

*Versuchsauswertung Prozessmaschinen und Apparatechnik*  
MESSUNG DER KENNLINIE EINES GEBLÄSES

Florian Enzenberger (*2033971*)  
Marco Prähofer (*2068167*)  
Sebastian Werner (*2033878*)

Versuchsbetreuer: Dipl.-Ing. S. Blendinger

Versuch durchgeführt am 09.01.2006

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Versuchsaufbau</b>	<b>1</b>
1.1	Verwendete Messtechnik . . . . .	1
1.1.1	Einlaufmessdüse . . . . .	1
1.1.2	Druck am Ventilatoreinlauf . . . . .	1
1.1.3	Totaldruckerhöhung . . . . .	2
1.1.4	Drehmomentmessung . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Versuchsdaten</b>	<b>2</b>
2.1	Ermittlung des Kennlinienfeldes . . . . .	3
2.2	Druckverlauf längs des Strömungsweges . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Diskussion</b>	<b>7</b>
3.1	Kennlinienfeld . . . . .	7
3.2	Druckverlauf . . . . .	7
3.3	Fehlerquellen . . . . .	8
	<b>Anhang</b>	<b>I</b>
A	Abbildungsverzeichnis . . . . .	I
B	Tabellenverzeichnis . . . . .	I

## 1 Versuchsaufbau

Im Versuch "Messung der Kennlinie eines Gebläses" soll das Kennlinienfeld eines **Radialgebläses** vom Typ VRU-18-160-30H3 der Firma spellna (Wuppertal) ermittelt werden. Der Versuchstand besteht im Wesentlichen aus:

- Radialgebläse
- Drehstrom-Asynchronmotor
- Gehäuse
- Messeinrichtungen

### 1.1 Verwendete Messtechnik

Die Messeinrichtungen im Einzelnen sind:

- Drucksensor im kalibrierten Venturirohr zur Bestimmung des Einlaufvolumenstromes
- Drucksensor im Ventilatoreinlauf
- Differenzdrucksensor zur Bestimmung der Totaldruckerhöhung
- Drehmomentsensor an der Gebläsewelle
- Drehzahlgeber an der Gebläsewelle

#### 1.1.1 Einlaufmessdüse

Die Einlaufmessdüse arbeitet nach dem **Wirkdruckverfahren** und besteht aus einem Venturirohr, welches ein Drosselgerät darstellt. Es werden die Drücke an dessen Einlauf  $p_U$  (Umgebungsdruck) und Auslauf  $p_e$  gemessen. Der resultierende Wirkdruck ergibt sich zu

$$\Delta p_e = p_e - p_U \quad (1)$$

Im vorliegenden Fall wird  $\Delta p_e$  direkt als Relativdruck über den Referenzdruckaufnehmer P3MB R (Hottinger Baldwin Messtechnik, HBM) erhalten. Über dem vom Hersteller gegebenem Zusammenhang

$$\dot{V}_e = 0,01064 \cdot \sqrt{\frac{\Delta p'}{\rho_e}} \quad (2)$$

mit

$$\Delta p' = 4,336 \cdot \Delta p_e - 3,835 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta p_e^2 + 19,4 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta p_e^3 \quad (3)$$

lässt sich der Volumenstrom  $V_e$  ermitteln. Die Dichte der Luft am Einlass  $\rho_e$  wird dabei nach Gleichung (6) berechnet.

#### 1.1.2 Druck am Ventilatoreinlauf

Der Druck am Ventilatoreinlauf  $p_1$  wird über eine Ringleitung mit vier Einzelbohrungen ( $\varnothing 0,2 \text{ mm}$ ) mittels eines elektronischen Drucksensors erfasst. Dieser gibt, entgegen der Angabe in der Versuchsbeschreibung, den Druck als Relativdruck zum Atmosphärendruck aus. Beide letztgenannten Druckaufnehmer arbeiten nach dem piezoresistiven Meßprinzip in einem Messbereich bis 1 bar.

### 1.1.3 Totaldruckerhöhung

Die Totaldruckerhöhung vor und nach dem Gebläse wird über zwei PITOT-Rohre mit dazwischen geschaltetem Differenzdruckaufnehmer bestimmt. Die Verformung der Membran zwischen beiden Druckkammern wird von einem induktiven Messsystem in ein elektrisches Signal umgewandelt.

### 1.1.4 Drehmomentmessung

Die Drehmomentmesswelle T30 FN (HBM) arbeitet mit einem Nenndrehmoment von  $500 Nm$  und einer Nenndrehzahl von  $3000 min^{-1}$ . Sie besteht aus einem in den Übertragungsstrang integrierten Messkörper, der entsprechend dem Drehmoment auf Torsion belastet wird. Über einen Dehnungsmessstreifen wird die resultierende Verformung erfasst und daraus das Drehmoment berechnet.

Zusätzlich wird über einen Drehzahlgeber die Drehzahl erfasst.

Aus Drehmoment  $M_t$  und Drehzahl  $n$  wird die Wellenleistung

$$P_W = P_L = M_t \cdot \frac{n}{60} \quad (4)$$

die näherungsweise gleich der am Laufrad eingebrachten Leistung  $P_L$  ist, berechnet.

## 2 Versuchsdaten

Am Versuchsstand wurden folgende Messreihen ermittelt.

Versuch Nr.	Winkel °	kal. Einlauf $\Delta p_e$ [mbar]	Ansaugrohr $\Delta p_1$ [mbar]	Totaldruckerh. $\Delta p_t$ [mbar]	Drehmoment $M_t$ [Nm]	Drehzahl $n$ [ $min^{-1}$ ]
1	0	108	29	32	32,98	1483
2	10	105	28	32	32,72	1483
3	20	92	25	34	31,74	1483
4	30	72	19,5	39	29,48	1484
5	40	50	13	43	26,02	1485
10	45	43	11	44	24,67	1486
6	50	27	7	47	20,69	1487
7	60	14,5	3,5	48	17,04	1488
8	70	6,5	1,5	48	13,66	1490
9	80	1	0,4	47,5	10,33	1491

Tabelle 1: Aufgenommene Messwerte

Die Umgebungsparameter betragen

Temperatur	24	°C
Rel. Luftfeuchtigkeit	23	%
Luftdruck	1032	mbar
Dichte trockene Luft	1,1858	$kg/m^3$
Dichte feuchte Luft	1,1829	$kg/m^3$

Tabelle 2: Basisdaten

Die Dichte der trockenen Luft ergibt sich aus

$$\rho_{tr} = 1,29 \cdot \frac{273}{273 + T} \quad (5)$$

Die Dichte der feuchten Luft kann durch

$$\rho_f = \rho_{tr} \left( 1 - 0,377 \cdot \varphi \cdot \frac{p_d}{p} \right) \quad (6)$$

errechnet werden.

## 2.1 Ermittlung des Kennlinienfeldes

Zur Erstellung des Kennlinienfeldes müssen die gemessenen Daten wie folgt umgerechnet werden:

- Einlaufdruckdifferenz in  $mm$  Wassersäule

$$p_{mmWS} = 9.80665 \cdot p_{Pa} \quad (7)$$

- Umgerechneter Wirkdruck am Einlauf nach Gleichung (3)
- Volumenstrom am Einlass nach Gleichung (2)
- Wegen einem mittleren  $\frac{p_{t2}}{p_{t1}}$  von  $1,041 \leq 1,3$  gilt für die spezifische Förderarbeit

$$Y_{fa} = Y_t = k \cdot \frac{\Delta p_t}{\rho_e} \quad (8)$$

Da  $\frac{p_{t2}}{p_{t1}} \geq 1,03$  wird der Korrekturfaktor  $k$  mittels der Reihenentwicklung

$$k = 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{n} \cdot \frac{\Delta p}{p_1} + \frac{1}{6} \cdot \frac{1}{n} \cdot \left( 1 + \frac{1}{n} \right) \cdot \left( \frac{\Delta p}{p_1} \right)^2 \quad (9)$$

berechnet.

- Geförderter Massenstrom

$$\dot{m} = \rho_e \cdot \dot{V}_e \quad (10)$$

- Förderleistung des Gebläses mit freier Ausblasung

$$P_{fa} = \dot{m} \cdot Y_{fa} \quad (11)$$

- Wellenleistung des Gebläses (am Laufrad eingebrachte Leistung) errechnet sich nach Gleichung (4)
- Wirkungsgrad des freiblasenden Ventilators bezogen auf die Wellenleistung

$$\eta_{faW} = \frac{P_{fa}}{P_W} \quad (12)$$

Hierzu werden folgende Annahmen getroffen:

- Luft ist inkompressibel:  $\rho_1 = \rho_2$
- Wellenleitung  $P_w \approx$  Laufradleistung  $P_l$
- Ventilator bläst frei aus.

Die errechneten Werte sind in Tabelle 3 zusammengefasst, das resultierende Kennlinienfeld in Abbildung 1 wiedergegeben.

Nr.	$\Delta p_e$ [mmWS]	$p_1$ [Pa]	$\Delta p_t$ [Pa]	$\Delta p'$ [mmWS]	$V_e$ [m <sup>3</sup> /s]	$k$ [-]	$Y_{fa}$ [J/kg]	$\dot{m}$ [kg/s]	$P_{fa}$ [kW]	$P_w$ [kW]	$\eta_{faW}$ [-]
1	105,9	100300	3200	439,3	0,205	0,989	2675,0	0,243	0,65	0,82	0,80
2	103,0	100400	3200	427,0	0,202	0,989	2675,1	0,239	0,64	0,81	0,79
3	90,2	100700	3400	374,2	0,189	0,988	2840,4	0,224	0,64	0,78	0,81
4	70,6	101250	3900	293,9	0,168	0,987	3252,7	0,199	0,65	0,73	0,88
5	49,0	101900	4300	205,7	0,140	0,985	3581,8	0,166	0,59	0,64	0,92
10	42,2	102100	4400	177,5	0,130	0,985	3663,9	0,154	0,56	0,61	0,92
6	26,5	102500	4700	112,5	0,104	0,984	3910,0	0,123	0,48	0,51	0,94
7	14,2	102850	4800	60,9	0,076	0,984	3992,1	0,090	0,36	0,42	0,85
8	6,4	103050	4800	27,5	0,051	0,984	3992,2	0,061	0,24	0,34	0,71
9	1,0	103160	4750	4,2	0,020	0,984	3951,4	0,024	0,09	0,26	0,37

Tabelle 3: Ergebnisse der Messwertauswertung

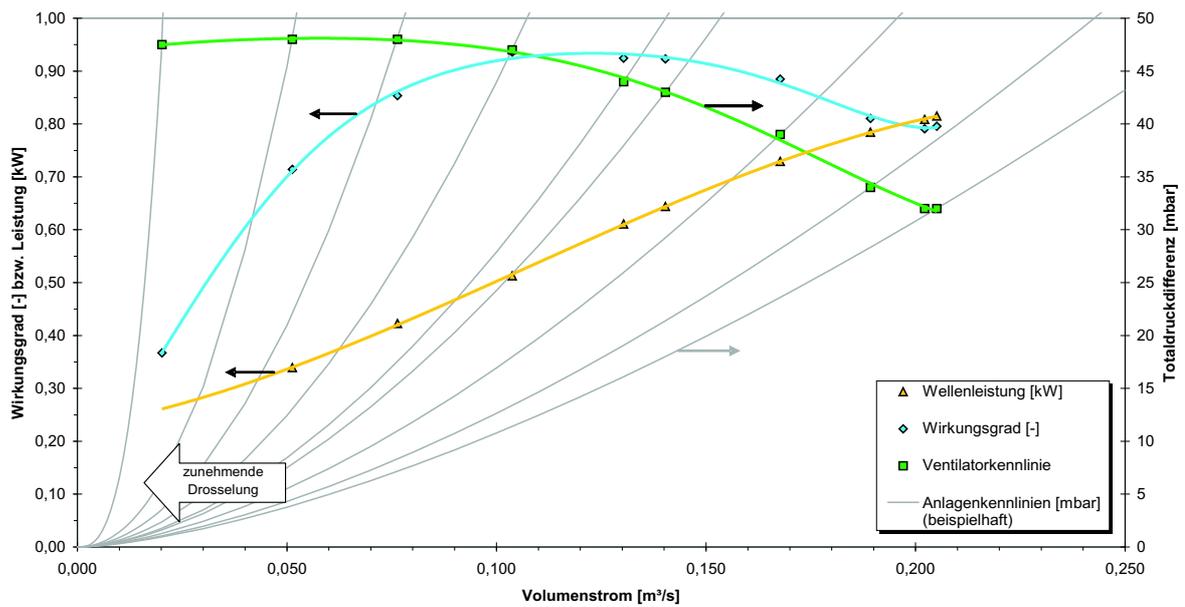


Abbildung 1: Kennlinienfeld des Gebläses

## 2.2 Druckverlauf längs des Strömungsweges

Der Totaldruck ist die Summe aus dynamischem und statischem Druck

$$p_{tot} = p_{dyn} + p_{stat} \tag{13}$$

Der dynamische Druck ist definiert als

$$p_{dyn} = \frac{\rho}{2} \cdot c^2 \tag{14}$$

Versuch Nr.	Einlauf	Einlaufmessdüse	Saugrohr	Druckrohr	Auslauf
Durchmesser [m]	$\infty$	0,083	0,16	0,16	$\infty$
Querschnittsfläche [m <sup>2</sup> ]	$\infty$	0,005	0,020	0,020	$\infty$
Strömungsgeschwindigkeiten [m/s]					
1	0	37,90	10,20	10,20	0
2	0	37,36	10,05	10,05	0
3	0	34,98	9,41	9,41	0
4	0	31,00	8,34	8,34	0
10	0	25,93	6,98	6,98	0
5	0	24,09	6,48	6,48	0
6	0	19,18	5,16	5,16	0
7	0	14,11	3,80	3,80	0
8	0	9,48	2,55	2,55	0
9	0	3,73	1,00	1,00	0
Totaldruck [Pa]					
1	103200	93249	100362	103562	103200
2	103200	93526	100460	103660	103200
3	103200	94724	100752	104152	103200
4	103200	96568	101291	105191	103200
10	103200	98598	101929	106229	103200
5	103200	99243	102125	106525	103200
6	103200	100717	102516	107216	103200
7	103200	101868	102859	107659	103200
8	103200	102603	103054	107854	103200
9	103200	103108	103161	107911	103200
statischer Druck [Pa]					
1	103200	92400	100300	103500	103200
2	103200	92700	100400	103600	103200
3	103200	94000	100700	104100	103200
4	103200	96000	101250	105150	103200
10	103200	98200	101900	106200	103200
5	103200	98900	102100	106500	103200
6	103200	100500	102500	107200	103200
7	103200	101750	102850	107650	103200
8	103200	102550	103050	107850	103200
9	103200	103100	103160	107910	103200
dynamischer Druck [Pa]					
1	0	849	62	62	0
2	0	826	60	60	0
3	0	724	52	52	0
4	0	568	41	41	0
10	0	398	29	29	0
5	0	343	25	25	0
6	0	217	16	16	0
7	0	118	9	9	0
8	0	53	4	4	0
9	0	8	1	1	0

Tabelle 4: Druckverlauf längs des Strömungsweges

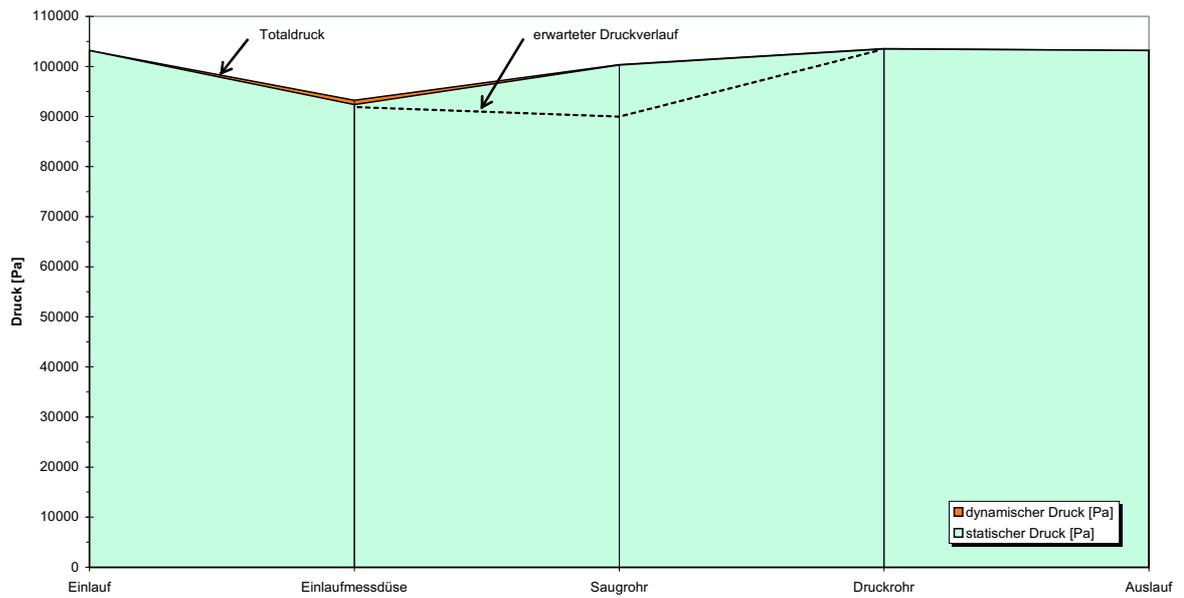


Abbildung 2: Druckverlauf längs des Strömungsweges bei voll geöffneten Drosselklappe

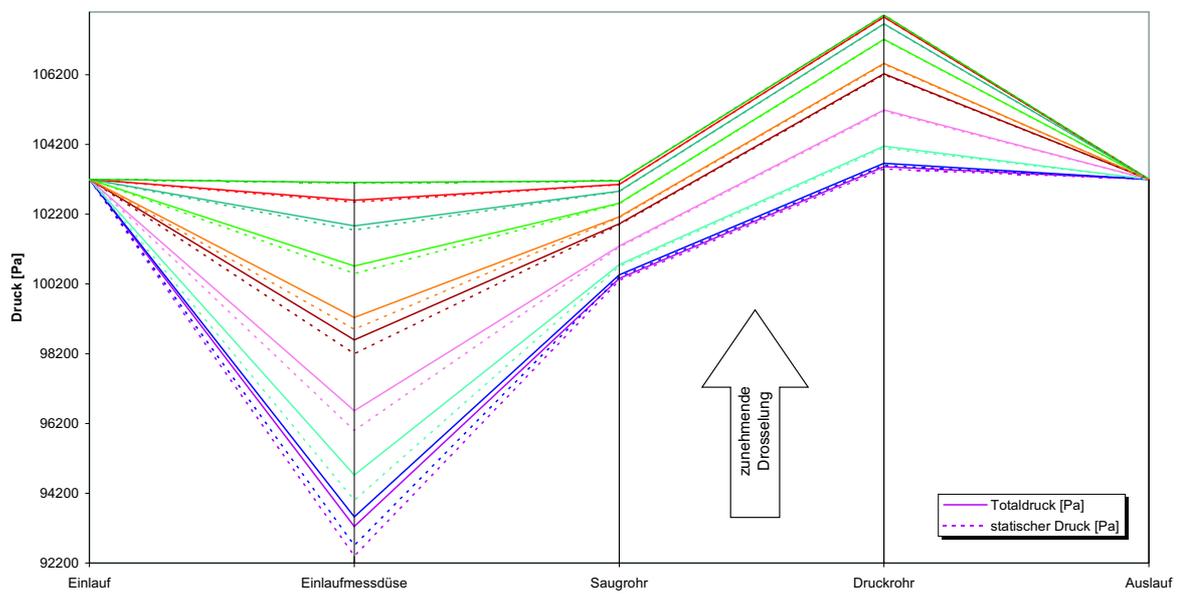


Abbildung 3: Druckverläufe über die Apparatur bei verschiedenen Drosselklappenstellungen

Die Geschwindigkeit im Strömungrohr lässt sich aus der Querschnittsfläche

$$A = \frac{d^2}{4} \cdot \pi \tag{15}$$

und dem Volumenstrom  $\dot{V}$  über die Kontinuitätsgleichung

$$c = \frac{\dot{V}}{A} \quad (16)$$

bestimmen.

Der Gesamtdruck im freien Raum vor dem Einlauf und nach dem Auslauf wird mittels Barometer gemessen. Der statische Druck in der Einlaufmessdüse und im Saugrohr wird über die Referenzdruckaufnehmer durch Vergleich mit dem Atmosphärendruck gemessen.

Über Gleichung (13) lässt sich der Totaldruck berechnen. Der Totaldruck im Druckrohr ergibt sich aus der Addition von Totaldruck im Saugrohr und gemessener Totaldruckerhöhung. Der statische Druck im Druckrohr ergibt sich via Subtraktion des dynamischen Druckes nach Gleichung (13).

In Tabelle 4 auf Seite 5 sind die ermittelten Daten zur Darstellung der Druckverläufe (vgl. Abb. 2 und 3 auf der vorherigen Seite) wiedergegeben.

## 3 Diskussion

### 3.1 Kennlinienfeld

Vergleicht man das im Versuch ermittelte Kennlinienfeld (Abb. 1) mit dem theoretischen, so kann man erkennen, dass die Verläufe der einzelnen Kennlinien ähnlich sind.

Betrachtet man die Ventilator Kennlinie, erkennt man, dass die Totaldruckerhöhung mit zunehmender Drosselung ansteigt. Der Wirkungsgrad weist im Bereich von  $0,125 \text{ m}^3/\text{s}$  sein Maximum auf. Die Wellenleistung steigt kontinuierlich an, was darauf hinweist, dass der maximale Leistungsbereich noch nicht erreicht ist. (Betrieb bei verminderter Leistung bedingt durch auf  $50 \text{ A}$  begrenzte Stromzufuhr.)

### 3.2 Druckverlauf

Im Bereich der Einlaufdüse erreicht der Gesamtdruck sein Minimum (vgl. Abbildung 2). Dies wird durch Reibungsverluste (Dissipation der Druckenergie in Wärme) in der Venturidüse verursacht. Abbildung 3 zeigt, dass diese mit zunehmender Drosselung und damit abnehmender Strömungsgeschwindigkeit geringer werden.

Gleichzeitig wird statischer Druck in dynamischen Druck umgewandelt, welcher zum Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit proportional ist. Im nachfolgendem Saugrohr wird durch Querschnittserweiterung dynamischer Druck in statischen Druck rücktransformiert.

Hierbei fällt auf, dass der Totaldruck entgegen der Erwartung wieder ansteigt (ca.  $100 \text{ mbar}$ ); Umkehrung der Strömungsrichtung wäre die Folge! Möglicherweise ist dies auf einen Messfehler, bedingt durch ungenügende Kalibrierung bzw. Zuverlässigkeit des Signalwandlers, zurückzuführen.

Im Ventilator ist eine Erhöhung des Totaldruckes bemerkbar, welche der durch den Ventilator eingebrachten Energie entspricht. Mit zunehmender Drosselung nimmt auch die Totaldruckerhöhung zu (vgl. Abbildung 3), so dass der Ausgangsdruck immer über Umgebungsdruck liegt. Es fällt auf, dass der dynamische Druck einen verschwindend geringen Anteil am Totaldruck einnimmt. Dies wird plausibel, wenn man sich die um den Faktor 1000 geringere Dichte des Betriebsfluides Luft im Vergleich zu Flüssigkeiten vor Augen führt.

### 3.3 Fehlerquellen

Als mögliche Fehlerquellen kommen in Betracht:

- Unzuverlässige Kalibrierung des Signalwandlers.
- Ablese- und Messungenauigkeiten aufgrund z.T. stark schwankender Messwerte.
- Die getroffenen Annahmen bei den Berechnungen stimmen nicht hundertprozentig mit der Realität überein (Luft ist inkompressibel, konstante Temperatur über die gesamte Messstrecke). So weist eine mit steigendem Drosseloeffekt zunehmende Temperaturerhöhung am Auslass auf dissipierte Energie hin, was auf Kompression hinweist.
- Möglicherweise unvollständige Kanalisierung der Strömung durch die Gleichrichter beeinträchtigt Messgenauigkeit.

## Anhang

### A Abbildungsverzeichnis

1	Kennlinienfeld des Gebläses . . . . .	4
2	Druckverlauf längs des Strömungsweges bei voll geöffneter Drosselklappe . . . . .	6
3	Druckverläufe über die Apparatur bei verschiedenen Drosselklappenstellungen . . . . .	6

### B Tabellenverzeichnis

1	Aufgenommene Messwerte . . . . .	2
2	Basisdaten . . . . .	2
3	Ergebnisse der Messwertauswertung . . . . .	4
4	Druckverlauf längs des Strömungsweges . . . . .	5