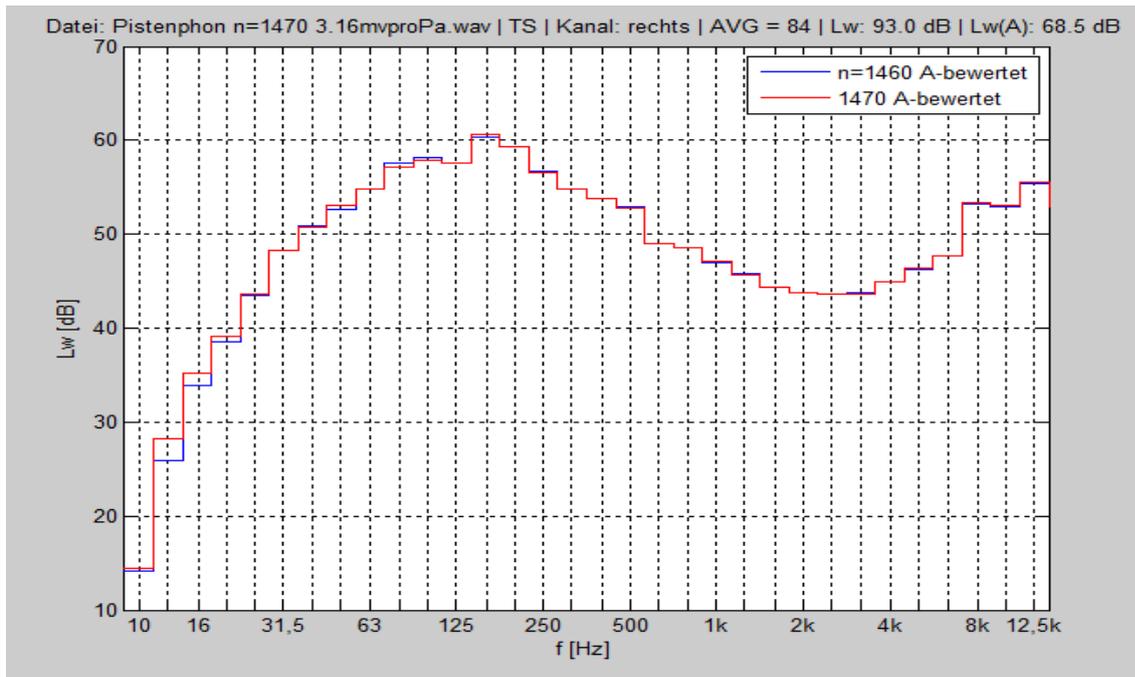


Diagramm 37: Gegenüberstellung der Terzspektren bei Drehzahländerung(10 Schritte)

In den Diagramme 38 und 39 sind Geräuschpegel des Ventilators bei unterschiedlichen Drehzahlen 1000, 1500 und 2000 U/min dargestellt. Wie erwartet liegen die Geräuschpegel mit 2000 U/min über Ventilatorgeräusche mit 1500 und 1000 U/min. Aus Diagramm 38 ist zu erkennen, dass die Terzpegeldifferenz recht gering ist. Dagegen ist im Diagramm 39 ein deutlicher Unterschied der Terzpegel zu sehen.

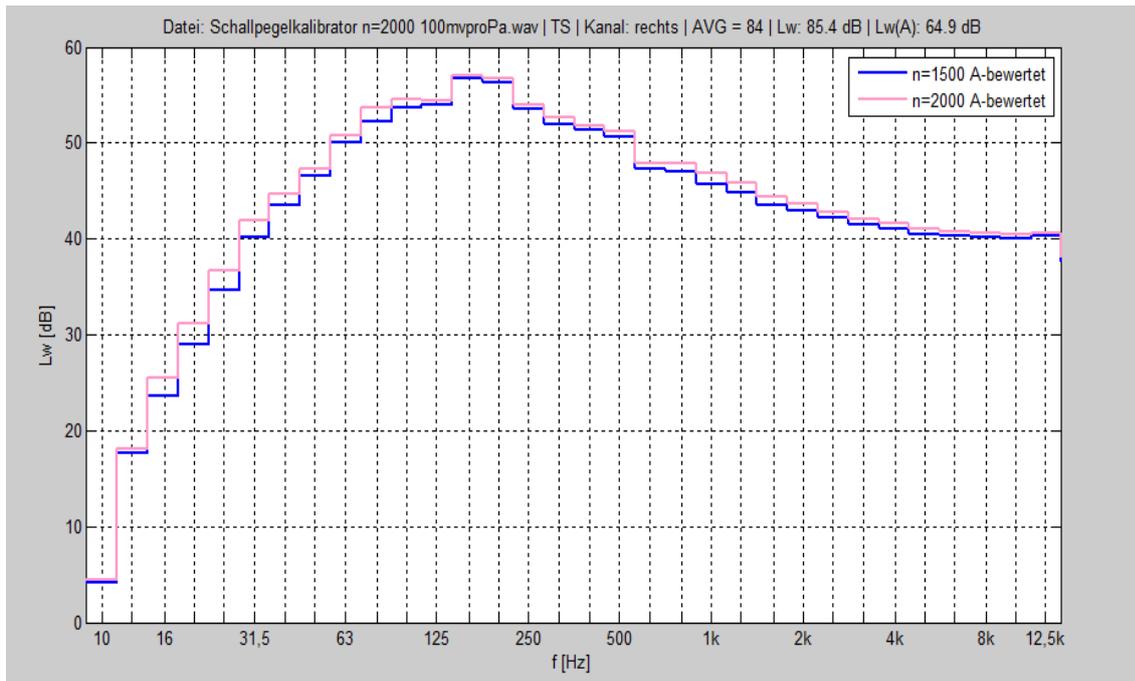


Diagramm 38: Gegenüberstellung der Terzspektren bei unterschiedlichen Drehzahlen(schallpegelkalibrator)

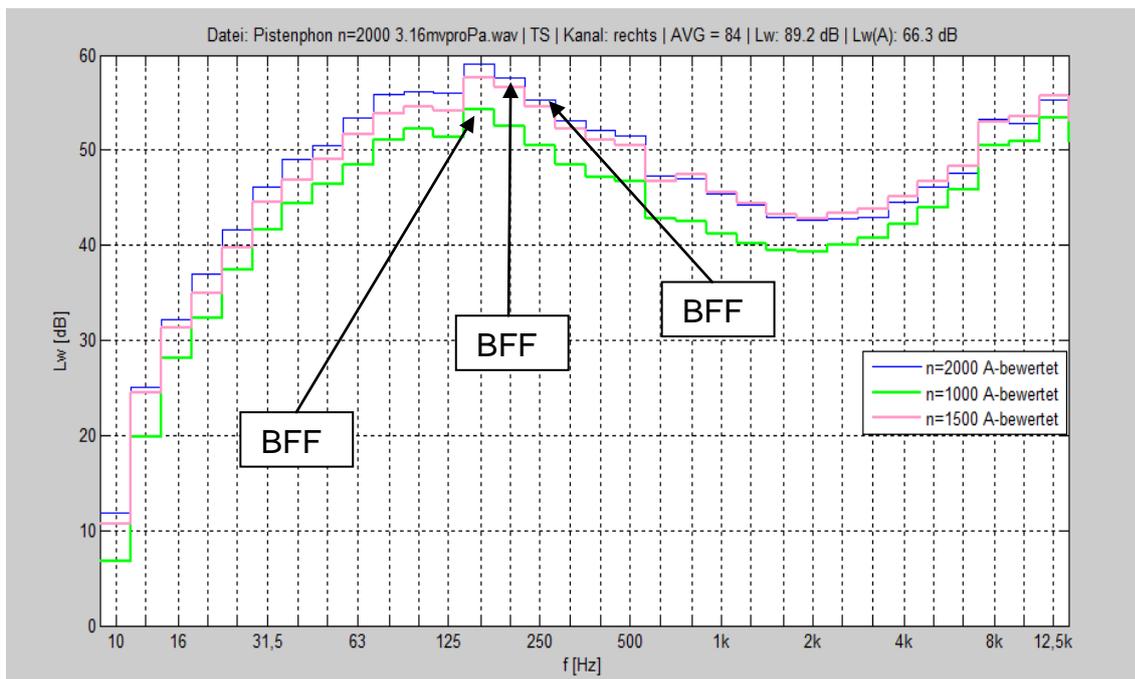


Diagramm 39: Gegenüberstellung der Terzspektren bei unterschiedlichen Drehzahlen (Pistenphon)

Aus Diagramm 39 sind die drei ersten BFF bei 133, 200 und 260 Hz zuerkennen.

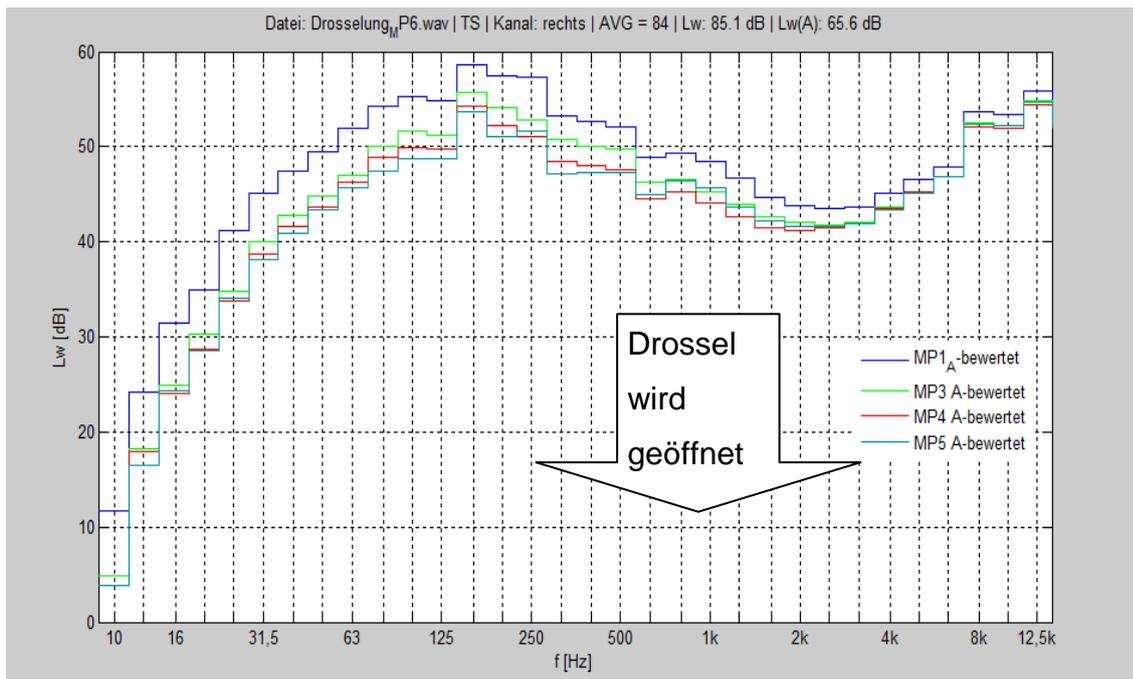


Diagramm 40: Gegenüberstellung der Terzspektren bei gleichen Drehzahlen, aber Drossel wird aufgeföhren

In den Diagramm 40 sind die Terzspektren der Ventilatorgeräusche, bei einer Drehzahl von 2000 U/min gegenübergestellt. Dabei wird die Drosselklappe aufgeföhren. Die Terzpegelabnahme im Diagramm 40 lassen sich dadurch erklären, dass sich durch den zufahrt des Drosseles Geräusche bemerkbare gemacht haben.

10 Zusammenfassung

In der Vorliegenden Arbeit wurden aerodynamische und akustische Messungen gemäß ISO 5136 durchgeführt. Der Prüfstand wurde mit neuer Messtechnik ausgestattet, so dass alte und neue Ergebnisse der verschiedenen Messsysteme verglichen werden konnten. Mittels der Messkarte werden die Daten, welche mit den Messgeräte und BNC angeschlossen sind, über die USB-Schnittstelle an den Rechner übertragen. Des Weiteren wurden im Rahmen dieser Arbeit sowohl die unterschiedlichen Einstellungen, als auch die Genauigkeit der verwendeten Messkarte untersucht.

Unter Zuhilfenahme von DASYLab 11 wurden mehrere Schaltbilder zur aerodynamischen Leistungsvermessung von Radialventilatoren programmiert. Neu hierbei ist es, dass die ausgewerteten Daten nicht als ASCII-Datenformat gespeichert werden, sondern direkt in Excel durch das Moduls DDE geschrieben werden. Dadurch lassen sich die Drosselkennlinien eines Radialventilator für die aerodynamischen Messungen bei verschiedenen Drehzahlen berechnen und in ein Diagramm auftragen. Zunächst wurde zwischen dem Verhalten zweier Einlaufdüsen (Einlaufdüse mit überdeckten Spalt und Einlaufdüse mit nicht überdeckten Spalt) verglichen.

Zudem wurde in dieser Arbeit auch ein α -Wertbestimmung durchgeführt, sowohl durch die Drehzahländerung als auch durch die Drosselregelung, ein Wert von 0,96 gemessen wurde.

Der Vergleich der Kennlinien, welche mittels der alten(Tradinco, Typ 2090) und der neuen (MKS) Messgeräte aufgezeichnet wurden, zeigt keinerlei Unterschiede.

Durch die Bearbeitung einer Excel Tabelle, welche von der Firma Ventec AG programmiert wurde, ist es jetzt möglich, direkt nach der Auswertung, das Optimum des Ventilators zu bestimmen.

11 Literaturverzeichnis

- [1] Bohl / Elmendorf Strömungsmaschinen 1
- [2] www.klimapartner-berlin.de/default.asp?file=471676.xml
- [3] Ventilatoren Im Einsatz: Anwendung in Geräten und Anlagen von Fritz schlender und Günter Klingenberg
- [4] L. Bommers /J. Fricke/K. Klaes (Hrsg.) Ventilatoren , VULKAN-VERLAG ESSEN
- [5] Praxishandbuch Thermoprozess-Technik, Carl Kramer
- [6] Diplomarbeit 2007, José-Miguel Agustin-Manzaneque, Inbetriebnahme einer Pelton-Turbine und der zugehörigen Messdatenerfassung.
- [7] Ertu Sariaslan: „Diplomarbeit Messung und Prognose von Ventilatorgeräuschen“ FHD 2004.
- [8] Messung von Volumen- und Massenstrom, Messtechnik-Labor: Versuch V5, Universität Siegen.
- [9] Schade/Kunz Strömungslehre,3.Auflage,Inkompressible Fluide.
- [10] Durchflußmessung mit Drosselgeräten Blenden und Düsen für besondere Anwendungen VDI/VDE 2041
- [11] ww.ni.com
- [12] www.betzler.physik.uni-osnabrueck.de/Skripten/Elektronik-Praktikum
- [13] L. Bommers / J. Fricke / K. Klaes (Hrsg.) Ventilatoren , VULKAN-VERLAG ESSEN
- [14] Diplomarbeit, Terence Klitz „Konstruktion, Aufbau und Programmierung eines Drehkanals zur Bestimmung der von Ventilatoren in Kanäle abgestrahlten Schalleistung“
- [15] Ertu Sariaslan: „Diplomarbeit Messung und Prognose von Ventilatorgeräuschen“ FHD 2004

Anhang-A

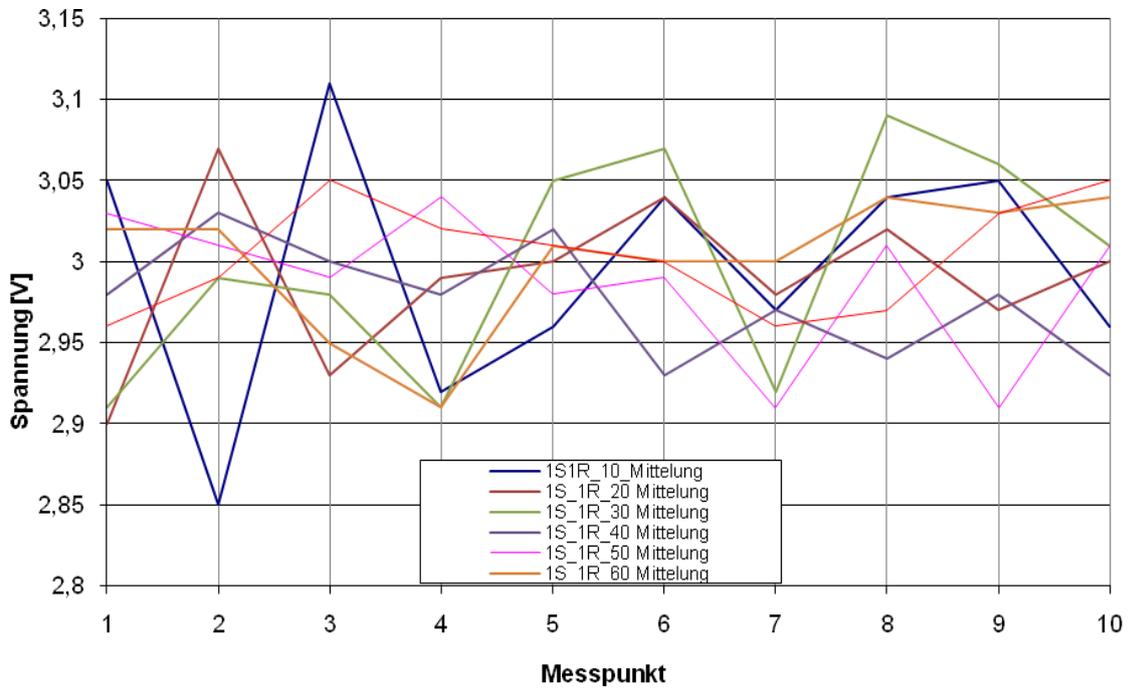


Diagramm 41: Schwankungen der gemittelten Werte (10 bis 50 Mittelung)

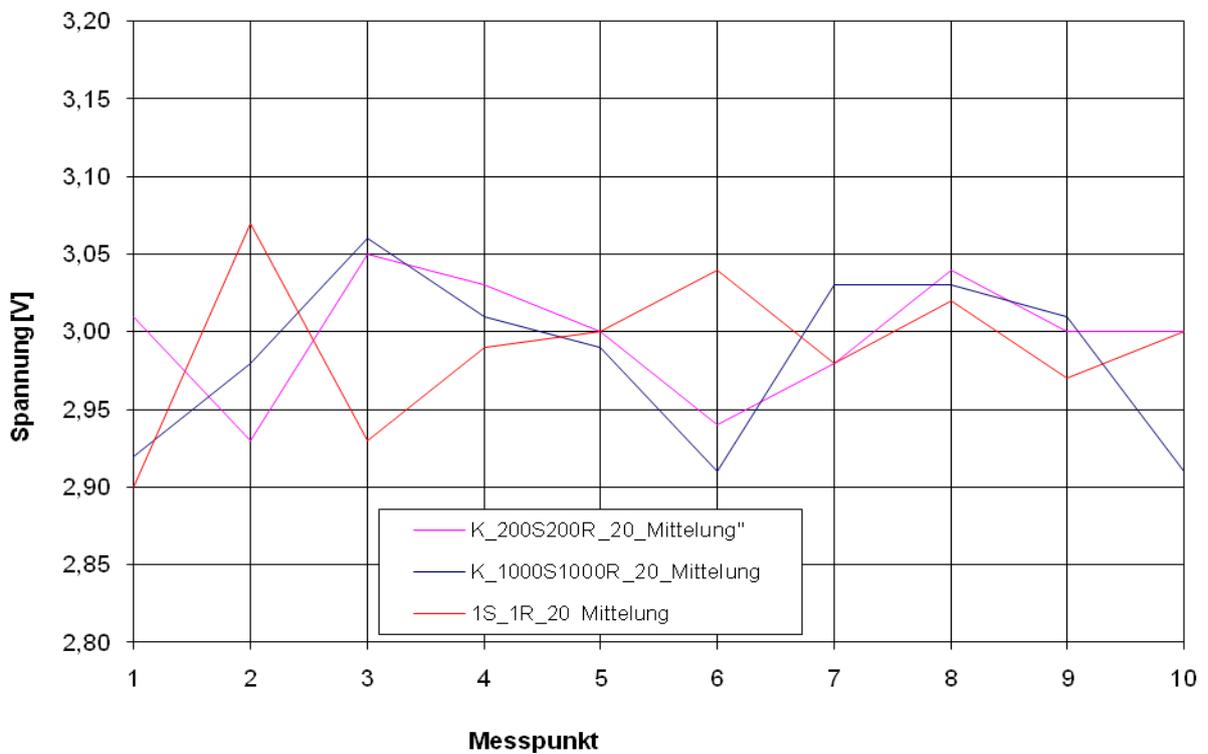


Diagramm 42: Schwankungen der gemittelten Werte (20 Mittelung)

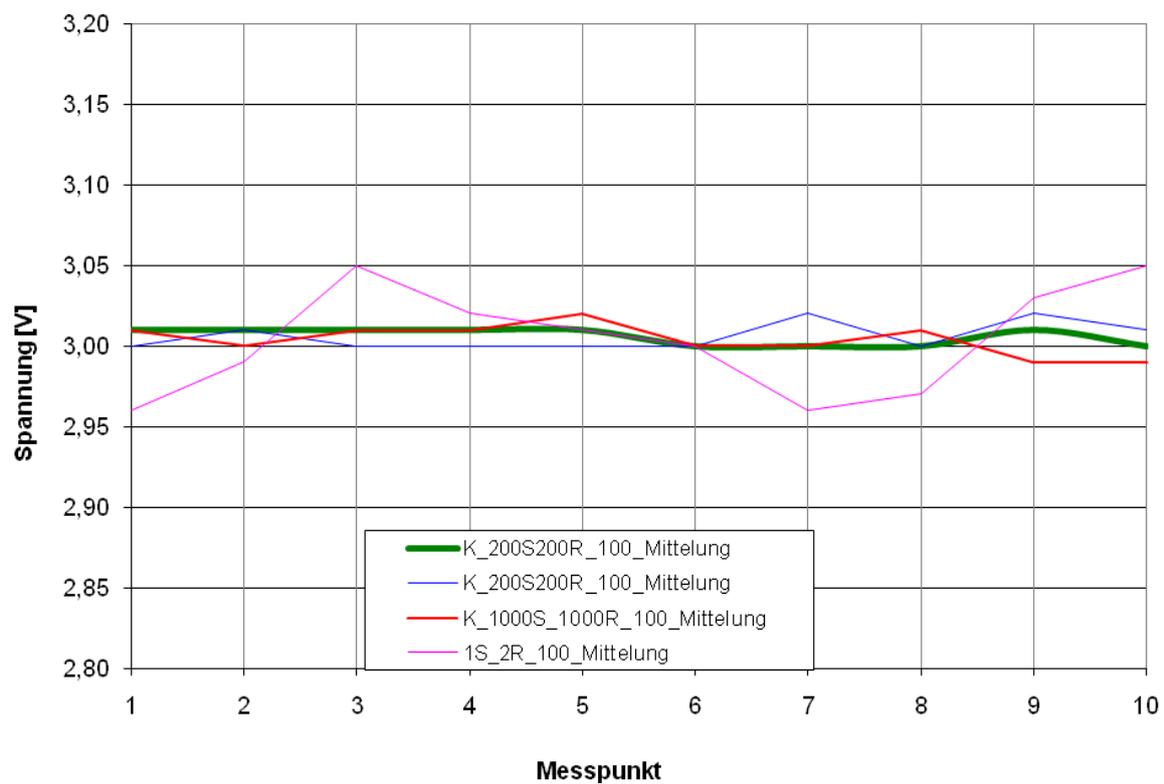


Diagramm 43: Schwankungen der gemittelten Werte (100 Mittelung)

Anhang-B

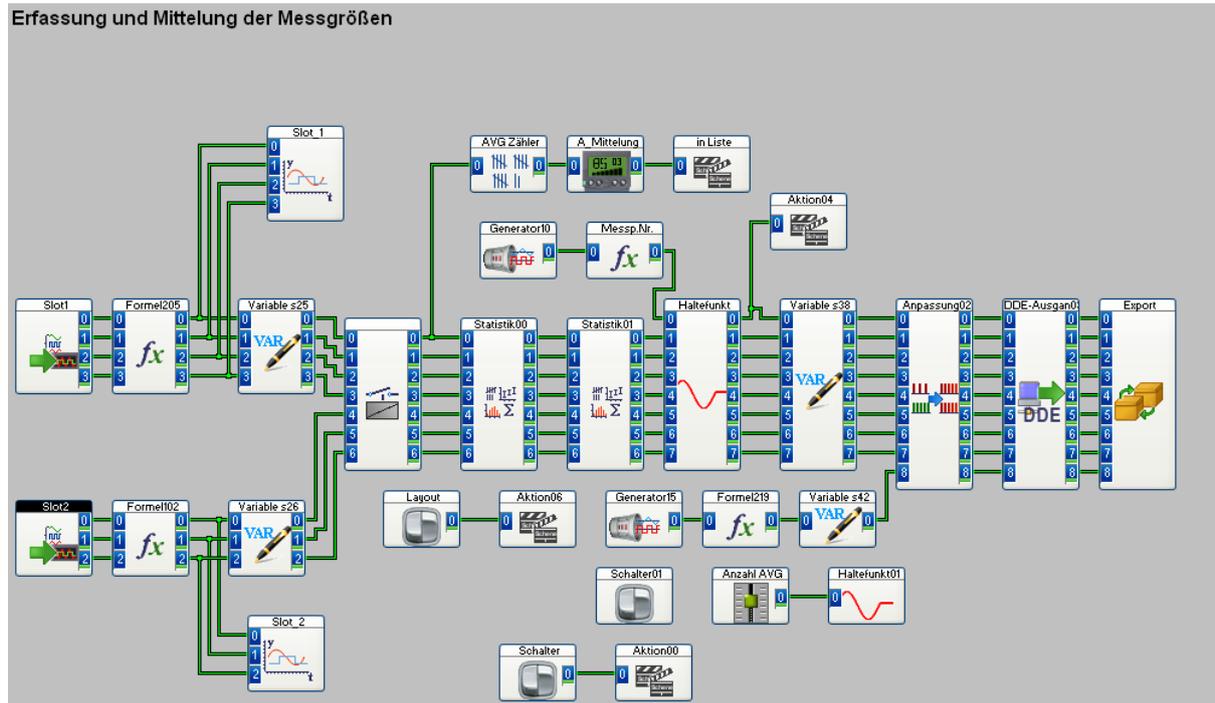


Bild 65: Erfassung und Mittelung der Messgrößen

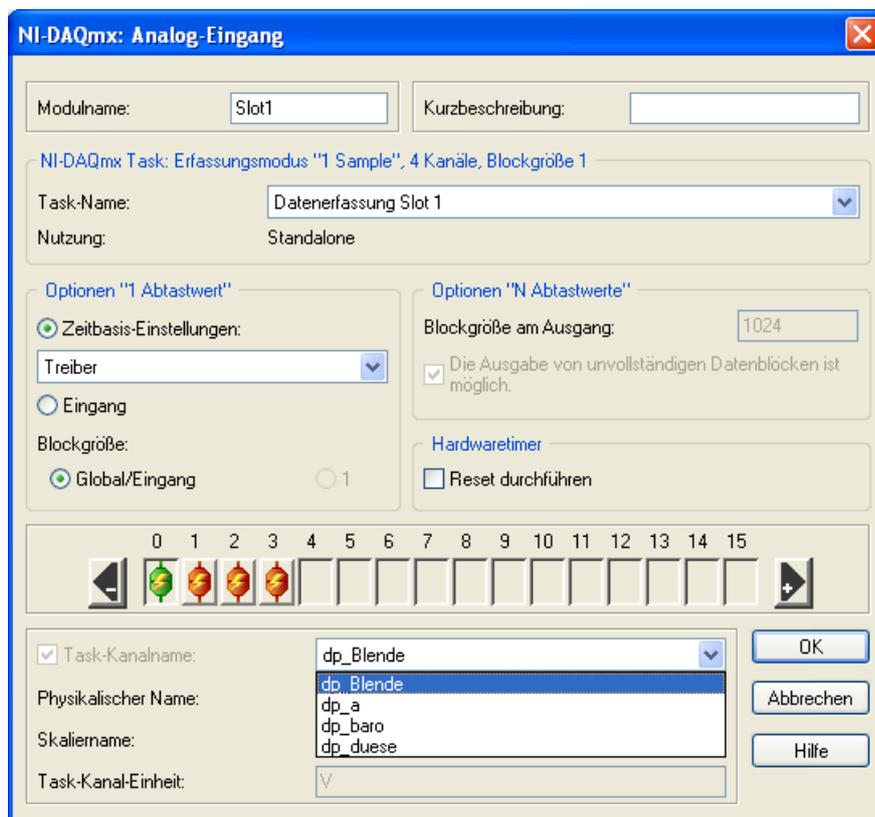


Bild 66: Einstellung der Task (Slot 1)

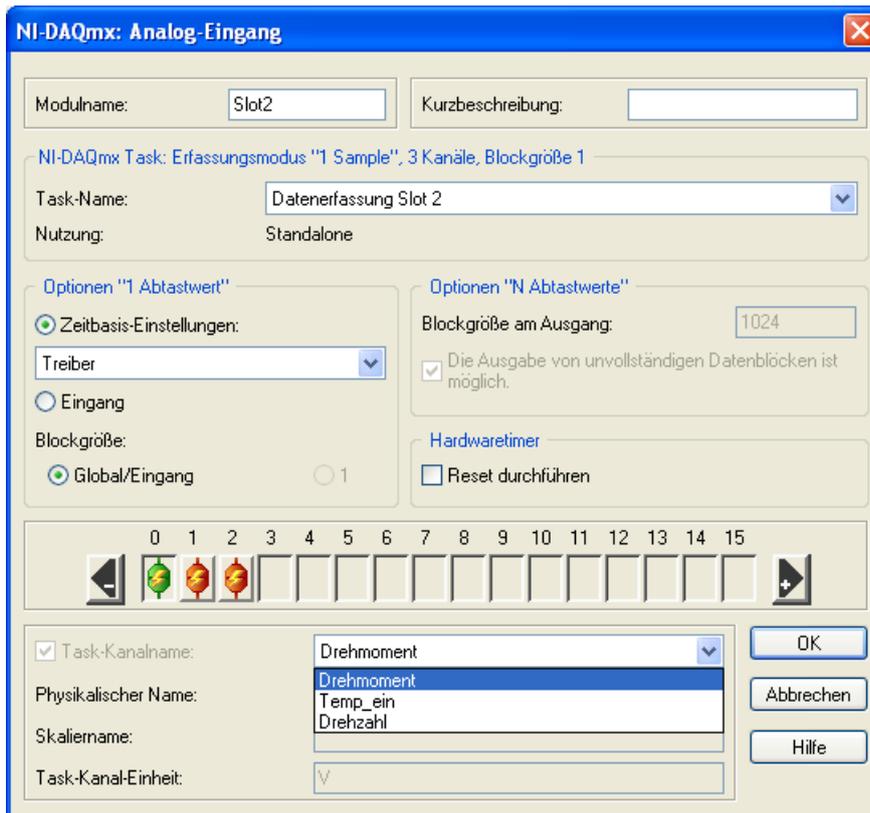


Bild 67: Einstellung der Task (Slot 1)



Bild 68: Drehmoment bei der Empfindlichkeit 0,5 mV/V

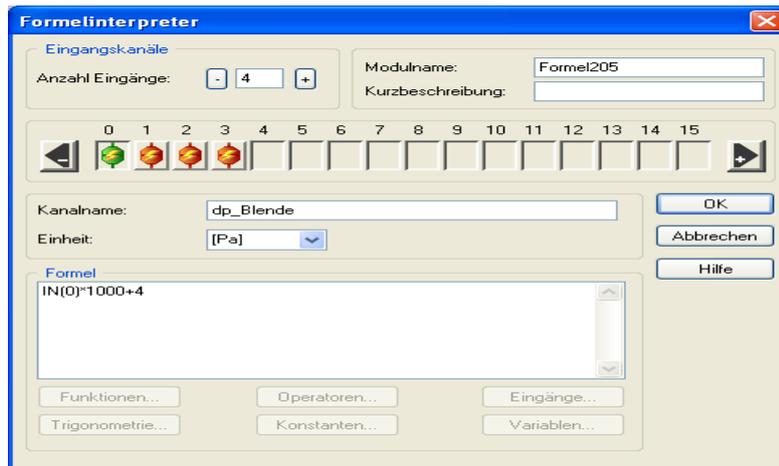


Bild 69: Formelinterpreter(dp_blende)



Bild 70: Einstellung des Globalen Variablen Modul



Bild 71: Einstellung des Globalen Variablen Moduls

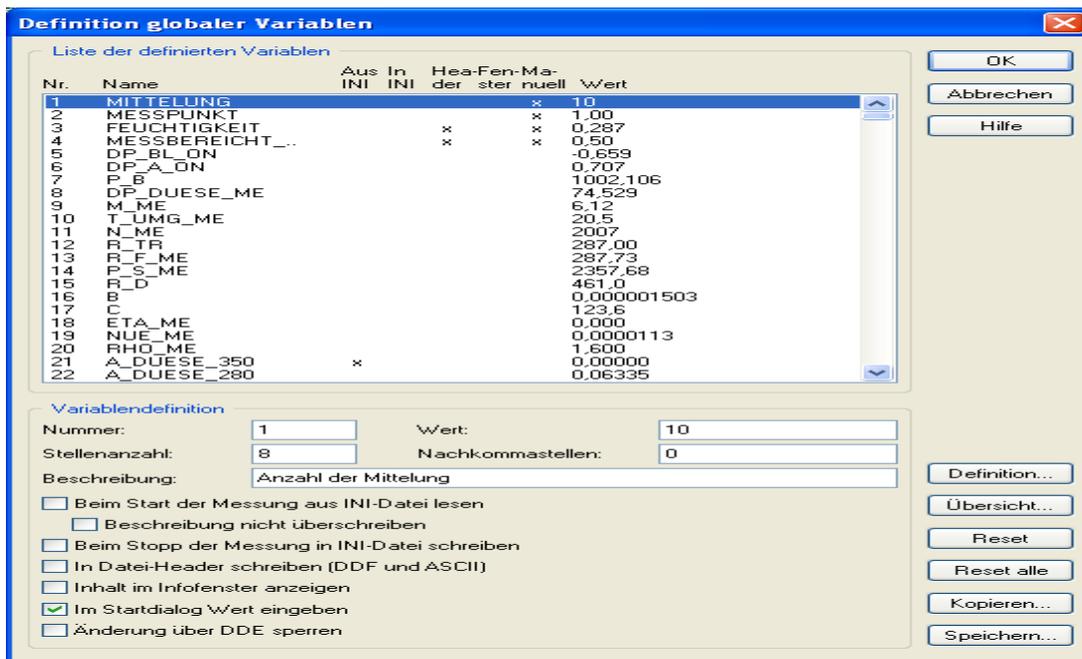


Bild 72: Die gespeicherte Globale Variable



Bild 73 : Einstellung des statistischen Moduls



Bild 74: Einstellug der Globalen Variablen Moduls

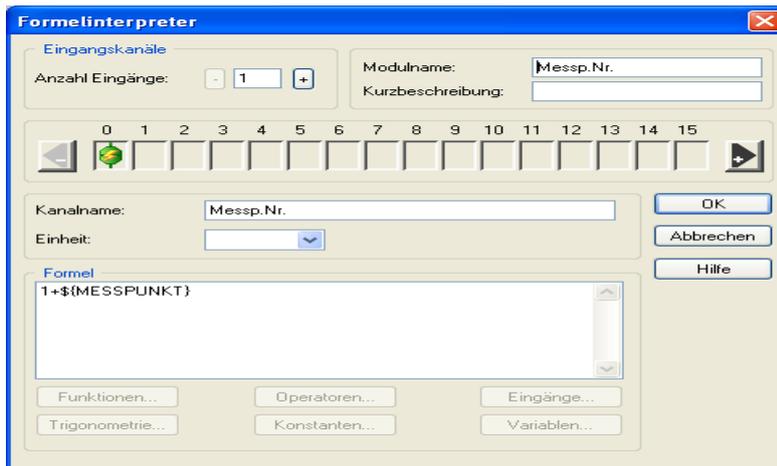


Bild 75: Messpunkte Erhöhung

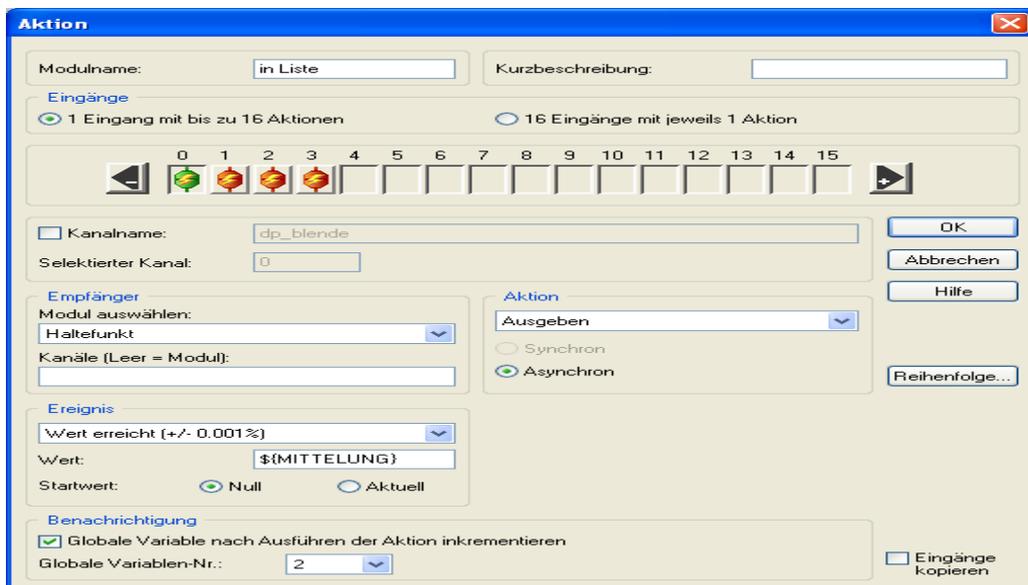


Bild 76: Einstellung des Aktion Moduls zur Datenausgabe

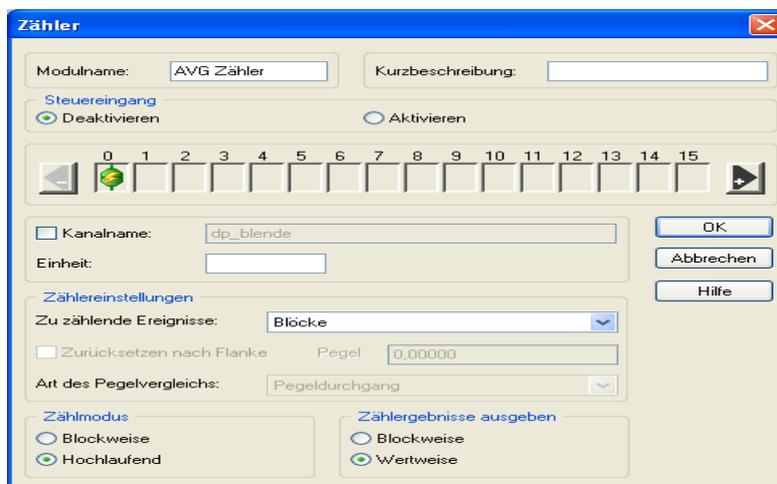


Bild 77: Einstellung des Moduls Zähler

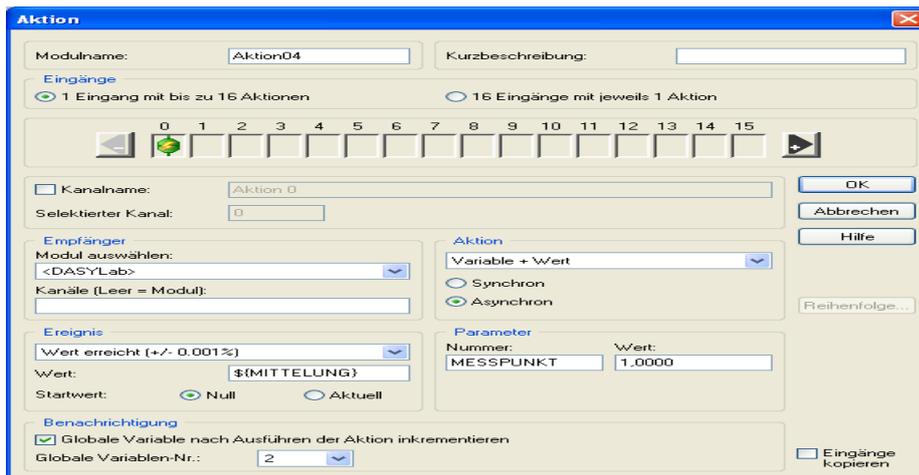


Bild 78: Messpunkte Erhöhung

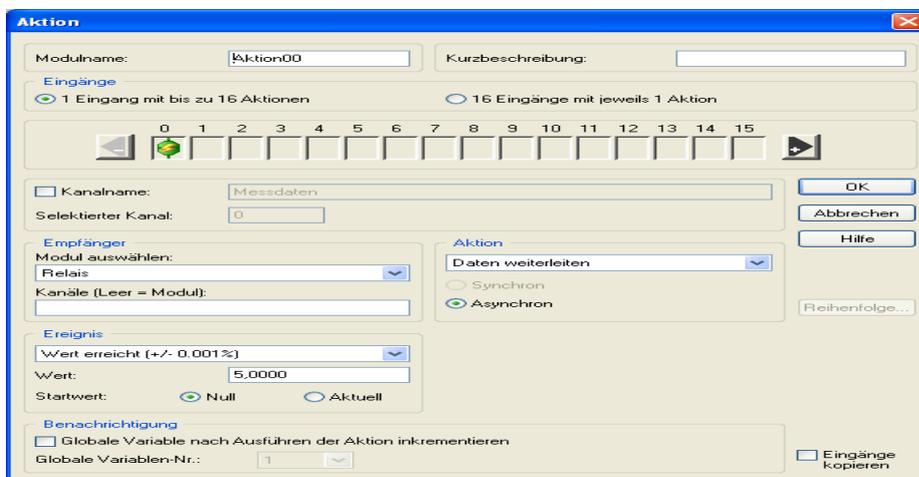


Bild 79: Steuerung des Moduls Relais

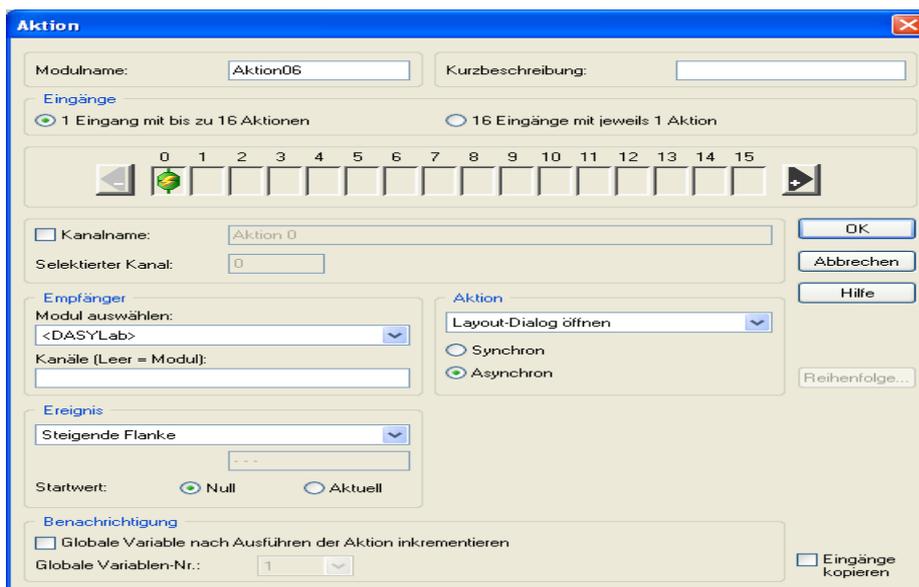


Bild 80: Layout Steuerung

- Berechnung der Luftwerte

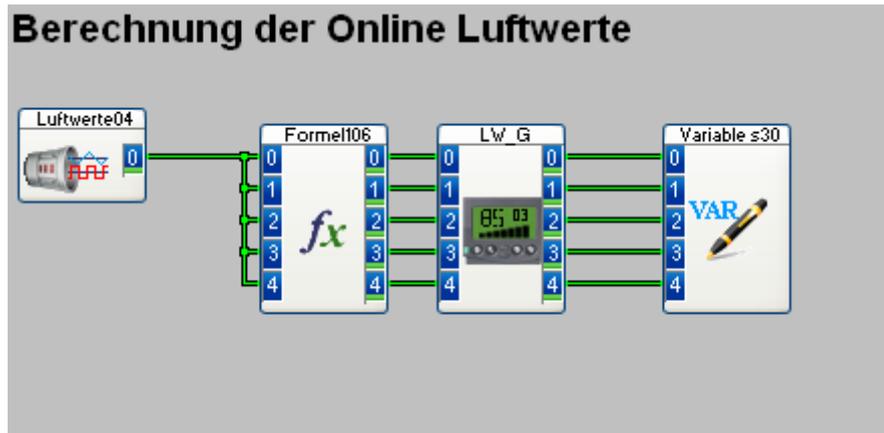


Bild 81: Berechnung der Online Luftwerte

Formelinterpreter

Eingangskanäle
Anzahl Eingänge:

Modulname:
Kurzbeschreibung:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

Kanalname:
Einheit:

Formel

$$100 * (0.00001 * \$(T_UMG_ME)^4 - 0.0005 * \$(T_UMG_ME)^3 + 0.0456 * \$(T_UMG_ME)^2 - 0.0429 * \$(T_UMG_ME) + 7.789)$$

Bild 82: Formel zur Berechnung der Sättigungsdruck

Formelinterpreter

Eingangskanäle
Anzahl Eingänge:

Modulname:
Kurzbeschreibung:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

Kanalname:
Einheit:

Formel

$$\$(R_TR) / (1 - (\$(FEUCHTIGKEIT) * \$(P_S_ME) / (100 * \$(P_B_ME))) * (1 - (\$(R_TR) / \$(R_D))))$$

Bild 83: Formel zur Berechnung der feuchten Gaskonstante

Formelinterpreter

Eingangskanäle
Anzahl Eingänge: - 5 +

Modulname: Formel106
Kurzbeschreibung:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

Kanalname: rho_me
Einheit: [kg/m³]

Formel
(100*\$(P_B_ME))/((\$(R_F_ME)*\$(T_UMG_ME)+273.15))*(1-0.377*\$(FEUCHTIGKEIT))*((P_S_ME)/\$(P_B_ME))

Funktionen... Operatoren... Eingänge...
Trigonometrie... Konstanten... Variablen...

OK
Abbrechen
Hilfe

Bild 84: Formel zur Berechnung der Dichte

Formelinterpreter

Eingangskanäle
Anzahl Eingänge: - 5 +

Modulname: Formel106
Kurzbeschreibung:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

Kanalname: eta
Einheit: [kg/m.s]

Formel
((\$B)*\$(T_UMG_ME)+273.15)^0.5)/(1+((C)/((T_UMG_ME)+273.15)))

Funktionen... Operatoren... Eingänge...
Trigonometrie... Konstanten... Variablen...

OK
Abbrechen
Hilfe

Bild 85: Formel zur Berechnung der dynamischen Viskosität

Formelinterpreter

Eingangskanäle
Anzahl Eingänge: - 5 +

Modulname: Formel106
Kurzbeschreibung:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

Kanalname: nue
Einheit: [m²/s]

Formel
\$(ETA_ME)/\$(RHO_ME)

Funktionen... Operatoren... Eingänge...
Trigonometrie... Konstanten... Variablen...

OK
Abbrechen
Hilfe

Bild 86: Formel zur Berechnung der kinematischen Viskosität

- Online Iteration

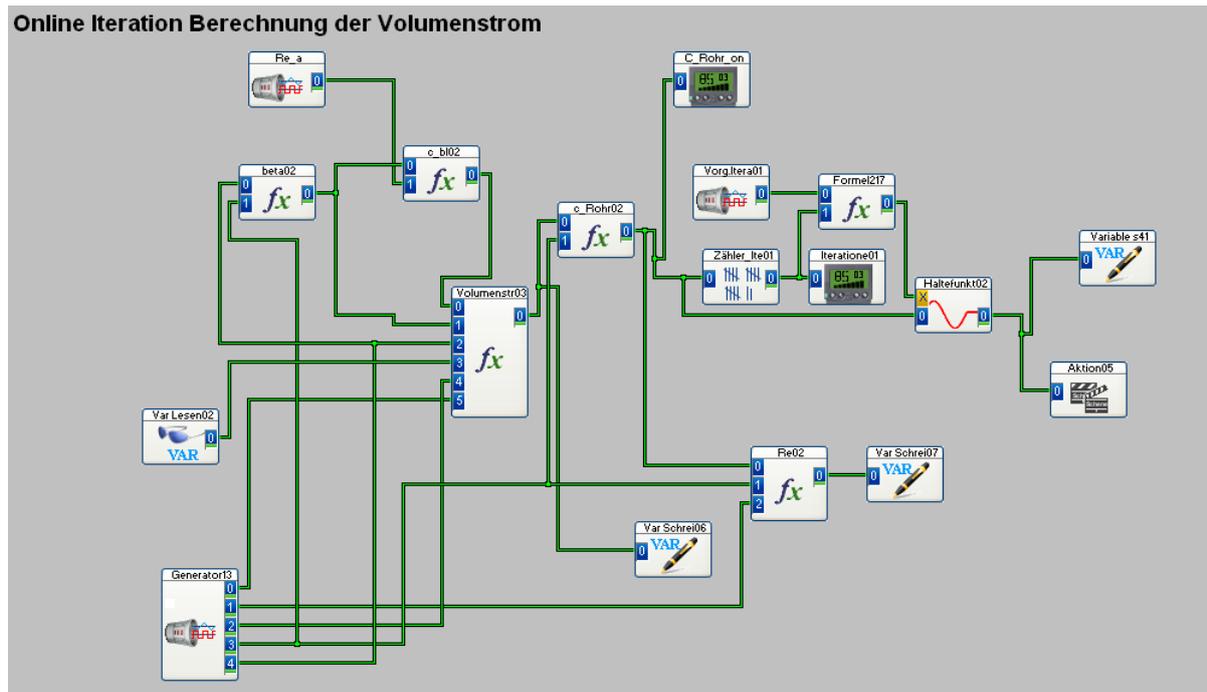


Bild 87: Online Iteration Berechnung der Volumenstrom



Bild 88: Einstellung des Moduls Globale Variablen Lesen

Formelinterpreter

Eingangskanäle
Anzahl Eingänge: - 2 +

Modulname: c_bl02
Kurzbeschreibung:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

Kanalname: c_bl
Einheit: V

Formel

$$0.5961+0.0261 \cdot IN(0) \\
^2-0.216 \cdot IN(0)^8+0.000521 \cdot (IN(0) \cdot 10^6 / IN(1))^{0.7}+(0.0188+0.0063 \cdot (19 \\
000 \cdot IN(0) / IN(1))^{0.8}) \cdot IN(0)^3.5 \cdot (10^6 / IN(1))^{0.3}+(0.043+0.08-0.123) \cdot (1 \\
-0.11 \cdot (19000 \cdot IN(0) / IN(1))^{0.8}) \cdot IN(0)^4 / (1 - IN(1)^4)$$

Funktionen... Operatoren... Eingänge...
Trigonometrie... Konstanten... Variablen...

OK
Abbrechen
Hilfe

Bild 89: Formel zur Berechnung der Durchflusskoeffizienten

Formelinterpreter

Eingangskanäle
Anzahl Eingänge: - 6 +

Modulname: Volumenstr03
Kurzbeschreibung:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

Kanalname: Formel 0
Einheit: V

Formel

$$IN(0) \cdot (1 - IN(1)^4)^{-0.5} \cdot (\pi / 4) \cdot IN(2)^2 \cdot (2 \cdot IN(3) / IN(4))^{0.5} \cdot IN(5)$$

Funktionen... Operatoren... Eingänge...
Trigonometrie... Konstanten... Variablen...

OK
Abbrechen
Hilfe

Bild 90: Formel zur Berechnung des Volumenstroms

Formelinterpreter

Eingangskanäle
Anzahl Eingänge: - 2 +

Modulname: v_Rohr02
Kurzbeschreibung:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

Kanalname: c_rohr
Einheit: [m/s]

Formel

$$4 \cdot IN(0) / (\pi \cdot IN(1)^2)$$

Funktionen... Operatoren... Eingänge...
Trigonometrie... Konstanten... Variablen...

OK
Abbrechen
Hilfe

Bild 91: Formel zur Berechnung der Rohrgeschwindigkeit

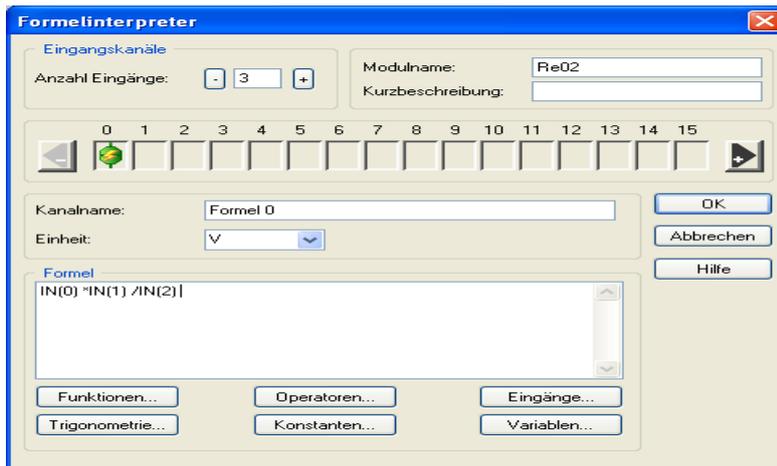


Bild 92: Formel zur Berechnung der Reynoldszahl



Bild 93: berechnete Reynoldszahl neue eingeben

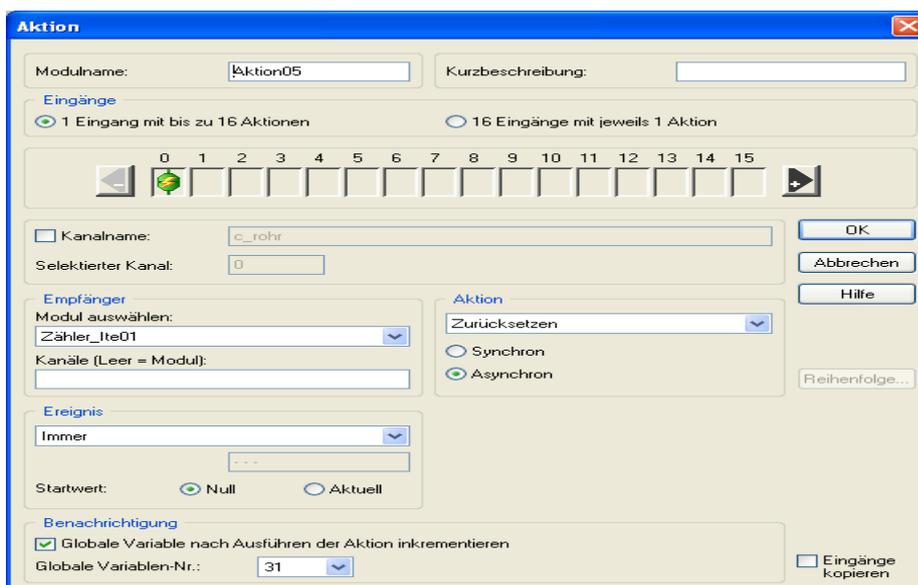


Bild 94: Einstellung der Aktion zur Zählung der Iterationsschritte

- Auswertung der Messgrößen

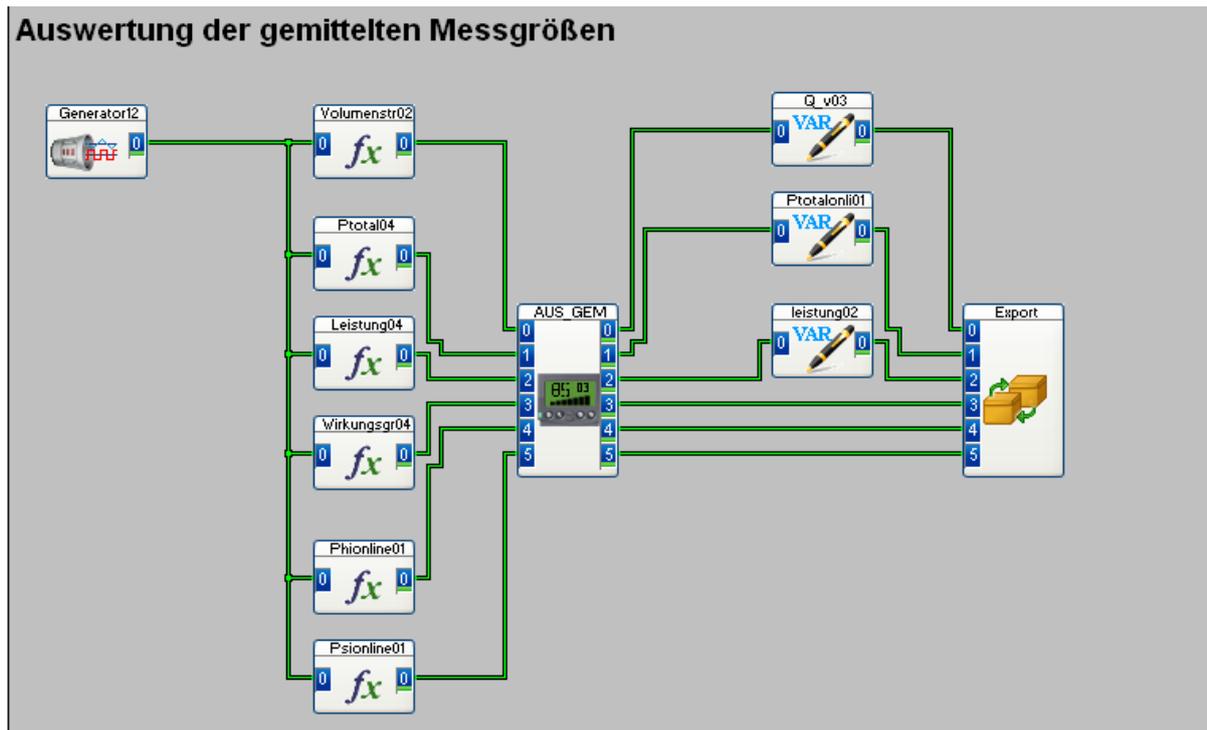


Bild 95: Auswertung der gemittelten Messgrößen

Formelinterpreter

Eingangskanäle
Anzahl Eingänge: Modulname:
Kurzbeschreibung:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

Kanalname:
Einheit:

Formel
$$\{C_ROHR_ME\} \cdot \pi \cdot \{D_2\}^2 / 4$$

Bild 96: Formel zur Berechnung des Volumenstroms

Formelinterpreter

Eingangskanäle
Anzahl Eingänge: - 1 +

Modulname: Ptotal04
Kurzbeschreibung:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

Kanalname: DP_total
Einheit: [Pa]

Formel
 $\${DP_A_ME} + \${RHO_ME} * (\${C_ROHR_ME})^2 / 2$

Funktionen... Operatoren... Eingänge...
Trigonometrie... Konstanten... Variablen...

OK
Abbrechen
Hilfe

Bild 97: Formel zur Berechnung der Totaldruckerhöhung

Formelinterpreter

Eingangskanäle
Anzahl Eingänge: - 1 +

Modulname: Leistung04
Kurzbeschreibung:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

Kanalname: Leistung
Einheit: W

Formel
 $2 * PI * \${M_ME} * \${N_ME} / 60$

Funktionen... Operatoren... Eingänge...
Trigonometrie... Konstanten... Variablen...

OK
Abbrechen
Hilfe

Bild 98: Formel zur Berechnung der Leistung

Formelinterpreter

Eingangskanäle
Anzahl Eingänge: - 1 +

Modulname: Wirkungsgr04
Kurzbeschreibung:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

Kanalname: Wirkungsgrad
Einheit: %

Formel
 $\${Q_V_GM} * \${DP_TOT_ME} / \${P_ME}$

Funktionen... Operatoren... Eingänge...
Trigonometrie... Konstanten... Variablen...

OK
Abbrechen
Hilfe

Bild 99: Formel zur Berechnung des Wirkungsgrads

Formelinterpreter

Eingangskanäle
Anzahl Eingänge: - 1 +

Modulname: Phionline01
Kurzbeschreibung:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

Kanalname: Phi
Einheit: [...]

Formel
4*{Q_V_GM} / (PI ^2*{D_LAUFRAD} ^3*{N_ME}/60)

Funktionen... Operatoren... Eingänge...
Trigonometrie... Konstanten... Variablen...

OK
Abbrechen
Hilfe

Bild 100: Formel zur Berechnung der Durchflusszahl

Formelinterpreter

Eingangskanäle
Anzahl Eingänge: - 1 +

Modulname: Pisionline01
Kurzbeschreibung:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

Kanalname: Psi
Einheit: [...]

Formel
2*{(\$DP_TOT_ME)/(\$RHO_ME)} / (PI ^2*{D_LAUFRAD} ^2*{(\$N_ME) /60}^2)

Funktionen... Operatoren... Eingänge...
Trigonometrie... Konstanten... Variablen...

OK
Abbrechen
Hilfe

Bild 101: Formel zur Berechnung der Druckzahl

- Geschwindigkeit an der Düse

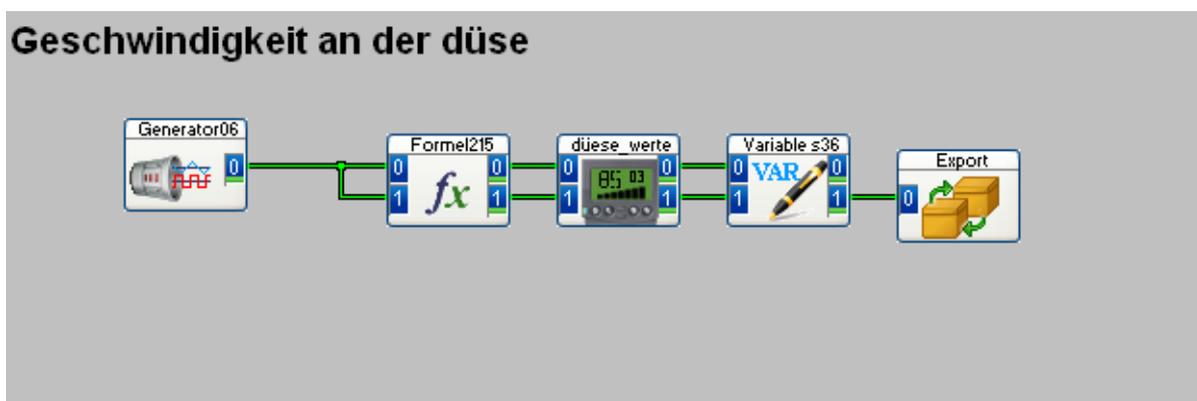


Bild 102: Berechnung der Geschwindigkeit an der Düse

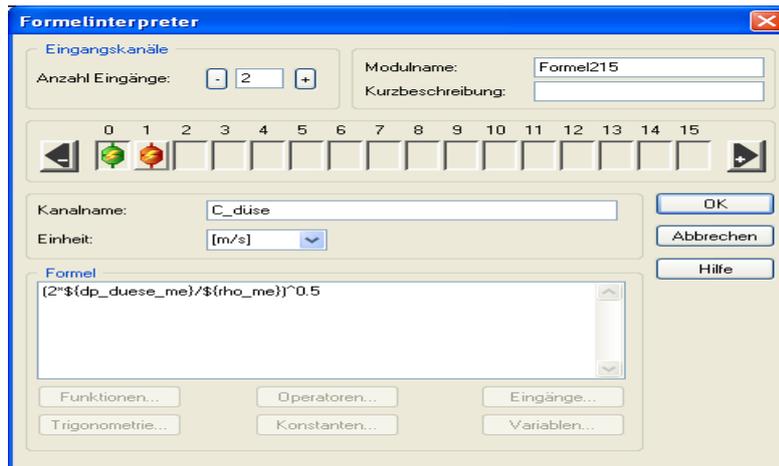


Bild 103: Formel zur Berechnung der Geschwindigkeit an der düse



Bild 104: Formel zur Berechnung des Volumenstrom an der Düse

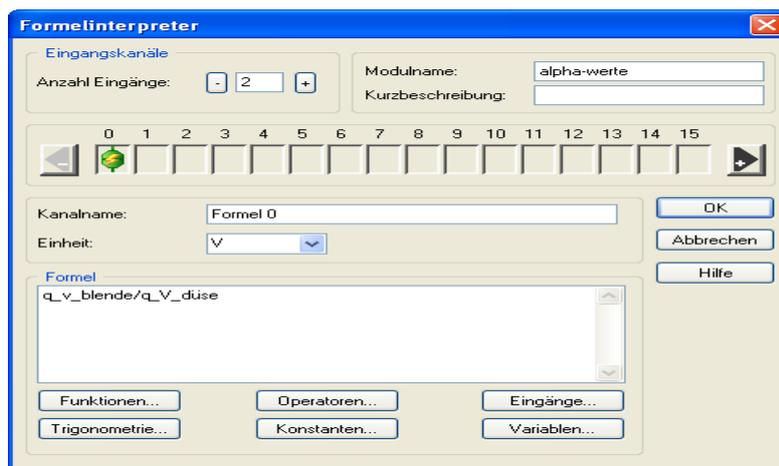


Bild 105: Formel zur Berechnung Alpha-werte

Anhang-C

Empfindlichkeit	0,2	[mV/V]
	0,5	[mV/V]
	2	[mV/V]
Drehzahl	1000	U/min
Tiefpass	ein	aus

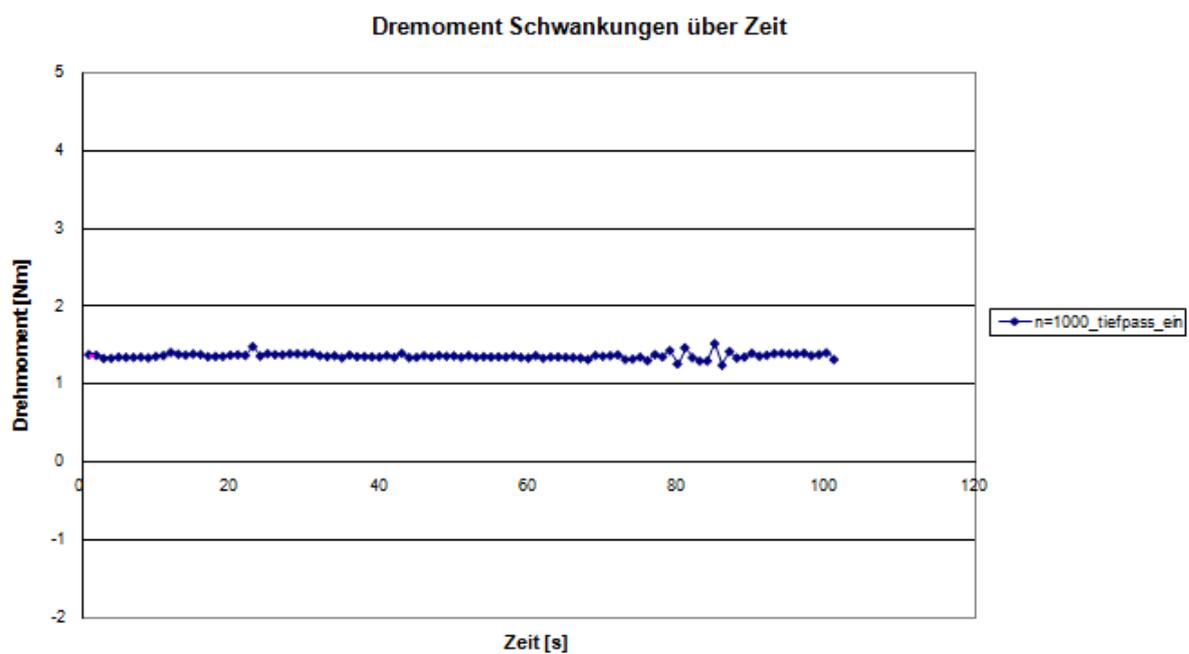


Diagramm 44: Schwankungen des Drehmoments und einen eingeschalteten Tiefpass

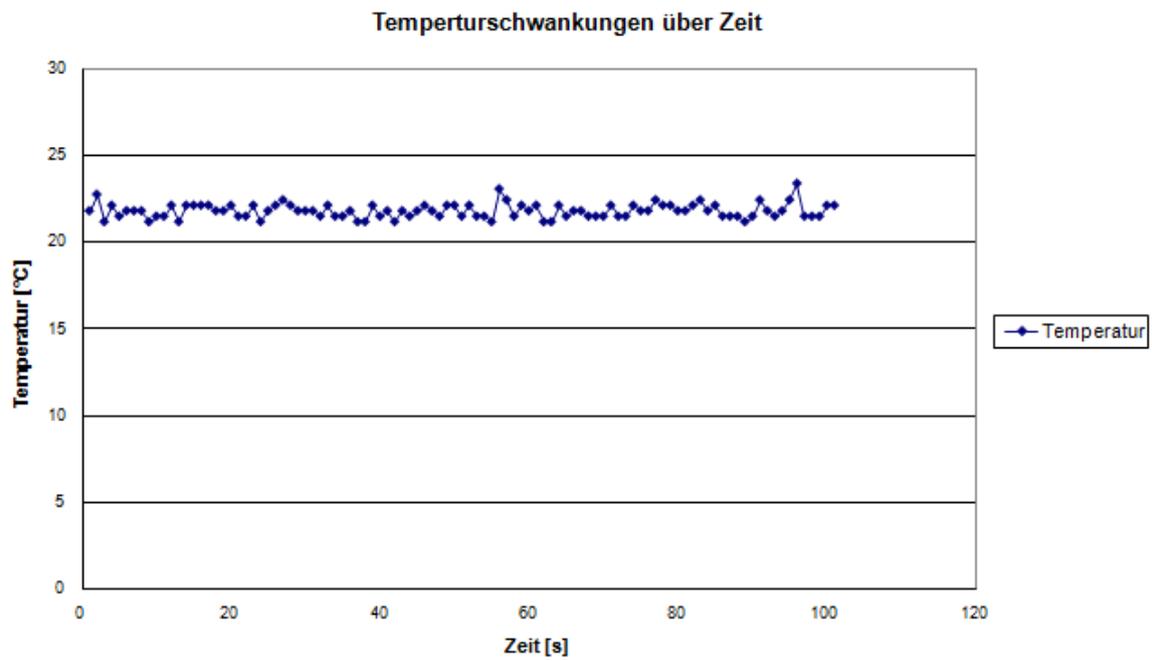


Diagramm 45: Schwankungen der Temperatur

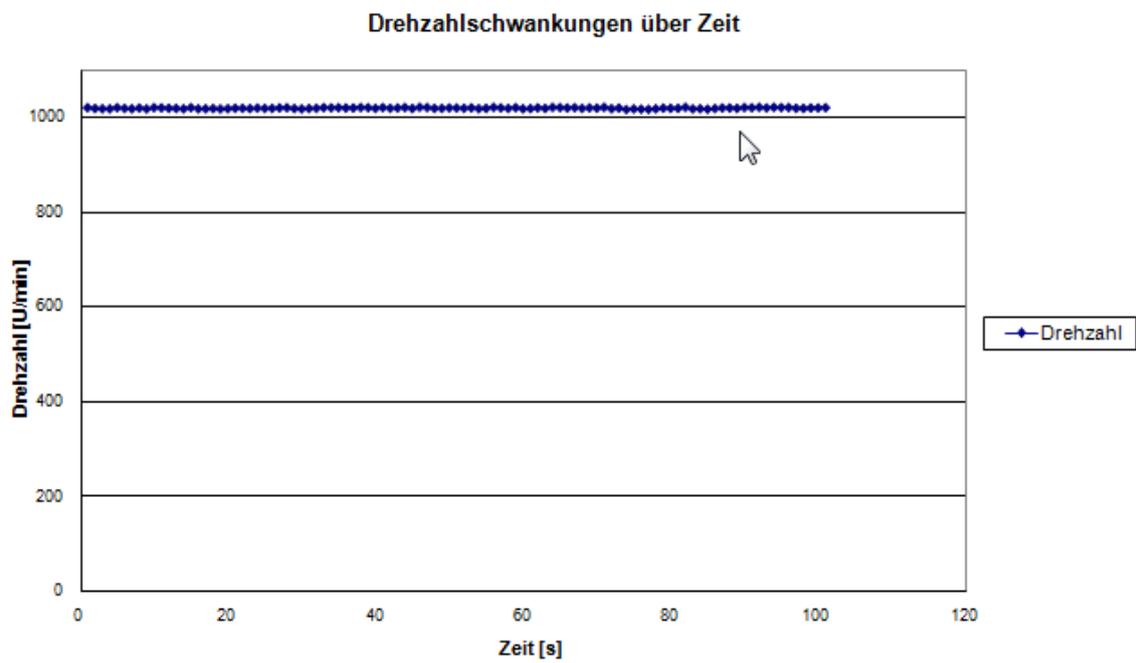


Diagramm 46: Schwankungen der Drehzahl

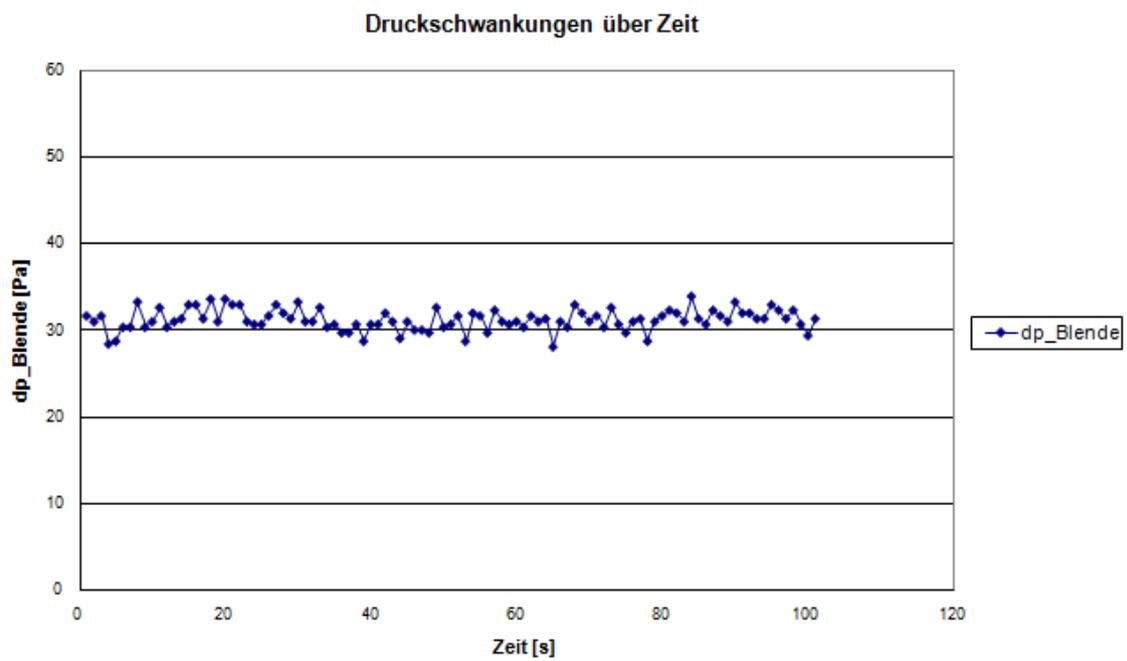


Diagramm 47: Schwankungen des Druckes an der Blende

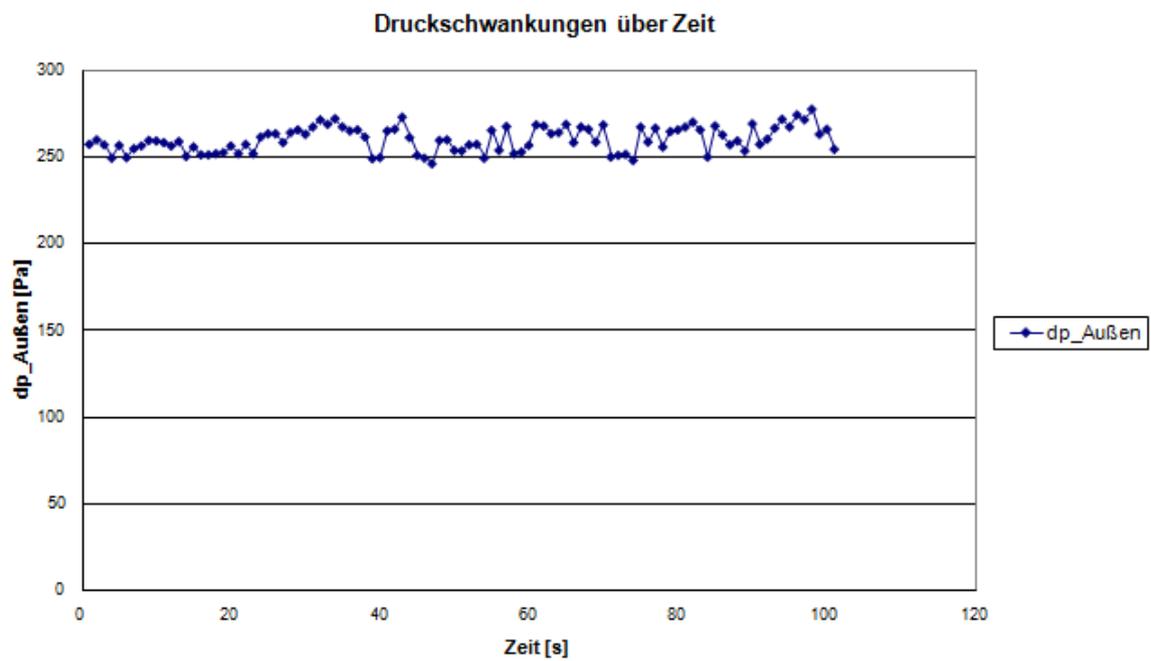


Diagramm 48: Schwankungen des Außendrucks

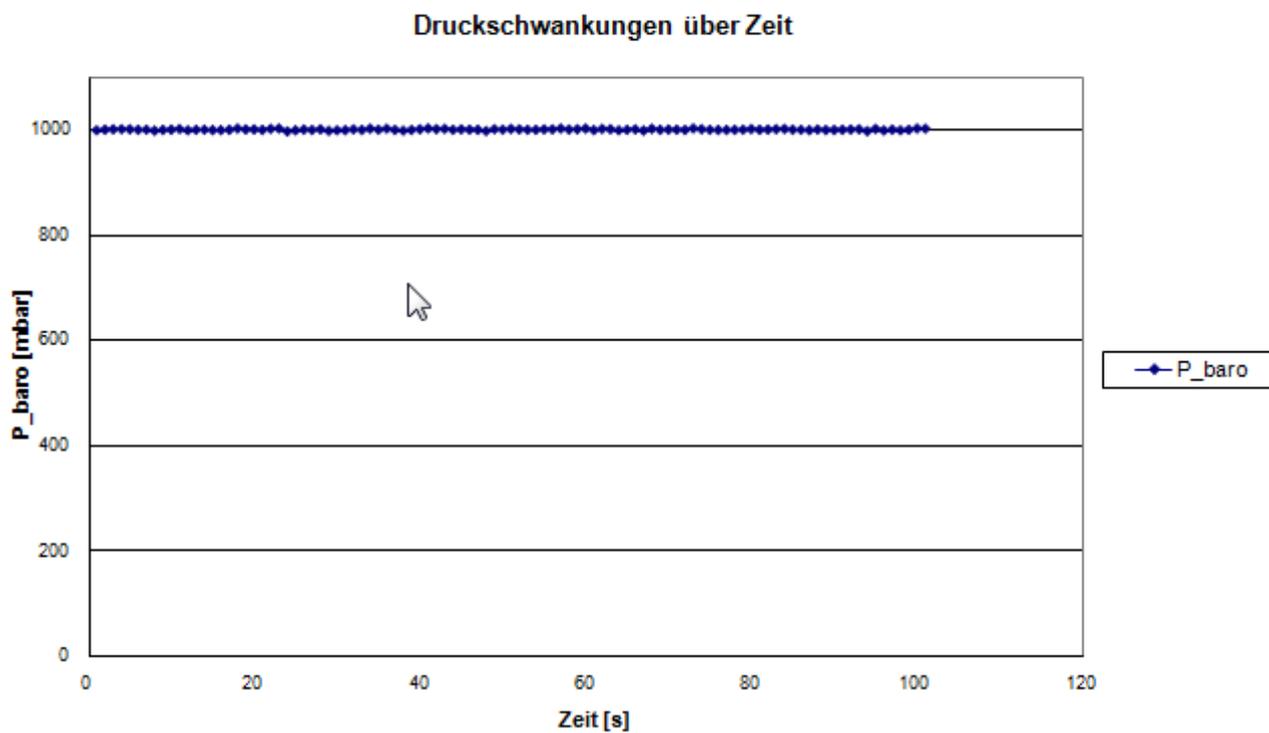


Diagramm 49: Schwankungen des Barometrischen Drucks

Empfindlichkeit	0,2	[mV/V]
	0,5	[mV/V]
	2	[mV/V]
Drehzahl	1500	U/min
Tiefpass	aus	

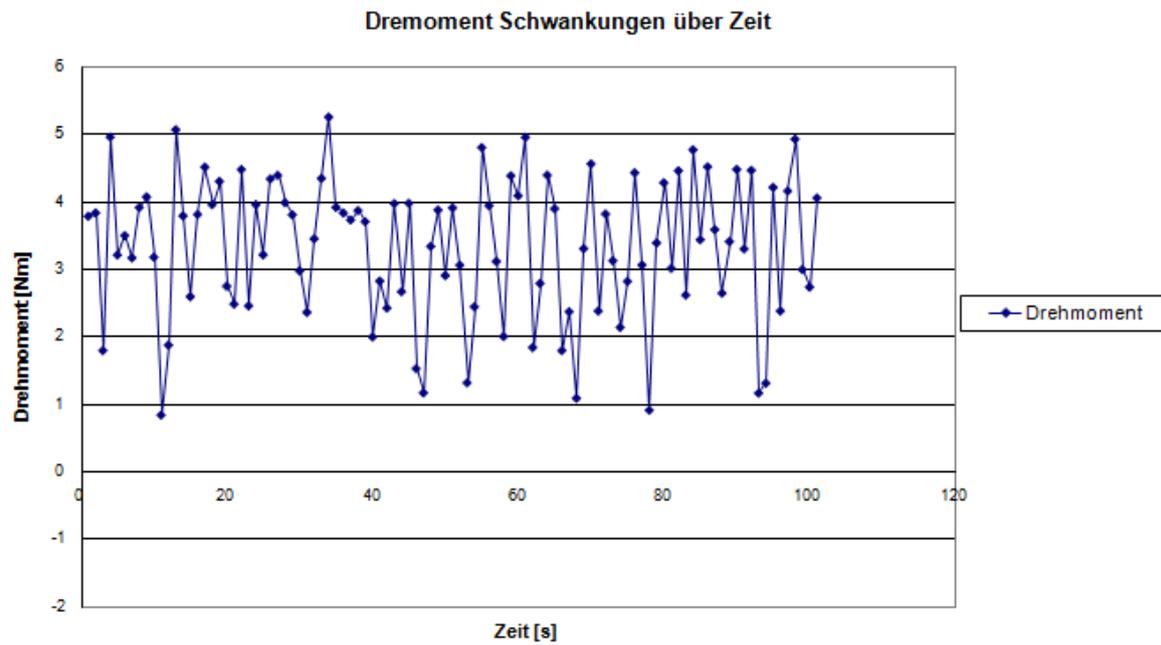


Diagramm 50: Schwankungen des Drehmoments und einen ausgeschalteten Tiefpass

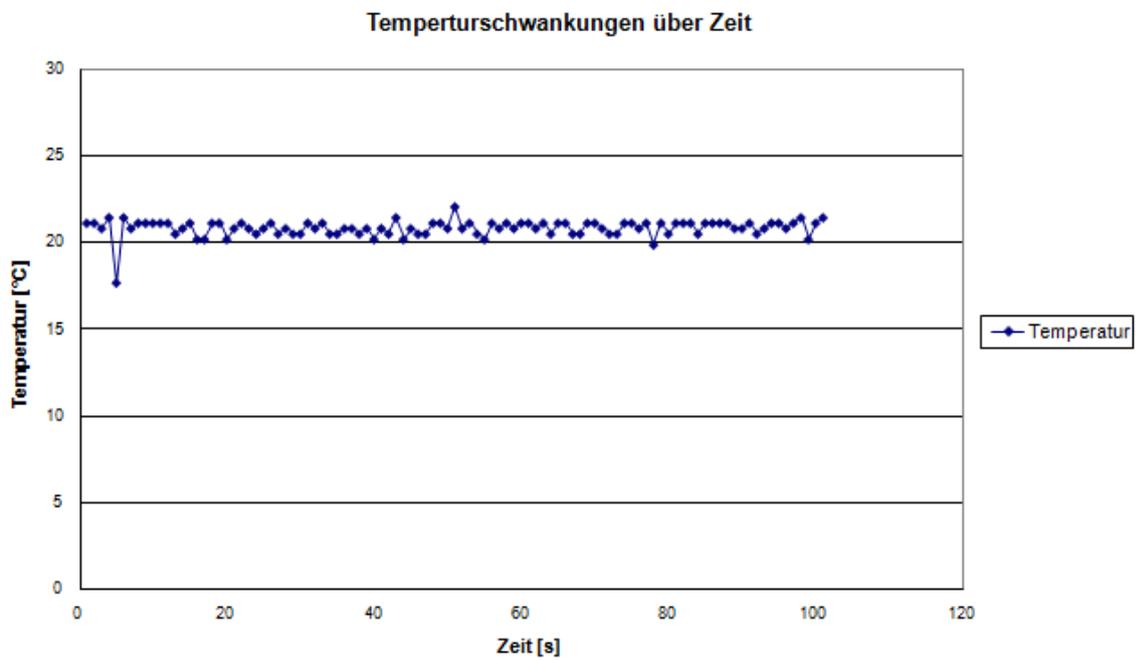


Diagramm 51: Schwankungen der Temperatur

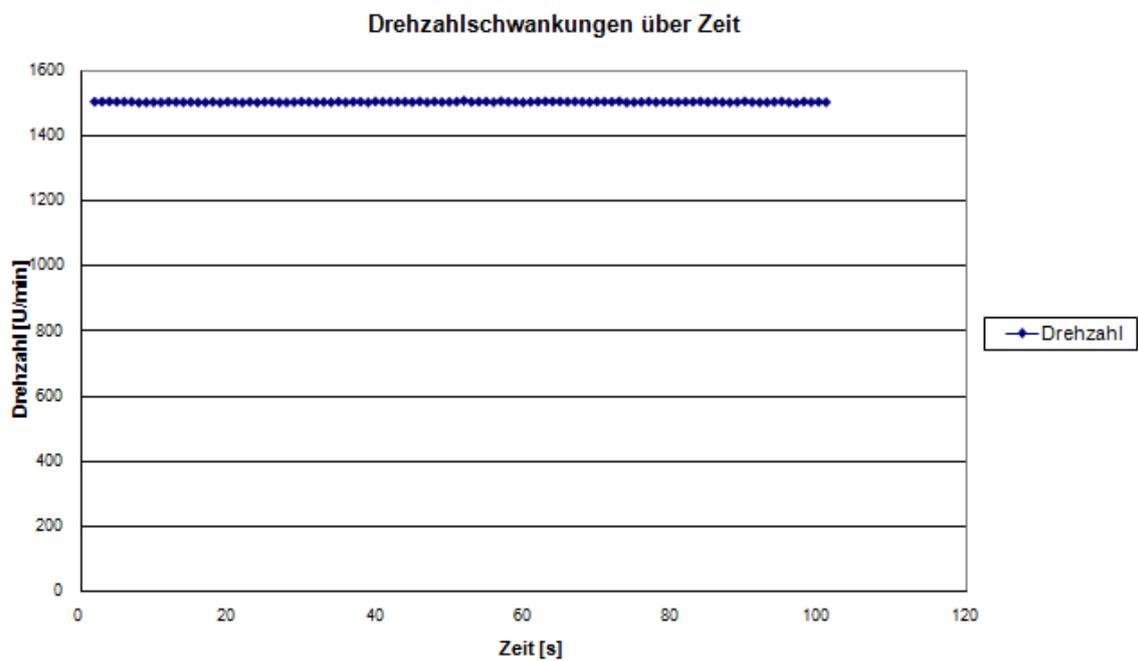


Diagramm 52: Schwankungen der Drehzahl

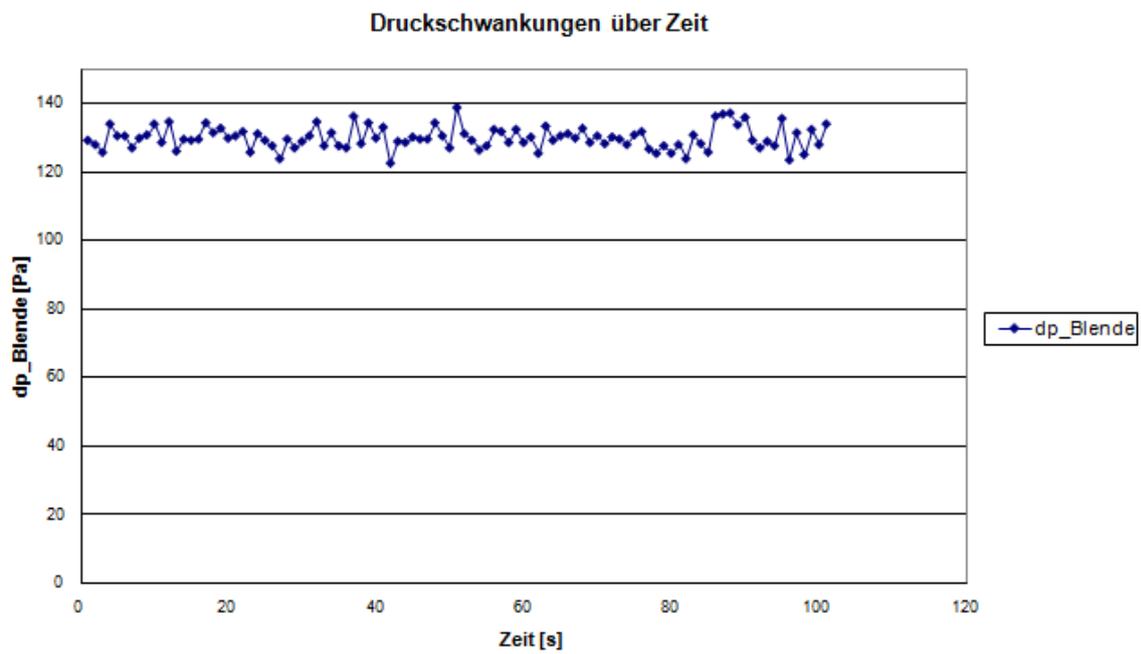


Diagramm 53: Schwankungen des Drucks an der Blende

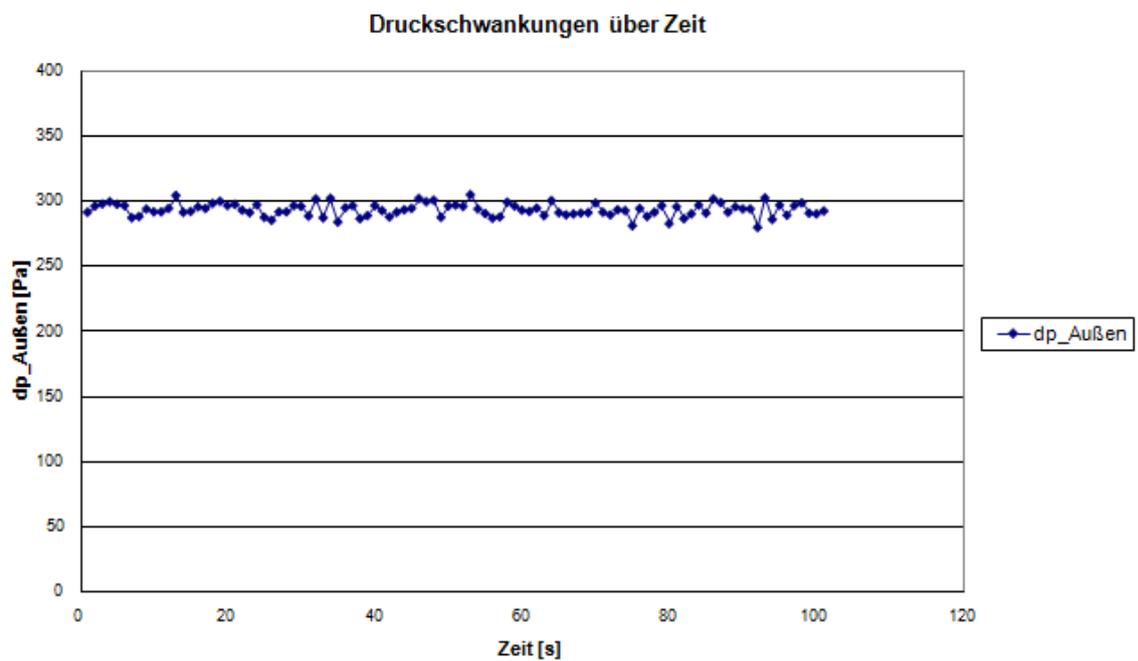


Diagramm 54: Schwankungen des Außendruckes

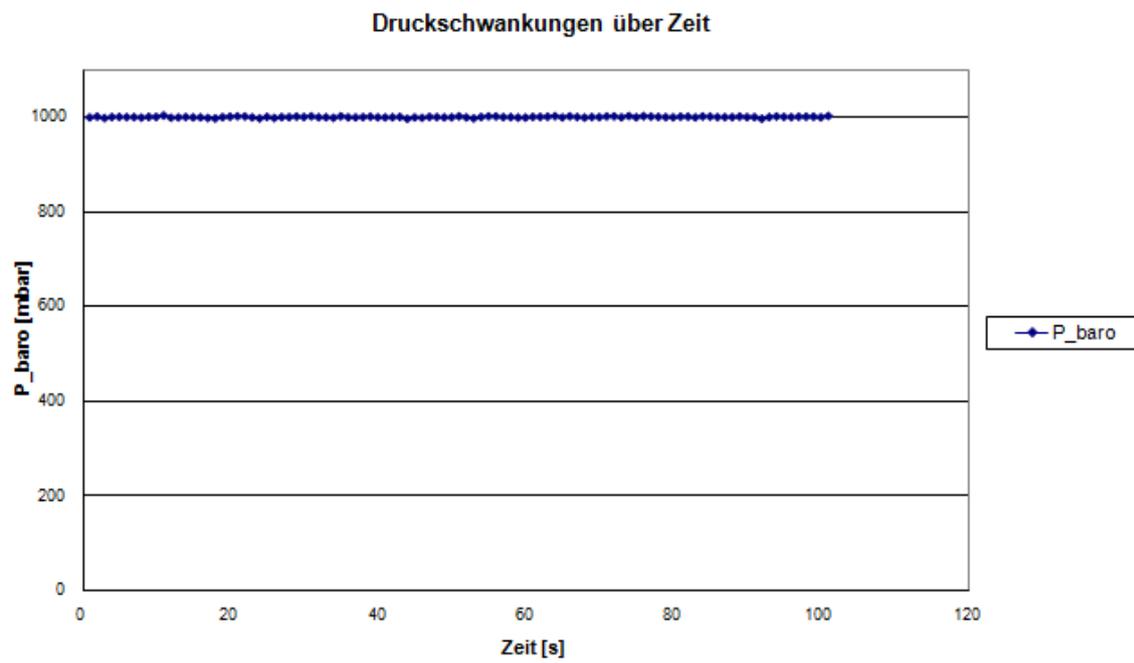


Diagramm 55: Schwankungen des Barometrischen Drucks

Anhang-D

Zunächst werden die optimalen Kennzahlen der verwendeten Radialventilatoren (RV-722 und RV-680) bei unterschiedlichen Drehzahlen dargestellt.

n = 1500, RV-680

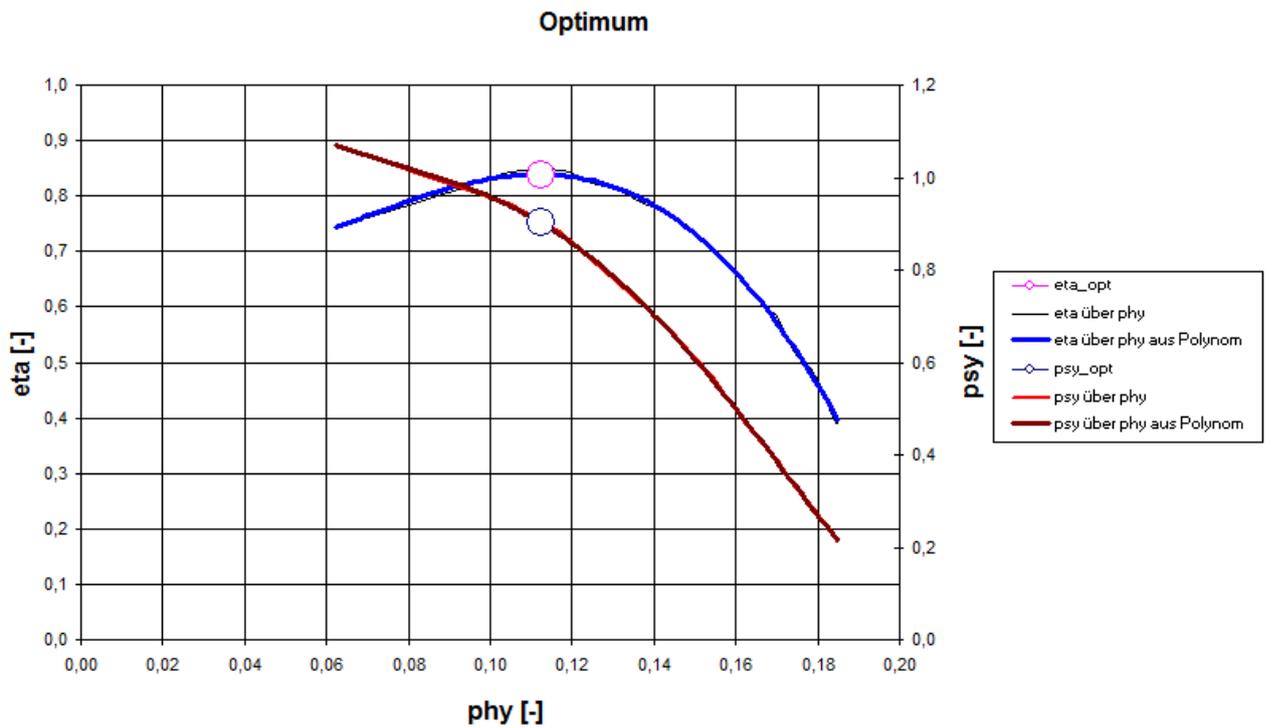


Diagramm 56: Optimal Wirkungsgrad und Druckzahl über Durchflusszahl

Optimum	
φ_{opt}	0,1123932
ψ_{opt}	0,9021203
η_{opt}	0,8385511
σ_{opt}	0,3621776
λ_{opt}	0,1209135

n = 2000 , RV-680

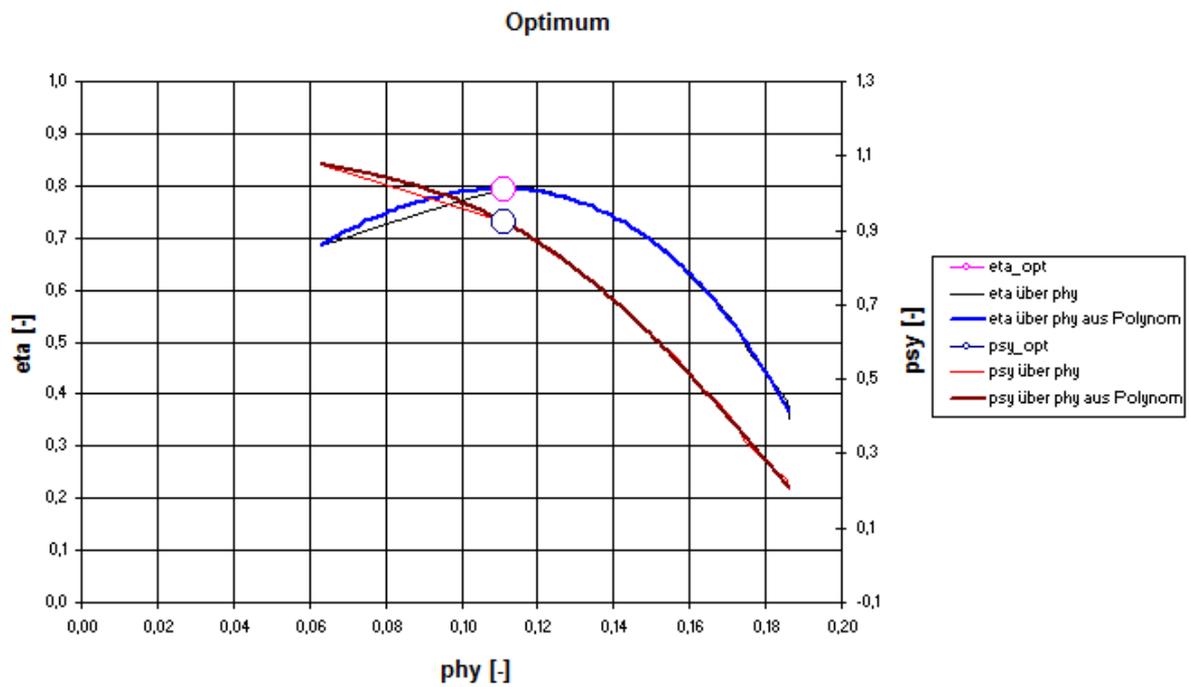


Diagramm 57: Optimal Wirkungsgrad und Druckzahl über Durchflusszahl

Optimum	
ϕ_{opt}	0,1110352
ψ_{opt}	0,9241996
η_{opt}	0,7932202
σ_{opt}	0,3535134
λ_{opt}	0,1293697

n = 2500 , RV-680

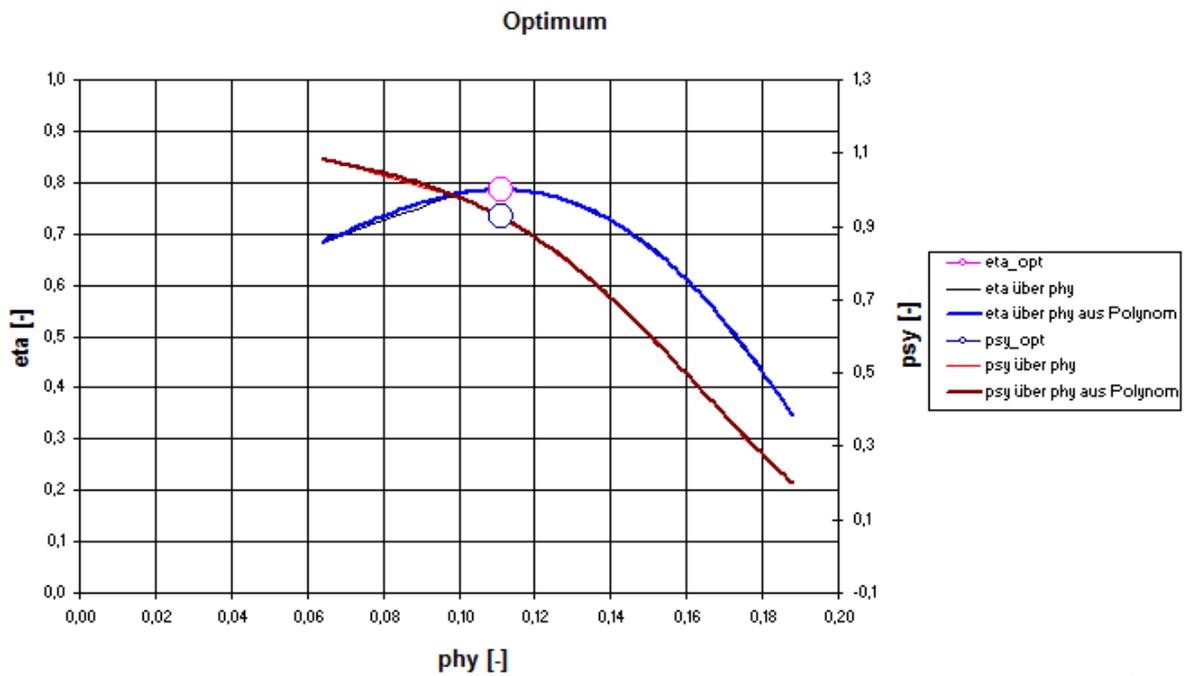


Diagramm 58: Optimal Wirkungsgrad und Druckzahl über Durchflusszahl

Optimum	
φ_{opt}	0,1109811
ψ_{opt}	0,9273613
η_{opt}	0,7850745
σ_{opt}	0,3525233
λ_{opt}	0,1310953

n = 1000, RV-722

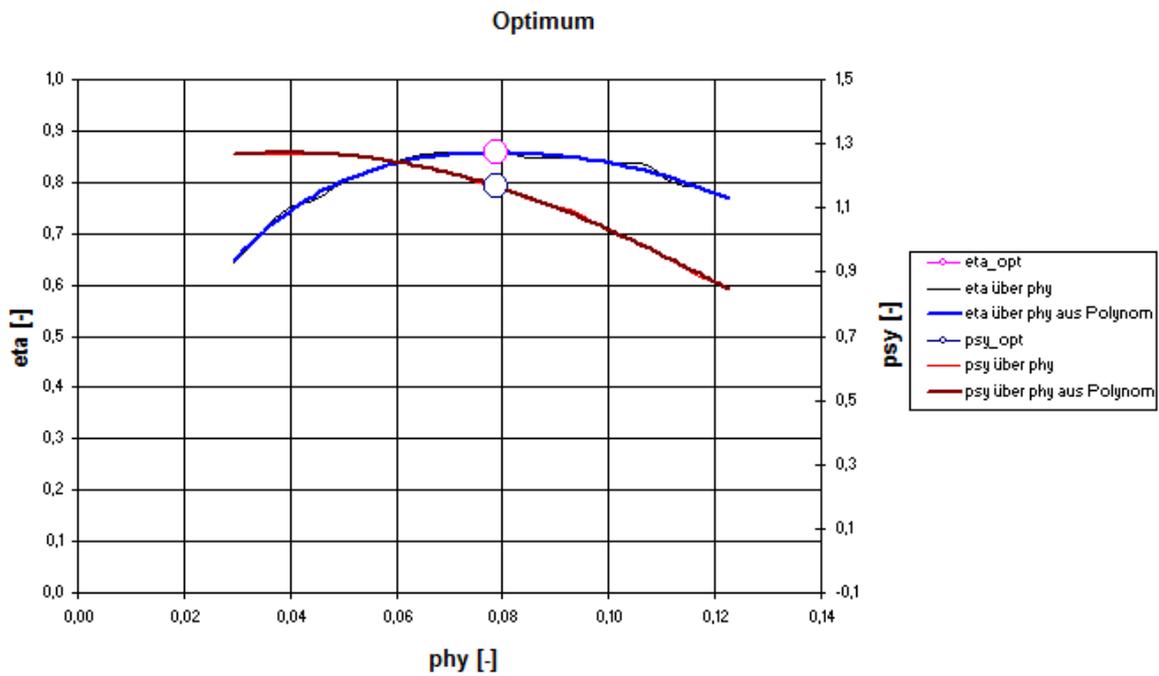


Diagramm 59: Optimal Wirkungsgrad und Druckzahl über Durchflusszahl

Optimum	
ϕ_{opt}	0,0788596
ψ_{opt}	1,1678758
η_{opt}	0,8566427
σ_{opt}	0,2499654
λ_{opt}	0,1075107

n = 1500, RV-722

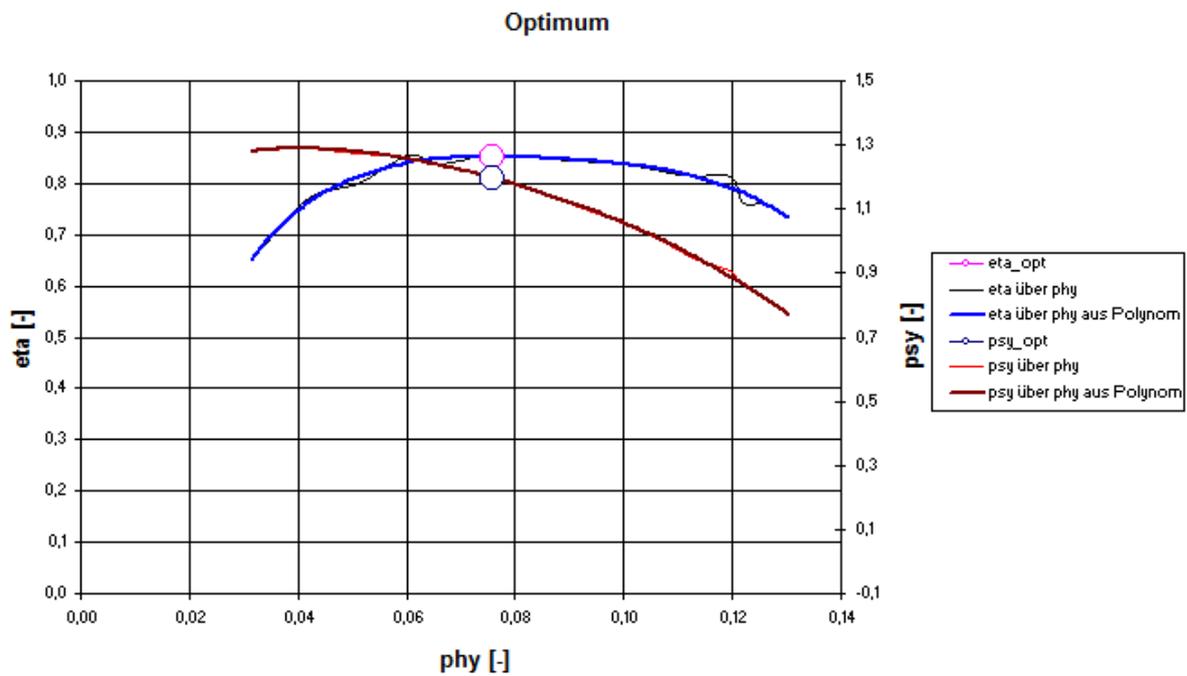


Diagramm 60: Optimal Wirkungsgrad und Druckzahl über Durchflusszahl

Optimum	
ϕ_{opt}	0,0758034
ψ_{opt}	1,1978039
η_{opt}	0,8517635
σ_{opt}	0,2404668
λ_{opt}	0,1065996

Anhang-E

Zunächst werden die Verwendeten Mat-Programme zur Auswertung der Wav.Files abgebildet.

Kalibrierfaktor_Kanal_File

```

%-----
%- Programm zur Ermittlung des Kalibrierfaktors
%- 28.05.2003 Terence Klitz
%-----
%- Dieses Programm berechnet den Kalibrierfaktor für beide Kanäle (re.
%- und li.). Nach Aufruf verlangt es die Kalibriersignale des rechten
%- Kanals, es sucht automatisch nach der Datei des linken Kanals.
%- Daher ist es erforderlich, dass beide Dateien im selben Ordner
%- existieren.
%- Das Ergebnis dieses Programmes ist jeweils der Kalibrierfaktor k
%- [Pa/EU] für den rechten und den linken Kanal.
%- Es wird von einer Kalibrierung mit 250 Hz (124 dB) oder
%- 1000Hz (94 dB) ausgegangen.
%- Analysiert wird eine WAV-Datei, die im Stereo-Format vor-
%- liegen muss und der festgelegten Dateinamensvergabe ent-
%- spricht, es wird dann der jeweilige Kanal erkannt:
%- [Stammname]_KALI_re.WAV oder [Stammname]_KALI_li.WAV.
%- Damit der Kalibrierfaktor in der richtigen Einheit ([Pa/EU])
%- ausgegeben werden kann, wird von einem Faktor = 1 ausgegangen
%- und ein lineares APS betrachtet.
%- Bei der Kalibrierung wird das Flattop-Fenster angewendet. Dazu ist
%- es erforderlich, dass die Flattop-Funktion [Haukap] im Funktionsverzeichnis
%- von MATAB existiert..
%- Die Kalibrierfaktoren für den rechten und linken Kanal werden
%- abschließend in einer Textdatei im Ordner der WAV-Dateien abgelegt:
%- [Stammname]_Kalibrierfaktor.TXT.
%- Der Kalibrierfaktor wird aus dem Gesamtpegel eines Bereiches, der die
%- Kalibrierfrequenz einschließt berechnet. Dieser Bereich wird mit
%- f_bereich = 50 abgesteckt.
%-----

clear all;
close all;
clc;

%-----
%- Programmeinstellungen, die vom Benutzer vorgenommen werden müssen.
%- Standardeinstellung für ein Signal, das mit 44100 Hz abgetastet wurde:
%- Blockgröße von 32768 Werten
%- Divisor von 2.56
%- f_bereich von 50 Hz
%-----

blockgroesse = 32768;      %- 16384; 32768; 65536; 131072
divisor       = 2.56;
f_bereich     = 50;      %- Frequenzbereich von der Kalibrierfrequenz
                        %- nach oben und unten, für die GP-Berechnung.

```

```
%-----  
  
%- Start mit dem rechten Kanal  
  
kanal = 'rechts';  
vergleich = 0;  
  
%-----  
%- Programmschleife  
%-----  
  
for i = 1:2 %- Es werden nur zwei Dateien analysiert.  
  
    %- Dateiwahlschleife  
    if i == 1 % Erster Durchlauf: rechten Kanal wählen  
  
        while vergleich == 0  
  
            %-----  
            %- Einlesen der Wav-Datei  
            %-----  
  
            fenstertitel          = strcat('WAV-Datei laden, Kanal: ',  
kanal);  
            [dateiname, pfad]      = uigetfile('*.wav', fenstertitel);  
            datei_string          = strcat(pfad, dateiname);  
            [zeitdaten_roh, abtastrate, bits] = wavread(datei_string);  
  
            %- Namensergänzung für den rechten Kanal  
            str_er = '_re';  
  
            %- Länge der Kanal-Namenserweiterung  
            l_str = length(str_er);  
            laenge_dateiname = length(dateiname);  
  
            %- Position der Kanal-Namenserweiterung im Dateinamen ('_re' oder '_li')  
            %- Dies geht, da hinter der Namensergänzung im Namen nichts mehr steht.  
            pos_str = laenge_dateiname - 6;  
  
            v_str = dateiname(pos_str:(pos_str+l_str-1));  
            %- Entnahme eines Teilstrings aus dem Dateinamen, der Länge l_str.  
            %- Dieser Teilstring wird mit den erwarteten Namenserweiterungen  
            %- verglichen, wonach der gewählte Kanal ermittelt wird.  
            %- Ergibt: '_re' oder '_li'.  
  
            if strcmp(v_str, str_er)  
                vergleich = 1;  
            elseif strcmp(v_str, str_er)  
                vergleich = 0;  
                display('Falscher Kanal oder Dateinamenfehler');  
            end %- if-Anweisung  
        end %- while-Anweisung  
    elseif i==2 %- zweiter Durchlauf: linken Kanal wählen
```

```

    datei_string = strcat(pfad,
dateiname(1:(laenge_dateiname - 6)), 'li', '.wav')
    [zeitdaten_roh, abtaste, bits] = wavread(datei_string);
end

%- Anzeige der analysierten Datei
datei_string

%-----
%- Textdatei für den Kalibrierfaktor vorbereiten
%- [Stammmame]_Kalibrierfaktor.TXT.
%-----

if i==1
    textdatei = strcat(pfad, dateiname(1:(laenge_dateiname-
12)), '_Kalibrierfaktor.txt');
    fid = fopen(textdatei, 'w');
    fprintf(textdatei, '\n');
end

%-----

laenge_zeitdaten_roh = length(zeitdaten_roh);

%- Kanalwahl, rechts oder links
switch lower(kanal)
    case {'rechts'}
        zeitdaten_kanal = zeitdaten_roh(1:laenge_zeitdaten_roh,2);
    case {'links'}
        zeitdaten_kanal = zeitdaten_roh(1:laenge_zeitdaten_roh,1);
    otherwise
        display('Fehler');
        hold
end

window = flattopwin(blockgroesse);
fenster_flattop = 4.688600988;
epsilon_flattop = 3.83;
ueberlappung = 0;
p_null = 2e-5; %-[Pa]

%- Aus den Zeitdaten werden nun soviele Werte übernommen, wie
%- ganze Bloecke hineinpassen.
%- Es passen n_block mal ganze Bloecke in die Zeitdaten-Matrix.

laenge_zeitdaten_roh = length(zeitdaten_roh);
n_block = (laenge_zeitdaten_roh - mod(laenge_zeitdaten_roh,
blockgroesse)) / blockgroesse;
wertezahl = n_block * blockgroesse;
zeitdaten = zeitdaten_kanal(1:wertezahl,1);
laenge_zeitdaten = length(zeitdaten);
dauer = laenge_zeitdaten / abtaste; %-[s]
dauer_block = blockgroesse / abtaste; %-[s]
delta_f = 1 / dauer_block; %-[Hz]
mittelungsanzahl = n_block;

```

```

f_min    = 0;
% theoretische Maximalfrequenz
f_max_th = abtaste / divisor;

% Maximalfrequenz, die mit delta_f abgedeckt werden kann.
f_max    = f_max_th - mod(f_max_th, delta_f);

% delta_f passt n-mal in f_max rein, es gibt aber n+1 Stützpunkte
n_f      = f_max / delta_f + 1;

frequenzen = (linspace(f_min, f_max, n_f))';

%-----
%- Berechnung des linearen APS ueber die Funktion specgram
%-----

[B_th, F_th, T] = specgram(zeitdaten, blockgroesse, abtaste, window,
ueberlappung);

%- Übernahme des berücksichtigten Frequenzbereiches.

B = B_th(1:n_f, :);
F = F_th(1:n_f);

[m, n]    = size(B);

%-----
%- Lineares APS
%-----
%- Das APS kann aus der Multiplikation der FFT mit ihrer
%- konjugiert komplexen berechnet werden. Daraus geht dann das
%- quadratische APS hervor [v^2]. Das lineare APS erhält man,
%- indem man aus dem quadratischen APS die Wurzel zieht, oder
%- das APS über die Betragsbestimmung der komplexen Elemente in
%- der FFT-Matrix B ermittelt.
%- Der zweite Weg wird hier angewendet.
%-----

aps_lin = (2.0 * fenster_flattop * abs(B) / blockgroesse) / sqrt(2.0);

%- Der Faktor 2.0 ersetzt die theoretisch durchzuführende Addition
%- der Amplituden des negativen und positiven Frequenzbereiches,
%- was bei reellen Signalen zulässig ist.
%- Der Fensterfaktor (fenster_flattop) macht die Normierung des
%- angewendeten Wichtungsfensters rückgängig.
%- Mit der Division durch sqrt(2.) werden RMS-Amplituden berechnet.

%- Gesonderte Beachtung des Gleichanteils
%- Der Gleichanteil kommt nur einmal vor, darf also nicht mit
%- dem Faktor 2. vervielfacht werden.
aps_lin(1,1:n) = aps_lin(1,1:n) ./ 2.0;

%- Mitteln des APS
aps_lin_mittel = sqrt(sum(aps_lin.^2, 2)/n);

```

```

%- Berechnung des Gesamtschalldruckpegels
GP_aps_lin_mittel = sqrt(1/epsilon_flattop * sum(aps_lin_mittel.^2));

%-----
%- Berechnung des Kalibrierfaktors
%-----
%- Ermittlung der Kalibrierfrequenz und des Kalibrierpegels
%-----

%- Vorgabe, bei welchem Index der Kalibrierpegel zu finden ist
index_1000 = round(1000 / delta_f + 1); %- ungefährender Index des Pegels
index_250   = round(250 / delta_f + 1); %- ungefährender Index des Pegels
delta_index = round(20 / delta_f);      %- Bereich um den Pegel

%- Maximum im vorgegebenen Frequenzbereich berechnen
max_1000 = max(aps_lin_mittel((index_1000 - delta_index):(index_1000 +
delta_index)));
max_250  = max(aps_lin_mittel((index_250 - delta_index):(index_250 +
delta_index)));

%- Die größere des Maximums kennzeichnet den Kalibrierpegel

%-----Tobias-----

if max_1000 > max_250
    frequenz_kali = 1000
    pegel_kali    = 94
elseif max_1000 < max_250
    frequenz_kali = 1000 %250
    pegel_kali    = 94 %124
else
    display('Fehler - Kalibrierfrequenz');
    hold;
end %- if-Anweisung
%-----Tobias Ende-----

%-----Tobias Original-----
% if max_1000 > max_250
%     frequenz_kali = 1000
%     pegel_kali    = 94
% elseif max_1000 < max_250
%     frequenz_kali = 1000 %250
%     pegel_kali    = 94 %124
% else
%     display('Fehler - Kalibrierfrequenz');
%     hold;
% end %- if-Anweisung
%-----Tobias Original Ende-----

%- Frequenzbereich um die theoretische Kalibrierfrequenz festlegen
von_f_k = frequenz_kali - f_bereich; %- [Hz]
bis_f_k  = frequenz_kali + f_bereich; %- [Hz]

%- Frequenzbereich in einen Stützstellenbereich umrechnen

```

```

von_index_k = (von_f_k - mod(von_f_k, delta_f)) / delta_f + 1;
bis_index_k = (bis_f_k - mod(bis_f_k, delta_f)) / delta_f + 1;

%- Berechnung des Kalibrierfaktors über den Gesamtpegel
GP_kali = sqrt(1/epsilon_flattop *
sum(aps_lin_mittel(von_index_k:bis_index_k).^2));
kk_bereich = 10^(pegel_kali / 20) * p_null ./ GP_kali;
m_k_bereich(i,1) = kk_bereich;
k_bereich = num2str(kk_bereich,8);

aps(:,1) = F;
aps(:,i+1) = aps_lin_mittel;      %- aps(:,2) rechter Kanal
                                   %- aps(:,3) linker Kanal

%-----
%- Plotten des linearen APS
%-----
figure(1);
set(gcf,'name', datei_string);

subplot(2,2,i);
plot(aps(:,1), aps(:,i+1));
    title(['Lineares APS von Kanal: ', kanal, '; Kalibrierfrequenz = ',
num2str(frequenz_kali) ' Hz; k = ', num2str(m_k_bereich(i,1)), ' [Pa/EU]']);
    xlabel('f [Hz]');
    ylabel(['Amplitude [EU]']);
    grid;

%-----
%- Ablegen des Kalibrierfaktors in einer Datei
%-----

fid = fopen(textdatei,'a');
    fprintf(fid,'%11.8f\t%s \n', kk_bereich, kanal);
    fclose(fid);
display(['Datei ', kanal, ' gespeichert']);

kanal = 'links';

maximum(i,1) = max(aps_lin_mittel);

%-----
%- Anwendung der Kalibrierfaktoren auf das Kalibriersignal
%- Mit dieser Kontrolle kann geprüft werden, ob der Kalibrierfaktor
%- richtig berechnet wurde.
%-----

if i == 1
    amp_rechts = zeitdaten_roh(1:laenge_zeitdaten_roh,2);
    kali_fak_re = m_k_bereich(1,1)
    amp_rechts_kali = amp_rechts(1:wertezahl) * kali_fak_re;
    [B_re_th, F_re_th, T_re] = specgram(amp_rechts_kali, blockgroesse,
abtastrate, window, ueberlappung);

```

```

    B_re           = B_re_th(1:n_f,:);
    F_re           = F_re_th(1:n_f);
    [m, n]         = size(B_re);
    aps_lin_re     = (2.0 * fenster_flattop * abs(B_re) / blockgroesse)
/ sqrt(2.0);
    aps_lin_re(1,1:n) = aps_lin_re(1,1:n) ./ 2.0;
    aps_lin_mittel_re = sqrt(sum(aps_lin_re.^2, 2)/n);
    aps_lin_mittel_dB_re = 20. * log10(aps_lin_mittel_re ./ p_null);
    gp_aps_lin_mittel_re = sqrt(1/epsilon_flattop *
sum(aps_lin_mittel_re.^2));
    gp_aps_lin_mittel_dB_re = 20. * log10(gp_aps_lin_mittel_re ./ p_null);
    aps_dB_re      = [F_re, aps_lin_mittel_dB_re];
    subplot(2,2,3);
    plot(aps_dB_re(:,1), aps_dB_re(:,2));
        title(['Kalibriertes APS von Kanal: rechts; AVG: ', num2str(n_block), '
LpG [dB]: ', num2str(gp_aps_lin_mittel_dB_re,3)]);
        xlabel('f [Hz]');
        ylabel(['Lp [dB]']);
        grid;

elseif i == 2
    amp_links      = zeitdaten_roh(1:laenge_zeitdaten_roh,1);
    kali_fak_li    = m_k_bereich(2,1)
    amp_links_kali = amp_links(1:wertezahl) * kali_fak_li;
    [B_li_th, F_li_th, T_li] = specgram(amp_links_kali, blockgroesse,
abtastrate, window, ueberlappung);
    B_li           = B_li_th(1:n_f,:);
    F_li           = F_li_th(1:n_f);
    [m, n]         = size(B_li);
    aps_lin_li     = (2.0 * fenster_flattop * abs(B_li) / blockgroesse)
/ sqrt(2.0);
    aps_lin_li(1,1:n) = aps_lin_li(1,1:n) ./ 2.0;
    aps_lin_mittel_li = sqrt(sum(aps_lin_li.^2, 2)/n);
    aps_lin_mittel_dB_li = 20. * log10(aps_lin_mittel_li ./ p_null);
    gp_aps_lin_mittel_li = sqrt(1/epsilon_flattop *
sum(aps_lin_mittel_li.^2));
    gp_aps_lin_mittel_dB_li = 20. * log10(gp_aps_lin_mittel_li ./ p_null);
    aps_dB_li      = [F_li, aps_lin_mittel_dB_li];
    subplot(2,2,4);
    plot(aps_dB_li(:,1), aps_dB_li(:,2));
        title(['Kalibriertes APS von Kanal: links; AVG: ', num2str(n_block), '
LpG [dB]: ', num2str(gp_aps_lin_mittel_dB_li,3)]);
        xlabel('f [Hz]');
        ylabel(['Lp [dB]']);
        grid;

end %- if-Anweisung, Kontrolle

end %- if-Anweisung, Programmschleife

clear all;
close all;

```

2. Wav_Analyse_Programm_File

```
%
%Diese Programm wurde unter Matlab 6.5 geschrieben und getestet. Dieses
%Programm sollte prinzipiell auch unter neueren Versionen von Matlab
%lauffähig sein. Vorsicht ist bei dem Befehl 'specgram' walten zu lassen,
%da dieser bei neueren Matlab-Versionen zwar noch benutzbar ist, aber nicht
%mehr supported wird.
%
%
%Das Kalibrierfile ist mit dem Datum zu versehen
%
%Es wird vorausgesetzt, dass die Akustischen Messungen folgendes
%Dateiformat besitzen:
%messdatum_PositionvomBestpunkt_drehzahl_messreihenr.wav
%Bsb:
%      101105_op_n1100_MP1.wav = am Optimalpunkt
%      101105_re_n1100_MP1.wav = rechts davon
%      101105_li_n1100_MP1.wav = links davon
%Es wird bei 11 verschiedenen Drehzahlen gemessen
%1000 U/min 1100 U/min 1200 U/min 1300 U/min 1400 U/min 1500 U/min
%1600 U/min 1700 U/min 1800 U/min 1900 U/min 2000 U/min
%es muss ein Stereo-Kalibriersignal vorliegen, womit das linke und rechte
%Mikrofon kalibriert worden sind.
%
% Grundsätzlich gilt, dass in der Regel nicht mehr benötigte
% Variablen aus dem Workspace gelöscht werden. Variablen werden mit einem
% Grossbuchstaben versehen wenn diese an verschiedenen Stellen im Programm
% benötigt werden.

% Mehmet Topal Juni 2006
%
%- Analyse der Drehzahlhochfahrt
%
%- Zur Ermittlung einer lueckenlosen Drehklanglinie werden neben den
%- akustischen Messungen bei konstanter Drehzahl, Drehzahlhochfahrten von
%- 900 U/min bis 2100 U/min aufgenommen und analysiert.
%
%
%- Kappung der Wellenfrequenz wurde hinzugefügt 12.12.2006
%
%
%- Entfernung der kombinierten Frequenzgangkorrektur C fuer den linken
%- (Nahfeld Mikrofon) Kanal.                13.06.2007
%
%- Die kombiniernte Frequenzganagkorrektur C wird bei Mikrofonen mit
%- Mikrofonvorsaeetze verwendet. Da bei der Nachfeld Messposition ein 1/4"
%- Kondensatormikrofon ohne einen Mikrofonvorsatz verwendet wird muss die
%- bislang angewendete Frequenzgangkorrektur C fuer den linken Kanal
%- entfernt werden.

%
%clear all
%close all

%-----
%-----
%-----Allgemeine Einstelllungen-----
%-----
%-----
```

```

%-----
%-----Festlegung von wichtigen Größen-----
%-----

Blockgrosse = 32768;      % festgelegte Blockgrösse
Divisor      = 2.00;      % festgelegter Divisor
Ueberlappung = 50;       % Überlappung der Fenster('Window') in Prozent
Window       = hanning(Blockgrosse); % zum Fenstern des Signales wird ein
Hanning-Fenster gewählt
Fenster      = 2;        % Faktor um die Normierung des Hanning-Fenster('Window')
rückgängig zu machen
Epsilon      = 1.5;      % Korrekturwert für Hanningfenster
P_null       = 2e-5;     % [Pa]
Z            = 8;        % Anzahl der Schaufeln
D_2          = 0.447;    % Durchmesser des zu untersuchenden Laufrades
Grenze_Freq  = 12500;    % damit lässt sich die maximale Frequenzdarstellung und
Abspeicherung in den Schmalbandspektren steuern
A_0          = 1;        %- Bezugsflaeche [m^2]
D_Rohr       = 0.396;    %- Rohrdurchmesser [m]
A_Rohr       = (pi * D_Rohr^2) / 4; %- Rohrflaeche [m^2]
L_s          = 10 * LOG10(A_Rohr / A_0); %- Flaechenpegel

%- Nenn-Terzmittenfrequenzen
F_mn = [10 12.5 16 20 25 31.5 40 50 63 80 100 125 160 200 250 315 400 500 630 800
1000 1250 1600 2000 2500 3150 4000 5000 6300 8000 10000 12500 16000 20000];

%- Oktavmittenfrequenzen für die Achsbeschriftung
Oktav_m = {'10'; '' ; '16'; '' ; '' ; '31,5'; '' ; '' ; '63'; '' ; '' ; '125'; '' ; '' ;
'250'; '' ; '' ; '500'; '' ; '' ; '1k'; '' ; '' ; '2k'; '' ; '' ; '4k'; '' ; '' ; '8k'; '' ;
'12,5k'; '16000'};

%-----
%-----Ende Festlegung von wichtiger Größen-----
%-----

%-----
%-----Einlesen der Korrekturfiles-----
%-----

%- Die Datei c_2_korrigiert.mat basiert auf der koefc_C2.mat Datei. Die in
% dem Programm
% alt_Mat_lesen_darstellen_Kap_frequenzgangkorektur_verbessert(befindet
% sich im Verzeichniss) erwähnte Netzspannung ist bereits korrigiert.
%- Ausserdem wurde der letzte Wert der Originaldatei(die normalerweise bei
% Linie 801 oder der Frequenz 12830 endet) auf die Frequenzen bis 14510Hz
% erweitert. Es wurde der letzte existierende Wert der Originaldatei
% genommen (7.1938 dB) und die Matrize damit gefüllt.

load FLT_c_2_korrigiert.mat;
load FLT_c34.mat ;

%-----
%-----Ende-Einlesen der Korrekturfiles-----
%-----

%-----
%-----Einlesen der Kalibrierfaktoren-----
%-----

```

```

%- Es öffnet sich ein Fenster in dem man das Verzeichniss des
% Kalibrierfiles wählen kann.In diesem Verzeichniss müssen auch die
% aufgenommen wav-Files und die dazugehörigen Volumenstrommessungen
% vorhanden sein.
fenstertitel = strcat('Dokument mit Kalibrierfaktoren auswählen');
[dateiname, Pfad] = uigetfile('*.txt', fenstertitel);
clear fenstertitel

%- Extrahieren des Stammmamens
Stammmame = strrep(dateiname, 'Kalibrierfaktor.txt', '');
clear dateiname

%- Zu öffnende Textdatei mit den Kalibrierfaktoren
textdatei = strcat(Pfad, Stammmame, 'Kalibrierfaktor.txt');

%- Die Kalibrierfaktoren werden aus der Datei eingelesen und in den
% Workspace geschrieben
%- kali_re bedeutet der Kalibrierfaktor für den rechten Kanal
%- kali_li bedeutet der Kalibrierfaktor für den linken Kanal
%- string_1 und string_2 werden benötigt um die Kalibrierfaktoren richtig
% auszulesen, werden aber nicht mehr benötigt und daher gelöscht zum
% Schluss gelöscht
[Kali_re, string_1, Kali_li, string_2] = textread(textdatei, '%f\t%s\n%f\t%s');
clear string_1 string_2 textdatei

%-----
%-----Ende des Einlesens der Kalibrierfaktoren-----
%-----

%-----
%-----Einlesen der Aerodynamischen Daten-----
%-----

%geloescht

%-----Jawad-----
%-----
display(' ');
Anzahl_Schleifen = input('Anzahl der Datensätze angeben: ');
% for-Schleife fuer die mehrfache FFT Erstellung
for Anzahl_Datensaetze=1:Anzahl_Schleifen

%-----
%-----Jawad Ende-----
%-----

%-----
%-----Ende des Einlesen der Aerodynamischen Daten-----
%-----

%an dieser Stelle wird der Pfad in das Verzeichniss der Wav-Dateien
%gewechselt. Alle von hier an erstellten Plots Mat-Files werden in diesem
%Verzeichniss erzeugt. Da nichts mehr ab diesem Zeitpunkt eingelesen werden
%muss ist dies möglich.

cd (Pfad) %Achtung 'Pfad' ist eine Variable

```

```

%-----
%-----Vorbereiten der Terzbänder-----
%-----

%- Vorbereiten der Terzbänder in dem angegebenen Frequenzbereich.
%
%- Es wird gemäß DIN EN 61260 mit den exakten Terz-Bandmittenfre-
%- quenzen gerechnet. Aus diesen werden dann die oberen und unteren
%- Bandedeckfrequenzen errechnet, nach denen die Frequenzlinien den
%- einzelnen Terzbändern zugeordnet werden.
%- Die Terzmittenfrequenzen sind nach der Normreihe R10 formuliert,
%- die mit dem Faktor q erstellt wird.
%
%---ACHTUNG unterstes Terzband unter Umständen auf 12,5 wechseln da im
%---Schmalbandspektrum auch hohe Peaks bei 13Hz gesichtet worden sind.

% An dieser Stelle steuert man auch welches Terzband als letztes
% ausgerechnet wird
f_mn_a      = 10;           %- Erste beachtete Terz (Nenn-Frequenz),
f_mn_e      = 12500;       %- letzte beachtete Terz (Nenn-Frequenz);
q = 10^(1/10);           %- Stufensprung für die Normreihe R10

%- Da die exakten Terzmittenfrequenzen nicht den Nennfrequenzen
% entsprechen, wird als Abbrechkriterium f_2 auf Grundlage von f_mn_e
% genommen.
f_abbrech = f_mn_e * sqrt(q);
f_m_start = 10;           %- Erste Terzmittenfrequenz
i = 1;
% F_m sind die exakten Terzmittenfrequenzen. Diese werden zur Berechnung
% der Terzbänder benötigt
F_m(1) = f_m_start;
while F_m <= f_abbrech     %- exakte Terzmittenfrequenzen
    i = i + 1;             %- berechnen
    F_m(i) = F_m(i-1) * q;
end %- while-Anweisung

%- Vorgegebenen Terzmittenfrequenzbereich aus f_mn entnehmen
%- Start bei f_mn_a
%- Ende bei f_mn_e
Index_a = find(F_mn == f_mn_a); % Index_a wird zur Darstellung der Terzbänder
benötigt
Index_e = find(F_mn == f_mn_e); % Index_e wird zur Darstellung der Terzbänder
benötigt
F_mnenn = F_mn(Index_a : Index_e); % F_mnenn wird zur Berechnung der Terzbänder
herangezogen

%- Auf den Bereich f_mn_a bis f_mn_e angepasste exakte Mittenfrequenzen
%- Mittenfrequenzen des vorgegebenen Bereiches holen
F_m = F_m(Index_a : Index_e);

%- Zugehörige Bandedeckfrequenzen f_1 und f_2 berechnen. Dabei ist F_1 die
% unter Bandedeckfrequenz und F_2 die obere Bandedeckfrequenz zum der
% dazugehörige Bandmittenfrequenz. Diese werden zur Berechnung der Terzbänder
benötigt
for i = 1 : length(F_m)
    F_1(i) = F_m(i) / sqrt(q);
    F_2(i) = F_m(i) * sqrt(q);
    band(i) = F_2(i) - F_1(i); % ?? wird die Variable 'band' wirklich gebraucht ??
end %- for-Schleife

%- Aufgrund von f_mn_a und f_mn_e und den errechneten

```

```

%- Bandedeckfrequenzen steht nun die Frequenzspanne fest
F_start = F_1(1);
F_ende  = F_2(length(F_2));

%zum Abschluss werden die nicht mehr benötigten Variablen aus dem
%Worksspace entfernt.
clear f_mn_a f_mn_e f_abbrech f_m_start i band q F_start F_ende
%-----
%-----Ende "Vorbereiten der Terzbänder"-----
%-----

%-----
%-----
%-----Ende Allgemeine Einstellungen-----
%-----
%-----

%-----
%-----
%-----erste Drehzahl bei 1000 U/min-----
%-----
%-----

% Es wird immer der rechte und linke Kanal gleichzeitig untersucht.

%Deklarierung der Variablen für diese Drehzahl

% hier wird die Strömungsgeschwindigkeit aus dem array Volumenstrommessung
% herausgeschrieben. Der Wert für die Messung n=1000 befindet sich in der
% ersten Zeile und Spalte Nummer 8. In der zweiten Zeile stehen die
% Messdaten für die Drehzahl 1100 usw. Analog gilt dies für andere Messgrößen

%str_geschw = Volumenstrommessung(1,8);

n          = 2800;
str_geschw = 7.5;

%- erstellen eines strings mit dem Pfad und Namen des zu untersuchenden
% Wav-Files damit man den wavread-Befehl vernünftig ausführen kann.

fenstertitel = strcat('Wavefile auswählen');
[dateiname_wav, Pfad_wav] = uigetfile('*.wav', fenstertitel);
clear fenstertitel

pfad_wave_datei = strcat(Pfad_wav,dateiname_wav);
%pfad_wave_datei = strcat(Pfad, Stammname, 'n1000_MP1.wav');
[zeitdaten_roh, abtastrate, bits] = wavread(pfad_wave_datei);
clear pfad_wave_datei

%- Aus den Zeitdaten werden nun soviele Werte übernommen, wie
%- ganze Bloecke hineinpassen.
%- Es passen n_block mal ganze Bloecke in die Zeitdaten-Matrix.
laenge_zeitdaten_roh = length(zeitdaten_roh);

```

```

n_block          = (laenge_zeitdaten_roh - mod(laenge_zeitdaten_roh,
Blockgroesse)) / Blockgroesse;
laenge_zeitdaten_pa = n_block * Blockgroesse;

clear laenge_zeitdaten_roh

%Aufspaltung der Zeitrohdaten in einen linken und rechten kanal.
%Gleichzeitig werden die Kalibrierfaktoren mit eingerechnet und man erhält
%die Zeitdaten in Pascal
%kanal 1 = links kanal 2 = rechts
zeitdaten_Pa_links = zeitdaten_roh(1:laenge_zeitdaten_pa,1) * Kali_li;
zeitdaten_Pa_rechts = zeitdaten_roh(1:laenge_zeitdaten_pa,2) * Kali_re *
0.1257^0.5; %(Schallleistung!!!!);

%clear zeitdaten_roh

%- Aus den Zeitdaten werden nun sovieler Werte übernommen, wie
%- ganze Bloecke hineinpassen.
%- Es passen n_block mal ganze Bloecke in die Zeitdaten-Matrix.
dauer          = laenge_zeitdaten_pa / abtastrate;      % [s]
dauer_block    = Blockgroesse / abtastrate;           % [s]
delta_f        = 1 / dauer_block;                    % [Hz]
mittelungsanzahl = n_block; %'mittelungszahl wird zur Darstellung benötigt
clear laenge_zeitdaten_pa dauer dauer_block

%- Frequenzspanne ermitteln(scheint nicht benötigt zu werden.)
f_min          = 0;

%- Theoretische Maximalfrequenz
f_max_th = abtastrate / Divisor;

%- Maximalfrequenz, die mit delta_f erfasst wird
f_max      = f_max_th - mod(f_max_th, delta_f);

%- delta_f passt n-mal in f_max, es gibt aber n+1 Stützstellen
n_f        = f_max / delta_f + 1;

clear f_max f_min f_max_th

%- Berechnung des linearen APS über die Funktion <specgram>
%- Im Nachfolgenden wird zwischen dem Frequenzbereich (_bereich) und
%- dem gesamten Frequenzbereich (_gesamt) unterschieden. Der vorgege-
%- bene Frequenzbereich (_bereich) wird durch den angegebenen Terz-
%- bereich bestimmt.
[b_th_re, f_th_re, t_re] = specgram(zeitdaten_Pa_rechts, Blockgroesse, abtastrate,
Window, Ueberlappung);
[b_th_li, f_th_li, t_li] = specgram(zeitdaten_Pa_links, Blockgroesse, abtastrate,
Window, Ueberlappung);
clear zeitdaten_Pa_rechts zeitdaten_Pa_links t_re t_li

%-Spektrum und Frequenzen des gesamten Bereiches (linker und rechter Kanal)
b_gesamt_re = b_th_re(1:n_f,:);
f_gesamt_re = f_th_re(1:n_f);

clear b_th_re f_th_re

b_gesamt_li = b_th_li(1:n_f,:);
f_gesamt_li = f_th_li(1:n_f);

clear b_th_li n_f f_th_li

```

```

%- Dimensionen von B_gesamt
%- m = Anzahl der Linien (re=rechter Kanal / li=linker Kanal)
%- n = Anzahl der Spektren (re=rechter Kanal / li=linker Kanal)
[m_re, n_re] = size(b_gesamt_re);
[m_li, n_li] = size(b_gesamt_li);
clear m_re m_li

%----- Lineares APS-----
%- Das APS kann aus der Multiplikation der FFT mit ihrer konjugiert
%- komplexen berechnet werden. Daraus geht dann das quadratische APS
%- hervor [V^2]. Das lineare APS erhält man, indem aus dem quadra-
%- tischen APS die Wurzel gezogen wird, oder das APS über die Betrags-
%- bestimmung der komplexen Elemente in der FFT-Matrix B ermittelt
%- wird. Der zweite Weg wird hier angewendet.

%- Der Faktor 2.0 ersetzt die theoretisch durchzuführende Addition
%- der Amplituden des negativen und positiven Frequenzbereiches,
%- was bei reellen Signalen zulässig ist.
%- Der Fensterfaktor (Fenster) macht die Normierung des
%- angewendeten Wichtungsfensters rückgängig.
%- Mit der Division durch sqrt(2.) werden RMS-Amplituden berechnet.
aps_lin_Pa_gesamt_re = (2.0 * Fenster * abs(b_gesamt_re) / Blockgroesse) /
sqrt(2.0);
aps_lin_Pa_gesamt_li = (2.0 * Fenster * abs(b_gesamt_li) / Blockgroesse) /
sqrt(2.0);
clear b_gesamt_re b_gesamt_li

%- Gesonderte Beachtung des Gleichanteils
%- Dies ist nur zu beachten, wenn die Frequenzspanne bei 0 Hz beginnt.
%- Der Gleichanteil kommt nur einmal vor, darf also nicht mit
%- dem Faktor 2. vervielfacht werden.
aps_lin_Pa_gesamt_re(1,1:n_re) = aps_lin_Pa_gesamt_re(1,1:n_re) ./ 2.0;
aps_lin_Pa_gesamt_li(1,1:n_li) = aps_lin_Pa_gesamt_li(1,1:n_li) ./ 2.0;

%- Mitteln des APS
%- Es liegt ein lineares APS vor, also muss quadratisch gemittelt
%- werden.
frequenzspektrum_Pa_unbewertet_re = sqrt(sum(aps_lin_Pa_gesamt_re.^2, 2)/n_re);
frequenzspektrum_Pa_unbewertet_li = sqrt(sum(aps_lin_Pa_gesamt_li.^2, 2)/n_li);
clear aps_lin_Pa_gesamt_re aps_lin_Pa_gesamt_li n_re n_li

%- Schalldruckpegel berechnen, in dB für den gesamten Bereich
frequenzspektrum_dB_unbewertet_re = 20. *
log10(frequenzspektrum_Pa_unbewertet_re ./ P_null);
frequenzspektrum_dB_unbewertet_li = 20. *
log10(frequenzspektrum_Pa_unbewertet_li ./ P_null);
clear frequenzspektrum_Pa_unbewertet_re frequenzspektrum_Pa_unbewertet_li

%-----Frequenzgangkorrektur C2-----

%Es wird die obere und untere Begrenzung für den Spline festgestellt. C2_x
%ist zeigt die Frequenzen zu den Korrekturwerten.
f_min_index_re = find((ceil(f_gesamt_re))==C2_x(1));

f_max_index_re = find((ceil(f_gesamt_re))==C2_x(length(C2_x)));

%es wird der ein Spline erzeugt mit dessen Hilfe das Schmallbandspektrum
%korrigiert wird.
c2_bereich_re = spline(C2_x, C2_pdiff, f_gesamt_re(f_min_index_re:f_max_index_re));

```

```

c2_re(1:f_min_index_re) = 0;

c2_re((f_max_index_re):length(f_gesamt_re))=0;

c2_re(f_min_index_re:f_max_index_re) = c2_bereich_re;

clear f_max_index_re f_min_index_re

frequenzspektrum_dB_c2bewertet_re = frequenzspektrum_dB_unbewertet_re + c2_re';
frequenzspektrum_dB_li = frequenzspektrum_dB_unbewertet_li;

clear c2_re c2_bereich_re frequenzspektrum_dB_unbewertet_re
frequenzspektrum_dB_unbewertet_li

%-----
%-----Ende Frequenzgangkorrektur C2-----
%-----

%-----
%-----Frequenzgangkorrektur C3,4-----
%-----

%hier werden anhand der Strömungsgeschwindigkeit und der Koeffizienten die
%Korrekturwerte für die Terzbänder nach Din XYZ
%c34_t wird noch für die Kontrolle der Richtigkeit des Splines benötigt
%(Addition auf unbewertetes Terzspektrum)
c34_t = C34_koeff(:,1) + C34_koeff(:,2)*str_geschw + C34_koeff(:,3)*str_geschw^2 +
C34_koeff(:,4)*str_geschw^3 + C34_koeff(:,5)*str_geschw^4 +
C34_koeff(:,6)*str_geschw^5 + C34_koeff(:,7)*str_geschw^6;

f_min_index_lre = find((ceil(f_gesamt_re))== C34_koeff_terz(1));

f_max_index_lre = find((ceil(f_gesamt_re))==
C34_koeff_terz(length(C34_koeff_terz)));

c34_aps_re = spline(C34_koeff_terz, c34_t,
f_gesamt_re(f_min_index_lre:f_max_index_lre));

c34_aps_re(1:f_min_index_lre) = c34_aps_re(1);

c34_aps_re((f_max_index_lre):length(f_gesamt_re)) = 0;

clear f_max_index_lre f_min_index_lre

frequenzspektrum_dB_c2c34_re = frequenzspektrum_dB_c2bewertet_re + c34_aps_re;

%für die Berechnung der Terzbänder Umrechnung auf Pa
frequenzspektrum_Pa_c2c34_re = 10.^(frequenzspektrum_dB_c2c34_re ./ 20) * P_null;
frequenzspektrum_Pa_li = 10.^(frequenzspektrum_dB_li ./ 20) * P_null;

clear c34_aps_re str_geschw frequenzspektrum_dB_c2bewertet_re

%-----
%-----Ende Frequenzgangkorrektur C3,4-----
%-----

```

```

%-----
%-----Terzbandberechnung und Darstellung-----
%-----

% - Wann wird ein Terzband berücksichtigt:
% - 1) In diesem Programm wird die Frequenzspanne fest vorgegeben, die
% -   darin enthaltenen Terzbänder müssen berücksichtigt werden. Wie
% -   viele Linien dann im untersten Terzband enthalten sind hängt von
% -   der Frequenzauflösung und damit von der Blockgröße ab.
% - 2) Das Terzband muss unter Berücksichtigung von delta_f komplett
% -   gefüllt sein.
% -   2a) Bezüglich f_1 heisst das, dass die Linie entweder auf f_1
% -       liegt oder max. um delta_f von f_1 entfernt ist.
% -   2b) Bezüglich f_2 gilt entsprechendes, wobei hier die Linie
% -       nicht auf f_2 liegen darf, denn dann wird sie dem
% -       nachfolgenden Terzband zugeschrieben.
% -   Die Entfernung um max. delta_f gilt in Richtung der jeweiligen
% -   Terzmittenfrequenz, was dadurch berücksichtigt ist, das pro
% -   Terzband Frequenzen herausgesucht werden, die im Intervall
% -   [f_u; f_o[ liegen,
% -   Zur Bestimmung der Pegel der Terzbänder müssen die Pegel der
% -   Frequenzen, die im jeweiligen Terzband liegen energetisch addiert
% -   werden.

%----- gekappt/korrigiert rechts -----

%- Für jedes einzelne Terzband werden die Linien addiert.
for i = 1 : length(F_m)
    %- Suche die Indizes der Frequenzen, die in das jeweilige Band
    %- hineinpassen.
    terz_i = find (f_gesamt_re >= F_1(i) & f_gesamt_re < F_2(i));

    %- Anzahl der Frequenzlinien im aktuellen Terzband
    terz_i_anz = length(terz_i);
    tabelle(i,1) = F_mnenn(i);
    tabelle(i,2) = F_m(i);
    tabelle(i,3) = F_1(i);
    tabelle(i,6) = F_2(i);
    %- Prüfen, ob das Band gefüllt ist
    if (f_gesamt_re(terz_i(1)) - F_1(i) <= delta_f) & (F_2(i) -
f_gesamt_re(terz_i(terz_i_anz)) <= delta_f)
        % f_1 enthält Informationen über die verwirklichten Terzbänder
        tabelle_inhalt = ['F_mnenn | F_m | F_1 | f_1_ist | index_f_1 | F_2 |
f_2_ist | index_f_2 | Anz.Linien | Lp_Terz_dB | Lp_Terz_dB(A)'];
        tabelle(i,4) = f_gesamt_re(terz_i(1));
        tabelle(i,5) = terz_i(1);
        tabelle(i,7) = f_gesamt_re(terz_i(terz_i_anz));
        tabelle(i,8) = terz_i(terz_i_anz);
        tabelle(i,9) = terz_i_anz;
        for k = 1 : terz_i_anz
            summe_terz = sum(frequenzspektrum_Pa_c2c34_re(terz_i(1) :
terz_i(terz_i_anz)).^2);
            korrigiert = summe_terz / Epsilon;
            wurzel      = sqrt(korrigiert);
            amp_terz_dB(i) = 20 * log10 (wurzel / P_null);
        end %- for-Schleife
        tabelle(i,10) = amp_terz_dB(i);
    else %- Band nicht gefüllt
        tabelle(i,4) = 0;
        tabelle(i,5) = 0;
        tabelle(i,7) = 0;
    end
end

```

```

        tabelle(i,8) = 0;
        tabelle(i,9) = 0;
        tabelle(i,10) = 0;
    end %- if-Anweisung
end %- for-Schleife

n1000_Terz_dB_kor_re    = amp_terz_dB';
%Erleichter die Umstellung auf mehr als eine Drehzahl, da man dann in den
%Grafikbeschriftungen nichts ändern muss
GP_terz                = 10*log10( sum( 10.^(amp_terz_dB(:)./10)));
n1000_GPT_dB_kor_re    = GP_terz;

%- Nehme alle f_1-Werte aus tabelle
f_stairs = tabelle(:,3);

%- Füge an die Liste der f_1-Werte den letzten f_2-Wert an
f_stairs((length(f_stairs))+1) = tabelle(length(tabelle),6);

%- Logarithmierte Frequenzlisten
log_f_stairs = log10(f_stairs);
log_f_mn     = log10(F_mn(Index_a : Index_e+1));

amp_terz_spek = tabelle(:,10);
amp_terz_spek((length(amp_terz_spek)+1)) = tabelle(length(tabelle),10);

%- Für jedes einzelne Terzband werden die Linien addiert.
for i = 1 : length(F_m)
    %- Suche die Indizes der Frequenzen, die in das jeweilige Band
    %- hineinpassen.
    terz_i_k = find (f_gesamt_re >= F_1(i) & f_gesamt_re < F_2(i));

    %- Anzahl der Frequenzlinien im aktuellen Terzband
    terz_i_anz_k = length(terz_i_k);
    tabelle_k(i,1) = F_mnenn(i);
    tabelle_k(i,2) = F_m(i);
    tabelle_k(i,3) = F_1(i);
    tabelle_k(i,6) = F_2(i);
    %- Prüfen, ob das Band gefüllt ist
    if (f_gesamt_re(terz_i_k(1)) - F_1(i) <= delta_f) & (F_2(i) -
f_gesamt_re(terz_i_k(terz_i_anz_k)) <= delta_f)
        % f_1 enthält Informationen über die verwirklichten Terzbänder
        tabelle_inhalt_k = ['F_mnenn | F_m | F_1 | f_1_ist | index_f_1 | F_2 |
f_2_ist | index_f_2 | Anz.Liniën | Lp_Terz_dB | Lp_Terz_dB(A)'];
        tabelle_k(i,4) = f_gesamt_re(terz_i_k(1));
        tabelle_k(i,5) = terz_i_k(1);
        tabelle_k(i,7) = f_gesamt_re(terz_i_k(terz_i_anz_k));
        tabelle_k(i,8) = terz_i_k(terz_i_anz_k);
        tabelle_k(i,9) = terz_i_anz_k;
        for k = 1 : terz_i_anz_k
            summe_terz_k = sum(frequenzspektrum_Pa_c2c34_re(terz_i_k(1) :
terz_i_k(terz_i_anz_k)).^2);
            korrigiert_k = summe_terz_k / Epsilon;
            wurzel_k     = sqrt(korrigiert_k);
            amp_terz_dB_k(i) = 20 * log10 (wurzel_k / P_null);
        end %- for-Schleife
        tabelle_k(i,10) = amp_terz_dB_k(i);
    else %- Band nicht gefüllt
        tabelle_k(i,4) = 0;
    end
end

```

```

        tabelle_k(i,5) = 0;
        tabelle_k(i,7) = 0;
        tabelle_k(i,8) = 0;
        tabelle_k(i,9) = 0;
        tabelle_k(i,10) = 0;
    end %- if-Anweisung
end %- for-Schleife

n1000_Terz_dB_kap_re    = amp_terz_dB_k';
%Erleichter die Umstellung auf mehr als eine Drehzahl, da man dann in den
%Grafikbeschriftungen nichts ändern muss
GP_terz_k              = 10*log10( sum( 10.^(amp_terz_dB_k(:)./10)));
n1000_GPT_dB_kap_re    = GP_terz_k;
n1000_Terzmitten_re    = tabelle_k(:,1);

%- Nehme alle f_1-Werte aus tabelle
f_stairs_k = tabelle_k(:,3);

% Füge an die Liste der f_1-Werte den letzten f_2-Wert an
f_stairs_k((length(f_stairs_k))+1) = tabelle_k(length(tabelle_k),6);

% Logarithmierte Frequenzlisten
log_f_stairs_k = log10(f_stairs_k);
log_f_mn_k     = log10(F_mn(Index_a : Index_e+1));

amp_terz_spek_k = tabelle_k(:,10);
amp_terz_spek_k((length(amp_terz_spek_k)+1)) = tabelle_k(length(tabelle_k),10);

fa_stuetz=[10 16 20 25 31.5 40 50 63 80 100 125 160 200 250 315 400 500 630 800
1000 1250 1600 2000 2500 3150 4000 5000 6300 8000 10000 12500 16000 20000];
%
%dba_stuetz=[-70.4 -56.7 -50.5 -44.7 -39.4 -34.6 -30.2 -26.2 -22.5 -19.1 -16.1 -
13.4 -10.9 -8.6 -6.6 -4.8 -3.2 -1.9 -0.8 0 0.6 1 1.2 1.3 1.2 1 0.5 -0.1 -1.1 -2.5
-4.3 -6.6 -9.3];
dba_stuetz=[-70.4 -56.7 -50.5 -44.7 -39.4 -34.6 -30.2 -26.2 -22.5 -19.1 -16.1 -13.4
-10.9 -8.6 -6.6 -4.8 -3.2 -1.9 -0.8 0 0.6 1 1.2 1.3 1.2 1 0.5 -0.1 -1.1 -2.5 -4.3
-6.6 -9.3];
Lp_A_spl=spline(fa_stuetz,dba_stuetz,f_gesamt_li);

Lp_A_spl=Lp_A_spl(1:9289);

% Terzspektrum plotten
datei_string = strcat(dateiname_wav);
kanal = 'rechts';
fenstertyp = 'Hanning';
terz_string = ['Terzmittenfrequenzen [', num2str(tabelle(1,1)), '; ',
num2str(tabelle(length(tabelle),1)), ']'];
figure(2);
set(gcf, 'PaperUnits', 'centimeters');
set(gcf, 'PaperType', 'A4');
set(gcf,'name', datei_string);
stairs(log_f_stairs,amp_terz_spek,'r');
hold on
amp_terz_spek_a=amp_terz_spek+dba_stuetz'
GP_terz_A= 10*log10( sum( 10.^(amp_terz_spek_a(:)./10)));
stairs(log_f_stairs,amp_terz_spek_a);
amp_terz_spek_a_excel=amp_terz_spek_a;

```

```

title(['Datei: ', datei_string, ' | TS | Kanal: ', kanal, ' | AVG = ',
num2str(mittelungsanzahl,3), ' | Lw: ', num2str(GP_terz, '%5.1f'), ' dB | Lw(A): ',
num2str(GP_terz_A, '%5.1f'), ' dB' ]);
legend('ISO5136 korrigierte Terzen', 'A-bewertet');
xlabel('f [Hz]');
ylabel('Lw [dB]');
set(gca, 'ylim', [20, 100]);
set(gca, 'xlim', [log_f_stairs(1), log10(tabelle(length(tabelle),6))]);
set(gca, 'xscale', 'linear');
set(gca, 'xtick', log_f_mn);
set(gca, 'xticklabel', Oktav_m);
set(gca, 'fontsize', 10);
set(gca, 'xgrid', 'on');
set(gca, 'ygrid', 'on');

[m n]=size(datei_string)
speichername=[datei_string(1:(n-4)) '_Terz_re']
print ('-dtiff', '-r300', speichername);

%savefile ('speichername', 'Lp_A_spl');
%save(speichername, 'frequenzspektrum_Pa_li','amp_terz_spek_a_excel');

%%print -dtiff -r300 Terz_re;
%close (datei_string)

%Löschen der nicht mehr benötigten Variablen
%clear terz_i terz_i_anz summe_terz korrigiert wurzel amp_terz_dB tabelle
datei_string kanal fenstertyp terz_string tabelle_inhalt amp_terz_spek log_f_stairs
%clear log_f_mn tabelle f_stairs GP_terz
%clear terz_i_k terz_i_anz_k summe_terz_k korrigiert_k wurzel_k amp_terz_dB_k
tabelle datei_string_k kanal fenstertyp_k terz_string_k tabelle_inhalt_k
amp_terz_spek_k log_f_stairs_k
%clear log_f_mn_k tabelle_k f_stairs_k GP_terz_k

%----- Ende gekappt/korrigiert rechts -----

%-----Tobias-----
    Anzahl_Datensaetze=Anzahl_Datensaetze+1
end % for-Schleife Z161
%-----Tobias Ende-----
%
%
% %----- gekappt/korrigiert links -----
% %- Für jedes einzelne Terzband werden die Linien addiert.
% for i = 1 : length(F_m)
%     %- Suche die Indizes der Frequenzen, die in das jeweilige Band
%     %- hineinpassen.
%     terz_i = find (f_gesamt_li >= F_1(i) & f_gesamt_li < F_2(i));
%
%     %- Anzahl der Frequenzlinien im aktuellen Terzband
%     terz_i_anz = length(terz_i);
%     tabelle(i,1) = F_mnenn(i);
%     tabelle(i,2) = F_m(i);
%     tabelle(i,3) = F_1(i);
%     tabelle(i,6) = F_2(i);
%     %- Prüfen, ob das Band gefüllt ist
%     if (f_gesamt_li(terz_i(1)) - F_1(i) <= delta_f) & (F_2(i) -
f_gesamt_li(terz_i(terz_i_anz)) <= delta_f)
%         % f_1 enthält Informationen über die verwirklichten Terzbänder

```

```

%         tabelle_inhalt = ['F_mnenn | F_m | F_1 | f_1_ist | index_f_1 | F_2 |
f_2_ist | index_f_2 | Anz.Linien | Lp_Terz_dB | Lp_Terz_dB(A)'];
%         tabelle(i,4) = f_gesamt_li(terz_i(1));
%         tabelle(i,5) = terz_i(1);
%         tabelle(i,7) = f_gesamt_li(terz_i(terz_i_anz));
%         tabelle(i,8) = terz_i(terz_i_anz);
%         tabelle(i,9) = terz_i_anz;
%         for k = 1 : terz_i_anz
%             summe_terz = sum(frequenzspektrum_Pa_li(terz_i(1) :
terz_i(terz_i_anz)).^2);
%             korrigiert = summe_terz / Epsilon;
%             wurzel      = sqrt(korrigiert);
%             amp_terz_dB(i) = 20 * log10 (wurzel / P_null);
%         end %- for-Schleife
%         tabelle(i,10) = amp_terz_dB(i);
%     else %- Band nicht gefüllt
%         tabelle(i,4) = 0;
%         tabelle(i,5) = 0;
%         tabelle(i,7) = 0;
%         tabelle(i,8) = 0;
%         tabelle(i,9) = 0;
%         tabelle(i,10) = 0;
%     end %- if-Anweisung
% end %- for-Schleife
%
% n1000_Terz_dB_kor_li      = amp_terz_dB';
% %Erleichter die Umstellung auf mehr als eine Drehzahl, da man dann in den
% %Grafikbeschriftungen nichts ändern muss
% GP_terz                  = 10*log10( sum( 10.^(amp_terz_dB(:)./10)));
% n1000_GPT_dB_kor_li      = GP_terz;
%
%
% %- Nehme alle f_1-Werte aus tabelle
% f_stairs = tabelle(:,3);
%
% %- Füge an die Liste der f_1-Werte den letzten f_2-Wert an
% f_stairs((length(f_stairs)+1) = tabelle(length(tabelle),6);
%
% %- Logarithmierte Frequenzlisten
% log_f_stairs = log10(f_stairs);
% log_f_mn      = log10(F_mn(Index_a : Index_e+1));
%
% amp_terz_spek = tabelle(:,10);
% amp_terz_spek((length(amp_terz_spek)+1)) = tabelle(length(tabelle),10);
%
%
%
% %- Für jedes einzelne Terzband werden die Linien addiert.
% for i = 1 : length(F_m)
%     %- Suche die Indizes der Frequenzen, die in das jeweilige Band
%     %- hineinpassen.
%     terz_i_k = find (f_gesamt_li >= F_1(i) & f_gesamt_li < F_2(i));
%
%     %- Anzahl der Frequenzlinien im aktuellen Terzband
%     terz_i_anz_k = length(terz_i_k);
%     tabelle_k(i,1) = F_mnenn(i);
%     tabelle_k(i,2) = F_m(i);
%     tabelle_k(i,3) = F_1(i);
%     tabelle_k(i,6) = F_2(i);
%     %- Prüfen, ob das Band gefüllt ist
%     if (f_gesamt_re(terz_i_k(1)) - F_1(i) <= delta_f) & (F_2(i) -
f_gesamt_li(terz_i_k(terz_i_anz_k)) <= delta_f)
%         % f_1 enthält Informationen über die verwirklichten Terzbänder

```

```

%         tabelle_inhalt_k = ['F_mnenn | F_m | F_1 | f_1_ist | index_f_1 | F_2 |
f_2_ist | index_f_2 | Anz.Linien | Lp_Terz_dB | Lp_Terz_dB(A)'];
%         tabelle_k(i,4) = f_gesamt_li(terz_i_k(1));
%         tabelle_k(i,5) = terz_i_k(1);
%         tabelle_k(i,7) = f_gesamt_li(terz_i_k(terz_i_anz_k));
%         tabelle_k(i,8) = terz_i_k(terz_i_anz_k);
%         tabelle_k(i,9) = terz_i_anz_k;
%         for k = 1 : terz_i_anz_k
%             summe_terz_k = sum(frequenzspektrum_Pa_li(terz_i_k(1) :
terz_i_k(terz_i_anz_k)).^2);
%             korrigiert_k = summe_terz_k / Epsilon;
%             wurzel_k      = sqrt(korrigiert_k);
%             amp_terz_dB_k(i) = 20 * log10 (wurzel_k / P_null);
%         end %- for-Schleife
%         tabelle_k(i,10) = amp_terz_dB_k(i);
%     else %- Band nicht gefüllt
%         tabelle_k(i,4) = 0;
%         tabelle_k(i,5) = 0;
%         tabelle_k(i,7) = 0;
%         tabelle_k(i,8) = 0;
%         tabelle_k(i,9) = 0;
%         tabelle_k(i,10) = 0;
%     end %- if-Anweisung
% end %- for-Schleife
%
% n1000_Terz_dB_kap_li      = amp_terz_dB_k';
% %Erleichter die Umstellung auf mehr als eine Drehzahl, da man dann in den
% %Grafikbeschriftungen nichts ändern muss
% GP_terz_k                = 10*log10( sum( 10.^(amp_terz_dB_k(:)./10)));
% n1000_GPT_dB_kap_li      = GP_terz_k;
% n1000_Terzmitten_li      = tabelle_k(:,1);
%
%
% %- Nehme alle f_1-Werte aus tabelle
% f_stairs_k = tabelle_k(:,3);
%
% %- Füge an die Liste der f_1-Werte den letzten f_2-Wert an
% f_stairs_k((length(f_stairs_k)+1) = tabelle_k(length(tabelle_k),6);
%
% %- Logarithmierte Frequenzlisten
% log_f_stairs_k = log10(f_stairs_k);
% log_f_mn_k      = log10(F_mn(Index_a : Index_e+1));
%
% amp_terz_spek_k = tabelle_k(:,10);
% amp_terz_spek_k((length(amp_terz_spek_k)+1)) = tabelle_k(length(tabelle_k),10);
% %- Terzspektrum plotten
% datei_string = strcat(dateiname_wav);
% kanal = 'links';
% fenstertyp = 'Hanning';
% terz_string = ['Terzmittenfrequenzen [', num2str(tabelle(1,1)), '; ',
num2str(tabelle(length(tabelle),1)), ']'];
% figure(2);
% set(gcf, 'PaperUnits', 'centimeters');
% set(gcf, 'PaperType', 'A4');
% set(gcf,'name', datei_string);
% stairs(log_f_stairs,amp_terz_spek,'r');
% amp_terz_spek_a=amp_terz_spek+dba_stuetz'
% GP_terz_A= 10*log10( sum( 10.^(amp_terz_spek_a(:)./10)));
% hold on
% stairs(log_f_stairs,amp_terz_spek_a);
% title(['Datei: ', datei_string, ' | TS | Kanal: ',kanal,' | AVG = ',
num2str(mittelungsanzahl,3), ' | Lp: ',num2str(GP_terz,'%5.1f'),' dB | Lp(A):
',num2str(GP_terz_A,'%5.1f'),' dB' ]);

```

```
% legend('ISO5136 korrigierte Terzen', 'A-bewertet');
% xlabel('f [Hz]');
% ylabel('Lp [dB]');
% set(gca, 'ylim', [10, 90]);
% set(gca, 'xlim', [log_f_stairs(1), log10(tabelle(length(tabelle),6))]);
% set(gca, 'xscale', 'linear');
% set(gca, 'xtick', log_f_mn);
% set(gca, 'xticklabel', Oktav_m);
% set(gca, 'fontsize', 10);
% set(gca, 'xgrid', 'on');
% set(gca, 'ygrid', 'on');
% %print -dtiff -r300 n1000_Terz_li;
% % [m n]=size(datei_string)
% %speichername=[datei_string(1:(n-4)) '_Terz_li']
% %print ('-dtiff', '-r300', speichername);
%
%
% %print -dtiff -r300 Terz_li;
% %close (datei_string)
%
%
% %Löschen der nicht mehr benötigten Variablen
% clear terz_i terz_i_anz summe_terz korrigiert wurzel amp_terz_dB tabelle
datei_string kanal fenstertyp terz_string tabelle_inhalt amp_terz_spek log_f_stairs
% clear log_f_mn tabelle f_stairs GP_terz
% clear terz_i_k terz_i_anz_k summe_terz_k korrigiert_k wurzel_k amp_terz_dB_k
tabelle datei_string_k kanal fenstertyp_k terz_string_k tabelle_inhalt_k
amp_terz_spek_k log_f_stairs_k
% clear log_f_mn_k tabelle_k f_stairs_k GP_terz_k
%
% %-----Ende gekappt/korrigiert links -----
%
%
% %-----
% %-----Ende Terzbandberechnung und Darstellung-----
% %-----
%
```