



Werner Luckinger, BSc BSc

Verfahren zur Messung der Abgasgeschwindigkeit eines Verbrennungsmotors

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Telematik

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernd Eichberger

Institut für Elektronische Sensorsysteme

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen haben.

Speziell möchte ich mich bei meinem Betreuer Herrn Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernd Eichberger bedanken, welcher mir durch seine gute Unterstützung und Diskussionen mein Interesse und meine Motivation gestärkt hat. Weiters möchte ich mich bei Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Graber bedanken, der mir die Besonderheiten der Akustik in Rohren verständlich machte.

Ein großer Dank gilt meinem Arbeitgeber, der Fa. AMIUM, die mich tatkräftig mit Hardware unterstützt hat. Ein besonderer Dank gilt dem Geschäftsführer Herrn Dipl.-Ing. Andreas Schwentner, für die Möglichkeit der Projektdurchführung sowie die guten Diskussionen zu diesem Thema.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, die mir bei meinem Studium eine gute Stütze waren.

Schließlich danke ich meinen Kollegen und Freunden während der Studienzeit für die schönen Studienjahre.

Zusammenfassung

Um den geforderten Anforderungen der Automobilen Abgasgesetzgebung zu entsprechen, ist es nötig im realen Fahrbetrieb die ausgestoßene Abgasmenge zu bestimmen. Zu diesem Zweck muss neben der Messung der Emissionen auch die aktuelle Strömungsgeschwindigkeit bzw. der aktuelle Massenstrom des Abgases bestimmt werden.

Im Zuge dieser Arbeit werden Methoden und Prinzipien zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit bzw. einer zur Geschwindigkeit proportionalen Größe untersucht und auf deren Anwendung im automobilen Bereich evaluiert.

Da Verbrennungsmotoren einen pulsierenden Durchfluss erzeugen, wird der Lösungsansatz verfolgt, aus der Laufzeit der Pulsationen die Strömungsgeschwindigkeit zu bestimmen.

In einem zweiten Versuchsaufbau wird die pulsierende Strömungsgeschwindigkeit mit einer Staudrucksonde erfasst. Ein eigens projektiertes und gefertigtes Messsystem misst den Staudruck mit vier Differenzdrucksensoren. Aus den erfassten Messwerten wird die mittlere Abgasgeschwindigkeit durch einen dafür spezifisch entwickelten Algorithmus berechnet.

Abstract

The Emission Regulation of the European Union requires to carry out tests for Real Driving Emissions (RDE) of cars. In these tests the exhaust concentration and also the exhaust velocity or exhaust mass flow must be measured.

This work will demonstrate methods and principles for detecting the exhaust velocity or a value which is in relation to the velocity. The selected methods are evaluated for the use in an automotive area.

In an experiment, based on the fact that a combustion engine generates a pulsating exhaust flow, the transit time of the pulses were used to calculate the exhaust velocity.

A second experiment was set up, using the dynamic pressure principle. Based on the developed sensor interface the dynamic pressure of the annubar primary element was measured with four differential pressure transducers. The mean velocity of the exhaust gas is calculated by a specifically developed algorithm.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	III
Zusammenfassung	IV
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis	IX
Nomenklatur	X
1 Einleitung und Projektumfeld	1
2 Projektanforderungen	1
3 Grundlagen	2
3.1 Bernoulli- und Kontinuitätsgleichung	2
3.2 Druckbezeichnungen	3
3.2.1 statischer Druck	4
3.2.2 Gesamtdruck	4
3.2.3 Staudruck bzw. dynamischer Druck	5
3.3 Thermische Zustandsgleichung	5
3.4 Schallgeschwindigkeit und Machzahl	6
3.5 Dichte	6
3.6 Gebereffekt	7
3.7 Volumen- und Massenstrom	7
3.8 Weitere Einflussfaktoren	8
4 Messprinzipien	8
4.1 Durchfluss	8
4.1.1 Gebereffekt	8
4.1.2 mechanische Durchflussmesser	9
4.1.3 elektronische Durchflussmesser	13
4.1.4 Differenzdruckdurchflussmesser	15
4.1.5 Massendurchflussmesser	18
4.1.6 Andere Durchflussmessverfahren	22
4.2 Druck	26
4.2.1 Gebereffekt	26
4.2.2 kapazitive Druckmessung	27
4.2.3 resisitive und piezoresistive Druckmessung	27
4.2.4 induktive Druckmessung	28
4.2.5 piezoelektrische Druckmessung	29
4.2.6 Druckmessung mittels Resonanzfrequenzmessung	29
4.2.7 Druckmessung mittels Schwingquarzen	29
4.2.8 weitere Druckmessverfahren	30
5 Messung mittels Laufzeit von Pulsationen	31
5.1 Hardware	31

5.1.1	mechanischer Aufbau	32
5.2	Elektronik	32
5.2.1	Erfassung der Messgrößen	33
5.2.2	Sensorschnittstelle	34
5.2.3	Signalerfassung	35
5.3	Software	35
5.3.1	Signalverarbeitung	36
5.4	Ergebnisse / Versuchsauswertungen	37
5.5	Diskussion	40
6	Messung mittels Differenzdruck	44
6.1	Hardware	44
6.1.1	mechanischer Aufbau	45
6.2	Elektronik	48
6.2.1	Erfassung der Messgrößen	48
6.2.2	Signalaufbereitung	51
6.2.3	Leiterplattendesign	57
6.3	Software	60
6.3.1	Software für Embedded Controller	60
6.4	Software für Datenerfassung am PC	63
6.4.1	Signalverarbeitung / Postprocessing	63
6.5	Ergebnisse / Versuchsauswertungen	68
6.6	Diskussion	76
7	Schlussfolgerung	79
	Literatur	80
	Verwendete Tools	84
	Anhang	84
A.1	Rauschspannungsberechnung Instrumentenverstärker	85
A.2	Übersicht über OBD-II-Telegramme	89
A.3	Schaltplan Schnittstellen-Platine	91
A.4	Schaltplan Sensorplatine	93

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	Grafik zur Herleitung der Bernoulli Gleichung.	2
Abb. 3.2	Gesamtdruckmessung mit Pitot Rohr.	4
Abb. 3.3	Aufbau einer Prandtl-Sonde.	5
Abb. 3.4	Relative Dichteänderung von Luft in Abhängigkeit von der Machzahl.	7
Abb. 4.5	Prinzip der Durchflussmessung mit Messflügeln.	9
Abb. 4.6	Einbaulage der Flügelradeintauchsonde und Abhängigkeit vom Anströmwinkel.	10
Abb. 4.7	Wirbelbildung durch einen in der Strömung befindlichen Körper.	11
Abb. 4.8	Schwebekörper-Durchflussmesser.	12
Abb. 4.9	Federscheiben-Durchflussmesser.	12
Abb. 4.10	Aufbau zur Durchflussmessung mit zwei Sendern (S) und zwei Empfängern (E).	14
Abb. 4.11	Formen von Drosseleinsätzen in Rohren.	16
Abb. 4.12	Strömungs- und Druckverlauf an einem Drosselgerät mit Kreisblende.	16
Abb. 4.13	Klassisches Venturirohr.	16
Abb. 4.14	Venturidüse als Staudruckverstärker.	17
Abb. 4.15	Venturirohr als Staudruckmultiplikator.	17
Abb. 4.16	Staudruck in Abhängigkeit vom Anströmwinkel.	17
Abb. 4.17	Aufbau einer Mehrlochsonde.	18
Abb. 4.18	Ausführungsvarianten von Hitzdrahtsensoren.	19
Abb. 4.19	Ausführungsvarianten von Heißfilmsensoren.	19
Abb. 4.20	Prinzip Coriolis-Massenstrommesser.	21
Abb. 4.21	Messung des Phasenunterschiedes.	21
Abb. 4.22	Messprinzip eines induktiven Durchflussmessers.	23
Abb. 4.23	Prinzip der Stauscheibenmessung.	24
Abb. 4.24	prinzipieller Aufbau zum Korrelationsverfahren.	25
Abb. 5.25	Geschwindigkeitsmessung mittels Laufzeit - schematischer Aufbau und erwarteter Signalverlauf.	31
Abb. 5.26	Konstruktionszeichnung Messrohr.	32
Abb. 5.27	schematische Übersicht der Signalkette.	33
Abb. 5.28	Instrumentenverstärker.	35
Abb. 5.29	Funktionelle Übersicht über den Berechnungsalgorithmus.	36
Abb. 5.30	Rohmesswerte und gefilterte Messwerte der Drucksensoren p_1 und p_2	37
Abb. 5.31	Messung am Kunststoffrohr mit einer Länge von 0,75 m bei 900 U/min.	38
Abb. 5.32	Messung am Kunststoffrohr mit einer Länge von 1,42 m bei 900 U/min.	39
Abb. 5.33	Vergleich zwischen Papierrohr (links) und Plastikrohr (rechts) bei 900 U/min.	40
Abb. 5.34	Ortskurve für den Reflexionsfaktor an der Mediumsgrenze.	42
Abb. 5.35	Einfluss von Radius r auf das Verhältnis $2 \cdot \pi \cdot \frac{r}{\lambda}$ bei unterschiedlichen λ -Werten.	43
Abb. 6.36	Foto der verwendeten Mehrlochsonde.	44
Abb. 6.37	Foto der Truckflow-Staudrucksonde.	45
Abb. 6.38	Anforderungen und Positionierung der Sensoren am Messrohr.	46
Abb. 6.39	Zusammenhang zwischen Abgasmenge, Abgasgeschwindigkeit und Differenzdruck.	47
Abb. 6.40	Messrohr mit Halterung und Messbox.	48
Abb. 6.41	elektrische und pneumatische Kreuzkoppelung am Drucksensor.	49

Abb. 6.42 Funktionsgruppen zur Berechnung des Massendurchflusses mit dem TFI4.	51
Abb. 6.43 Instrumentenverstärker.	54
Abb. 6.44 Einfluss der einzelnen Faktoren und Komponenten auf die Rauschspannung am Ausgang des INA.	55
Abb. 6.45 Signalkette im diskreten Aufbau.	56
Abb. 6.46 Frontseite der Schnittstellen-Platine.	59
Abb. 6.47 Rückseite der Schnittstellen-Platine.	59
Abb. 6.48 Frontseite der Sensorplatine.	59
Abb. 6.49 Rückseite der Sensorplatine.	59
Abb. 6.50 Übersicht der Systeme und Kommunikation.	60
Abb. 6.51 Zustandsdiagramm.	62
Abb. 6.52 Gaslaufplan Druckmessung.	62
Abb. 6.53 Innenansicht und Verbindungen der Messbox.	63
Abb. 6.54 Zusammenhang zwischen dem Differenzdruck einer Staudrucksonde und dem square root error	64
Abb. 6.55 Verhalten bei mehrfacher Anwendung eines rechteckigen Filterkerns.	65
Abb. 6.56 Übersicht der Fehler am Eingang des ADCs.	68
Abb. 6.57 Einfluss der Betriebsarten und Versorgungsspannung auf Mittelwert und Standardabweichung.	69
Abb. 6.58 Vergleich der Drucksensoren bei Signaländerung.	70
Abb. 6.59 Gemessener Differenzdruck mit der Truckflow-Staudrucksonde.	71
Abb. 6.60 Gemessener Differenzdruck mit der SKI-Staudrucksonde.	71
Abb. 6.61 Auswirkung von Vibrationen auf die Drucksensoren.	72
Abb. 6.62 Signal und Frequenzspektrum unter Einfluss von Vibrationen.	73
Abb. 6.63 Verlauf der Messwerte bei 880 U/min.	74
Abb. 6.64 Verlauf der Messwerte bei 2500 U/min.	74
Abb. 6.65 Verlauf der Messwerte bei Beschleunigung von 0 auf 40 km/h.	75
Abb. 6.66 Verlauf der Messwerte bei Beschleunigung von 110 auf 130 km/h.	76
Abb. A.1 Instrumentenverstärker.	85
Abb. A.2 CAN-Telegramme für Anfrage und Antwort Luftmasse.	89
Abb. A.3 CAN-Telegramme für Anfrage und Antwort Geschwindigkeit.	89
Abb. A.4 CAN-Telegramme für Anfrage und Antwort Drehzahl.	90
Abb. A.5 CAN-Telegramme für Anfrage und Antwort Außentemperatur.	90

Nomenklatur

Konstanten

Symbol	Wert	Einheit	Beschreibung
g	9,81	m/s^2	Erdanziehung
R	8,314	$J/(mol \cdot K)$	allg. Gaskonstante
κ	1,4	-	Adiabatexponent für Luft
k_b	$1,3806504e^{-23}$	J/K	Boltzmann-Konstante

Allgemeine Formelzeichen

Symbol	Einheit	Definition	Beschreibung
E	J		Energie
m	kg		Masse
\dot{m}	kg/s		Massenstrom
v	m/s		(Strömungs-)Geschwindigkeit
h	m		Höhe
ρ	kg/m^3		Dichte
p	Pa	$p = F/A$	Druck
p_d	Pa		Stau- bzw. dynam. Druck (Pitot Rohr)
p_{ges}	Pa		Gesamtdruck (Pitot Rohr)
p_{stat}	Pa		statischer Druck (Pitot Rohr)
A	m^2		Querschnittsfläche
V	m^3		Volumen
\dot{V}	m^3/s		Volumenstrom
T	K od. $^{\circ}C$		Temperatur
n	mol		Stoffmenge
M	kg/mol		molare Masse
R_s	$J/(mol \cdot K)$	$R_s = R/M$	spezifische Gaskonstante
c	m/s		Schallgeschwindigkeit
Ma	-	$Ma = v/c$	Machzahl
a	m/s^2		Beschleunigung
F	N	$F = m \cdot a$	Kraft
d od. D	m		Abstand od. Durchmesser
ϵ	As/Vm		Dielektrizitätskonstante
α	$^{\circ}$ od. rad		(Anstell-)Winkel
\vec{u}	m/s		Umfangsgeschwindigkeit
r	m		(mittlerer) Radius
f	Hz		Frequenz
S	-		Strouhal-Zahl
t	s		Zeit
L od. l	m		Länge
K	-		Faktor
N	-		Anzahl
R_r	U/min		(Motor-)Drehzahl
ω	rad/s		Winkelgeschwindigkeit

Symbol	Einheit	Definition	Beschreibung
U	V		Spannung
I	A		Strom
R	Ω		Widerstand
λ	m		Wellenlänge
SNR	dB		Signal-Rausch-Verhältnis
C	F od. As/V		Kapazität

1 Einleitung und Projektumfeld

Der Gesetzgeber fordert eine Messung der Abgaskonzentration von Nutz- und Personenkraftwagen im realen Fahrbetrieb, zusätzlich zum Prüfstandsbetrieb und jeglichen genormten Testzyklen. Hierbei ist nicht nur die aktuelle Schadstoffkonzentration des Abgases zu bestimmen sondern auch die ausgestoßene Abgasmasse. Im Zuge dieses Projektes sollen Möglichkeiten für ein unabhängiges System zur Bestimmung der Abgasgeschwindigkeit im realen Fahrbetrieb untersucht werden. Mit den vorhandenen Abgaskonzentrationen vom Analysegerät und der erfassten Abgasgeschwindigkeit lässt sich die Abgasmasse zu jedem Messpunkt bestimmen.

2 Projektanforderungen

Im Zuge dieser Arbeit soll untersucht werden, welche Methoden und Prinzipien zur Bestimmung der Abgasgeschwindigkeit bzw. einer zur Geschwindigkeit proportionalen Größe bestehen. Zudem soll deren Anwendung im automobilen Umfeld evaluiert werden. Hierbei ist vor allem zu beachten, dass der Verbrennungsmotor durch zyklisches Ausstoßen von Abgas periodische Schwankungen im Abgasstrom verursacht.

Da ein eventuell in Frage kommendes Messkonzept im realen Straßenverkehr zum Einsatz kommt, muss das Messsystem für die entsprechenden Umweltbedingungen wie erhöhte Temperatur, Staub und Wasser gerüstet sein. Von Seiten der Gesetzgebung sind einige Kriterien zu erfüllen, die unter anderem die Messgenauigkeit und den Messaufbau regeln. Da ein solches Messsystem, oftmals auch als Exhaust Flow Meter (EFM) bezeichnet, als Zusatzmessgerät zum Portable Emissions Measurement Systems (PEMS) am Auto montiert wird, ist eine kompakte und leichte Bauform nötig.

Um den Motorbetrieb so wenig wie möglich durch das Messsystem zu belasten, ist es nötig den Strömungswiderstand bzw. den Differenzdruck der Messvorrichtung sehr gering zu halten. Dennoch ist eine hohe Genauigkeit im unteren Messbereich gefordert, um Messungen im Leerlauf bzw. bei geringer Geschwindigkeit zu ermöglichen.

Aus diesem Grund soll ein aus Hard- und Software bestehendes Messsystem realisiert werden, dass es ermöglicht die Strömungsgeschwindigkeit des Abgases mit guter Genauigkeit zu erfassen und für Versuche im Straßenverkehr geeignet ist.

3 Grundlagen

In diesem Kapitel werden einige physikalische Grundlagen und Definitionen erläutert, welche für dieses Projekt einen wichtigen Zusammenhang darstellen.

3.1 Bernoulli- und Kontinuitätsgleichung

Es wird die Herleitung der Bernoulligleichung für inkompressibel Fluide¹ mit den allgemein gültigen Energieerhaltungssatz beschrieben. Mit der Bernoulligleichung ist es möglich den Druckverlauf entlang einer Stromlinie, welche in Abbildung 3.1 als strichpunktier-te Linie ausgeführt ist, zu beschreiben. Gas wird im generellen bis zu einer Geschwindigkeit von ca. 100 m/s als inkompressibel angesehen. Flüssigkeiten sind mehr oder weniger immer inkompressibel - eine Ausnahme stellt hier der Druckstoß in Rohren, der sogenannte „water hammer“, dar.

Abbildung 3.1 zeigt eine eindimensionalen Behandlung des Strömungsverlaufes bei unterschiedlichen Rohrquerschnitten.

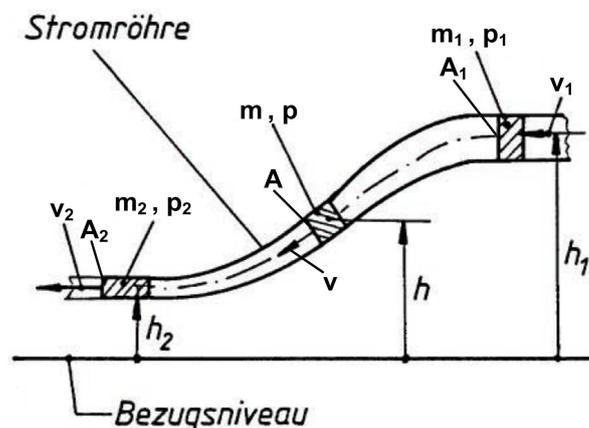


Abbildung 3.1: Grafik zur Herleitung der Bernoulli Gleichung - modifiziert nach [3].

Die Gesamtenergie E_{ges} für ein Masseteilchen im Fluid setzt sich aus der kinetischen Energie

$$E_{kin} = \frac{m \cdot v^2}{2},$$

der potentiellen Energie

$$E_{pot} = m \cdot g \cdot h$$

und der Druckenergie²

$$E_p = \frac{m}{\rho} \cdot p$$

zusammen.

¹Die Strömungslehre bezeichnet flüssige als auch gasförmige Medien als Fluide.

²Bemerkung aus [3]: Druckenergie ist nur im Fall eines Strömungsvorgangs vorhanden und hat somit keinen Speichercharakter. Hingegen haben kinetische und potentielle Energie Speichercharakter, daher wäre die Bezeichnung Druckarbeit passender. In der Literatur und in der Technik kommt oftmals Druckenergie als Bezeichnung vor und wurde aus diesem Grund auch so belassen.

Der Energieerhaltungssatz besagt, dass Energie nie verloren geht, sondern nur in eine andere (Energie-)Form umgewandelt wird. Aus diesem Grund gilt, dass bei Eintritt bzw. Austritt eines Fluids die gleiche Gesamtenergie vorhanden sein muss, also konstant bleibt. Somit gilt:

$$E_{ges} = E_{kin} + E_{pot} + E_p = \frac{m \cdot v^2}{2} + m \cdot g \cdot h + \frac{m}{\rho} \cdot p = const. \quad (1)$$

Multipliziert man Gleichung (1) mit dem Ausdruck ρ/m so ergibt sich die Bernoulligleichung

$$\frac{\rho \cdot v^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h + p = const. \quad (2)$$

welche auch als Druckgleichung bekannt ist. Die Gleichung gilt für strömende, inkompressible und ideale Fluide.

Unter Anwendung von (2) ergibt sich für die Abbildung 3.1 folgende Gleichung:

$$\frac{\rho_1 \cdot v_1^2}{2} + \rho_1 \cdot g \cdot h_1 + p_1 = \frac{\rho_2 \cdot v_2^2}{2} + \rho_2 \cdot g \cdot h_2 + p_2. \quad (3)$$

Durch die Inkompressibilität des Fluids gilt $\rho_1 = \rho_2 = \rho$. Weiters wird beim Durchlauf eines Fluids durch die Strömungsröhre keine Masse gespeichert oder vernichtet. Die Masse bleibt erhalten und es lässt sich dadurch die Kontinuitätsgleichung

$$\rho_1 \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot v_2 \cdot A_2 = \dot{m} = const. \quad (4)$$

aufstellen.

Durch einsetzen in (3) ergibt sich

$$\frac{\rho \cdot v_1^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_1 + p_1 = \frac{\rho \cdot v_2^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_2 + p_2. \quad (5)$$

Befinden sich h_1 und h_2 auf der gleichen Höhe, vereinfacht sich (5) zu

$$\frac{\rho \cdot v_1^2}{2} + p_1 = \frac{\rho \cdot v_2^2}{2} + p_2. \quad (6)$$

Diese Form der Bernoulligleichung ist für die weitere Betrachtung sehr nützlich.

3.2 Druckbezeichnungen

Bei strömenden Fluiden werden oftmals die Begriffe Staudruck, dynamischer Druck, statischer Druck und Gesamtdruck verwendet. In diesem Abschnitt wird näher auf die einzelnen Begriffe eingegangen. Abbildung 3.2 soll hier beim generellen Verständnis helfen.

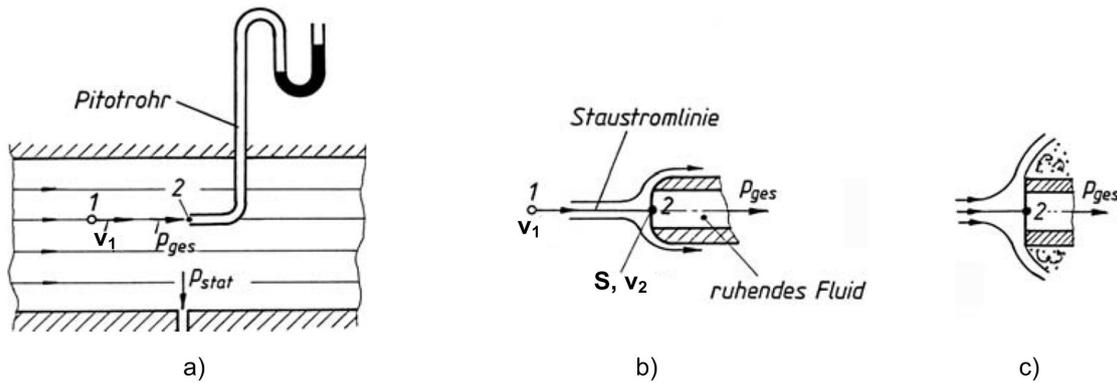


Abbildung 3.2: Gesamtdruckmessung mit Pitot Rohr - modifiziert nach [3].

3.2.1 statischer Druck

Auf ein mittfließendes Teilchen im Fluid wirkt der statische Druck. Dies ist jener Druck, der von allen Seiten auf das Teilchen wirkt. Er kann durch ein Manometer normal zur Strömungsrichtung gemessen werden. Die Druckentnahme soll so wenig wie möglich die Strömung stören. Oftmals wird der statische Druck p_{stat} direkt an der Rohrwand gemessen - Abbildung 3.2 a) unten.

3.2.2 Gesamtdruck

Wird ein Objekt zur Druckmessung mit der Drucköffnung entgegen der Strömungsrichtung in das Fluid gehalten, so bildet sich an der Öffnung der sogenannte Gesamtdruck aus. Der Gesamtdruck ist immer größer als der statische Druck. Da auf der anderen Seite der Druckentnahme ein Messgerät angeschlossen ist, bildet sich vor der Druckentnahmestelle ein Staupunkt - in Abbildung 3.2 Punkt S bzw. Punkt 2. Vor diesem Punkt verzweigen die Stromlinien. Die Strömungsgeschwindigkeit nimmt den Wert $v_2 = 0 \text{ m/s}$ an.

Der Gesamtdruck p_{ges} lässt sich durch diese Erkenntnis mit Gleichung (6) berechnen. Hierzu definieren wir einen Punkt 1, welcher sich stromaufwärts vom Staupunkt befindet. Am Punkt 1 liegt keine Beeinflussung durch den Staukörper vor. An diesem Punkt ist die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids unbeeinflusst.

Somit gilt mit $v_2 = 0 \text{ m/s}$ und das $p_2 = p_{ges}$ entspricht

$$\underbrace{p_2}_{p_{ges}} = \underbrace{\frac{\rho \cdot v_1^2}{2}}_{p_d} + \underbrace{p_1}_{p_{stat}}. \quad (7)$$

Dabei entspricht p_1 jenem Druck, wenn die Messsonde nicht vorhanden wäre - also p_{stat} . Der Gesamtdruck setzt sich aus dem statischen Druck und einem dynamischen Druck p_d , welcher von der Geschwindigkeit und der Dichte abhängt, zusammen. Der dynamische Druck wird auch als Staudruck bezeichnet.

Durch Messen von Gesamtdruck und statischen Druck lässt sich somit der dynamische Druck

$$p_d = p_{ges} - p_{stat} = \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} = \Delta p \quad (8)$$

berechnen und unter Kenntnis der Dichte die Geschwindigkeit

$$v_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad (9)$$

ermitteln.

3.2.3 Staudruck bzw. dynamischer Druck

Der Staudruck kann nicht nur rechnerisch bestimmt, sondern auch direkt mit einer Prandtl-Sonde gemessen werden. Die Prandtl-Sonde ist so konstruiert, dass der Gesamtdruck und der statische Druck erfasst werden. Die Druckdifferenz zwischen den beiden Anschlüssen entspricht dem dynamischen Druck, welcher mit einem Differenzdrucksensor erfasst wird. Abbildung 3.3 zeigt den schematischen Aufbau einer Prandtl-Sonde.

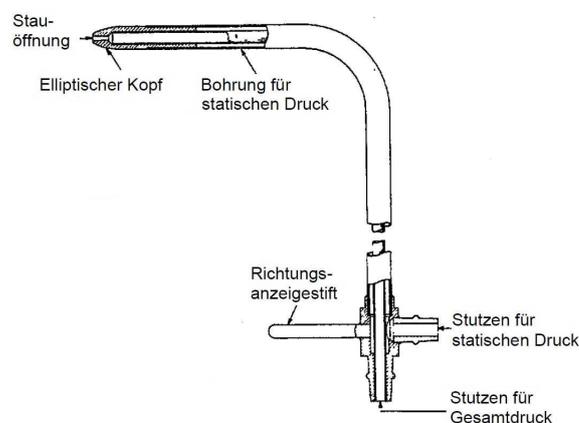


Abbildung 3.3: Aufbau einer Prandtl-Sonde - modifiziert nach [15].

3.3 Thermische Zustandsgleichung

Mit der thermischen Zustandsgleichung

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (10)$$

wird die Beziehung von Druck, Volumen, Temperatur, Stoffmenge und der allgemeinen Gaskonstante bei idealen Gasen³ hergestellt.

Wird statt der Stoffmenge die Masse verwendet so lautet die Gleichung

$$p \cdot V = m \cdot R_s \cdot T, \quad (11)$$

wobei nun die spezifische Gaskonstante R_s zu berücksichtigen ist.

Die molare Masse für Luft setzt sich aus 21% Sauerstoff (O_2), 78% Stickstoff (N_2) und 1% Argon (Ar) zusammen und beträgt

$$M = 0,21 \cdot 32 \text{ g/mol} + 0,78 \cdot 28 \text{ g/mol} + 0,01 \cdot 40 \text{ g/mol} = 28,96 \text{ g/mol}.$$

³Für ideale Gase wird angenommen [2]: Die Gasteilchen haben zwar eine Masse, aber kein Volumen; zwischen den Teilchen herrschen keine (Wechselwirkungs-)Kräfte; Stöße zwischen den Teilchen bzw. Wänden werden als vollkommen elastische Stöße betrachtet.

Somit ergibt sich eine spezifische Gaskonstante

$$R_s = \frac{R}{M} = \frac{8,314 \frac{J}{mol \cdot K}}{28,96 \frac{g}{mol}} = 0,287 \frac{J}{g \cdot K} = 287 \frac{J}{kg \cdot K} \text{ für Luft.}$$

In der Literatur wird für Verbrennungsabgas oftmals die spezifische Gaskonstante von Luft verwendet. In [36] finden sich Tabellen, die diese Annahme für ein Verbrennungsluftverhältnis größer gleich 1 bestätigen.

Mit (11) kann unter Kenntnis des Druckes und der Gastemperatur die Masse des (Ab-)Gases berechnet werden

$$m = \frac{p \cdot V}{R_s \cdot T} = \rho \cdot V.$$

3.4 Schallgeschwindigkeit und Machzahl

Die Fortpflanzung von Schallwellen bei idealen Gasen, unter der Annahme einer konstanten Wärmekapazität, hängt von der Temperatur ab und kann durch [3]

$$c = \sqrt{\kappa \cdot R_s \cdot T} = \sqrt{\kappa \cdot \frac{p}{\rho}} \quad (12)$$

berechnet werden.

Das Verhältnis der aktuellen Strömungsgeschwindigkeit eines Fluids zur Schallgeschwindigkeit wird auch als Machzahl Ma bezeichnet. Die Machzahl wird bei der Betrachtung von inkompressiblen Fluiden benötigt.

3.5 Dichte

Die Dichte eines Gases wird von Druck und Temperatur beeinflusst. Dieser Zusammenhang lässt sich mit der thermischen Zustandsgleichung ausdrücken:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{p}{R_s \cdot T}. \quad (13)$$

Kompressible Fluide werden bis zu einer Machzahl von ca. 0,3 [29], in [44] wird 0,25 angegeben, generell als inkompressibel betrachtet. Bei höheren Geschwindigkeiten muss ein Einfluss auf die Dichte berücksichtigt werden. Dies ist vor allem bei der Messung der Strömungsgeschwindigkeit mittels Wirkdruckprinzip, wie z.B. bei der Staudrucksonde zu beachten.

Die relative Änderung der Dichte

$$\frac{\Delta \rho}{\rho_0} = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}$$

in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit in Mach ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Als Bezugsdichte wird ρ_0 bei Strömungsstillstand mit $Ma = 0$ verwendet.

Dass die Dichteänderung durch den Adiabatenexponent und die Machzahl beeinflusst wird, zeigt die Gleichung [44]

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = 1 - \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot Ma^2\right)^{\frac{-1}{\kappa-1}}. \quad (14)$$

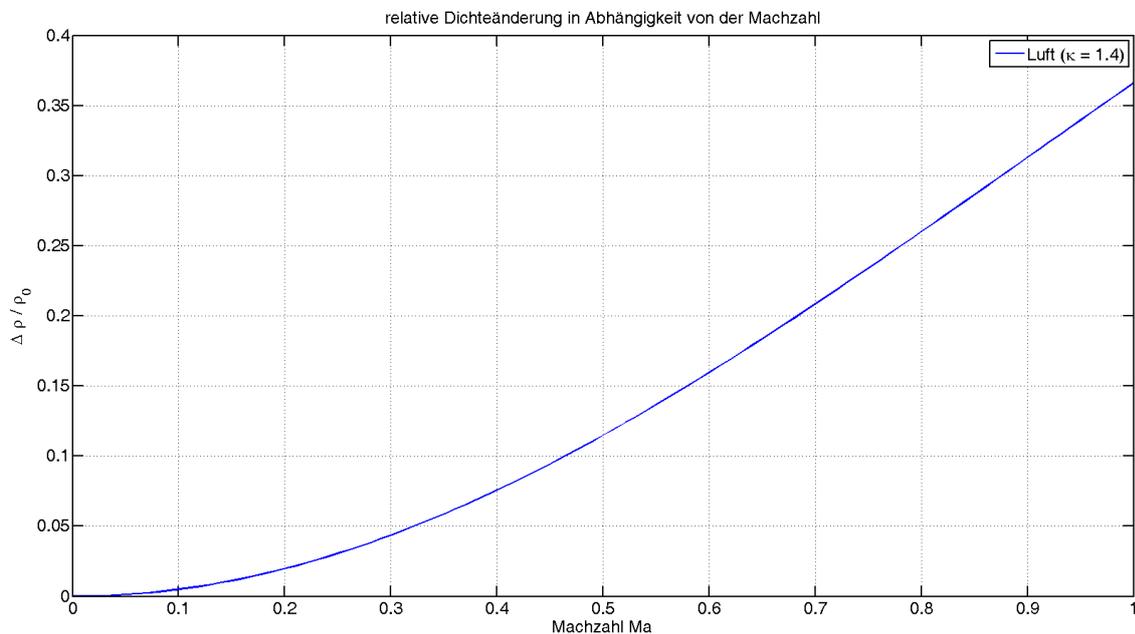


Abbildung 3.4: Relative Dichteänderung von Luft in Abhängigkeit von der Machzahl.

Aus der Grafik ist ersichtlich, dass durch die Annahme, Gase bis zur Machzahl von 0,3 als inkompressible zu betrachten, ein Fehler von bis zu 5% akzeptiert wird.

3.6 Gebereffekt

Um eine nicht elektrische Größe in eine elektrische Größe umzuwandeln, werden physikalische Effekte ausgenutzt, welche als Gebereffekt bezeichnet werden.

3.7 Volumen- und Massenstrom

Bei der Durchflussmessung wird zwischen Volumenstrommessung und Massenstrommessung unterschieden. Hierbei existieren Messmethoden die direkt den Massenstrom messen und solche, die den Volumenstrom messen und durch zusätzliche Messungen von Druck und Temperatur den Massenstrom berechnen.

Bei der direkten Massenstrommessung zur Bestimmung der Durchflussrate wird ein Gebereffekt ausgenutzt, der die Masse des Stoffes direkt miteinbezieht.

Bei der Volumenstrommessung wird hingegen die Strömungsgeschwindigkeit über unterschiedliche Methoden erfasst und unter Kenntnis der Querschnittsfläche mit $\dot{V} = v \cdot A$ berechnet.

Ist die spezifische Gaskonstante bekannt und wird zudem bei der Bestimmung des Volumenstroms der Druck und die Temperatur gemessen, so kann daraus die Dichte (13) berechnet werden und in weiterer Folge der Massendurchfluss

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V} = \frac{p}{R_s \cdot T} \cdot \dot{V}.$$

Bei Gasen ist es sehr wichtig den Einfluss von Temperatur und Druck auf die Dichte und damit auf die Masse zu beachten.

3.8 Weitere Einflussfaktoren

Bei der Messung von Durchfluss oder einer daraus abgeleiteten Größe müssen immer auch die Randbedingungen der Messung bzw. des Messaufbaus beachtet werden, da viele Faktoren die Messung beeinflussen.

Die wichtigsten Faktoren für dieses Projekt sind eine gerade Ein- und Auslaufstrecke, je länger desto besser, die Art der Rohrführung und die dadurch bedingte Drallbildung im Fluid und ob eine laminare oder turbulente Strömung vorliegt. Details zur laminaren und turbulenten Strömung sind in [44], [29] und [3] angeführt.

Da es vorab meist schwierig ist, alle Faktoren / Einflüsse genau zu bestimmen, wird bei einer Vergleichsmessung mit einem Referenzsystem ein Kalibrierfaktor bestimmt und auf die Messwerte angewandt.

Die oben genannten Punkte werden wissenschaftlich mit der Strömungslehre behandelt.

4 Messprinzipien

In diesem Kapitel erfolgt ein Überblick über Messtechniken zur Bestimmung der Durchflussrate von Massen oder Volumen von Fluiden. Folgend werden einige Verfahren / Prinzipien zur Messung einer Durchflussgröße wie Masse, Volumen oder Geschwindigkeit erläutert und auf die Vor- sowie Nachteile eingegangen. Die Messverfahren werden in mechanische Durchflussmesser, elektronische Durchflussmesser, Differenzdruckdurchflussmesser, Massendurchflussmesser und andere Durchflussmesser aufgeteilt.

4.1 Durchfluss

Es folgt ein Überblick über mögliche Messprinzipien zur Bestimmung des Durchflusses sowie in Frage kommende Sensoren.

4.1.1 Gebereffekt

Es gibt viele physikalische Effekte, die ein Maß für den Durchfluss darstellen. Hierzu zählen unter anderem thermische, akustische, magnetische, optische und druckabhängige Gebereffekte. Je nach Messumgebung und Aufgabenstellung ist abzuwägen welcher Gebereffekt die optimale Wahl darstellt und ob der Massenstrom oder der Volumenstrom gemessen werden soll.

4.1.2 mechanische Durchflussmesser

Durchflussmessung mit Messflügeln

Mit Hilfe eines Flügelrades kann der Durchfluss von flüssigen und gasförmigen Medien in einer Rohrleitung erfasst werden. Das Flügelrad besitzt einen Anstellwinkel, welcher fix oder variabel ausgeführt ist. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit auf die Empfindlichkeit / Sensibilität der Durchflussmessung Einfluss zu nehmen. Abbildung 4.5 zeigt das prinzipielle Verfahren für die Durchflussmessung mittels Flügelrad.

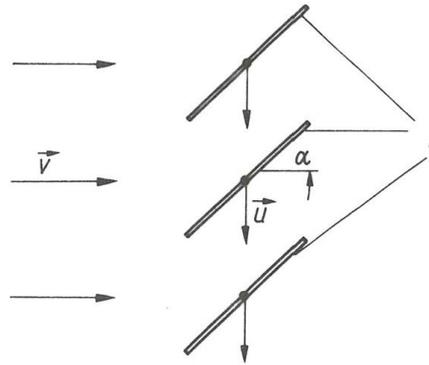


Abbildung 4.5: Prinzip der Durchflussmessung mit Messflügeln [12]

1 - Flügelblätter, α - Anstellwinkel,
 \vec{u} - Umfangsgeschwindigkeit des Flügelrades,
 \vec{v} - Strömungsgeschwindigkeit.

Die Messgröße ist die Drehzahl n des Flügelrades, welche proportional dem Volumenstrom $\dot{V} = (2 \cdot \pi \cdot r \cdot A \cdot \cot(\alpha)) \cdot n$ [12] ist.

Die Formel zeigt einen linearen Zusammenhang zwischen Drehzahl und Volumenstrom. In Wirklichkeit besteht auch eine Abhängigkeit von Viskosität, Dichte und Geschwindigkeit des Mediums. Dies wird in einer sogenannten Gerätekonstanten $K = n/\dot{V}$ berücksichtigt und durch eine volumetrische Kalibrierung ermittelt. Die Impulsrate dN/dt des Umlauf-sensors ist proportional zum Volumenstrom.

Vorteile [12] :

- großer Temperaturbereich (-200 bis +350°C)
- zuverlässige Mengen- und Volumenstrommessung für niederviskose Fluide
- Genauigkeiten von $\pm 0,2\%$ bis $\pm 0,3\%$ erreichbar
- lageunempfindlich
- gutes dynamisches Verhalten
- hoher Betriebsdruck möglich - bis zu 600 bar

Nachteile [12]:

- Einfluss von pulsierendem Volumendurchfluss ist nicht genau untersucht.
- Viskosität muss bekannt sein
- Beruhigungsstrecken im Ein- und Auslauf erforderlich
- Überlastgefährdung
- nicht für faserhaltige oder erosive Fluide geeignet.

Eintauchsonden

Neben der Möglichkeit mit dem Flügelrad den gesamten Rohrquerschnitt zu erfassen, gibt es auch Eintauchsonden, welche axial angeströmt werden und eine punktuelle Messung im Rohr ermöglichen.

Die Kalibrierung auf den Volumenstrom erfolgt in Abhängigkeit von Einbaulage und Rohrdurchmesser. Abbildung 4.6 zeigt die Einbaulage eines Eintauchflügelrades sowie die Abhängigkeit des Anströmwinkels α auf das Turbinerad und den Einfluss auf die gemessene Geschwindigkeit v_α bei vorgegebener Anströmgeschwindigkeit v_0 . Der Anströmwinkel wird zwischen Hauptfluss und Turbinenradachse gebildet.

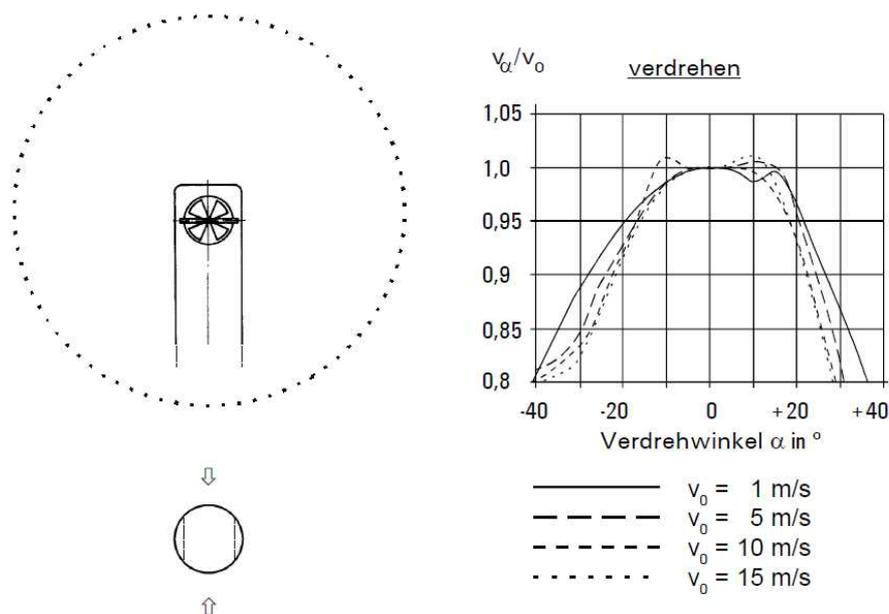


Abbildung 4.6: Einbaulage der Flügelradeintauchsonde und Abhängigkeit vom Anströmwinkel [17]
links: Anströmrichtung; rechts: Abhängigkeit von der Einbaulage v_0 Anströmgeschwindigkeit; v_α gemessene Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Anströmwinkel.

Angaben zur Messunsicherheit / Reproduzierbarkeit bei einer Gasdichte von $1,2 \text{ kg/m}^3$ bzw. bei Wasser - Auszug Datenblatt [17]:

- Messunsicherheit $< (1,5 \% \text{ v. Messwert} + 0,5 \% \text{ v. Endwert})$
- Reproduzierbarkeit $\pm (0,05 \% \text{ v. Endwert} + 0,02 \text{ m/s})$

Die Abtastung der Flügelraddrehzahl erfolgt berührungslos durch induktive Näherungssensoren. Für die Richtungserkennung wird ein zweiter Induktionsabgriff verwendet.

Die mittlere Flussgeschwindigkeit $v_m = PF \cdot v_\alpha$ wird mithilfe eines Profilkoeffizienten PF von der gemessenen Geschwindigkeit v_α berechnet.

Flügelradsensoren benötigen im generellen eine gerade Ein- und Auslaufstrecke sowie eine drallfreie Strömung für eine exakte Messung. Die Länge der Einlaufstrecke hängt von der vorgelagerten Rohrgeometrie, also ob 90° -Bögen, Reduktionen, Erweiterungen oder T-Stücke vorhanden sind, ab und beträgt mindestens den 15-fachen Innendurchmesser des Messrohres. Die Auslaufstrecke sollte zumindest mehr als das 5-fache des Innendurchmessers lang sein. Mit einem Strömungsgleichrichter lässt sich die Einlaufstreckenlänge auf

den 8-fachen Innendurchmesser reduzieren. Diese Angaben stellen Empfehlungen aus [17] dar.

Wirbel-Durchflussmesser / Vortex-Durchflussmesser

Bei der Umströmung eines Hindernisses / Staukörpers bilden sich hinter diesem Objekt Wirbel aus, die sich periodisch und gegenseitig ablösen. Das entstehende Wirbelfeld wird auch als Karmansche Wirbelstraße [44] bezeichnet. Abbildung 4.7 zeigt eine Karmansche Wirbelstraße.

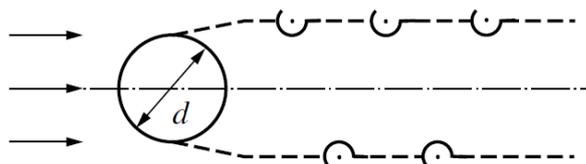


Abbildung 4.7: Wirbelbildung durch einen in der Strömung befindlichen Körper [21].

Die Ablösefrequenz der Wirbel ist der Durchflussgeschwindigkeit proportional und wird mittels der Strouhal-Zahl $S = \frac{f \cdot d}{v}$ beschrieben.

Für die Detektion der Wirbelfrequenz können verschiedene Messprinzipien angewandt werden.

Durch die Wirbelbildung kommt es zu Änderungen der Strömungsgeschwindigkeiten an den Seiten des Prallelements bzw. in der Wirbelstraße.

Diese Änderungen können mittels eines anemometrischen Verfahrens, mit Ultraschall aber auch durch eine Druckmessung detektiert werden. Andere Verfahren werten die Kräfte an der Anströmseite des Staukörpers bzw. die Druckdifferenz an den Staukörperseitenflächen aus. Eine weitere Methode besteht darin, einen schwingungsfähigen Steg am Staukörper mittels Dehnungsmessstreifen auszuwerten. Hierbei sollte die Grenztemperatur des Mediums nicht über die zulässige Grenztemperatur des Klebstoffes für den Dehnungsmessstreifen steigen.

Bei all den genannten Verfahren wird nur eine Änderung der Messgröße ausgewertet. Es werden keine großen Anforderungen an Genauigkeit und Linearität gestellt. Die Impulsfolge des Messsignals entspricht einer Frequenz welche wiederum proportional der Durchflussgeschwindigkeit ist und sich leicht mit einem Zähler messen lässt.

Die *Fa. Höntzsch*⁴ bietet Vortex-Durchflusssensoren [18] als Eintauchsonden an. Diese Sonden verwenden Ultraschall zur Detektion der Wirbelfrequenz. Laut Hersteller sind die Sonden für gleichförmige Strömungsgeschwindigkeiten bestimmt. Bei pulsierenden Strömungen bzw. bei Pendelströmungen kann es bei Frequenzen größer 5 Hz und einer Amplitude von mehr als 0,3 m/s zu einer Beeinflussung des Messwertes kommen [18].

Vorteile aus [12]:

- robust, geringe Empfindlichkeit gegen Verschleiß, Korrosion und Ablagerungen
- linearer Zusammenhang zwischen Wirbelfrequenz und Volumenstrom, unabhängig von Temperatur, Druck, Viskosität und Aggregatzustand des Messstoffes
- kleine Messfehler $\pm 0,5\%$ vom Messwert
- beliebige Einbaulage

⁴www.hoentzsch.com

Nachteile aus [12]:

- Einbau eines Staukörpers in die Rohrleitung, was zu einem Druckverlust führt
- für hohe Reynolds-Zahl $Re > 10000$
- relativ kleine Wirbelfrequenzen begrenzen das Messen von Durchflussschwankungen

Schwebekörper

Beim Schwebekörper-Durchflussmesser wird ein Schwebekörper, entgegen seiner Gewichtskraft, in einem konischen Gefäß durch die vom Fluidstrom ausgeübte Kraft nach oben bewegt. Die Höhe des Schwebekörpers ist proportional dem Volumenstrom und kann durch ablesen oder durch ein angekoppeltes Messsystem, welches z.B. magnetisch-induktiv oder optoelektronisch ausgeführt ist, festgestellt werden. Abbildung 4.8 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Schwebekörper-Durchflussmessers. Das Messsystem muss für den ordnungsgemäßen Betrieb in senkrechter Lage sein.

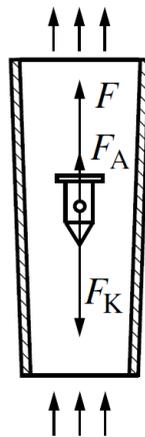


Abbildung 4.8: Schwebekörper-Durchflussmesser [21].

Mit dem Federscheiben-Durchflussmesser wird eine lageunabhängige Durchflussmessung ermöglicht. Hierbei stellt eine Feder mit einem Widerstandskörper die Gewichtskraft des Schwebekörpers nach. Durch die Ausdehnung der Feder und der bekannten Federkonstante lässt sich die Geschwindigkeit des Fluidstromes und somit der Volumenstrom messen.

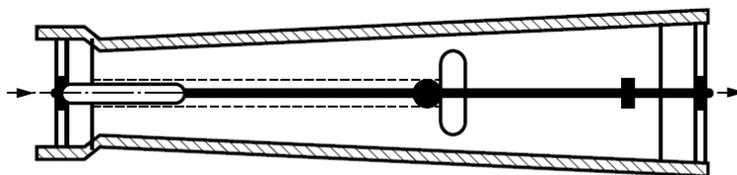


Abbildung 4.9: Federscheiben-Durchflussmesser [21].

Vorteile [12]:

- einfacher Aufbau
- preisgünstig
- überlastsicher

-
- für aggressive Fluide geeignet
 - meist keine geraden Ein- und Auslaufstrecken erforderlich
 - federbelastete Durchflusssysteme sind lageunabhängig

Nachteile [12]:

- Abhängigkeit von Dichte, Temperatur und Viskosität des Fluids - Umrechnung von Eichwert auf aktuellen Wert
- Durchflusskennzahlen sind bauformspezifisch und nicht ohne weiteres übertragbar
- begrenzte Genauigkeit $\pm 2\%$
- teilweise niedrige Grenzwerte für die Viskosität des Fluids
- federfreie Schwebekörper-Durchflussmesser sind lageabhängig

4.1.3 elektronische Durchflussmesser

Akustische Strömungsmessung - Ultraschall

Die akustische Strömungsmessung nutzt den Effekt, dass sich Schallwellen in einem Fluid ausbreiten. Hierbei wird mittels geeigneten Sender / Empfänger, basierend auf CUT⁵ bzw. Piezoeffekt, die Schallfrequenz in das Fluid eingekoppelt. Die Auflösung der Messung erhöht sich durch das Erhöhen der Schallfrequenz. Aus diesem Grund werden die Messsysteme im Ultraschallbereich⁶ betrieben. Bei diesem Messverfahren wird die Frequenzänderung, Laufzeitdifferenz, Phasenverschiebung oder die örtliche Drift der Schallwellen im Fluid als Messgröße verwendet, um daraus den Volumenstrom zu berechnen.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwellen in einem Fluid hängt davon ab, ob sie in oder gegen die Flussrichtung des Fluids eingekoppelt werden. So ergeben sich folgende Ausbreitungsgeschwindigkeiten:

$$\begin{aligned} c + v & \text{ in Strömungsrichtung} \\ c - v & \text{ gegen die Strömungsrichtung} \end{aligned} \tag{15}$$

Dieser Effekt wird als Mitführungseffekt bezeichnet.

Abbildung 4.10 zeigt den prinzipiellen Aufbau zur Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit anhand des Mitführungseffektes, bei zeitgleicher Ermittlung der Laufzeiten mit und gegen die Flussrichtung.

⁵Capacitance Ultrasonic Transducer [33]

⁶Akustische Wellen mit Frequenzen oberhalb von 20 kHz werden als Ultraschall bezeichnet. Akustische Wellen größer 1 MHz werden als Hyperschall bezeichnet.

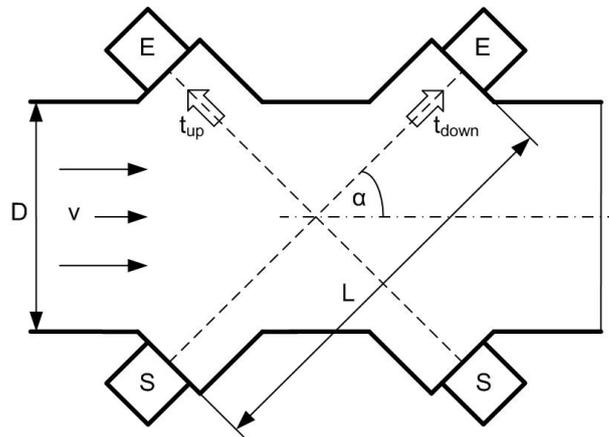


Abbildung 4.10: Aufbau zur Durchflussmessung mit zwei Sendern (S) und zwei Empfängern (E) D - Rohrdurchmesser, α - Winkel, v - Strömungsgeschwindigkeit des Fluids.

Unter Beachtung des Winkels α zur Strömungsrichtung und der Messstrecke $L = D/\sin\alpha$, ergeben sich folgende Signallaufzeiten:

in die Strömungsrichtung

$$t_{down} = \frac{L}{c + v \cdot \cos\alpha}$$

gegen die Strömungsrichtung

$$t_{up} = \frac{L}{c - v \cdot \cos\alpha}$$

Durch Umformen ergibt sich die Gleichung für die Strömungsgeschwindigkeit

$$v = \frac{L}{2 \cdot \cos\alpha} \cdot \left(\frac{1}{t_{down}} - \frac{1}{t_{up}} \right),$$

welche unabhängig von der Schallgeschwindigkeit ist und somit der Einfluss von Dichte, Temperatur und Druck eliminiert wurde.

Eine weitere Methode besteht darin, den Dopplereffekt auszunützen. Wenn sich Sender und Empfänger aufeinander zu (+) oder voneinander weg (-) bewegen, entsteht eine Frequenzänderung, die Doppler-Frequenz

$$\pm \Delta f = K \cdot f \cdot v/c \text{ für } c \gg v \quad (16)$$

Als Empfänger und Sender werden Partikel / Unterschiede in der Mediumsdichte verwendet, welche schallstreuend wirken. Die Partikel sollten in etwa eine Größe von mehr als einem Zehntel der Wellenlänge haben um eine einwandfreie Funktion gewährleisten zu können. Die Anzahl von Partikeln und deren Größe stellt eine große Einschränkung für die Anwendung dar.

Vorteile [12]:

- kein Druckverlust
- Messung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit über den Pfad des Ultraschallstrahls im Rohr (Mitführungseffekt)

-
- Messung der Strömungsgeschwindigkeit im Schnittvolumen der Ultraschallstrahlen (Dopplerprinzip)
 - kein Druckverlust
 - keine Querschnittsverengungen
 - keine bewegten Teile
 - durch Kompensation der Schallgeschwindigkeit unabhängig von Druck, Temperatur und Dichte

Nachteile [12]:

- stabiles Strömungsprofil nötig (lange gerade Ein- und Auslaufstrecken)
- hoher Aufwand für eine Grundgenauigkeit von $\pm 1\%$
- Fehler durch Ablagerungen im Rohr, am Sender und Empfänger

Die Anwendung von Ultraschall bei heißen Gasen bzw. bei pulsierenden Gasflüssen und die dabei aufgetretenen Probleme und Lösungen sind in [38], [31], [33] und [32] näher angeführt.

4.1.4 Differenzdruckdurchflussmesser

Differenzdruckmessung

Anhand der Differenz der statischen Drücke vor und nach einem Drosselgerät lässt sich durch die Bernoulligleichung (6) und die Kontinuitätsgleichung (4) die Strömungsgeschwindigkeit eines Fluids bestimmen, wenn die Stoffwerte des Fluids bekannt sind.

Die Messpunkte für die Differenzdruckmessung werden entweder durch Drosselgeräte oder durch ausnutzen von konstruktionsbedingten Gegebenheiten, z.B. Messung des Differenzdruckes zwischen Rohr Innen- und Außenbogen, erzeugt.

In der ÖNORM EN ISO 5167 wird sehr detailliert die Durchflussmessung mit Hilfe von Drosseleinsätzen beschrieben. Hierbei wird der Effekt ausgenutzt, dass sich die Strömungsgeschwindigkeit vergrößert, wenn der Rohrquerschnitt verkleinert wird. Die Differenz der Drücke vor und nach/bei der Querschnittsverjüngung stellen ein Maß für die Strömungsgeschwindigkeit dar. Die Druckdifferenz wird oftmals als Wirkdruck bezeichnet.

Abbildung 4.11 zeigt unterschiedliche Formen von Drosseleinsätzen zur Bestimmung des Wirkdruckes.

Die Ausführung der Drossel geschieht entweder in Blendenform, welche einen hohen Druckverlust verursacht aber konstruktiv einfach ist. In Düsenform, welche einen mittleren Druckverlust bedingt oder als Venturidüse, die den geringsten Druckverlust der drei erwähnten Formen besitzt aber konstruktiv am aufwendigsten ist. Je nach Messaufgabe und Anwendungsgebiet muss abgewägt werden, welche Form am besten geeignet ist. Der Diffusor, so wird der konische Anbau an der Venturidüse bezeichnet, begünstigt die Druckrückbildung und besitzt dadurch einen geringeren Druckverlust gegenüber den anderen erwähnten Düsenformen.

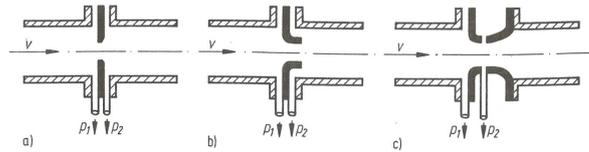


Abbildung 4.11: Formen von Drosseleinsätzen in Rohren [12] a) Blende, b) Düse, c) Venturidüse kurz
 p_1, p_2 Wirkdruckentnahmestellen.

In Abbildung 4.12 ist der Strömungs- und Druckverlauf an einem Drosselgerät mit Kreisblende dargestellt. Das Durchmesser Verhältnis D/d bzw. das Öffnungsverhältnis D^2/d^2 hat Einfluss auf den Messeffekt und den bleibenden Druckverlust Δp_V . Ein großes Verhältnis bewirkt einen großen Differenzdruck / Wirkdruck und stellt dadurch auch einen großen Druckverlust dar. Für ein kleines Verhältnis gilt der Zusammenhang sinngemäß umgekehrt. Der Einsatz von Drosselgeräten bedingt immer einen Druckverlust, was zugleich einen Energieverlust darstellt.

Die Eckdruckentnahme an den Messpunkten p_1 und p_2 liefert einen größeren Differenzdruck im Vergleich zur D-D/2-Entnahme. Bei der D-D/2-Entnahme wird der Differenzdruck an den Messpunkten p'_1, p'_2 gemessen, mit dem Nachteil eines instabileren Messwertes. Es gibt sehr viele unterschiedliche Ansätze zur Druckentnahme und Position der Entnahmestellen. Weitere Informationen sind in der Norm und in [12] zu finden.

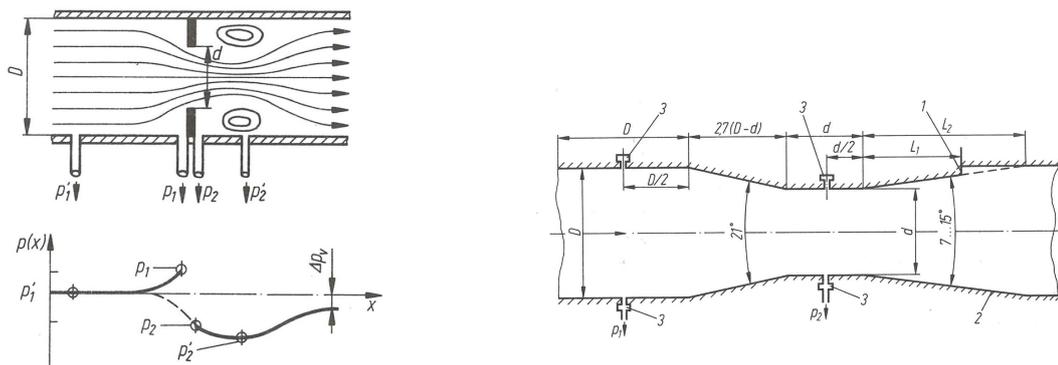


Abbildung 4.12: Strömungs- und Druckverlauf an einem Drosselgerät mit Kreisblende [12].

Abbildung 4.13: Klassisches Venturirohr [12].

Das in in Abbildung 4.13 dargestellte Venturirohr stellt eine weitere mögliche Art zum Messen des Differenzdruckes dar. Im Vergleich zur Venturidüse, welche in Abbildung 4.11c dargestellt ist, benötigt das Venturirohr kürzere Ein- und Auslaufstrecken und ist einfacher im Aufbau.

Staudrucksonde

Die Staudrucksonde, auch als Prandtl-Staurohr bezeichnet, ermöglicht die Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit durch Messen des dynamischen Druckes - näheres siehe Punkt 3.2.3.

Mit der Prandtl-Sonde kann punktuell die Geschwindigkeit in einem Rohr festgestellt

werden.

Abbildung 3.3 zeigt die typische Ausführung der Sonde. Durch angebrachte konstruktive Maßnahmen, wie z.B. mit einer Venturidüse am statischen Druckanschluss, dargestellt in Abbildung 4.14, lässt sich der Messeffekt verstärken. Eine andere konstruktive Maßnahme zum Verstärken des Messeffektes ist in Abbildung 4.15 mit einem Miniaturventurirohr dargestellt.

Im generellen hat der Ausrichtungswinkel der Sondenspitze zur Strömungsrichtung einen Einfluss auf das Messergebnis. Der Zusammenhang ist in Abbildung 4.16 dargestellt.

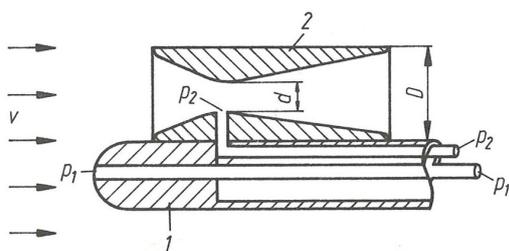


Abbildung 4.14: Venturidüse als Staudruckverstärker [12].

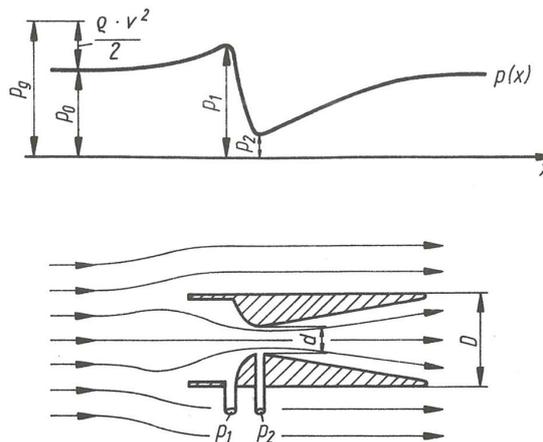


Abbildung 4.15: Venturirohr als Staudruckmultiplikator [12].

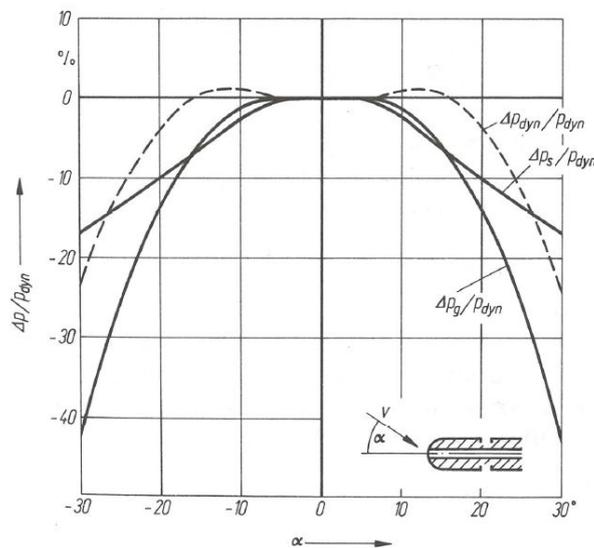


Abbildung 4.16: Staudruck in Abhängigkeit vom Anströmwinkel [12].

Neben der typischen Prandtlbauform, zur punktuellen Messung, gibt es Sonden in stabförmiger Ausführung mit mehreren Löchern, welche symmetrisch über den Rohrdurchmesser verteilt sind. Solche Mehrlochsonden erfassen den gemittelten dynamischen Druck über den gesamten Rohrdurchmesser, da alle Löcher auf der Anström- und Abströmseite miteinander verbunden sind.

Die Mehrlochsonde wird auch als Annubarsonde bezeichnet. Bedingt durch die Bauform erzeugt die Mehrlochsonde einen größeren Strömungswiderstand als die Prandtlsonde, da die Mehrlochsonde über den gesamten Rohrdurchmesser reicht. Abbildung 4.17 zeigt den Aufbau und die Anordnung der Löcher einer Mehrlochsonde.

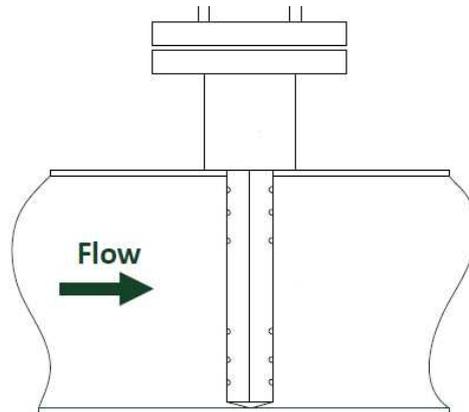


Abbildung 4.17: Aufbau einer Mehrlochsonde - modifiziert nach [20].

Untersuchungen [20] zeigen, dass die kreuzweise Anordnung von Mehrlochsonden, auch bei reduzierten Ein- und Auslaufstrecken, die Messgenauigkeit deutlich verbessern.

Vorteile:

- geringer Strömungswiderstand
- punktuelle Messung möglich
- Wartungsarm bzw. periodisches Spülen der Messbohrungen mittels Druckluft bei partikelhaltigen Medien
- großer Einsatzbereich - erlaubt große Druck- und Temperaturbereiche

Nachteile:

- Abhängigkeit vom Anströmwinkel - daher eine exakte Ausrichtung nötig
- je nach Bauform anfällig für Verschmutzungen (partikelhaltige Gase)
- Einfluss durch Ein- und Auslaufstrecken

4.1.5 Massendurchflussmesser

Die Messprinzipien zur Massendurchflussmessung sind unabhängig von Viskosität, Dichte, Temperatur und Druck. Sie messen direkt den Massenfluss und werden aus diesem Grund sehr oft in der Industrie eingesetzt, dort wo die Masse als Verrechnungsgröße verwendet wird.

Hitzdrahtanemometer

Wird ein auf über die Medientemperatur erhitzter Draht umströmt, so erfolgt, bedingt durch die Strömung / herbeigeführte Konvektion, eine Wärmeabgabe an das Medium. Die Wärmeabgabe ist ein Maß für die Strömungsgeschwindigkeit und wird durch geeignete Verfahren ausgewertet. Das Hitzdrahtanemometer besitzt gute dynamische Eigenschaften und wird deshalb häufig bei variablen Strömungsbedingungen eingesetzt, z.B. als Luftmassenmesser beim Auto.

Neben der Hitzdrahtsonde werden auch Heißfilmsonden eingesetzt.

Abbildung 4.18 zeigt mögliche Varianten von Hitzdrahtsensoren. Die Länge des Sensor-
drahtes beträgt $1 - 3 \text{ mm}$ bei einem Durchmesser von $4 - 400 \mu\text{m}$.

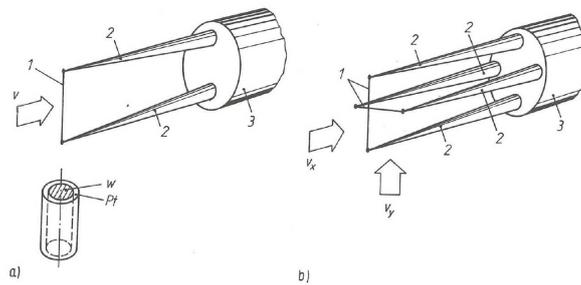


Abbildung 4.18: Ausführungsvarianten von Hitzdrahtsensoren [12]
a) Standard-Sonde mit Drahtauschnitt, b) Dual- oder X-Sonde
1 Hitzdraht, 2 Haltespitzen, 3 Keramikhalter,
W Wolframdraht, Pt Platin-Passivierungsschicht.

Abbildung 4.19 zeigt mögliche Varianten von Heißfilmsensoren.

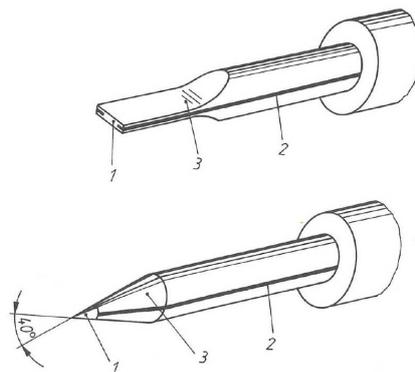


Abbildung 4.19: Ausführungsvarianten von Heißfilmsensoren [12]
1 Heißfilm, 2 Stromzuführung, 3 Quarzsubstrat.

Wird ein konstanter Strom im Hitzdraht eingepreßt, so wird das Verfahren als Konstantstromanemometer (CCA⁷) bezeichnet. Bei Strömung verändert sich die Temperatur des Hitzdrahtes und somit dessen Widerstand. Mit höherer Strömung wird der Spannungsabfall am Hitzdraht, PTC-Verhalten vorausgesetzt, kleiner. Der gemessene Spannungsabfall ist ein Maß für die Strömungsgeschwindigkeit. Mit diesem Prinzip lässt sich nur ein geringer Messbereich abdecken, da bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten der Spannungsabfall sehr klein wird und dadurch keine genaue Messung mehr möglich ist.

Beim Verfahren nach dem Konstanttemperaturanemometer (CTA⁸) wird die Temperatur des Hitzdrahtes durch einen Regler, der die Speisespannung bzw. den Speisestrom nachführt, konstant gehalten. Dadurch wird die von der Strömung verursachte Abkühlung des Hitzdrahtes kompensiert. Somit sind Speisespannung bzw. Speisestrom ein Maß für die Strömungsgeschwindigkeit. Dieses Verfahren hat u.a. einen größeren Messbereich und ermöglicht auch höhere Messfrequenzen als das CCA-Verfahren.

⁷Constant Current Anemometer

⁸Constant Temperature Anemometer

Zur Durchflussrichtungsbestimmung werden drei Sonden hintereinander in Flussrichtung angeordnet. Eine Sonde wird beheizt und befindet sich in der Mitte der beiden unbeheizten Sonden. Bei Strömungsstillstand messen die beiden unbeheizten Sonden die gleiche Temperatur, da sich die Wärme der beheizten Sonde in alle Richtungen gleichmäßig ausbreitet. Bei Strömung wird die in Flussrichtung unbeheizte Sonde, auf Grund des Wärmetransports durch die Strömung, eine höhere Temperatur als die unbeheizte Sonde entgegen der Strömungsrichtung messen. Somit kann anhand der Temperatur der beiden außenliegenden Sensoren die Richtung festgestellt werden und anhand der Temperaturdifferenz auf den Massenstrom zurückgeschlossen werden.

Die erwähnten zwei Verfahren werden entweder direkt im zu messendem Hauptstrom oder in einem Bypasselement eingesetzt. Bei der Methode mit Bypass wird im Hauptfluss ein Drosselement einbracht, welches für den nötigen Durchfluss durch den Bypass sorgt. Nachteilig ist hier der erhöhte Druckabfall durch das Drosselement.

Die Empfindlichkeit von Hitzdraht- und Heißfilmsonden hängt von der Anströmrichtung und somit von der Ausrichtung zur Fließrichtung ab.

Vorteile:

- hohe Messfrequenz möglich - für Turbulenzforschung geeignet
- einfache Messschaltungen

Nachteile

- Empfindlichkeit von Anströmrichtung abhängig
- Einfluss von Medium auf die Messsonde durch Korrosion, Partikelablagerung bzw. Beschädigung durch Partikel
- Je nach Medium kurze Kalibrierintervalle nötig
- relativ teuer
- kleine und sensible Bauform - Drahtstärke im μm -Bereich

Hitzdrahtsonden für hohe Temperaturbereiche ($>400^\circ\text{C}$) kosten ca. 2500 € (Preisauskunft Fa. Prager⁹ für Dantec-Hitzdrahtsonden¹⁰).

Die Firma TSI¹¹ hat zwar Sonden für diesen Temperaturbereich im Einsatz, jedoch große Bedenken bezüglich Partikel und eventueller Feuchtigkeit im Gas. Dadurch können Probleme mit Ablagerungen bzw. Beschädigungen an der Hitzdrahtsonde hervorgerufen werden und kürzere Kalibrierintervalle nötig sein.

Coriolis-Massenstrommesser

Die Corioliskraft wirkt auf einen Körper, welcher sich mit einer Geschwindigkeit in einem rotierenden System bewegt. So wirkt u.a. auf Meeres- und Luftströmungen die Corioliskraft und verursacht die charakteristischen Wirbel der Strömungen.

Bewegt sich ein Körper mit der Geschwindigkeit v und der Masse m in einem rotierenden System mit der Winkelgeschwindigkeit ω so wirkt zusätzlich zur Zentrifugalkraft die Corioliskraft

⁹<http://www.prager-elektronik.at/>

¹⁰<https://www.dantecdynamics.com/hot-wire-probes>

¹¹www.tsi.com

$$F_c = 2 \cdot m \cdot [v \times \omega]. \quad (17)$$

Abbildung 4.20 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Coriolis-Massenstrommessers. Hierbei wird ein U-förmiges Messrohr an der Spitze mittels mechanischer Anregung in Schwingung versetzt. Der Punkt A kennzeichnet den Punkt der mechanischen Anregung. Das Messrohr schwingt in der Drehachse mit der Winkelgeschwindigkeit auf und ab. An den Punkten B und C sind Sensoren angebracht, welche die Auslenkung des Messrohres erfassen. Die Aufnahme für das U-förmige Messrohr ist fixiert und schwingt nicht mit.

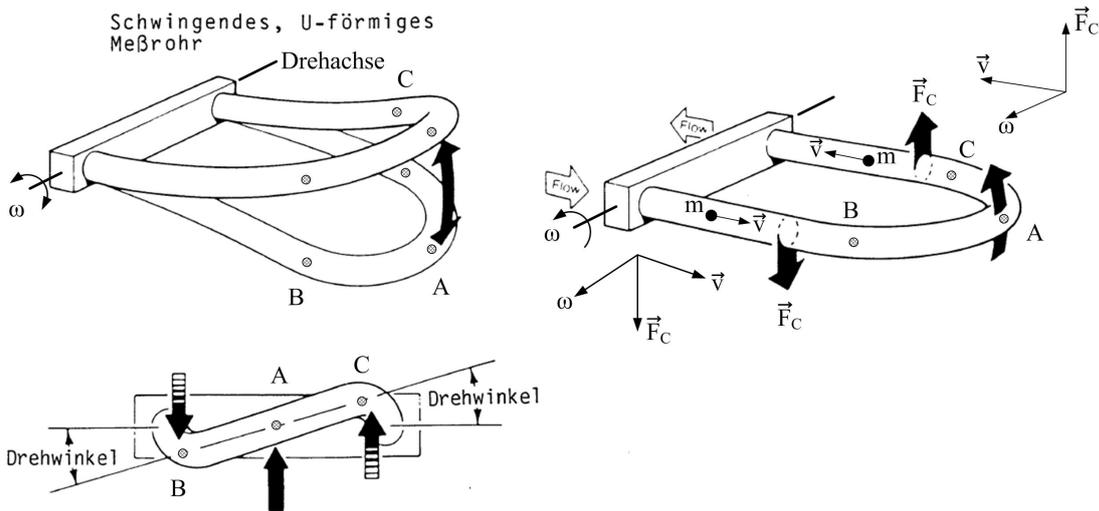


Abbildung 4.20: Prinzip Coriolis-Massenstrommesser - modifiziert nach [5].

Bei Stillstand des Medium im Messrohr erfassen beide Messsensoren die gleiche Auslenkung in gleicher Richtung. Es kommt zu keiner Torsion des Messrohres, der Drehwinkel beträgt 0° . Dies ist in Abbildung 4.21-linkes Bild dargestellt..

Fließt ein Medium durch das Messrohr, so bilden sich Corioliskräfte aus. Im Zuflussstrang ist die Kraft nach unten, im Abflussstrang nach oben gerichtet. Dadurch kommt es zu einer Torsion des Messrohres, der Drehwinkel ist ungleich 0° . Die Messsensoren erfassen einen Phasenunterschied - Abbildung 4.21-rechtes Bild.

Abbildung 4.21 zeigt den Signalverlauf der Messsensoren an den Punkten B und C. Der Phasenunterschied entspricht dem Drehwinkel und ist proportional dem Massendurchfluss.

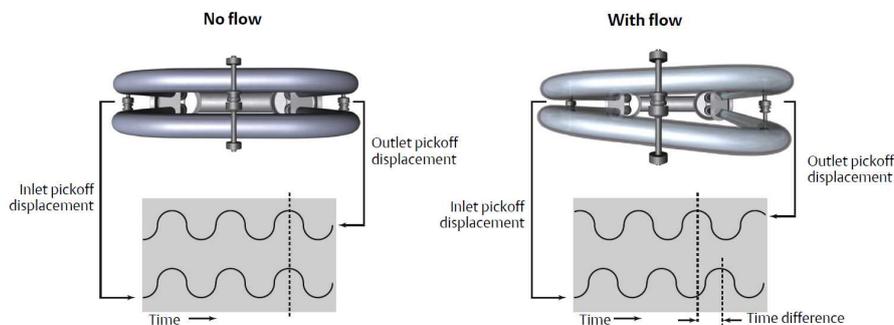


Abbildung 4.21: Messung des Phasenunterschiedes [34]
links - kein Durchfluss, rechts - mit Durchfluss.

Neben den gebräuchlichen Ausführungen, wie U-Rohr, Doppel-U-Rohr oder gerades Doppelrohr gibt es noch viele Sonderformen. Mehr Details sind in [5] zu finden.

Vorteile [12] [21]:

- Messung des Massenstroms unabhängig von Temperatur, Druck, Dichte und Viskosität
- für Mehrphasenstrommessungen geeignet - Gaseinschlüsse bzw. Feststoffanteile stellen kein Problem dar
- je nach Ausführung für hohe Temperaturen, Drücke und aggressive Medien geeignet
- unabhängig vom Strömungsprofil
- geringer Druckverlust
- Messung der Dichte möglich
- hohe Messgenauigkeit $\pm 0,15\%$ vom Messbereich

Nachteile [12] [21]:

- Messwertaufnehmer empfindlich gegen mechanische Verspannung und Vibration
- hoher Preis
- Materialsteifigkeit hat Einfluss auf Messgenauigkeit (Steifigkeit ist u.a. abhängig von der Temperatur)
- hohe zeitliche Auflösung nötig um Phasenunterschied exakt zu messen
- hohe Temperaturstabilität und Nullpunktgenauigkeit der Messwertaufnehmer
- Messsignal bei niedrigen Gasdurchflüssen schwer detektierbar

In [45] wird das Verhalten von pulsierenden Strömungen an einem geraden Coriolis-Massenstrommesser untersucht. Hierbei wurden Einflüsse auf das Messergebnis nachgewiesen.

4.1.6 Andere Durchflussmessverfahren

Volumenzähler mit Messkammern

Es gibt sehr viele Realisationen zu diesem Messprinzip. Hier soll das Prinzip der Verdrängungszähler (Displacement flowmeter) näher erläutert werden. Das Gesamtvolumen wird durch Messung von Teilvolumina bestimmt. In Abhängigkeit von der Messdauer und Anzahl der Teilvolumina ergibt sich ein Gesamtvolumenstrom. So werden Flüssigkeiten oft mit Ovalradzähler und mit Ringkolbenzähler gemessen. Ein Gaszähler, welcher für die Messung des Verbrauches im Haushalt verwendet wird, beruht ebenso auf diesem Prinzip. Es werden zwei Messkammern abwechselnd gefüllt und beim Entleeren einer Messkammer eine Zähluhr angetrieben. Die Anzahl der gefüllten Messkammern pro Zeitperiode entspricht dem Gasvolumen pro Zeitperiode.

Vorteile [12]:

- einfacher günstiger Aufbau - gutes Preis / Leistungsverhältnis
- zum Teil sehr genau - Verwendung als Kalibriernormale
- Einsatz als Verrechnungszähler - Gaszähler, Wasserzähler

Nachteile [12]:

- empfindlich gegenüber Schmutz und aggressiven Medien
- je nach Bauart beträchtliche Druckverluste
- blockiert die Leitung im Störfall
- nur bedingt überlastfähig

Volumenzähler mit Messkammern eignen sich nur bedingt für eine Durchflussmessung von pulsierenden Gasen, da die Messkammern eine Mittelwertbildung bewirken und dies je nach Anwendung nicht erwünscht ist. Zudem kann es bei heißen Gasen zu einer Kondensation des Gases in der Messkammer kommen und dadurch wird das Volumen in der Messkammer beeinflusst. Abhilfe würde ein Beheizen der Messkammern schaffen, was aber eine relativ aufwendige und teure Methode darstellt.

Magnetisch-induktive Durchflussmessung

Bei der magnetisch-induktiven Durchflussmessung (MID) wird die Leitfähigkeit des zu messenden Mediums genutzt. Gegenüberliegende Spulen, außen am nicht ferromagnetischen Rohr angebracht, erzeugen ein Magnetfeld und bewirken eine Trennung der Ladungsträger im Messfluid. Mit Hilfe von Elektroden im Rohrinernen wird die durch die Ladungstrennung verursachte Spannung gemessen. Diese Spannung ist proportional zur Durchflussgeschwindigkeit.

Abbildung 4.22 zeigt den prinzipiellen Aufbau für die magnetisch-induktive Durchflussmessung.

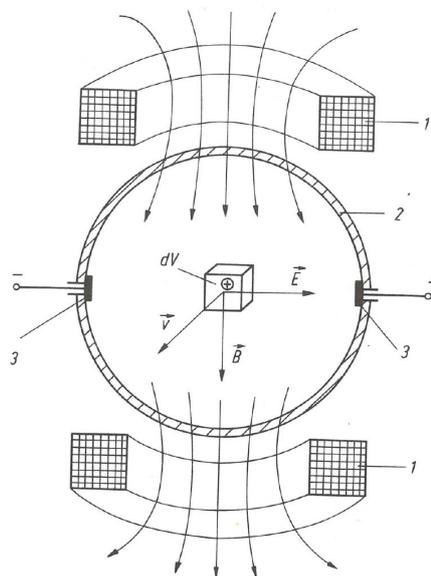


Abbildung 4.22: Messprinzip eines induktiven Durchflussmessers [12]
1 - Magnetfeldspule, 2 - Rohrwand, 3 - Messelektroden, dV - Volumenelement,
 B - magn. Induktion, v - Strömungsgeschwindigkeit, E - resultierende Feldstärke.

Vorteile [12]:

- linearer Zusammenhang zwischen Messspannung und Fluidgeschwindigkeit
- unabhängig von Temperatur, Viskosität, Druck und Dichte

-
- weitgehend unabhängig vom Strömungsprofil
 - gute Linearität und Langzeitstabilität (angepasstes Elektroden- und Wandmaterial vorausgesetzt)
 - kein Druckabfall bzw. Querschnittsverkleinerung
 - Strömungsrichtung erkennbar
 - gute Genauigkeit (0.2% v.Messwert. + 0.1% v.Endwert)
 - gute Wartbarkeit, geringer Reinigungsaufwand

Nachteile [12]:

- Durchflussmessung nur bei Flüssigkeiten mit Ladungsträgern möglich (Mindestleitfähigkeit von $0.5\mu S/cm$ nötig)
- Anfällig gegenüber Verschmutzungen und Ablagerungen im Elektroden und Messrohrbereich

Stauscheibendurchflussmesser

Hierbei erfährt eine im Rohr eingebrachte Scheibe eine Kraftwirkung, welche proportional zur Fließgeschwindigkeit ist. Es besteht ein quadratischer Zusammenhang zwischen Fließgeschwindigkeit und Kraftwirkung. Die Kraftwirkung wird entweder direkt im Rohr oder außerhalb des Rohrs mittels eines Koppelungsmechanismus gemessen.

Das Messverfahren ist abhängig von der Dichte des Messmediums und somit von Druck und Temperatur bei gasförmigen Medien.

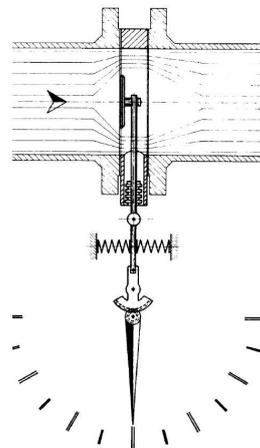


Abbildung 4.23: Prinzip der Stauscheibenmessung [19].

Vorteile [19]:

- für beliebige Durchflussrichtung geeignet

Nachteile [19]:

- mechanische Bauteile im Fluidweg - kann zu Problemen bei Langzeitanwendungen führen
- gewisse Ein- und Auslaufstrecken nötig
- Druckverlust, abhängig von Stauscheibengröße
- Sensibilität wird durch die Stauscheibengröße beeinflusst

- gewisser Vordruck ($> 0,4$ bar) nötig

Bildgebende Verfahren

Bei diesen Verfahren wird mittels optischer Verfahren und Bildaufzeichnungsgeräten die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Partikeln im Fluidstrom analysiert. Anhand der mittleren berechneten Partikelgeschwindigkeit wird auf den Massenstrom geschlossen.

Vorteile

- keine Querschnittsverengung
- kein Druckverlust

Nachteile

- Kameralinse im Fluidbereich (Verschmutzung, Trübung)
- Partikelgröße muss für Auswertesystem erfassbar sein
- rechenintensiv - Auswertung der hochfrequenten Bildserien

Geschwindigkeits- und Durchflussmessung nach dem Korrelationsverfahren

Bei diesem Verfahren wird die Laufzeit anhand einer Markierung im Fluid bestimmt. Die Markierung kann von außen durch Tracer injections eingebracht werden oder ist schon im Fluid, auf Grund der Prozessführung vorhanden, z.B. als Druck-, Temperaturschwankung, Änderung der Leitfähigkeit oder Geschwindigkeit etc.. Diese Inhomogenitäten lassen sich durch zwei in einem definierten Abstand angebrachte Sensoren erfassen. Anhand des Laufzeitunterschiedes kann auf die Geschwindigkeit des Fluids zurückgeschlossen werden.

Der Laufzeitunterschied wird durch Kreuzkorrelation der beiden Sensorsignale bestimmt. Dazu werden markante Punkte z.B. Maximas oder Minimas im Signalverlauf benötigt. Dieses Verfahren kann nur solange angewendet werden, solange Maximas oder Minimas eindeutig detektiert werden können. Die Sensoren müssen nicht abgestimmt sein, es reicht, dass beide Sensoren die Maximas oder Minimas erkennen. Drift oder ein Offset des Sensors stellt kein Problem dar. Bei periodischen Signalen kann dieses Verfahren mehrdeutige Ergebnisse liefern - $\Delta\varphi + k \cdot 360^\circ$.

Abbildung 4.24 zeigt den prinzipiellen Aufbau zu diesem Verfahren.

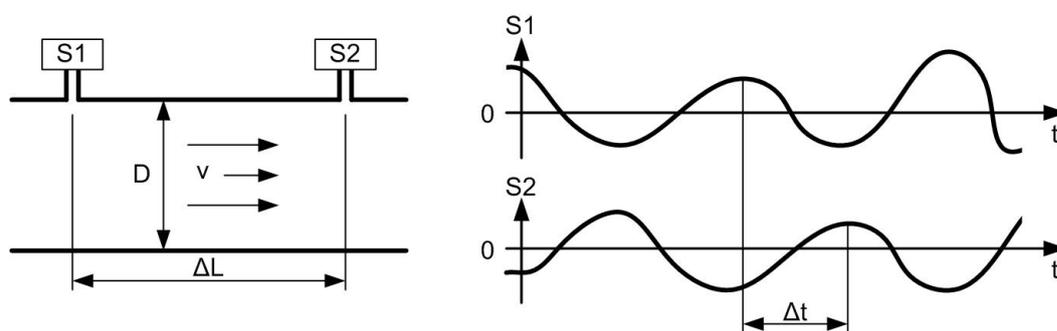


Abbildung 4.24: prinzipieller Aufbau zum Korrelationsverfahren
 S_1, S_2 - Sensoren, D - Rohrdurchmesser, v - Strömungsgeschwindigkeit,
 ΔL - Sensorabstand, Δt - Laufzeitdifferenz.

Die Strömungsgeschwindigkeit berechnet sich aus

$$v = \frac{\Delta L}{\Delta t}.$$

Bei bekanntem Rohrdurchmesser lässt sich der Volumendurchfluss und daraus der Massendurchfluss mit der Dichte des Mediums bestimmen.

Je nach Anwendungsgebiet kommen unterschiedliche Sensorprinzipien zum Einsatz:

- optische Sensorik: Zwei Lichtmessstrecken mit je einem Sender und Empfänger erfassen die durch strömende Teilchen hervorgerufenen Signalveränderungen.
- akustische Sensorik: Zwei Akustikmessstrecken mit je einem Sender und Empfänger erfassen die durch den Teilchentransport im Medium hervorgerufenen Amplitudenänderungen
- kapazitive Sensorik: Zwei Elektrodenpaare an der Rohrwand erfassen die durch den Teilchentransport verursachte Ladungsänderung. Die Teilchen müssen dielektrisch sein und ändern dabei die Dielektrizitätskonstante und somit die Kapazität, welche messtechnisch erfasst wird.
- Ladungsempfindliche Sensoren: elektrostatisch aufgeladene Teilchen erzeugen beim Durchfluss durch zwei Elektrodenpaare entsprechend der Größe und Verteilung der Teilchen eine Spannung an den Elektrodenpaaren.
- thermische Sensoren: Zwei „Temperaturfühler“, z.B. Hitzdraht- oder Heißfilmsonde, messen Temperaturschwankungen im Fluid, welche korreliert werden.

Vorteile:

- geringe Anforderungen an Sensorik (Offset, Drift, Nullpunkt)
- breites Anwendungsgebiet durch unterschiedliche Sensorprinzipien für unterschiedliche Medien

Nachteile:

- Inhomogenitäten / Teilchen im System nötig
- rechenintensiv (Kreuzkorrelation)
- Sensorik soll klein sein um keine Beeinflussung für die Strömung und für den stromabwärtsliegenden Sensor darzustellen
- zeitliche Auflösung der Abtastung

4.2 Druck

Zur Erfassung der physikalischen Größe Druck sind viele Messverfahren und Sensorprinzipien im Einsatz, die je nach Einsatzgebiet und Messzweck aufeinander abgestimmt werden müssen.

4.2.1 Gebereffekt

Druck ist definiert als Kraft, die auf eine Fläche einwirkt. Somit lässt sich die Druckmessung auf eine Kraftmessung zurückführen. Die Druckmessung erfolgt immer in Bezug

zu einem Referenzdruck der z.B. der Umgebungsdruck, der absoluten Nulldruck - also Vakuum oder ein definiertes Druckniveau sein kann.

Im folgenden Abschnitt werden die grundlegenden Prinzipien zur Erfassung von Druckänderungen erläutert und auf die Prinzipien der elektronischen Messgrößenerfassung eingegangen.

4.2.2 kapazitive Druckmessung

Die Kapazität $C = \epsilon \cdot \frac{A}{d}$ eines Kondensators ist abhängig von der Dielektrizitätskonstante, der Fläche und dem Abstand der Kondensatorplatten. Eine Druckänderung kann auf eine Änderung des Abstandes, der Fläche oder einer Änderung der Dielektrizität übertragen werden.

Vorteile [21]:

- hohe Empfindlichkeit
- hohe Genauigkeit
- für hohe Temperaturen geeignet
- kurze Ansprechzeit
- gut für dynamische Druckmessungen geeignet
- einfache und robuste Konstruktion
- für kleinste Druckmessbereiche geeignet

Nachteile [21]:

- nur kleine Abstandsänderungen d möglich
- Sensorik und Elektronik sollten sehr nah zusammen sein
- Langzeitstabilität eher gering
- empfindlich gegen Staub und Feuchte

4.2.3 resistive und piezoresistive Druckmessung

Hier wird der Effekt ausgenutzt, dass eine mechanische Änderung eines Leiters in der Länge bzw. im Querschnitt zu einer Änderung des Widerstandwertes und dessen spezifischen Widerstands führt. Die Änderung des Widerstandwertes wird als resistive Änderung bezeichnet und tritt vorwiegend bei Metallen in Erscheinung. Eine Änderung des spezifischen Widerstandes wird als piezoresistiver Effekt bezeichnet und tritt vor allem bei Halbleitern, die einer Stauchung oder Dehnung, unterliegen auf.

Eine Dehnung oder Stauchung einer druckbeaufschlagten Membran führt zu einer Gestaltänderung. Diese Gestaltänderung wird entweder mit aufgeklebten Dehnungsmessstreifen (DMS) oder durch halbleitertechnisch aufgebrachte Messstreifen erfasst. Der Messeffekt wird durch spezielle Anordnung der Messstreifen, um den Einfluss der Richtungsempfindlichkeit zu erhöhen bzw. zu reduzieren, sowie deren Verschaltung als Vollbrücke noch verstärkt. Der Vorteil der halbleitertechnisch gefertigten Messstreifen, welche meist aus Silizium gefertigt sind, liegt in der größeren Empfindlichkeit gegenüber metallischen Messstreifen um den Faktor 100. Durch die Dotierung lässt sich die Richtungsempfindlichkeit

der Messstreifen sehr gut beeinflussen.

Halbleitermessstreifen

Vorteil [21]:

- einfache Herstellung
- hohe Genauigkeit im Herstellungsprozess
- gute Steuerung der Richtungsempfindlichkeit
- sehr kleine Bauform durch Ätztechnik
- Signalverarbeitung direkt integrierbar

Nachteil [21]:

- Probleme bei Druckstößen und Vibrationen
- empfindlich gegen aggressive Medien, wenn ohne Schutz - mögliche Schutzmaßnahmen sind z.B. Parylenebeschichtung oder ein Koppelmedium

metallischer Dehnungsmessstreifen

Vorteile [21]:

- hohe Genauigkeit
- hohe Überlastbarkeit und Überlastsicherung
- sehr robust
- unempfindlich bei Druckstößen
- hohe Eigenfrequenz

Nachteile [21]:

- hoher Preis
- Einfluss durch Kleber, der die Temperaturfestigkeit begrenzt
- nicht für kleine Baugrößen

4.2.4 induktive Druckmessung

Die Positionsänderung der durch den Druck beaufschlagten Membrane wird mittels induktiver Wegmessung erfasst. Die Wegänderung der Membrane wird auf einen magnetischen Kern übertragen, der sich in einem Spulenkörper bewegt und somit die Induktivität der Spule beeinflusst und damit ein Maß für den anstehenden Druck darstellt.

Vorteile [21]:

- einfache Bauweise
- robust und störsicher
- geringe Feuchteempfindlichkeit
- gute dynamische Eigenschaften
- auch sehr kleine Druckmessbereiche möglich

Nachteil [21]:

- Baugröße der Spulen
- temperaturabhängig, meist ist eine aufwendig Temperaturkompensation nötig

-
- nicht für Gleichspannung geeignet

4.2.5 piezoelektrische Druckmessung

Unter Einwirkung von Kraft bzw. Druck kommt es in einem Piezoelement zu einer Ladungsverschiebung, die mit geeigneten Messschaltungen ausgewertet wird. Der Piezoeffekt, also die Ladungsverschiebung, findet nur bei Druckänderung statt und ist deshalb nur für dynamische und nicht für statische Druckmessungen geeignet.

Vorteile [21]:

- hohe Messdynamik
- kleiner, robuster, einfacher Aufbau
- hohe Überlastfähigkeit
- für hohe Drücke geeignet
- nahezu weglose Messung

Nachteile [21]:

- keine statischen Drücke erfassbar
- Einfluss von Störkapazitäten auf die Messelektronik bzw. Messaufbau
- Temperaturabhängigkeit, die vom verwendeten Quarzmaterial abhängt
- Einfluss durch Resonanzfrequenz

4.2.6 Druckmessung mittels Resonanzfrequenzmessung

Ein unter Zugspannung stehender Draht wird durch ein elektromagnetisches System zum Schwingen angeregt, so dass er mit seiner Eigenfrequenz bzw. Resonanzfrequenz schwingt. Eine Druckänderung führt zu einer Änderung der Zugspannung des Drahtes und somit zu einer Änderung der Eigenfrequenz. Die Frequenz ist abhängig von der Zugkraft, der Dichte, der Querschnittsfläche und der Länge der Schwingseite. Zwischen Druck und Frequenz besteht ein quadratischer Zusammenhang.

Vorteile [21]:

- digitales Signal, kann mit einem Frequenzzähler gemessen werden

Nachteile [21]:

- aufwendiger mechanischer Aufbau, da elektromagnetische Anregung und Drahtspannung benötigt werden
- quadratischer Zusammenhang zwischen Druck und Frequenz
- Einfluss durch Vibrationen und Druckstöße

4.2.7 Druckmessung mittels Schwingquarzen

Schwingquarze ändern ihre Eigenfrequenz in Abhängigkeit von Druck und Temperatur. Der eine Schwingquarz wird nur zur Bestimmung der Temperatur und somit für die Kompensation der Temperaturdrift verwendet. Der zweite Schwingquarz wird zusätzlich dem

zu messenden Druck ausgesetzt. Der Frequenzunterschied der Schwingquarze stellt ein Maß für den anliegenden Druck dar.

4.2.8 weitere Druckmessverfahren

Hallsensor

Hier wird durch den anliegenden Druck das Magnetfeld im Umfeld des Hallsensors beeinflusst, dadurch ändert sich die Hallspannung, welche ein Maß für den Druck ist.

5 Messung mittels Laufzeit von Pulsationen

In diesem Kapitel wird auf den ersten Versuch eingegangen, mittels Laufzeitanalyse die Geschwindigkeit des Abgases zu bestimmen. Jeder Verbrennungsmotor erzeugt in Abhängigkeit von Drehzahl und Zylinderanzahl periodische Druck- und Flussschwankungen. Diese Schwankungen sind je nach Abgasnachbehandlung¹² unterschiedlich stark ausgeprägt. Speziell im unteren Drehzahlbereich (Leerlaufbetrieb) entstehen oszillierende Schwankungen, die auch negative Durchflusswerte annehmen können. Dies wurde in [35], durch Messen der Sauerstoffkonzentration am Auspuffende, bewiesen.

Durch die Anwendung eines Messverfahrens nach dem Laufzeitprinzip, welches im Punkt 4.1.6 erklärt wurde, entsteht eine von der Geschwindigkeit linear abhängige Messgröße. Gegenüber anderen Verfahren, wie z.B. dem Wirkdruckverfahren, das einen quadratischen Zusammenhang mit der Geschwindigkeit besitzt, ergibt sich dadurch eine bessere Genauigkeit / Detektierbarkeit bei sehr geringen Strömungsgeschwindigkeiten. Dies ist vor allem im unteren Messbereich von großer Bedeutung, da genaue Messergebnisse für PEMS-Fahrten im Stadtverkehr wichtig sind und zur Zeit mit großer Messunsicherheit verbunden sind.

5.1 Hardware

Ein am Auspuffende angeflanshtes Rohr mit dem Durchmesser D dient als Messstrecke. Hierbei werden im Abstand Δs zwei Drucksensoren p_1 und p_2 angebracht. Die Drucksensoren messen den Druckunterschied zwischen atmosphärischem Umgebungsdruck und den vom Verbrennungsmotor verursachten Druckschwankungen im Messrohr. Bedingt durch die örtlich unterschiedliche Anordnungen der Drucksensoren sollte sich auf Grund des Laufzeitprinzips eine zeitliche Differenz Δt zwischen den gemessenen Druckverläufen feststellen lassen. Abbildung 5.25 zeigt den schematischen Aufbau und den erwarteten Signalverlauf der beiden Drucksensoren.

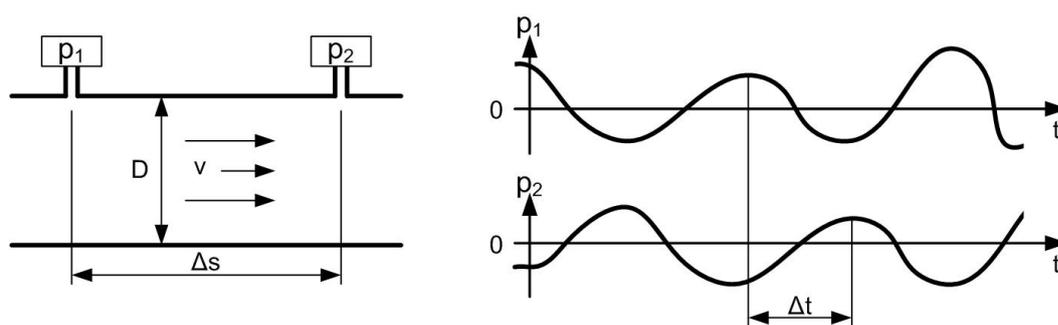


Abbildung 5.25: Geschwindigkeitsmessung mittels Laufzeit - schematischer Aufbau und erwarteter Signalverlauf.

Durch Kenntnis von Δs und Δt lässt sich die Geschwindigkeit $v = \Delta s / \Delta t$ bestimmen.

¹²Der Begriff umfasst Verfahren welche das Abgas nach dem Verbrennungsmotor bis zum Auspuffende emissionsmindernd behandeln. Dies wird in vielen Fällen durch Katalysatoren, Partikelfilter etc. erreicht.

5.1.1 mechanischer Aufbau

Die Messungen wurden jeweils mit einem PVC-Rohr (Panzerrohr aus dem Elektroinstallationsbereich) und einem aus Karton gedrehten Rohr durchgeführt. Der sehr einfache Aufbau macht etwaige Modifikationen / Veränderungen schnell und kostengünstig möglich. Das Messrohr wurde dabei so an das Auspuffende des Fahrzeuges adaptiert, dass dieses dicht umschlossen wurde.

Der Sondenabstand wurde „variabel“ vorgesehen um die Auswirkungen auf die Signalamplituden untersuchen zu können und den Einfluss des Sondenabstands auf die Laufzeitdifferenz zu beobachten.

An Abbildung 5.26 sind die Abmessungen für das Messrohr mit dem „variablen“ Sondenabstand ersichtlich. Die Länge L beim Papierrohr ist 420 mm und beim PVC-Rohr 750 mm ($L_{Ende} = 50$ mm) bzw. 1420 mm ($L_{Ende} = 720$ mm).

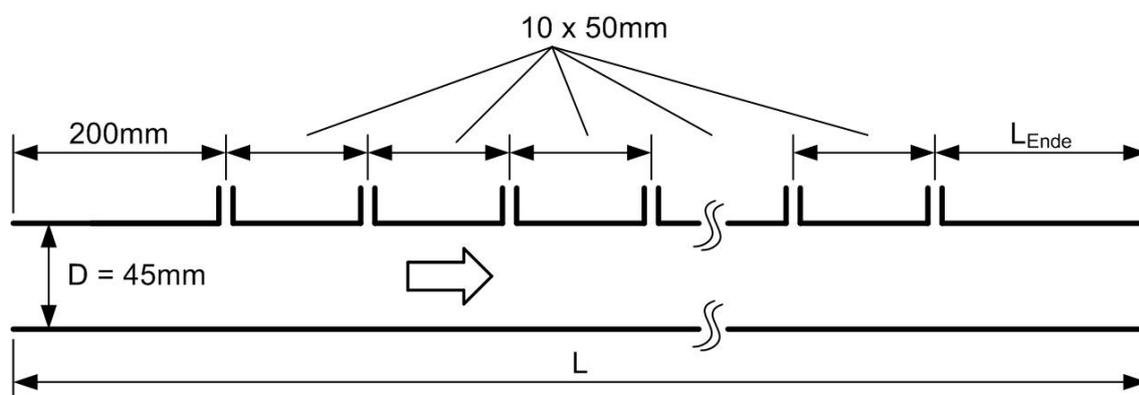


Abbildung 5.26: Konstruktionszeichnung Messrohr D - Rohrdurchmesser, L - Rohrlänge, L_{Ende} Abstand vom Rohrende bis zur Messöffnung.

Durch die vielen Messpunkte ist es möglich den Abstand der Drucksonden rasch zu variieren und dadurch den Einfluss auf das Messergebnis zu untersuchen. Nicht benötigte Öffnungen wurden mit einem Klebeband abgeklebt. Das Messrohr wurde formschlüssig an das Auspuffende des Autos montiert. Somit ist die erste Messöffnung 20 cm hinter dem Auspuffende.

Die Abgastemperatur wurde durch eine der nicht verwendeten Öffnungen gemessen.

5.2 Elektronik

Die Erfassung und Signalkonditionierung der unterschiedlichen Messgrößen ist schematisch in Abbildung 5.27 dargestellt. In den folgenden Unterpunkten wird näher auf die Signalkette eingegangen.

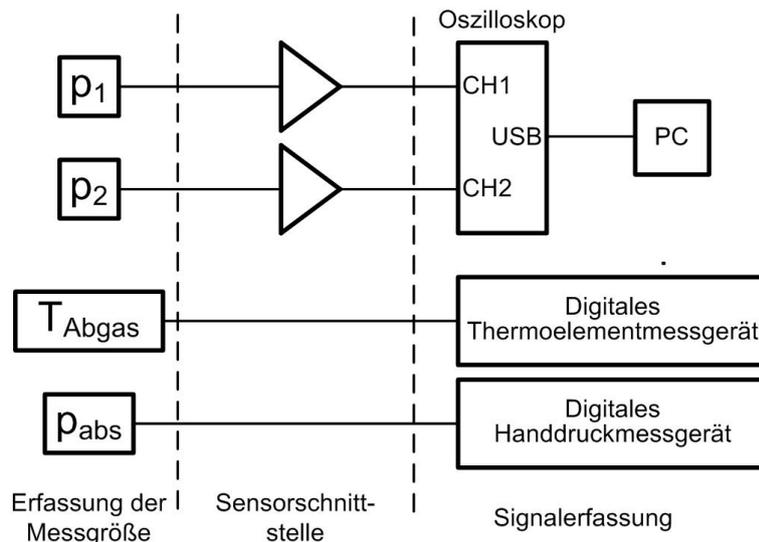


Abbildung 5.27: schematische Übersicht der Signalkette.

5.2.1 Erfassung der Messgrößen

Druck

Für die Erfassung der Druckschwankungen p_1 und p_2 im Messrohr werden Drucksensoren mit einer schnellen Ansprechzeit, einer guten Empfindlichkeit und einem analogen Ausgang benötigt.

Eine schnelle Ansprechzeit ist nötig um Messfehler durch Glättung bzw. Tiefpassfilterung bei einem zu raschen Signalwechsel zu verhindern.

Drucksensoren mit digitalem Messwertausgang (SPI, I2C) können bei diesem Messprinzip nicht angewandt werden, da bedingt durch die serielle Kommunikation eine Abtastung der Druckwerte zum gleichen Zeitpunkt ausgeschlossen ist¹³.

Für die Erfassung des Rohrrinnendrucks werden Differenzdrucksensoren verwendet, die den Druck in Relation zum Umgebungsdruck bestimmen. Durch diese Messanordnung können Drucksensoren verwendet werden, welche den Bereich der Druckschwankungen, über den gesamten Drehzahlbereich, komplett abdecken. Der Vorteil liegt in einer guten Ausnutzung des Sensormessbereiches und einer guten Sensibilität. Ein weiteres Auswahlkriterium stellt das Ansprechverhalten dar, das für die Erfassung pulsierender Druckschwankungen von großer Bedeutung ist. Für das Ansprechverhalten wird oftmals die T90-Zeit angegeben. Bei einer Eingangsdruckänderung von 0 auf 100% des Messbereiches, wird die Zeitdauer zwischen der Änderung des Ausgangssignals von 10% auf 90% als T90-Zeit bezeichnet.

Der ausgewählte Drucksensor, SCX05DNC [22] von der Firma Honeywell, verfügt über ein Sensorelement auf Chipbasis und gewährleistet durch weitere Maßnahmen (Lasertimmung, Temperaturkompensation) einen stabilen und genauen Messwert. Das Ausgangssignal steht als Brückenspannung zur Verfügung, die ratiometrisch zur Versorgungs-spannung ist. Der verwendete Drucksensor hat einen Messbereich von $\pm 5 \text{ psi}$ ¹⁴, was ca. $\pm 350 \text{ mbar}$ entspricht. Die Ausgangsspannung beträgt 1 mV bei 1 V Brückenversorgung je

¹³Bei der Marktrecherche konnte ich keine digitalen Drucksensoren mit einem eigenen Sample / Hold-Eingang ausfindig machen

¹⁴pound per square inch; $1 \text{ psi} = 68,9476 \text{ mbar}$

psi. Der Drucksensor besitzt eine T90-Zeit von $100 \mu s$. Dies sollte für die ersten Messungen ausreichend sein.

Die Messung des Absolutdruckes / Luftdruckes geschieht mit einem Handdruckmessgerät¹⁵. Das ist insofern für erste Evaluierungsmessungen in Ordnung, da nur ein kurzer Zeitraum und bei lokaler Position des Autos gemessen wird und der Luftdruck in der Regel keinen schnellen Schwankungen unterliegt. Der Absolutdruck wird für die Berechnung der Abgasdichte benötigt.

Temperatur

Die Temperatur im Messrohr wird durch einen Thermoelement-Einsteckfühler vom Typ K (NiCr/Ni) erfasst. Ein Thermoelement vom Typ K besitzt eine Temperaturfestigkeit bis $1200^{\circ}C$ und verfügt über eine gute Empfindlichkeit mit $40 \mu V/^{\circ}C$ sowie eine gute Linearität in einem Temperaturbereich von 0 bis $1000^{\circ}C$. Die Toleranz beträgt $\pm 1,5^{\circ}C$ oder $0,004 \cdot |Temperatur|$, bei einer Temperatur $> 375^{\circ}C$ - aus [21]. Diese Eigenschaften reduzieren den Verstärkungs- und Verarbeitungsaufwand im Erfassungssystem deutlich. Für die Abschätzung und Überprüfung des Laufzeitprinzips mit dem hier vorgestellten Aufbau wird die Temperatur mit einem digitalem Thermoelementmessgerät¹⁶ erfasst und händisch im Messprotokoll notiert. Diese ist insofern korrekt, da die Abgastemperatur generell keinen raschen Schwankungen unterliegt und die Messperioden mit maximal einer Sekunde relativ kurz gewählt wurden.

5.2.2 Sensorschnittstelle

Um die Brückenspannung der Differenzdrucksensoren vernünftig mit dem Oszilloskop messen zu können wurde das Ausgangssignal mit der in Abbildung 5.28 dargestellten Schaltung aufbereitet. Bei der Schaltung handelt es sich um einen diskret aufgebauten Instrumentenverstärker. Mit dieser Schaltung ist es möglich, eine Potentialdifferenz massefrei zu erfassen und eine massebezogene verstärkte Ausgangsspannung zu messen. Die Ausgangsspannung lässt sich durch eine Offsetspannung am positiven Verstärkereingang von OPV3 beeinflussen.

¹⁵KIMO Absolutdruckmessgerät MP55

¹⁶Voltcraft IR 1200-50D USB

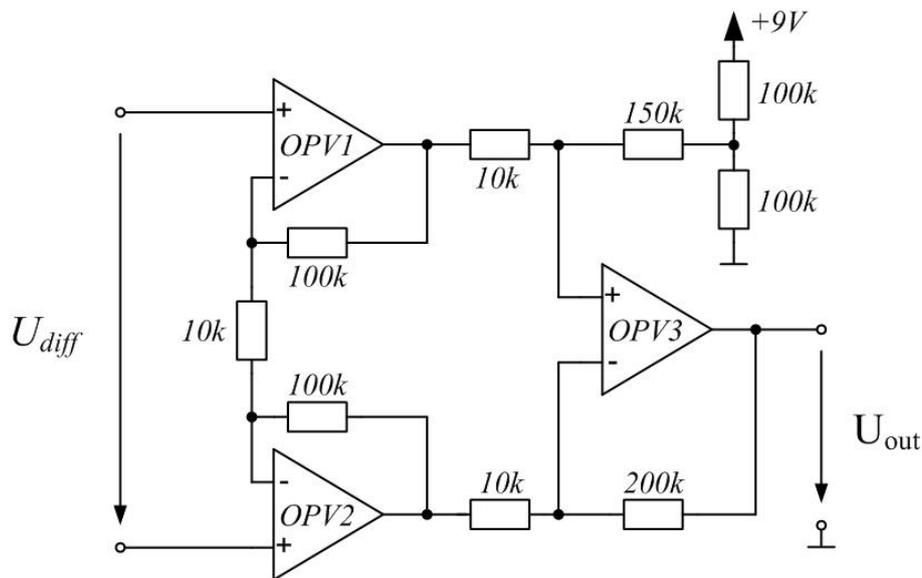


Abbildung 5.28: Instrumentenverstärker.

Das Laufzeitprinzip stellt keine großen Ansprüche an Genauigkeit und Offset der Signalverstärkung. Für die Bestimmung der Laufzeit wird die zeitliche Differenz von Signalmerkmalen (Flankenwechsel, Maximas, Minimas) herangezogen - die je nach Anwendungsfall definiert / ausgewählt werden.

Aus diesem Grund wurde die Schaltung mit drei Operationsverstärkern vom Typ LM324 aufgebaut. Der LM324 besitzt ein GBW^{17} -Product von 1MHz und erlaubt Single Supply Betrieb.

5.2.3 Signalerfassung

Die verstärkte Brückenspannungen der Drucksensoren wurde mit einem USB-Speicheroszilloskop mit einer Abtastfrequenz von 62,5 MHz erfasst und als Matlabfile für die weitere Datenverarbeitung abgespeichert. Die Temperatur wurde mit einem digitalen Messgerät für Thermoelementmessungen erfasst und notiert. Der Absolutdruck wurde mit dem Handdruckmessgerät gemessen und protokolliert.

5.3 Software

Die aufgezeichneten Rohwerte werden mit einem in Matlab implementierten Algorithmus bearbeitet und analysiert. Abbildung 5.29 zeigt schematisch die Berechnungsgruppen im Algorithmus.

¹⁷Gain Bandwith

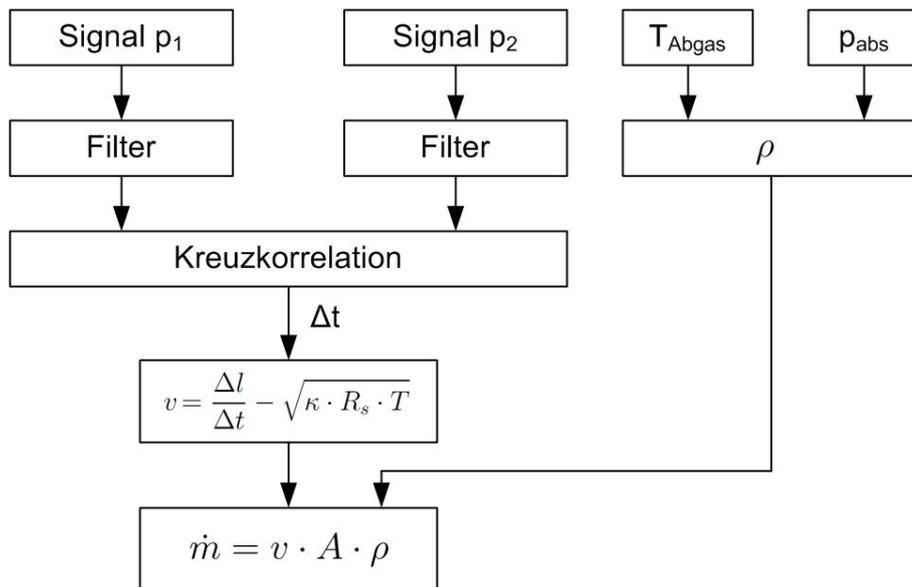


Abbildung 5.29: Funktionelle Übersicht über den Berechnungsalgorithmus.

5.3.1 Signalverarbeitung

Die computerunterstützt erfassten Messsignale p_1 und p_2 können einer Filterung unterzogen werden. Mit dem Filter ist die Möglichkeit gegeben Störungen und hohe Pulsationsfrequenzen zu entfernen. Es wird ein Tiefpassfilter mit variabler Grenzfrequenz f_g und 10-facher Ordnung verwendet. Mit dem Filter kann der Einfluss der Signalfrequenzen auf das Ergebnis der Kreuzkorrelation untersucht werden.

Bei einem Vierzylinder Viertaktmotor treten pro Umdrehung zwei Zünd- bzw. Verbrennungstakte auf. Im Ausschubtakt kommt es zu einer Druckerhöhung bzw. zu kurzen Druckimpulsen im Abgasstrang, die sich mit den Drucksensoren messen lassen. Die Hauptfrequenz der Druckimpulse hängt von der Motordrehzahl (R_r in Upm) und der Anzahl der Zylinder N ab und berechnet sich wie folgt:

$$f = \frac{R_r}{60} \cdot \frac{N}{2} \quad (18)$$

Für einen Vierzylindermotor mit $N = 4$, welcher im Leerlauf $R_r = 900 \text{ Upm}$ betrieben wird, ergibt sich somit für f eine Frequenz von 30 Hz. Dem Hauptsignal mit der Frequenz f überlagern sich Signalanteile mit einem Vielfachen der Hauptfrequenz. Dies ist vor allem dadurch bedingt, dass der Ausschubvorgang eines Zylinders mehr oder weniger durch einen rechteckigen Signalverlauf charakterisiert werden kann.

Die Kreuzkorrelation ermöglicht die Feststellung einer zeitlichen Verschiebung Δt der beiden gefilterten Signale. Durch den definierten Sensorabstand Δl und der zeitlichen Verschiebung Δt der beiden Signale ergibt sich die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Druckpulsationen mit $v_p = \Delta l / \Delta t$.

Bei einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Rohr ergibt sich für die Druckpulsationen eine Fortpflanzungsgeschwindigkeit $v_p = v + c$, wobei die Schallgeschwindigkeit des Gases von der Temperatur abhängt. Eine ausführliche Herleitung / Beweis ist in [37] zu finden.

Durch diese Erkenntnis berechnet sich die mittlere Strömungsgeschwindigkeit mit der

Formel

$$v = v_p - c = \frac{\Delta l}{\Delta t} - \sqrt{\kappa \cdot R_s \cdot T}. \quad (19)$$

5.4 Ergebnisse / Versuchsauswertungen

Erste Versuche wurden mit einem Papierrohr (Durchmesser = 45 mm) bei Leerlauf mit ca. 900 U/min durchgeführt. Der Abstand zwischen den Differenzdrucksensoren beträgt 15 cm und der erste Sensor ist 20 cm hinter dem Auspuffende montiert. Abbildung 5.30 zeigt die Rohsignale und die gefilterten Signale mit einer Grenzfrequenz von 1000 Hz beim ersten Versuchsaufbau.

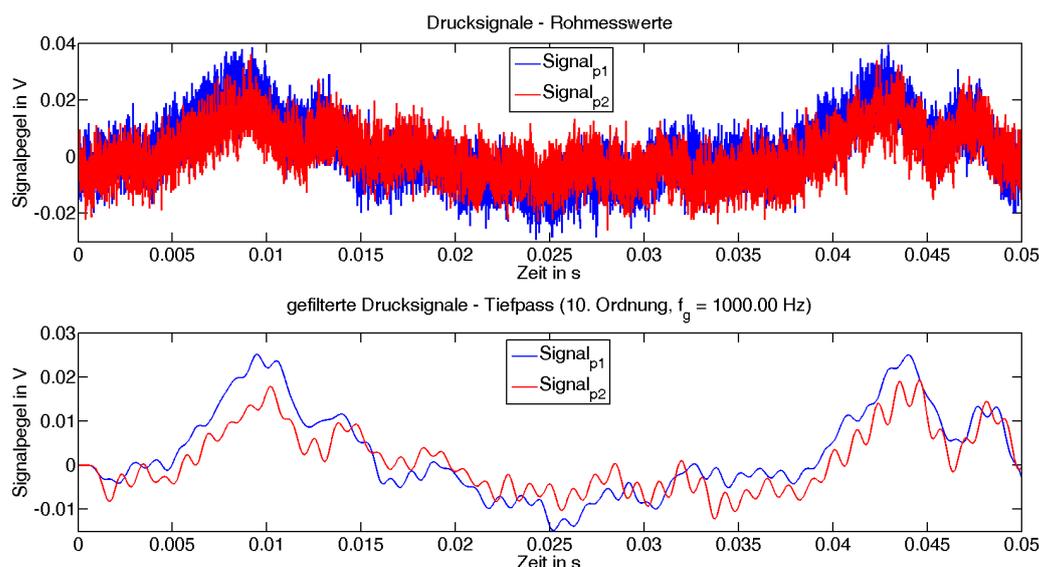


Abbildung 5.30: Rohmesswerte und gefilterte Messwerte der Drucksensoren p_1 und p_2 .

Bei einer Abgastemperatur von 40°C ergibt sich eine Schallgeschwindigkeit von $354,63\text{ m/s}$. Die Rohmesswerte wurden einer Tiefpassfilterung (10. Ordnung, Grenzfrequenz = 1 kHz) unterzogen und anschließend die zeitliche Verschiebung mit der Kreuzkorrelation bestimmt. Aus dem Abstand der Drucksensoren mit $0,15\text{ m}$ und der zeitlichen Verschiebung von $0,379\text{ ms}$ ergibt sich eine Fortpflanzungsgeschwindigkeit von $382,34\text{ m/s}$.

Die Differenz der beiden berechneten Geschwindigkeiten ist die mittlere Strömungsgeschwindigkeit mit $27,71\text{ m/s}$, was einen realistischen Messwert für einen Motor im Leerlauf darstellt. Die Strömungsgeschwindigkeit kann durch den Rohrdurchmesser beeinflusst werden - größerer Rohrdurchmesser \rightarrow geringe Strömungsgeschwindigkeit und umgekehrt. Weitere Messreihen im Leerlauf zeigten Abweichungen von $\pm 15\text{ m/s}$. Um den Einfluss eines elastischen Rohres, wie dem Papierrohr, zu eliminieren wurde das Messrohr gegen ein Kunststoffrohr ausgetauscht.

In den Abbildungen 5.31 und 5.32 sind die Rohsignale und die gefilterten Signale (Tiefpass, 10. Ordnung, $f_g = 1\text{ kHz}$) mit einigen Berechnungsergebnissen dargestellt. Die Messungen wurden bei einer durchschnittlichen Abgastemperatur von 40°C durchgeführt. In beiden Abbildungen wurde die Kreuzkorrelation mit den Rohmesswerten und den gefilterten Messwerten im Signalbereich von $0,005$ bis $0,1\text{ s}$ durchgeführt um Beeinflussungen durch

das Filter am Beginn der Messwerte zu eliminieren.

Die Messwerte in Abbildung 5.31 wurden mit einem verkürztem Messrohr mit einer Länge von 0,75m durchgeführt. In der linken Hälfte ist der Signalverlauf bei einem Sensorabstand von 10 cm ersichtlich. In der rechten Hälfte beträgt der Sensorabstand 50 cm. Die Signale in der linken Hälfte besitzen nahezu die gleiche Amplitude und keine Verschiebung untereinander. Die Zeitdifferenz beträgt 0 s. In der rechten Hälfte ist der Signalpegel der beiden Signale unterschiedlich und auch eine Zeitdifferenz von ca. $\Delta t = 3,8 \text{ ms}$ ist feststellbar. Durch den Sensorabstand von 0,5 m ergibt sich eine rechnerische Fortpflanzungsgeschwindigkeit von ca. 130 m/s. Dieser Wert ist deutlich kleiner als die Schallgeschwindigkeit und kann somit nur durch einen Messfehler bzw. durch die Sensoranordnung - 2.Sensor befindet sich nur 5 cm vor dem Rohrende - erklärt werden.

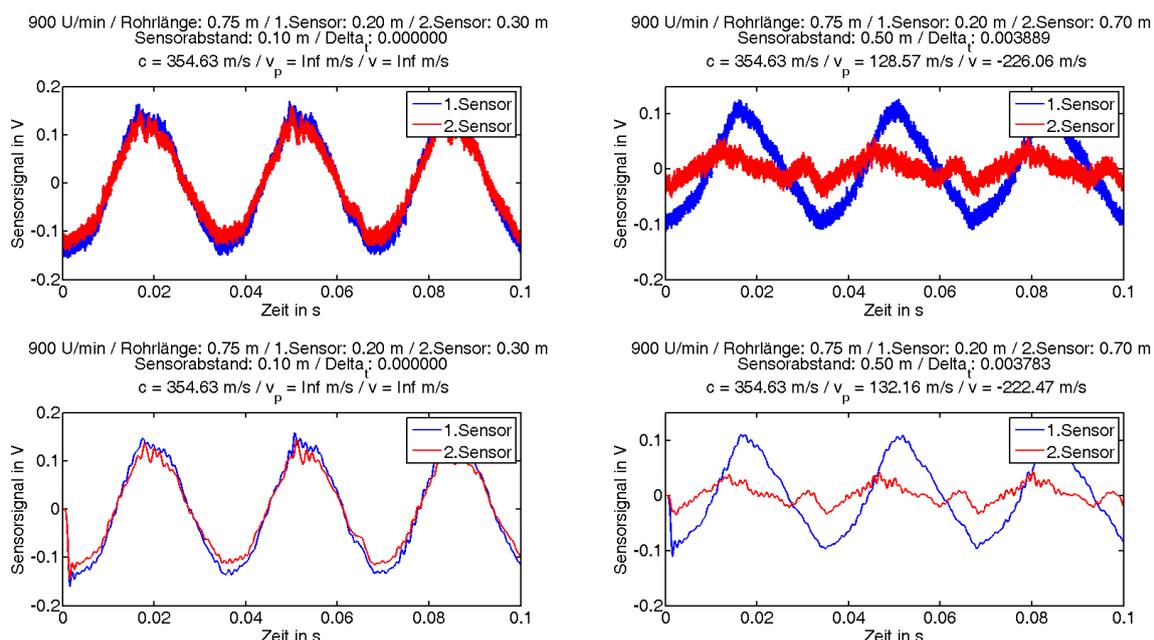


Abbildung 5.31: Messung am Kunststoffrohr mit einer Länge von 0,75 m bei 900 U/min.

In Abbildung 5.32 sind die Messungen und Berechnungen mit einem Messrohr der Länge 1,42 m dargestellt. Die Anordnung der Sensoren wurde gleich belassen. Die Berechnungen zeigen, dass keine Differenzen zwischen den Signallaufzeiten festgestellt werden können und somit keine Aussage über die mittlere Strömungsgeschwindigkeit getroffen werden kann.

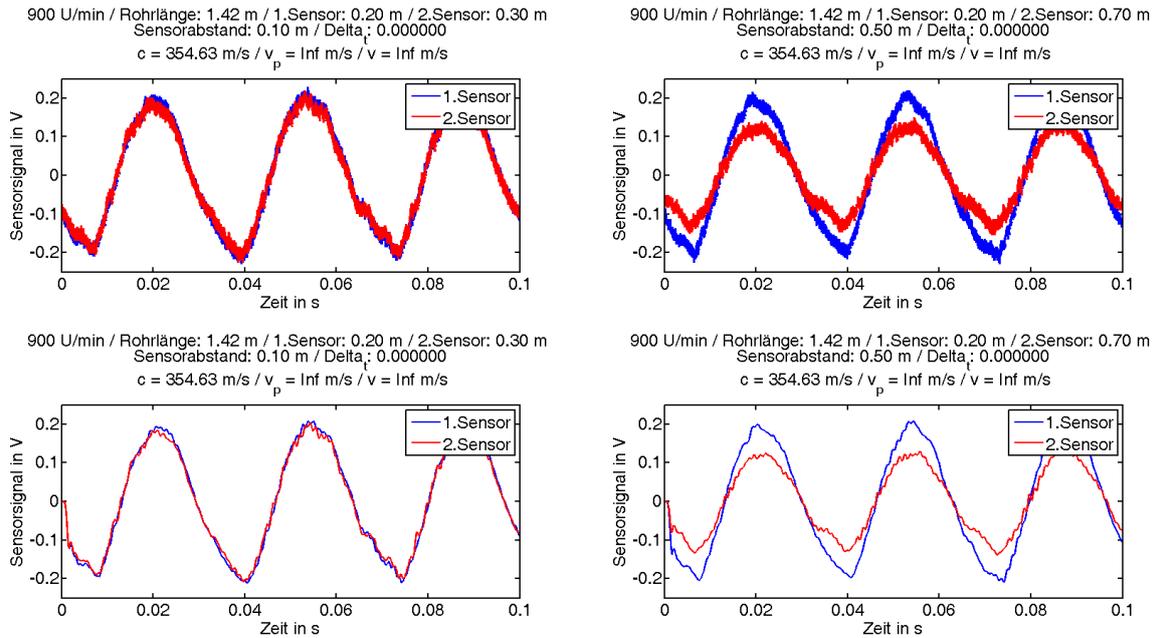


Abbildung 5.32: Messung am Kunststoffrohr mit einer Länge von 1,42m bei 900 U/min.

Es wurden weitere Messreihen bei unterschiedlichen Drehzahlen (1400 und 2200 U/min), unterschiedlichen Sensorpositionen und Sensorabständen durchgeführt. Bei keiner der Messreihen konnte eine plausible Signallaufzeit bzw. mittlere Strömungsgeschwindigkeit festgestellt werden.

Aus diesem Grund wurden nochmals Messungen mit dem Papierrohr und dem Plastikrohr mit einer Länge von 0,75 m durchgeführt, um mögliche Fehler im Messaufbau bzw. in der Auswertung zu finden. Abbildung 5.33 zeigt die Messwerte und Berechnungsergebnisse vom Papierrohr in der linken Hälfte und vom Plastikrohr in der rechten Hälfte. Die Sensorpositionen und der Sensorabstand von 10 cm ist bei beiden Rohren gleich. Das Papierrohr hat eine Gesamtlänge von 40 cm und besitzt den gleichen Innendurchmesser wie das Plastikrohr.

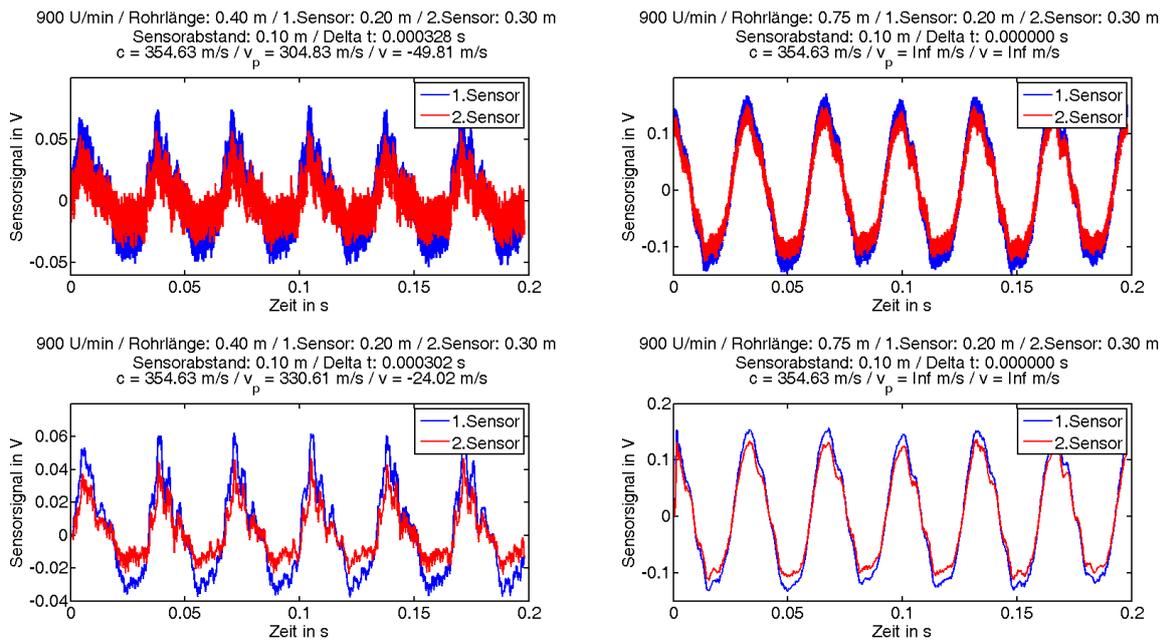


Abbildung 5.33: Vergleich zwischen Papierrohr (links) und Plastikrohr (rechts) bei 900 U/min.

Aus den Berechnungsergebnissen ist ersichtlich, dass beim Papierrohr eine Signallaufzeitdifferenz detektiert wurde. Jedoch ergeben die berechneten Werte keinen physikalischen Sinn und sind somit bedeutungslos. Wie schon zuvor, bleibt beim Plastikrohr die Signallaufzeitdifferenz bei 0.

Somit wurde gezeigt, dass die zuvor ermittelten Werte korrekt sind und der Einfluss auf das Ergebnis durch das Material bzw. Ausführung des Messrohres bedingt ist.

Weiters kann festgestellt werden, dass die Signalamplitude beim Papierrohr deutlich geringer als beim Plastikrohr ist, obwohl das Papierrohr kürzer und der Druckimpuls bzw. die Motordrehzahl gleich waren.

5.5 Diskussion

Aus den vorliegenden Messergebnissen ist ersichtlich, dass die Messung der Strömungsgeschwindigkeit mittels Laufzeitunterschied durch Detektion von Druckimpulsen zu keinen beständigen und vertrauensvollen Ergebnissen führt.

Bei Gasen, im speziellen beim Übergang von Gasströmungen in den Freiraum, muss die Akustik und deren physikalische Grundlagen beachtet werden. In [14] werden Grundlagen der Raumakustik und das Verhalten von akustischen Wellen in einem Rohr behandelt. So ist die Wellenausbreitung in nur eine Raumrichtung im Rohr von der Rohrabmessung und der Wellenlänge λ abhängig. In der Akustik werden oftmals Untersuchungen zur Bestimmung des Absorbtionsgrades von Materialien mit dem Kundtschem Rohr durchgeführt. Dieses Versuchsrohr besitzt ein relativ großes Verhältnis zwischen Rohrlänge und Durchmesser - die für die Laufzeitmessung verwendeten Messrohre besitzen ebenfalls ein großes Verhältnis.

In [14] wird der Fall behandelt, falls das Kundtsche Rohr ein offenes Ende besitzt, also

so wie bei einer Orgelpfeife oder bei dem hier verwendeten Versuchsaufbau. Hierbei wird am Rohrende, am Übergang von Rohr auf Freiraum, näherungsweise eine Kugelwelle abgestrahlt. Am Übergang Rohrende und Freiraum kann der Reflexionsfaktor r durch die Impedanz im Rohr \underline{Z}_{rohr} und der Kugelimpedanz \underline{Z}_{Ku} bestimmt werden.

Für eine ebene Welle wird die Schallkennimpedanz \underline{Z}_0 , das ist der Wellenwiderstand des Mediums, verwendet, was zugleich auch die Rohrimpedanz ist. Die Schallkennimpedanz berechnet sich aus den Mediumsparametern Dichte und Schallgeschwindigkeit, wobei bei Gasen der Einfluss der Temperatur auf Dichte und Schallgeschwindigkeit beachtet werden muss - näheres dazu in den Punkten 3.4 und 3.5. Somit ergibt sich für eine Abgastemperatur von 40°C eine Schallkennimpedanz von

$$\begin{aligned}\underline{Z}_0(40^\circ C) &= \rho(40^\circ C) \cdot c(40^\circ C) = \\ &= 1,128 \text{ kg/m}^3 \cdot 354,63 \text{ m/s} = \\ &= 399,9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} = 399,9 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^3} \\ &\approx 400 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^3}.\end{aligned}$$

Die Kugelimpedanz ist abhängig vom Verhältnis r/λ . Der Parameter λ ist seinerseits abhängig von der Schallgeschwindigkeit und der Frequenz. Hier wird für die Frequenz die 2-fache Motordrehzahl nach (18) verwendet. Bei einer Motordrehzahl von 900 U/min beträgt die Wellenlänge $\lambda_1 = 11,82 \text{ m}$ und bei einer Motordrehzahl von 3000 U/min beträgt die Wellenlänge $\lambda_2 = 3,55 \text{ m}$.

Mit folgender Formel lassen sich die Werte für die Kugelimpedanz bei den zwei Wellenlängen berechnen.

$$\underline{Z}_{Ku} = \underline{Z}_0 \cdot \left[\frac{(2 \cdot \pi \cdot \frac{r}{\lambda})^2}{1 + (2 \cdot \pi \cdot \frac{r}{\lambda})^2} + j \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot \frac{r}{\lambda}}{1 + (2 \cdot \pi \cdot \frac{r}{\lambda})^2} \right]$$

Mit $r = 0,0225 \text{ m}$ und λ_1 ergibt sich eine Kugelimpedanz

$$\underline{Z}_{Ku_1} = \underline{Z}_0 \cdot [0,000143 + j \cdot 0,01196].$$

Mit λ_2 ergibt sich für die Kugelimpedanz

$$\underline{Z}_{Ku_2} = \underline{Z}_0 \cdot [0,00159 + j \cdot 0,0398]. \quad (20)$$

Mit der Kenntnis von $\underline{Z}_{01} = \underline{Z}_{Rohr} = \underline{Z}_0$ und $\underline{Z}_{02} = \underline{Z}_{Ku}$ lässt sich der Reflexionsfaktor

$$r_0 = \frac{\underline{Z}_{02} - \underline{Z}_{01}}{\underline{Z}_{02} + \underline{Z}_{01}} = \frac{\underline{Z}_{Ku} - \underline{Z}_{Rohr}}{\underline{Z}_{Ku} + \underline{Z}_{Rohr}} \quad (21)$$

bestimmen.

Für beide Wellenlängen ergibt sich ein Reflexionsfaktor von nahezu -1 ($-0.9994 + j \cdot 0.0239$ bzw. $-0.9937 + j \cdot 0.0792$), was als Kurzschluss angesehen wird. In Abbildung 5.34 wird mit K der Kurzschlusspunkt bezeichnet. Dies bedeutet, dass eine Fehlanpassung vorliegt und die Welle trotz offenem Rohrende fast zur Gänze reflektiert wird. Wie auch in [14] angeführt, kann der Effekt der (Teil-)Reflexion entweder bei Mediumswechsel oder durch eine plötzliche Änderung des Querschnittes auftreten.

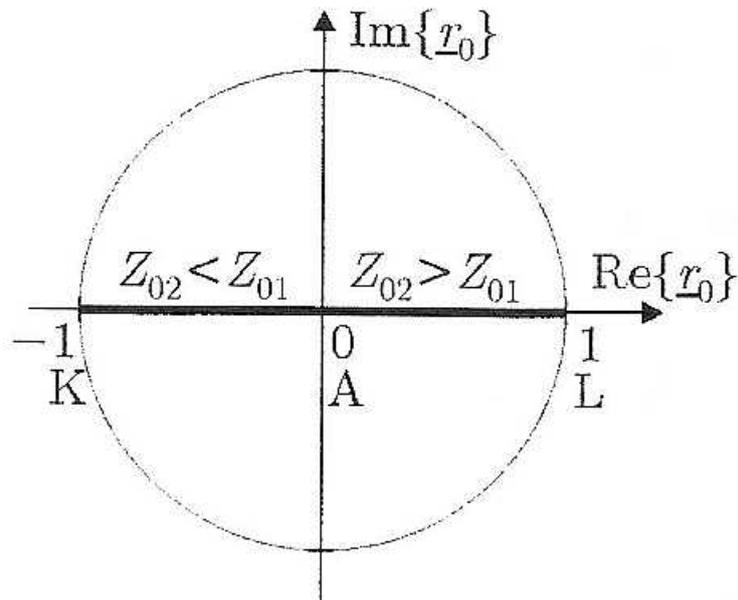


Abbildung 5.34: Ortskurve für den Reflexionsfaktor an der Mediumsgrenze [14]
 K - Kurzschluss, A - Anpassung, L - Leerlauf.

Um Anpassung zu erreichen muss Z_{Ku} gegen Z_0 gehen. Dies wird erreicht, wenn das Verhältnis $2 \cdot \pi \cdot \frac{r}{\lambda}$ sehr viel größer als 1 ist und damit der Reflexionsfaktor gegen 0 geht.

Abbildung 5.35 zeigt das Verhältnis unter Variation des Radius r für λ_1 und λ_2 .

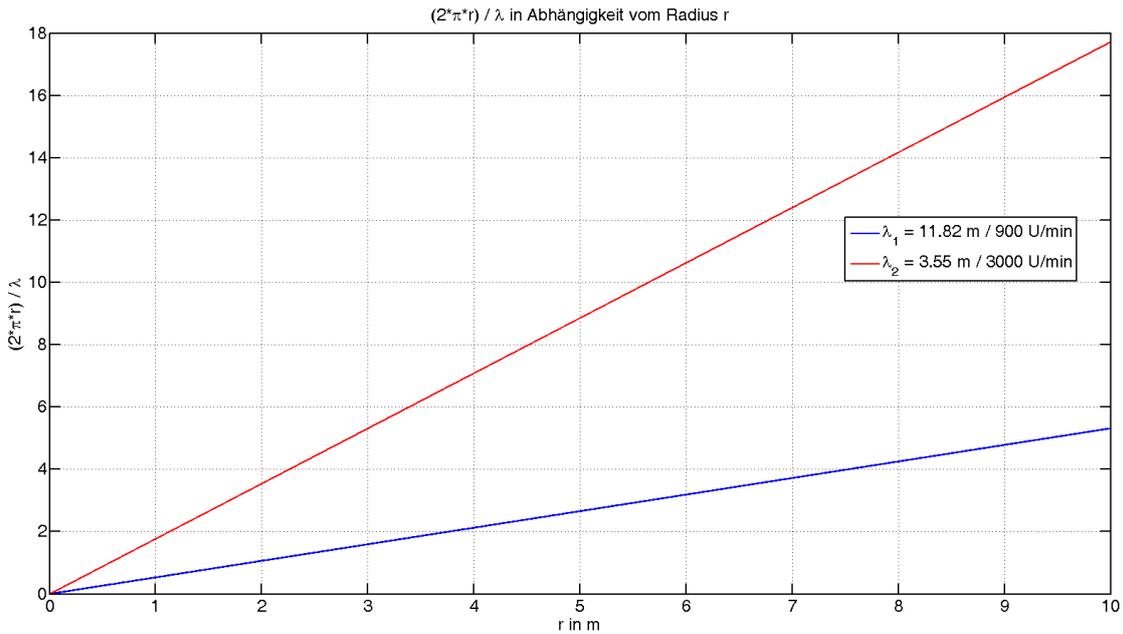


Abbildung 5.35: Einfluss von Radius r auf das Verhältnis $2 \cdot \pi \cdot \frac{r}{\lambda}$ bei unterschiedlichen λ -Werten.

Aus der Abbildung 5.35 ist ersichtlich, dass die Dimensionen für das Rohr sehr groß werden und dadurch für eine mobile Anwendung uninteressant / unbrauchbar werden.

Eine weitere Möglichkeit bestünde darin, dass das Messrohr mit einem exponentiell größer werdenden Horn ausgeführt wird. Neben dem Platzbedarf sprechen auch die Fertigungskosten gegen ein Messrohr mit Horn.

Auf Grund dieser Erkenntnisse wurde nochmals ein Versuch durchgeführt, wobei ein Messrohr aus Maschengitter mit einer Maschenweite von 1 cm geformt wurde. Dieses Rohr diente als Halterung für die Drucksensoren. Das Messrohr wurde direkt an das Auspuffende angeflanscht und die Druckwerte bei Leerlauf mit 900 U/min und bei einem Sensorabstand von 15 cm aufgenommen. Leider konnte auch bei diesem Messaufbau keine zuverlässige und vernünftige Laufzeitverschiebung festgestellt werden.

Zu Beginn der Versuchsdurchführungen traten Signalverläufe auf, die nicht unbedingt einen plausiblen bzw. interpretierbaren Verlauf darstellten. Die Ursachen waren:

- Anfänglich hatten die aufgezeichneten Drucksignale starke Sprünge im Signalverlauf. Die Ursache hierfür war die 12V-Bordnetzspannung vom Auto, welche für die Versorgung der Verstärkerstufe verwendet wurde. Aus diesem Grund wurde die Verstärkerstufe mit einer 9V-Blockbatterie versorgt.
- Die Drucksignale hatten einen deutlich erkennbare „hochfrequente“ Störung im Signalverlauf. Die Frequenzanalyse der Signale zeigte einen Peak bei 52 kHz. Da das Problem bei Probetrieb am Labortisch nicht auftrat, aber vor Ort am Auto klar sichtbar war, konnte das Problem durch Versorgen des Laptops mit einem Netzteil behoben werden. Hier haben sich wohl im Akkubetrieb des Laptops und dem mit einem Netzteil versorgten Oszilloskop über das USB-Kabel Störungen auf die Masse übertragen.

6 Messung mittels Differenzdruck

Als zweites Messverfahren wird die Geschwindigkeitsmessung mittels Wirkdruckmessung realisiert, da dieses Messsystem robust gegen Vibrationen ist, einen stabilen mechanischen Aufbau und ein noch relativ preiswertes System darstellt.

6.1 Hardware

Um die Beeinflussungen durch das Messsystem auf den Abgasstrang / Motor so gering wie möglich zu halten, wird auf ein Messsystem mit Blenden oder ähnlichem verzichtet. Deshalb bietet sich die Geschwindigkeitsmessung mittels Staudrucksonde an. Hier gibt es viele verschiedene Ausführungsvarianten. Drei konstruktiv unterschiedliche Sonden werden in diesem Abschnitt näher untersucht.

Prandtl-Sonde

Die typische Prandtl-Sonde, wie in Abbildung 3.3 dargestellt, ermöglicht eine punktuelle Messung der Strömungsgeschwindigkeit im Rohr. Die Sonde ist mit ca. 120 € noch relativ preiswert und je nach Ausführung für hohe Temperaturen geeignet. Die gebogene Bauform, welche die Montage und Demontage erschwert bzw. die mittige und parallele Ausrichtung der Sonde entgegen der Flussrichtung stellen negative Auswahlkriterien dar.

Annubar- / Mehrloch-Sonde

Bei der Annubar- bzw. Mehrloch-Sonde handelt es sich um eine modifizierte Prandtl-Sonde in Stabform, die durch mehrere Bohrlöcher den gemittelten Differenzdruck im Rohr erfasst. Je nach Hersteller besitzt die Sonde eine spezielle strömungsoptimierte Form, die sich positiv auf den Messeffekt auswirkt. So wird mit rauteähnlichen Profilen, aber auch speziell bearbeiteten Kantenformen geworben. Diese Bauform wird oft bei hohen Temperaturen und Drücken wie z.B. Dampf und bei partikelhaltigen Gasen eingesetzt. Eine Standard-Annubar-Sonde für einen Rohrdurchmesser kleiner 100 mm kostet ca. 600 €. Nachteilig ist, dass die Sonde, bedingt durch die Messbohrungen, exakt für den jeweiligen Rohrdurchmesser angefertigt wird und somit an einen Rohrdurchmesser gebunden ist.

Abbildung 6.36 zeigt eine Mehrlochsonde vom Hersteller *SKI* [20], welche bei diesem Projekt zum Einsatz kommt. Die Sonde wird im weiteren als SKI-Sonde bezeichnet.

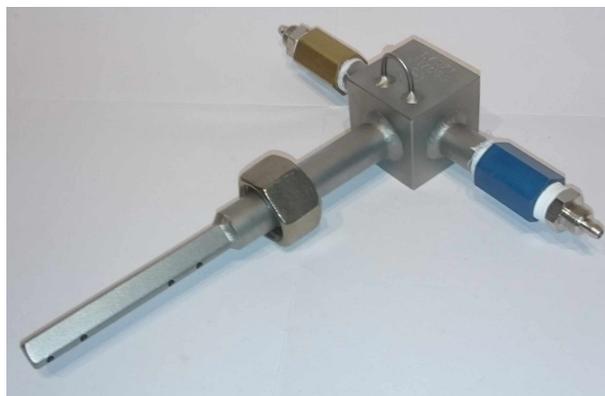


Abbildung 6.36: Foto der verwendeten Mehrlochsonde.

Truckflow-Staudrucksonde

Bei der Truckflow-Staudrucksonde [4] handelt es sich um eine Eigenkonstruktion aus dem Hause *sys-tec-controls*. Die Sonde wurde speziell für die Gasmengenmessung im Automotiven Umfeld konstruiert und wird in Serienfahrzeugen bei der Regelung der Abgasrückführung eingesetzt. Die in gerader Bauform ausgeführte Sonde besitzt zwei Druckmessöffnungen, welche den Wirkdruck in der Rohrmitte erfasst. Dadurch ergibt sich eine geringere Strömungsbeeinflussung durch die Sonde als im Vergleich zur Mehrloch-Sonde. Preislich liegt die aus Aluminium gefertigte Sonde bei ca. 150 € und kann mit einem für das Automotiv Umfeld angepassten und CAN-Bus fähigen Sensorplattform mit dem Namen TFI4 [4] ausgewertet werden.

In Abbildung 6.37 ist die Truckflow-Sonde dargestellt, welche bei diesem Projekt zum Einsatz kommt.



Abbildung 6.37: Foto der Truckflow-Staudrucksonde.

Sondenauswahl

In dieser Arbeit werden Messungen mit der Truckflow-Sonde und der SKI-Sonde durchgeführt. Diese Sonden sind für raue Umgebungsbedingungen geeignet. Die Bauformen ermöglichen eine leichte Montage und Demontage für etwaige Wartungszwecke. Zusätzlich muss durch die symmetrische Ausführung der Anström- bzw. Abströmseite der Sonden keine spezielle Berücksichtigung der Flussrichtung erfolgen. Dadurch entfällt eine aufwändige Kalibrierung zur Bestimmung der Faktoren und eine zusätzliche Fehlerquelle bei der Berechnung der Fließgeschwindigkeit.

Die Berücksichtigung der Flussrichtung ist bei der Prandtl-Sonde nötig und erfolgt mittels eines Sondenfaktors für die Vor- bzw. Rückwärtsrichtung bei der Bestimmung der Fließgeschwindigkeit. In [13] und [35] wird auf die Notwendigkeit der Berücksichtigung der Flussrichtung mit einem Sondenfaktor bei der Prandtl-Sonde eingegangen.

6.1.1 mechanischer Aufbau

Erst durch ein Messrohr ist es möglich mit der Staudrucksonde den Differenzdruck und schlussendlich die Abgasmasse zu bestimmen. Der Durchmesser des Messrohres hängt von dem zu messenden Abgasmassenbereich ab. Die Länge und Positionierung der Sensoren für ein gesetzeskonformes Messrohr¹⁸ im Real Driving Emissions (RDE)-Umfeld sind gesetzlich geregelt und unter [30] angeführt.

¹⁸Das gesamte Messsystem wird auch als Exhaust Flow Meter (EFM) bezeichnet.

Messrohraufbau

In Abbildung 6.38 sind die geforderten Mindestmaße lt. Gesetzgebung angegeben. Zusätzlich wurden die Maße für die Position des Temperatursensors und für die Erfassung des Absolutdruckes eingezeichnet.

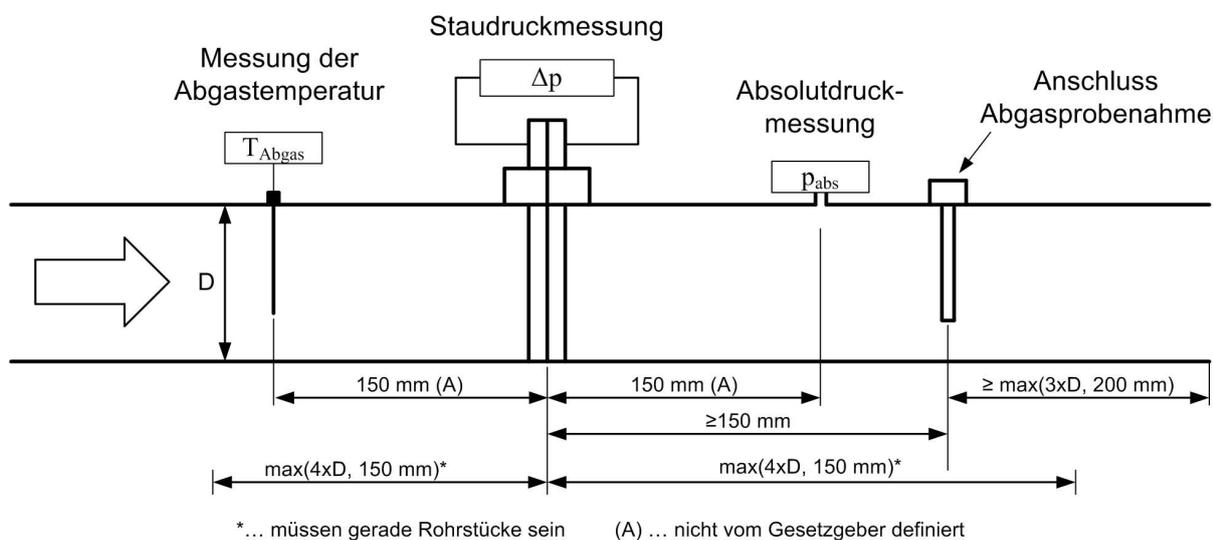


Abbildung 6.38: Anforderungen und Positionierung der Sensoren am Messrohr.

Die Abgaskonzentration wird mittels einer spezieller Mehrlochsonde nach der Staudrucksonde entnommen, wobei die Entnahmestelle lt. Gesetz mindestens 200 mm vom Rohrende entfernt sein muss.

Auswahl / Berechnung des Rohrdurchmessers

Der Rohrdurchmesser eines EFM-Rohres wird durch die zu messende Abgasmenge und unter Berücksichtigung der maximalen Strömungsgeschwindigkeit des Abgases bestimmt. Hierbei muss vor allem auf die Kompressibilität von Gasen geachtet werden. Details sind im Punkt 3.5 angeführt.

Das Messrohr sollte bei der Messung eines Mittelklasse-PKW's eingesetzt werden. Deshalb wurde die zu messende Abgasmenge mit mindestens 600 kg/h bei 400°C definiert.

Abbildung 6.39 zeigt den Zusammenhang zwischen Abgasmenge, Abgasgeschwindigkeit und Differenzdruck bei einem Rohrinne Durchmesser von 67 mm bei zwei unterschiedlichen Abgastemperaturen.

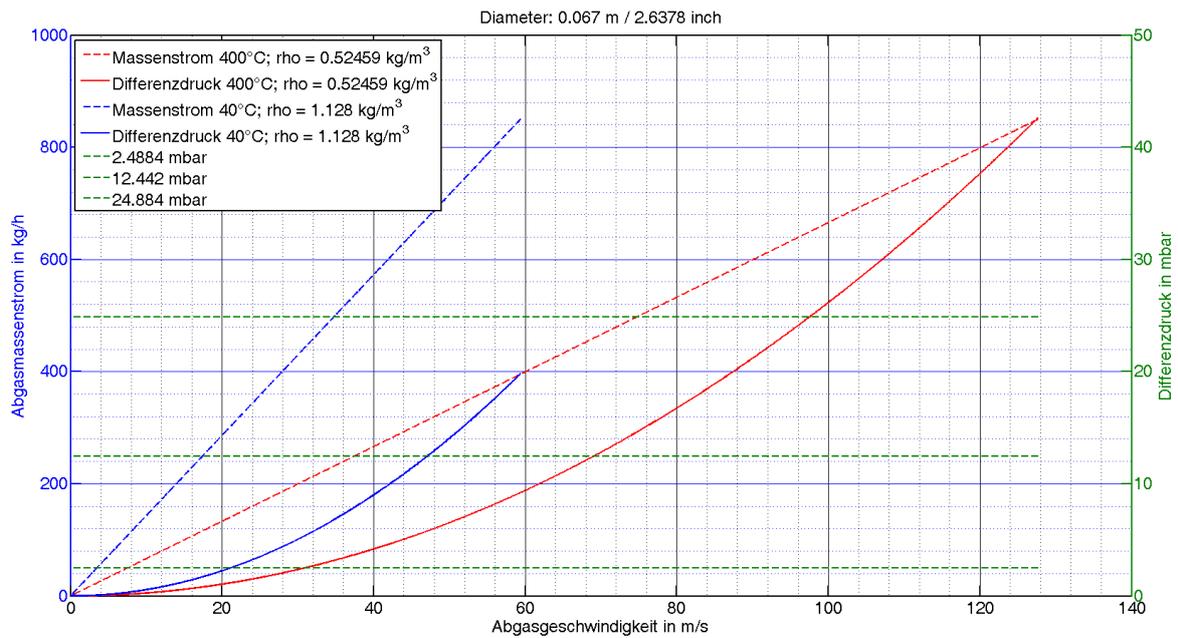


Abbildung 6.39: Zusammenhang zwischen Abgasmenge, Abgasgeschwindigkeit und Differenzdruck.

Die drei horizontalen grünen Linien zeigen den Druckmessbereich der ausgewählten Differenzdrucksensoren - näheres siehe 6.2.1

Das für dieses Projekt konstruierte und gefertigte Messrohr ist in Abbildung 6.40 dargestellt. Das Messrohr ist hier auf der Halterung für die Anhängerkupplung montiert und mit der Messbox, welche die Elektronik beinhaltet, dargestellt.

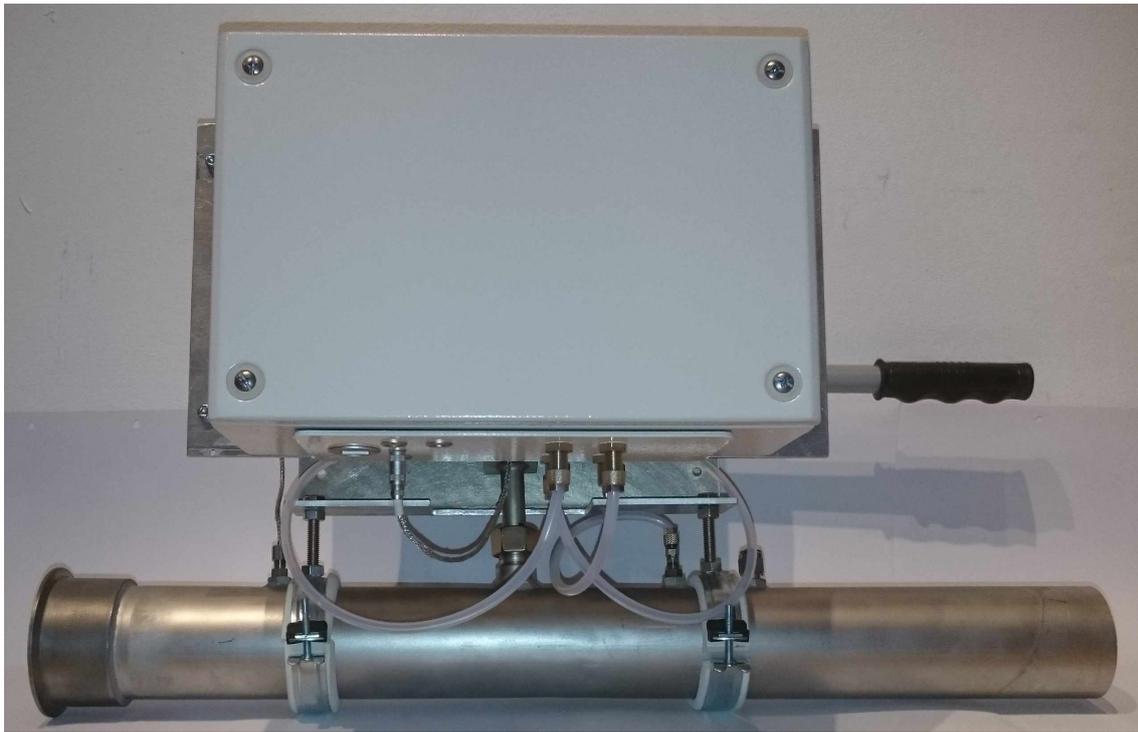


Abbildung 6.40: Messrohr mit Halterung und Messbox.

6.2 Elektronik

Für die Erfassung der Messgrößen Druck und Temperatur ist es nötig geeignete Sensoren auszuwählen und mit entsprechenden Mitteln zu digitalisieren. Die digitalen Werte sind einem Prozessrechner, häufig als Hostrechner bezeichnet, für die weitere Verarbeitung zur Verfügung zu stellen. Die gesamte Elektronik wird in einer Box verbaut, um diese vor externen Einflüssen zu schützen.

6.2.1 Erfassung der Messgrößen

Differenzdruckmessung an der Staudrucksonde

Der nötige Messbereich für die Erfassung des Differenzdruckes an der Staudrucksonde ist in der Abbildung 6.39 ersichtlich und beträgt für einen Abgasmassenstrom von ca. 600 kg/h ca. 25 mbar.

Das vom Motor ausgestoßene Abgas besitzt eine Pulsationsfrequenz, die der Drehzahl proportional ist. Nach (18) ergibt sich für einen Drehzahlbereich von 900 bis 6000 U/min, bei einem Vierzylindermotor, eine Grundpulsationsfrequenz von 30 bis 200 Hz. Die Pulsationen sind im unteren Drehzahl- und Lastbereich sehr ausgeprägt und erfordern nach [35] eine Drucksensorik mit einer vielfach höheren Grenzfrequenz als die Pulsationsfrequenz, um Messfehler zu vermeiden.

Bedingt durch den quadratischen Zusammenhang zwischen Differenzdruck und Geschwindigkeit (6), ist es nötig, dass der Drucksensor bei kleinsten Druckänderungen eine gute Sensibilität und Genauigkeit aufweist.

Am Markt stehen Differenzdrucksensoren mit digitalem Interface, beispielsweise SPI oder I^2C oder mit Analogausgang zur Verfügung. Sensoren mit digitalem Interface erlauben

Messfrequenzen bis zu 1 kHz [39]. Leider besitzen diese Drucksensoren keinen externen Triggereingang um mehrere Sensoren zu synchronisieren und so eine parallele und zeitgleiche Druckmessung mit unterschiedlichen Druckmessbereichen zu ermöglichen.

Der Hersteller *All Sensors* bietet Drucksensoren mit analogem Ausgang an, welche innerhalb von $100 \mu s$ zu 90% der Druckänderung gefolgt sind und somit eine genügend hohe Grenzfrequenz aufweisen um pulsierenden Druckschwankungen zu folgen. Das Messprinzip basiert auf der piezoresistiven Druckmessung, die als Vollbrücke ausgeführt ist und somit eine der Speisespannung proportionale Brückenspannung ausgibt, die dem anliegenden Differenzdruck entspricht.

Für die Messung des Differenzdruckes wurde der Sensor mit der Bezeichnung ADCX [40] aus dem Hause *All Sensors* ausgewählt. Durch spezielle Kompensationsmethoden wird eine hohe Genauigkeit bei kleinen Druckmessbereichen garantiert.

So wird im White Paper „Dual Die Compensation for MEMS Pressure Sensors“ [41] beschrieben, dass sich durch die Dual-Die-Kompensationsmethode Gleichtaktfehler im elektrischen und pneumatischen Bereich aufheben, was zu einer sehr guten Kompensation des Fehlers führt. Im nachfolgenden wird das Prinzip der „Dual Die Compensation“ beschrieben.

Der Differenzdrucksensor besteht aus zwei auf Silizium basierenden Drucksensorelementen, die bei der Herstellung am Siliziumwafer benachbarte Elemente waren. Dadurch wird ein nahezu identisches Verhalten hinsichtlich Material und Fertigung erreicht. Bedingt durch die Fertigung ist eine Wafelseite unbearbeitet und auf der anderen Seite ist die Elektronik bzw. Messbrücke aufgebracht. Dies führt im generellen zu unterschiedlichem Verhalten bei Druckbeaufschlagung auf der einen oder anderen Seite.

Deshalb werden durch zusätzliche Druckkanäle im Sensorgehäuse die Sensorelemente gegenseitig mit Druck beaufschlagt, was als pneumatische Kreuzkopplung bezeichnet wird. So wird erreicht, dass der Drucksensor unabhängig von der Druckbeaufschlagung am Druckmessanschluss 1 oder 2 eine nahezu gleiche Sensibilität erreicht und für Niederdruckmessungen sehr gut geeignet ist.

Zusätzlich eliminiert die gegenseitige elektrische Verschaltung der Brückenausgänge Effekte, die durch thermisches Driften der beiden Drucksensorelemente verursacht werden. Das wird als elektrische Kreuzkopplung bezeichnet.

In Abbildung 6.41 ist die Verschaltung für die elektrische und pneumatische Kreuzkopplung zu sehen.

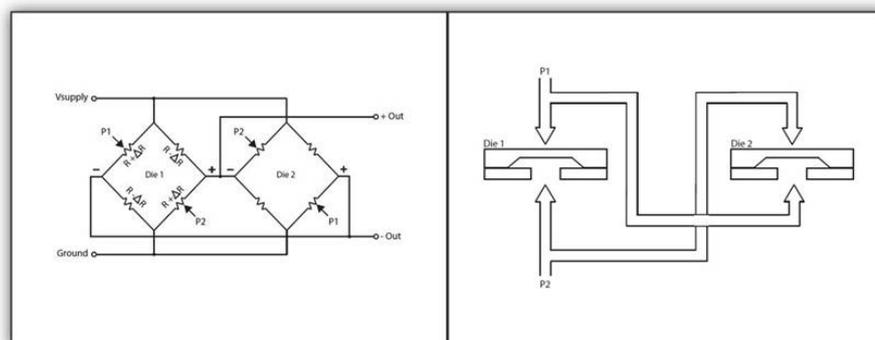


Abbildung 6.41: elektrische und pneumatische Kreuzkopplung am Drucksensor [41].

Um im unteren Druckmessbereich eine gute Auflösung zu erreichen werden für die Erfas-

sung des Differenzdruckes an der Staudrucksonde vier Drucksensoren verwendet. Tabelle 3 listet die ausgewählten Sensoren auf.

Bezeichnung	Messbereich		max. Betriebsdruck
	in inH_2O	in $mbar$	in $mbar$
1 INCH-D-MV	± 1	± 2.49	248.84
5 INCH-D-MV	± 5	± 12.44	497.68
10 INCH-D-MV	± 10	± 24.88	497.68
30 INCH-D-MV ¹⁹	± 30	± 74.65	497.68

Tabelle 3: Messbereich der Differenzdrucksensoren

Durch den hohen maximalen Betriebsdruck kommt es zu keiner Beeinflussung / Beschädigung der Messsensorik. Daher können alle Differenzdrucksensoren druckseitig parallel geschaltet werden ohne zusätzliche Schutzmaßnahmen für einen Sensor, wie z.B. eine mechanische Abkopplung, schaffen zu müssen.

Temperatur

Die Abgastemperatur im Messrohr wird mittels eines Thermoelementeintauchfühlers vom Typ K (NiCr/Ni) erfasst. Der Eintauchfühler besitzt ein isoliertes Gehäuse, um eventuelle Problem durch einen Massebezug zwischen Messschaltung und Messrohr zu verhindern. Der Durchmesser des Eintauchfühlers beträgt nur 0,5 mm, um schnellen Temperaturänderungen rasch folgen zu können.

Absolutdruck

Die Bestimmung des Absolutdruckes ist für die Berechnung der Dichte nötig. Hierbei wird, um eine besser Auflösung zu erreichen, der Differenzdruck zwischen Messrohr und der Messbox mit der Auswerteelektronik erfasst und zum Absolutdruck in der Messbox hinzuaddiert.

Als Differenzdrucksensor wird der SCX05DNC [22] von der Firma *Honeywell* verwendet. Der Sensor verfügt über ein Sensorelement auf Chipbasis und gewährleistet durch weitere Maßnahmen wie Lasertrimmung und Temperaturkompensation einen stabilen und genauen Messwert. Das Ausgangssignal steht als Brückenspannung zur Verfügung, die ratiometrisch zur Versorgungsspannung ist. Der verwendete Drucksensor ermöglicht die Messung von $\pm 5 \text{ psi}$ ²⁰ bzw. ca. $\pm 350 \text{ mbar}$ mit einer Ausgangsspannung von 1 mV bei 1 V Brückenversorgung je psi. Er besitzt eine T90-Zeit von $100 \mu s$.

In der Messbox erfolgt mit einem digitalen Sensor die Erfassung des Absolutdruckes. Als Sensor wurde der BME280 [42] von Bosch gewählt. Der Sensor hat ein I^2C -Interface und kann Luftdruck, Luftfeuchte und Temperatur messen. Die höchste Auflösungsstufe für den Luftdruck beträgt 0,2 Pa und muss durch einen externen Algorithmus mit Temperatur und Kalibrierdaten temperaturkompensiert werden. Die Messung des Luftdruckes, mit einer Messfrequenz von 10 Hz, ist zulässig, da der Luftdruck eine sich relativ langsam ändernde Größe ist. Im Fahrbetrieb sollten die Änderungen selbst bei Berg- und Talfahrten marginal sein und mit 10 Hz noch immer genügend genau erfasst werden.

¹⁹Eigentliche sollte hier ein 20 INCH-D-MV zum Einsatz kommen, war aber beim Lieferanten nicht verfügbar.

²⁰pound per square inch; $1 \text{ psi} = 68,9476 \text{ mbar}$

Der Luftdruck für die Dichteberechnung setzt sich aus dem vom BME280 gemessenen Luftdruck in der Messbox und dem Differenzdruckwert zwischen Messrohr und Messbox zusammen.

Da der BME280 auch die Temperatur im Elektronikgehäuse misst, kann dieser Temperaturwert zur Regelung der Gehäusetemperatur dienen um etwaige temperaturbedingte Fehler zu reduzieren bzw. zu eliminieren.

Kombisensor TFI4

Die Firma *sytec-controls* bietet zu ihrer Truckflow-Staudrucksonde ein Auswertegerät mit der Bezeichnung Kombisensor TFI4 an. Der TFI4 ist ein CAN-Bus fähiger Sensor, der mit 5VDC betrieben wird und über 2 Druckanschlüsse für die Differenzdruckmessung verfügt. Folgende Größen werden vom TFI4 gemessen:

- Differenzdruck Δp (-20 bis 450 mbar) und
- Absolutdruck 0 - 4,5 bar.

Die Druckgrößen werden im 2 kHz Rhythmus gemessen und mit Kenntnis der Abgastemperatur, welche über CAN mitgeteilt wird, erfolgt die Berechnung eines querschnittsunabhängigen Messwerts. Dieser Messwert wird alle 10 ms am CAN-Bus ausgegeben. Für die internen Berechnung wird Luft mit einer spezifischen Gaskonstante von $R_s = 288 \frac{J}{kg \cdot K}$ verwendet. Die übergeordnete Kontrolleinheit berechnet bei bekannter Querschnittsfläche A und einer falls nötigen Kalibrierkonstante k den Massendurchfluss $\dot{m} = k \cdot A \cdot M1$.

Abbildung 6.42 zeigt schematisch die nötigen Funktionsgruppen zur Berechnung des Massendurchflusses mit dem TFI4.

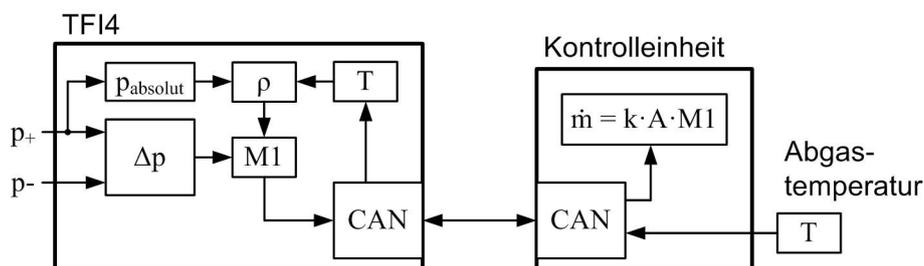


Abbildung 6.42: Funktionsgruppen zur Berechnung des Massendurchflusses mit dem TFI4.

Weitere Aussagen über die Grundgenauigkeit / Rauschen können nicht gemacht werden, weil dazu bis auf die LSB-Auflösung im Datenblatt keine weiteren Angaben zu finden sind.

Zudem besteht die Möglichkeit den Nullpunkt des Sensors mit einem CAN-Telegramm abzugleichen. Der Preis für den TFI4 beträgt ca. 350€.

6.2.2 Signalaufbereitung

Wegen der geringen Ausgangsspannung der Brückenschaltung, 10 bzw. 20 mV bei 12 V Versorgung, ist es nötig das Signal entsprechend zu verstärken um eine vernünftige Eingangsspannung für den ADC zu erhalten.

Auswahl ADC

Für die zeitgleiche Erfassung der Drucksignale wird ein ADC benötigt der es erlaubt 5 Spannungen (4x Drucksensoren für Staudrucksonden, 1x Drucksensor für Absolutdruckmessung) zeitgleich zu messen. So besteht die Möglichkeit mit Sample & Hold Gliedern alle nötigen Messwerte zu einem bestimmten Zeitpunkt zu erfassen und anschließend hintereinander mit einem ADC pro Kanal den Messwert zu wandeln. Für den ADC kommen entweder $\Delta\Sigma$ - oder SAR-Architekturen in Frage.

Bei Verwendung eines einzigen ADCs in $\Delta\Sigma$ - Architektur ist die gemeinsame Verwendung des digitalen Filters nachteilig, weil es hier zu Verzögerungen bei der Kanalschaltung kommt wird die Wandlungsgeschwindigkeit reduziert.

Eine andere Möglichkeit besteht in der Verwendung von $\Delta\Sigma$ - ADCs je Kanal mit eigenem digitalen Filter um obige Probleme zu vermeiden. Zudem benötigen $\Delta\Sigma$ - ADCs keine aufwendige Signalfilterung am Eingang und ermöglichen, architekturbedingt, einen guten Signal/Rausch-Abstand.

Für das Projekt wurden $\Delta\Sigma$ - ADCs mit 24-bit Auflösung und einer Datenrate größer 100 kHz mit Differenzeingängen in Betracht gezogen. Für diese Anwendung werden die 100 kHz nicht nötig sein. Dennoch soll mit diesem Projekt eine Basis für eine „Highspeed Parallelsampling Plattform“ geschaffen werden. Die Eingangsstruktur mit Differenzeingang wurde gewählt, um eventuell Sensorausgänge wie z.B. Brückenschaltungen direkt mit dem ADC verbinden zu können.

Passend obigen Kriterien wurden der AD7768 [6] von Analog Device und der ADS1278 [23] von Texas Instrument gefunden. Von den elektrischen Eigenschaften sind beide nahezu gleich. Der AD7768 hebt sich vom ADS1278 dadurch ab, dass zwei verschiedene Filtertypen (SINC5- oder Wideband-Filter) sowie Register für eine automatische Offset- und Gain-Korrektur zur Verfügung stehen.

Zum Zeitpunkt der Projektierung war das Datenblatt des AD7768 verfügbar, jedoch konnte der Baustein noch nicht am Markt erworben werden. Somit wurde der ADS1278 als ADC für das Projekt ausgewählt.

Mit dem ADS1278 können Spannungen im Bereich von 0-5 V gemessen werden. Als Referenzspannung wird 2,5 V benötigt.

Buffer für ADC

Da der ADC die Eingangsspannung basierend auf der Switched Capacitor Technology misst kommt es zu pulsformigen Strömen, die bei der Ladung der Kondensatoren auftreten. Um hier Rückwirkungen auf weitere Schaltungsteile zu vermeiden ist es nötig einen Buffer bzw. Treiber zu verwenden.

Zudem passt der Buffer, falls nötig, die Gleichtaktspannung an, um das Signal optimal mit dem ADC messen zu können.

Differentielle ADCs werden am besten in Kombination mit „Fully-Differential-Amplifier (FDA)“ verwendet. Weitere Information sind in [26], [46], [8] und [27] zu finden.

Ein FDA ist ein Verstärker mit differentielltem Eingang und differentielltem Ausgang. Zudem bietet ein FDA zwei Rückkopplungszweige an und ermöglicht damit eine Verstärkung des Signals. Hierbei ist auf eine gute Abstimmung der Widerstände zu achten, um eine hohe Gleichtaktunterdrückung zu erreichen [8]. Durch den zusätzlichen Eingang V_{OCM} lässt sich die Ausgangsgleichtaktspannung anpassen, damit der optimale Signalbereich am ADC ausgenutzt werden kann.

Als FDA wurde der THS4521 [24] von Texas Instrument verwendet. Dieser FDA wird im ADC-Datenblatt als Bufferreferenz angegeben. Es wurde darauf verzichtet einen anderen FDA zu erproben, da lt. ADC-Hersteller die Kombination passt und auf eine zusätzliche Problemstelle gerne verzichtet werden kann.

Signalverstärkung

Bei einer Versorgungsspannung der Drucksensoren von 12 V wird eine Brückendiagonalspannung von 10 bzw. 20 mV ausgegeben. Um Fehler, verursacht durch Schwankungen der Versorgungsspannung der Drucksensoren und der Referenzspannung für den ADC bei der Wandlung zu vermeiden, werden die Drucksensoren mit der Referenzspannung versorgt. Somit ist die Brückendiagonalspannung immer ratiometrisch zur Referenzspannung des ADCs. Dadurch vermeidet man ein Fehler bei der Empfindlichkeit des Sensors, der sich bei Änderung des Verhältnisses von Speisespannung zu ADC Referenz ergibt.

Der ADC benötigt eine Referenzspannung $V_{ref} = 2,5 V$. Daraus ergibt sich, wenn die Drucksensoren auch mit der Referenzspannung versorgt werden, dass die Brückendiagonalspannung der Drucksensoren 2 bzw. 4 mV beträgt. Zudem soll die Möglichkeit bestehen, falls die Sensoren nicht mechanisch in ihrem Druckmessbereich blockiert sind, diese ein wenig (ca. 2-3fach) über ihren Nennbereich zu beanspruchen. Dadurch überschneiden sich die Druckmessbereiche deutlich und eventuell kann durch eine spezielle Korrelationsmethode ein Mehrwert an Messgenauigkeit gewonnen werden.

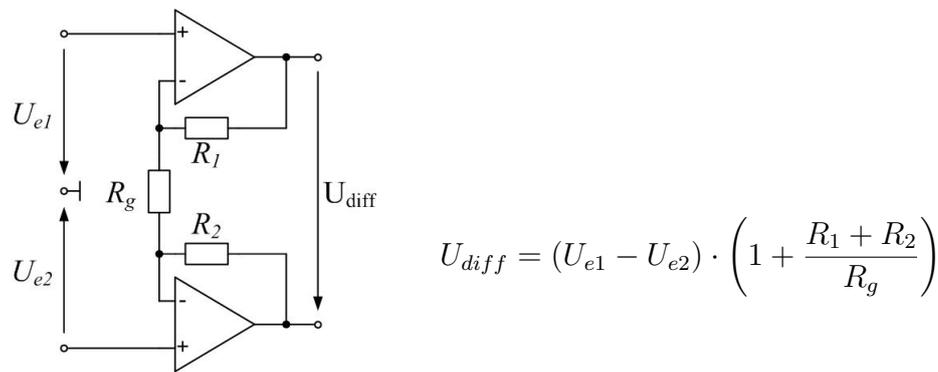
Unter Berücksichtigung der Übersteuerung der Drucksensoren und des ADC-Messbereiches ($\pm 2,5 V$) ergibt sich, dass eine Verstärkung des Sensorsignales bei Normbedingungen auf maximal 1 V als sinnvoll erscheinen. Dadurch besteht die Möglichkeit einer Auswertung der Sensoren über mehr als das Doppelte ihres ursprünglichen Messbereiches.

Auswahl der Verstärkerschaltung

Die Verstärkerschaltung sollte eine gute Gleichtaktunterdrückung sowie eine hohen Eingangswiderstand besitzen um Beeinflussungen der Messbrücke zu vermeiden. Aus diesem Grund bietet sich ein Instrumentenverstärker (INA), wie in Abbildung 6.43 dargestellt, an. Diese Schaltung verstärkt die Differenz der Eingangsspannungen. Durch die Verwendung der nicht invertierenden Verstärkereingänge ergibt sich ein hoher Eingangswiderstand und der Sensorausgangswiderstand hat keinen Einfluss auf den Verstärkungsfaktor.

Würde hingegen eine Schaltung gewählt, die die invertierenden Verstärkereingänge als Signaleingang verwendet, würde der Sensorausgangswiderstand Einfluss auf das Verstärkungsverhältnis der Schaltung haben. Zudem ändert sich der Ausgangswiderstand des Sensors abhängig vom Druck und ein konstantes Verstärkungsverhältnis über den Messbereich wäre nicht mehr gegeben.

Zudem ermöglicht der INA die Verstärkung mit nur einem Widerstand R_g einzustellen. Die Toleranz der Rückkopplungswiderstände R_1 , R_2 wirkt sich nicht nachteilig auf das Schaltungsverhalten aus, da nur die Summe und kein Verhältnis der Rückkopplungswiderstände in den Verstärkungsfaktor der Schaltung einfließen.



$$U_{diff} = (U_{e1} - U_{e2}) \cdot \left(1 + \frac{R_1 + R_2}{R_g}\right)$$

Abbildung 6.43:
Instrumentenverstärker.

Berechnen der Rauschspannung

Die Berechnung der Rauschspannung wurde durchgeführt um

1. zu sehen welche Komponenten das Signal in welchem Ausmaß beeinflussen,
2. welche Widerstandsgrößen,
3. welcher Verstärkungsfaktor und
4. welcher Operationsverstärkertyp am besten geeignet ist.

Die einzelnen Schritte zur Berechnung der Rauschspannung am INA sind im Anhang A.1 angeführt. Mit der Rauschspannungsanalyse des FDAs (Berechnung nach [25] durchgeführt) konnte die Rauschspannung am Eingang des ADCs berechnet und eine Aussage über deren Einfluss auf das Gesamtergebnis getroffen werden.

Bewertung von Operationsverstärkern

Die Rauschspannungsanalyse wurde für die in Tabelle 4 angegebenen Typen von Operationsverstärkern, bei Verwendung als Instrumentalverstärker, durchgeführt. Hierzu wurde in Matlab ein Skript erstellt um Werte der Widerstände und Operationsverstärkerparameter zu definieren und deren Auswirkungen zu untersuchen.

Für die Simulation wurde eine Umgebungstemperatur von 27.5°C verwendet. Hier wird angenommen, dass sich die Elektronik später in einer temperaturgeregelten Box mit $(25 \pm 2.5)^{\circ}\text{C}$ befindet. Für die Bandbreite wurde eine Begrenzung durch ein einfaches Filter mit einer Grenzfrequenz von 10 kHz angenommen. Für die Rauschspannungsberechnung ist die Grenzfrequenz bei einem einfachen Filter mit dem Faktor $\pi/2$ zu multiplizieren - näheres siehe [9].

Bei der Simulation stellte sich heraus, dass der Einfluss dominiert wird von

1. dem Spannungsrauschen des Verstärkers,
2. dem Sensorausgangswiderstand $R_s/2$,
3. dem Verstärkerwiderstand R_g und
4. dem Stromrauschen am positiven Verstärkereingang.

Abbildung 6.44 zeigt den Einfluss der einzelnen Faktoren und Komponenten auf die Rauschspannung am Ausgang des INA unter Verwendung eines AD4528 als Operationsverstärker.

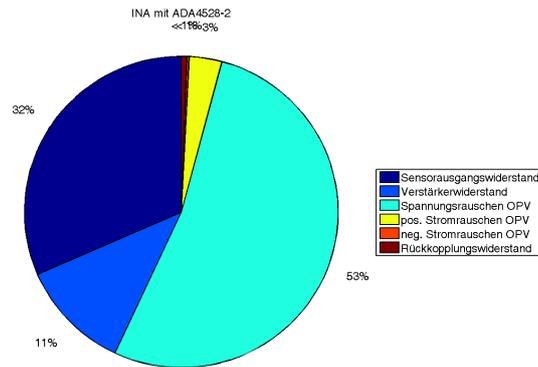


Abbildung 6.44: Einfluss der einzelnen Faktoren und Komponenten auf die Rauschspannung am Ausgang des INA.

Das Rauschen durch den Sensorausgangswiderstand muss als gegeben hingenommen werden bzw. durch einen anderen Sensor mit geringerem Ausgangswiderstand ersetzt werden. Bei der Sensorrecherche waren keine Drucksensoren mit einem Ausgangswiderstand $R_s < 1,5 \text{ k}\Omega$ zu finden.

Mehr Möglichkeiten bestehen hingegen bei der Wahl des Verstärkerwiderstandes und bei der Auswahl des Verstärkers hinsichtlich dessen Spannungsrauschdichte.

Das Stromrauschen am positiven Eingang ist deshalb so hoch, da am Ausgangswiderstand des Sensors eine nennenswerte Spannung abfällt, die nach Verstärkung am Ausgang gut ersichtlich wird. Deshalb ist bei der Wahl des Verstärkers auf eine geringe Stromrauschdichte zu achten.

Tabelle 4 zeigt die evaluierten Operationsverstärker für die Verwendung in einem INA sowie die effektive Rauschspannung $U_{a,diff}$ am differentiellen Ausgang des INA.

Typ	Spannungsrauschdichte in nV/\sqrt{Hz}	Stromrauschdichte in pA/\sqrt{Hz}	$U_{a,diff}$ in μV	Bemerkung
-				
ADA4528	5,9	0,5	247,4	Single-Supply Zero-Drift (Chopper)
AD797	1,2	2	146,77	Dual-Supply Single-Port
ADA4898	0,9	2,4	148,34	Dual-Supply
LT1028	1,2	1,8	144,9	Dual-Supply Single-Port
OPAx188	8,8	0,007	339,32	5V \rightarrow GBW nur 0,35 Mhz
OPA1612	1,5	1,7	147,56	Dual-Supply

Tabelle 4: Übersicht der evaluierten Verstärker

Für die Schaltung kommt der ADA4528-2 [7] zum Einsatz. Er besitzt einen Rail-To-Rail Ein- und Ausgang und kommt mit einer einzigen Spannungsversorgung aus. Dies

soll eine Wiederverwendung bei anderen Sensoranwendungen gewährleisten. Durch die Verwendung der Chopper-Technologie [10] wird ein sehr gutes Nullpunktverhalten sowie eine konstante Rauschspannungsdichte mit unterdrücktem $1/f$ -Rauschen gewährleistet. Der Chopper arbeitet mit einer Frequenz von 200 kHz. Durch die Verfügbarkeit von zwei Operationsverstärkern in einem Gehäuse wirken temperaturbedingte Einflüsse auf beide Verstärker gleich. Mit einem Bandbreitenprodukt von 4 MHz eignet sich der Verstärker sehr gut für den diskreten Aufbau eines Instrumentenverstärkers mit hoher Verstärkung.

Schaltungsdesign

Bei der Simulation konnten mit einem Verstärkungsfaktor von 201 für den INA und einem Faktor von 1 für den FDA gute Ergebnisse erzielt werden. Als Widerstandswerte am INA wurde $R_g = 100 \Omega$ und $R_1 = R_2 = 10 k\Omega$ gewählt.

Beim FDA wurde für die Widerstände ein Wert von $1 k\Omega$ gewählt. Um eine gute Gleichtaktunterdrückung zu erreichen ist es nötig, dass das Verhältnis der Widerstände R_A, R_B im positiven Zweig bzw. für R_C, R_D im negativen Zweig gleich ist.

Abbildung 6.45 zeigt die Signalkette bis zur Erfassung mit dem ADC im diskreten Aufbau, zudem sind die verwendeten Bauteilwerte angegeben.

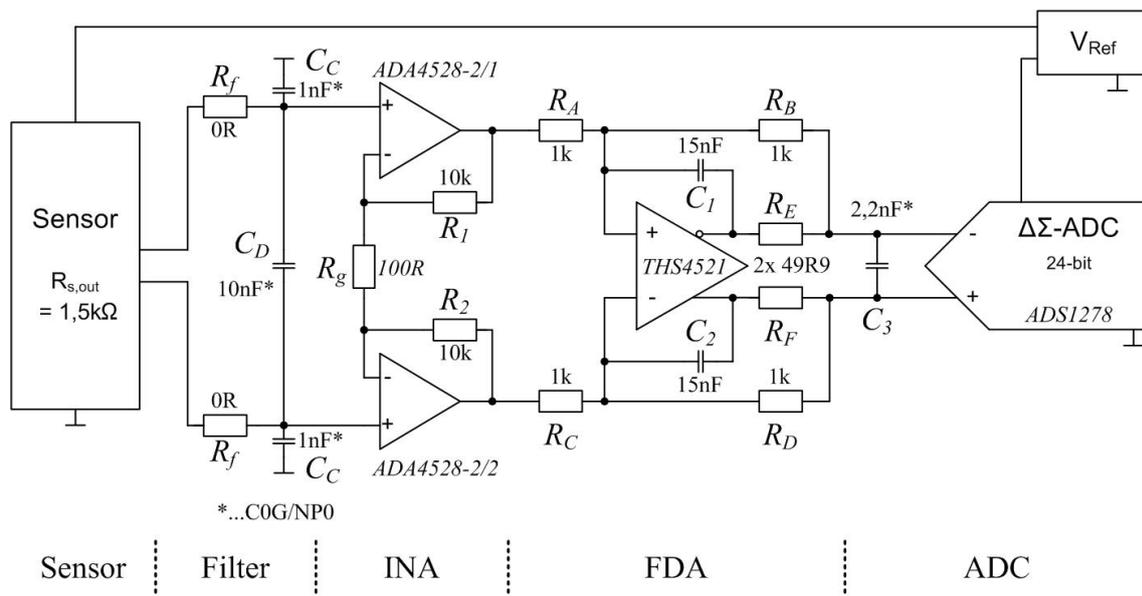


Abbildung 6.45: Signalkette im diskreten Aufbau.

Beim Filter und am Eingang des ADCs werden Kondensatoren vom Typ C0G/NP0²¹ verwendet um temperaturabhängige Effekte, ebenso wie Effekte durch mechanische Einwirkungen, den sogenannten Piezoeffekt, so gut wie möglich zu eliminieren. Auch durch eine Änderung der anliegende Spannung kann es zu mechanischen Änderungen und somit zu Beeinflussungen kommen.

Mit den in Abbildung 6.45 angegebenen Bauteilwerten für den Filter ergibt sich für das differentielle Signal eine Grenzfrequenz f_D von

²¹C0G/NP0 haben im Vergleich zu anderen Kondensatormaterialien einen sehr guten Temperaturkoeffizient, welcher fast keiner Alterung unterliegt.

$$\begin{aligned}
f_D &= \frac{1}{2 \cdot \pi (R_s/2 + R_f) \cdot (2 \cdot C_D + C_C)} = \\
&= \frac{1}{2 \cdot \pi (750\Omega) \cdot (2 \cdot 10 \text{ nF} + 1 \text{ nF})} = \\
&= 10,105 \text{ kHz}.
\end{aligned}$$

Die Grenzfrequenz f_{CM} für das Gleichtaktsignal berechnet sich mit

$$\begin{aligned}
f_{CM} &= \frac{1}{2 \cdot \pi (R_s/2 + R_f) \cdot C_C} = \\
&= \frac{1}{2 \cdot \pi (750\Omega) \cdot 1 \text{ nF}} = \\
&= 212,21 \text{ kHz}.
\end{aligned}$$

Um einen nahezu gleichen Einfluss durch Erwärmung und Temperaturänderungen auf die Widerstände des FDAs zu erhalten wird ein Präzisionswiderstandsnetzwerk mit minimaler Abweichung der Widerstandswerte untereinander verwendet.

Das Widerstandsnetzwerk besitzt einen Temperaturkoeffizienten von $\pm 15\text{ppm/K}$ und eine relative Abweichung von $\pm 0,05\%$.

Der aufgebaute INA besitzt eine Verstärkung von 201 und hat eine effektiven Rauschspannung von $247,4 \mu\text{V}$. Der FDA hat eine Verstärkung von 1 und eine effektive Rauschspannung von $4,95 \mu\text{V}$. Aus diesen Werten ergibt sich eine effektive Rauschspannung von $247,45 \mu\text{V}$ am Eingang des ADCs.

Nach umrechnen der effektiven Rauschspannung in eine Peak-to-Peak-Spannung, es wird hier der Faktor 6,6 verwendet, ergibt sich für den gesamten Eingangsspannungsbereich ein

$$\begin{aligned}
SNR &= 20 \cdot \log \left(\frac{U_{in,pp}}{U_{noise,pp}} \right) = 20 \cdot \log \left(\frac{U_{in,pp}}{6,6 \cdot U_{noise,rms}} \right) = \\
&= 20 \cdot \log \left(\frac{5 \text{ V}}{6,6 \cdot 247,45 \mu\text{V}} \right) = \\
&= 69,72 \text{ dB}.
\end{aligned}$$

6.2.3 Leiterplattendesign

Um eine flexible und austauschbare Lösung bei defekten Sensoren zu erreichen wurde eine Schnittstellen-Platine entworfen, die den ADC aufnimmt und als Trägermodul für die Sensorplatine dient.

Schnittstellen-Platine

Die Schnittstellen-Platine stellt die nötigen Spannungen für den ADC sowie für die Sensorplatinen bereit und ist so entwickelt, dass eine 24 V-Versorgung zum Betrieb ausreicht. Die intern nötigen 5V für die diversen Komponenten wird durch einen 24V zu 9V-DC/DC-Wandler und einem dahinter geschaltetem 5V-Linearregler erzeugt. Diese Variante wurde gewählt um Störungen durch die Taktfrequenz des DC/DC-Wandlers wirkungsvoll zu unterdrücken.

Da in der Regel Spannungsreferenzbausteine nur eine geringe Ausgangsleistung besitzen wurde eine Lösung benötigt um auch die Sensoren mit der Referenzspannung zu versorgen. Aus diesem Grund wird mit dem 5 V-Referenzbaustein MAX6126 die Basisreferenzspannung erzeugt und durch zwei Bufferschaltungen, aufgebaut aus ADA4528, die belastbaren 5 V und 2,5 V für den ADC und die Sensorplatinen erzeugt.

Für die Schnittstellen werden 3,3 V benötigt und mit einem DC/DC-Wandler aus der 24 V-Versorgung erzeugt. Der digitale Teil des ADC benötigt 1,8 V und wird mit einem Linearregler aus den 3,3 V generiert.

Der FDA benötigt eine Gleichtaktspannung V_{OCM} um den Ausgangspegel entsprechend dem ADC anzupassen. Diesen Pegel (2,5 V) bietet der ADC an. Er wird durch eine Bufferschaltung, welche nötig ist, um den Ausgang des ADCs nicht zu überlasten, allen Sensorplatinen zur Verfügung gestellt.

Der ADS1278 besitzt ein SPI-Interface ohne Chip-Select (CS). Um die Schnittstellen-Platine gemeinsam mit anderen Teilnehmern am SPI-Bus betreiben zu können wurde ein 4-fach Leitungstreiber (74HC125D) implementiert und auf diese Weise das CS-Signal nachgerüstet. Zudem wurden Ziehwiderstände für die SPI-Signale vorgesehen um bei Bedarf eine rasche Pegelanpassung durchführen zu können.

Das Ausgangsformat am SPI-Interface lässt sich mit den FORMAT-Eingängen einstellen und wurde so parametrisiert, dass alle 8 Eingänge immer am SPI-Bus ausgegeben werden - dies entspricht dem Format-Mode eins.

Die Betriebsart des ADCs lässt sich mit digitalen Eingängen MODE1, MODE0 und CLKDIV einstellen und wurde auf der Platine als Lötjumper realisiert, um je nach Anwendung flexibel reagieren zu können.

Als Takt für den ADC wurde ein Oszillator mit der Frequenz 3,6864 MHz verwendet. Je nach Einstellung von MODE und CLKDIV ergeben sich dadurch unterschiedliche Modulatorfrequenzen f_{mod} und Datenfrequenzen f_{data} . Das Überabtastverhältnis bzw. Over-Sampling-Ratio (OSR) ist das Verhältnis von f_{mod} zu f_{data} . Tabelle 5 zeigt in Abhängigkeit der Betriebsart die unterschiedlichen Modulator- und Datenfrequenzen.

Betriebsart	MODE[1:0]	CLKDIV	f_{mod} in kHz	f_{data} in kHz	OSR
-	-	-			
High-Speed	00	1	921,6	14,4	64
High-Resolution	01	1	921,6	7,2	128
Low-Power	10	1	460,8	7,2	64
		0	921,6	14,4	64
Low-Speed	11	1	92,16	1,44	64
		0	460,8	7,2	64

Tabelle 5: Übersicht über Modulator- und Datenfrequenzen.

In der Abbildung 6.46 ist die Schnittstellen-Platine, die für die Messungen verwendet wurde, mit der Montageseite für die Sensorplatinen dargestellt. Die Steckleiste, links oben, dient zur Spannungsversorgung und Datenkommunikation mit dem Embedded System.

Abbildung 6.47 zeigt die Rückseite der Schnittstellen-Platine.



Abbildung 6.46: Frontseite der Schnittstellen-Platine.

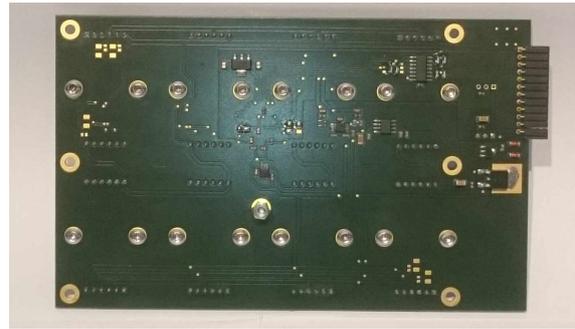


Abbildung 6.47: Rückseite der Schnittstellen-Platine.

Anhang A.3 zeigt den Schaltplan der Schnittstellen-Platine.

Sensorplatine

Die Sensorplatine wird mit Stiftleisten zur Schnittstellen-Platine kontaktiert und ermöglicht dadurch die Digitalisierung des aufbereiteten Messwertes. Die Platine dient als Trägerplattform für den Drucksensor bzw. andere Sensoren und übernimmt die Filterung sowie Signalverstärkung. Der INA und FDA sind auf dieser Platine realisiert.

Die Platine wird mit der 5 V-Analogspannung für die Versorgung der Halbleiterbauteile von der Schnittstellen-Platine gespeist. Um den Sensormessbereich speziell bei geringen Brückenausgangsspannungen, zu erhöhen besteht die Möglichkeit den Sensor wahlweise durch einen Lötjumper mit 2,5 V bzw. 5,0 V Referenzspannung zu versorgen.

Mittels zwei 6-poliger Stiftleisten erfolgt die Kontaktierung zur Schnittstellen-Platine.

In den Abbildung 6.48 und 6.49 ist die bestückte Sensorplatine mit einem Drucksensor abgebildet.

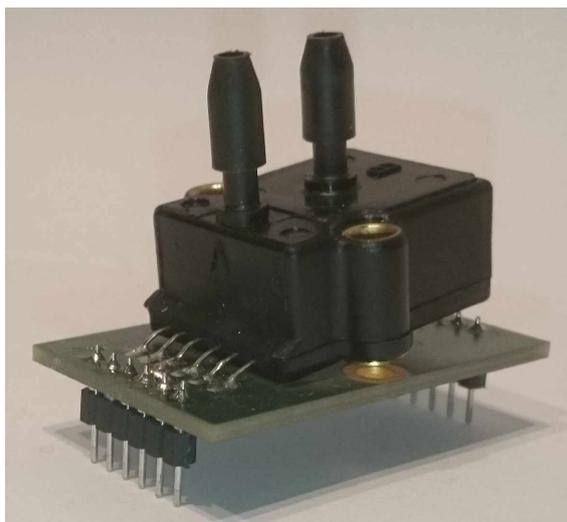


Abbildung 6.48: Frontseite der Sensorplatine.

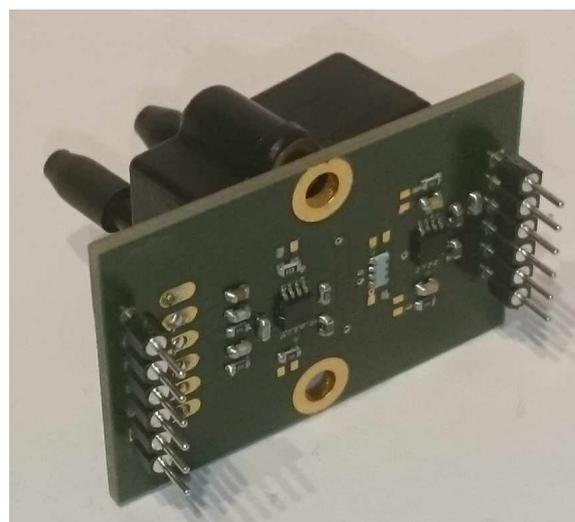


Abbildung 6.49: Rückseite der Sensorplatine.

Anhang A.4 zeigt den Schaltplan der Sensorplatine.

6.3 Software

Anfänglich wurde die Kommunikation zur Schnittstellen-Platine mit einem ARM-Prozessor durchgeführt und die Daten wurden via CAN-Bus und einem CAN-USB-Interface dem Hostcomputer für das Postprocessing zugeführt. Leider konnten nicht alle ADC-Werte übertragen werden, da dies zu einer Überlast am CAN-Bus geführt hätte.

Aus diesem Grund wurde auf eine Platine mit einem BECK-SC24 [16] umgestellt. Hierbei handelt es sich um einen 96-MHz Prozessor in DIL32-Bauform. Der SC24 verfügt über ein Echtzeitbetriebssystem mit den Namen RTOS sowie ein Ethernetinterface, welches für die Kommunikation zum Hostprozessor verwendet wird. Ein großer Vorteil des SC24 ist, dass die anwenderabhängige Software als exe-Datei via FTP-Transfer übertragen wird und somit ein direktes Programmieren in der Schaltung ermöglicht. Das ist vor allem in der Entwicklungsphase von großem Vorteil und ermöglicht rasche Änderungen. Der SC24 besitzt unter anderem 2xCAN, 1xSPI, 1xI²C. Dadurch wird eine kompakte Integration und Steuerung der vorhandenen Komponenten gewährleistet.

In Abbildung 6.50 wird eine generelle Übersicht über die Integration der Systeme und deren Kommunikation gegeben.

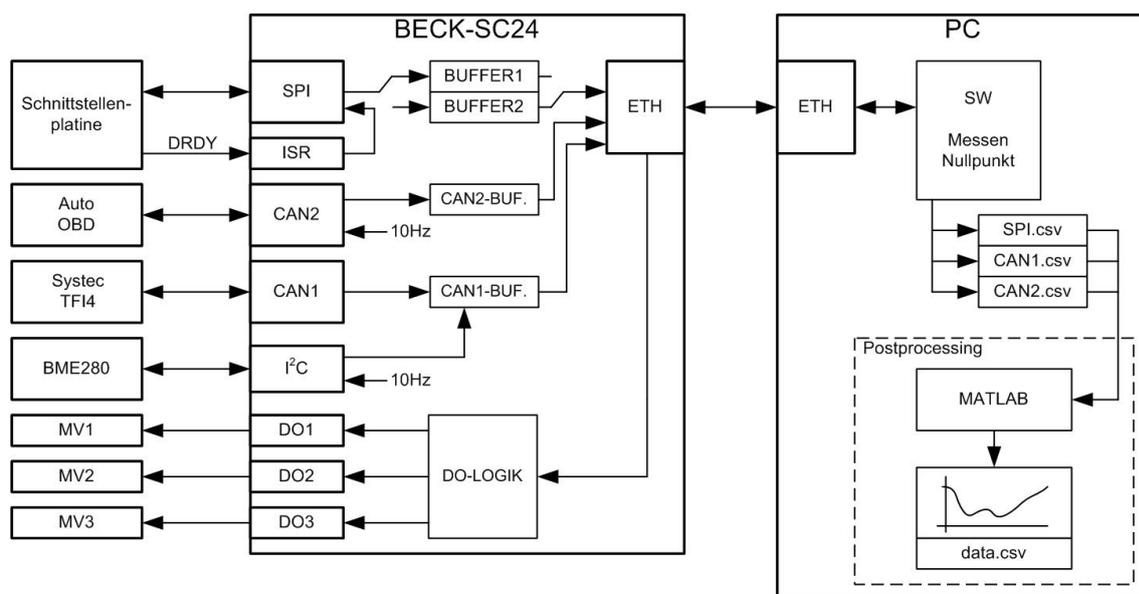


Abbildung 6.50: Übersicht der Systeme und Kommunikation.

6.3.1 Software für Embedded Controller

Die Kommunikation und Umsetzung der unterschiedlichsten Bussysteme auf Ethernet sowie die Abarbeitung der Befehle vom Hostcomputer (PC) werden durch die Software am BECK-SC24 übernommen.

Die Schnittstellen-Platine bzw. der ADS1278 wandelt die anliegenden Eingangsspannungen kontinuierlich und teilt dem übergeordneten System durch eine negative Flanke des Data Ready-Signals (DRDY-Signal) mit, dass neue Wandlungswerte verfügbar sind. Der negative Flankenwechsel triggert am SC24 einen Interrupt und startet, sofern dies gewollt

ist, die SPI-Kommunikation zum Auslesen der Daten. Die ausgelesenen Daten werden in einem Buffer zwischengespeichert. Um Dateninkonsistenz zu verhindern kommt eine Doppelbufferstrategie zum Einsatz. Das bedeutet, dass ein Buffer mit aktuellen Daten vom ADC gefüllt wird, während der andere Buffer via Ethernet an den Hostcomputer übermittelt wird. Jede Millisekunde erfolgt ein Wechsel der Buffer.

Für die Ethernetkommunikation wurde ein TCP-Server am SC24 realisiert, der die Daten am Port 3000 anbietet. Nach einem erfolgreichem TCP-Verbindungsaufbau werden kontinuierlich Daten, im Blocktransfer als Vielfaches von 8x3 Bytes, vom Buffer an das Hostsystem gesendet. Dem Hostsystem werden Rohdaten übergeben, es erfolgt keine Konvertierung.

Die folgenden Eigenschaften sind für alle TCP-Server am SC24 gültig:

- Solange eine TCP-Verbindung besteht werden Daten gesendet.
- Bei einem Verbindungsabbruch beendet der Server automatisch die Verbindung.

Luftmasse, Drehzahl, Geschwindigkeit und Außentemperatur werden vom Auto über über die CAN-Schnittstelle des OBD-II-Interfaces abgefragt. Bei OBD-II muss zuerst mit einem CAN-Telegramm der nötige Datensatz angefragt werden. Unterstützt das Auto die Anfrage, wird ein Antworttelegramm retourniert, ansonsten bleibt ein Antworttelegramm aus. Im Anhang A.2 sind die verwendeten Telegramme inkl. Antwort und Berechnungsformel angegeben. Weitere Abfrage-IDs sind unter [1] angeführt.

Jeder Wert wird im 100 ms-Rhythmus abgefragt und bei einer Antwort im CAN2-Ringbuffer zwischengespeichert. Jede Millisekunde wird der Ringbuffer entleert und dem CAN2-TCP-Server zur Übermittlung übergeben. Ein CAN-Telegramm wird als Block von 15 Bytes übermittelt. Die Verbindung zum CAN2-TCP-Server geschieht vom Hostsystem über den Port 4402.

Die Kommunikation mit dem Systec TFI4-Sensor geschieht mit dem CAN1-Interface des SC24s. Wie schon bei CAN2 kommt hier der CAN1-Ringbuffer zum Zwischenspeichern der CAN-Nachrichten zum Einsatz. Die Nachrichten werden jede Millisekunde dem CAN1-TCP-Server zur Übermittlung an das Hostsystem übergeben. Der CAN1-TCP-Server wird über den Port 4401 vom Hostsystem angesprochen.

Die Abfrage des Umweltsensor BME280 für Absolutdruck und Gehäusetemperatur erfolgt über I^2C durch einen eigenen Task im 10 Hz-Rhythmus. Die empfangenen Daten für Luftdruck (4 Bytes), Temperatur (2 Bytes) und Luftfeuchte (2 Bytes) werden auf ein CAN-Telegramm umkodiert und im CAN1-Buffer zwischengespeichert, welcher alle Millisekunden entleert wird.

Diese Lösung wurde gewählt um nicht zusätzlich einen TCP-Server am SC24 aufsetzen zu müssen.

Über den TCP-Port 3000 empfängt der SC24 Befehle vom Hostcomputer. Die Befehle dienen zur Steuerung der Digitalen Ausgänge $DO1 - 3$ bzw. der 3/2-Wege-Magnetventile $MV1 - 3$. Für ein besseres Verständnis zur Wirkung der Befehle und deren Auswirkung auf die Messung dient der Gaslaufplan in Abbildung 6.52.

Mögliche Befehle sind:

- Messen: Schaltet die Magnetventile ein. Es werden der Differenzdruck der Sonde, und der Differenzdruck zwischen Messrohr und Messbox zu den Drucksensoren durchgeschaltet. Der SC24 geht in den Zustand MESSEN.
- Nullpunkt: Schaltet die Magnetventile aus. Hierdurch liegt an den Differenzdrucksensoren der interne Umgebungsdruck der Messbox an. Dieser Befehl wird benötigt um den Offset der Drucksensoren zu bestimmen. Der SC24 geht in den Zustand Nullpunkt.

Nach dem Einschalten befindet sich der SC24 im Zustand NULLPUNKT.

Abbildung 6.51 zeigt das Zustandsdiagramm zu den obigen Befehlen.

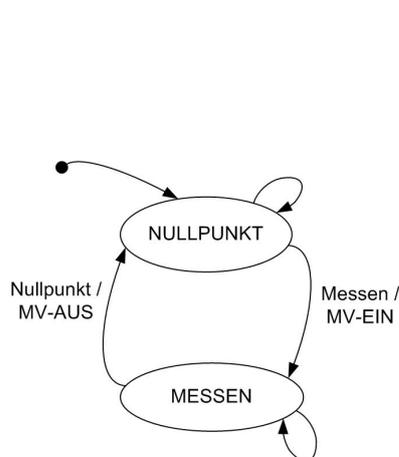


Abbildung 6.51:
Zustandsdiagramm.

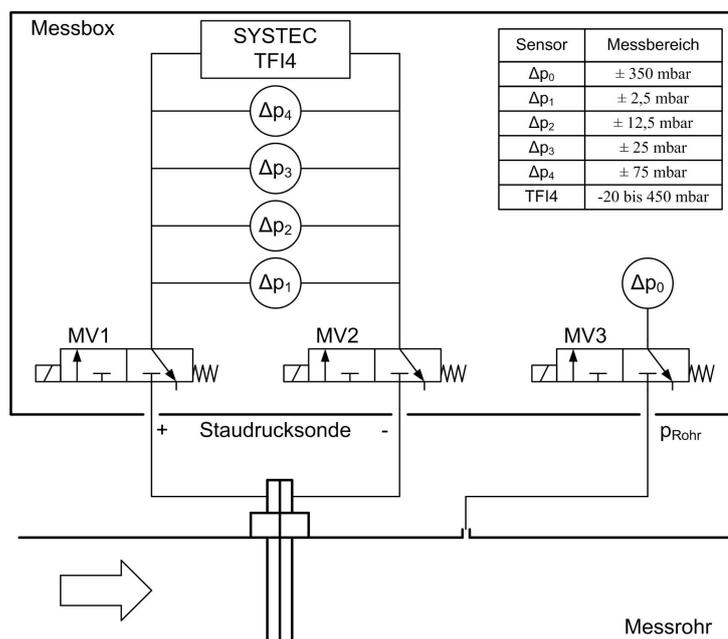


Abbildung 6.52: Gaslaufplan Druckmessung.

In 6.53 ist die Messbox mit aufgebauter Elektronik und Hardware zu sehen. Links oben befindet sich der BECK-SC24 mit einem Ethernetmodul. Auf der linken Seite unten erfolgt die Verteilung der unterschiedlichen Spannungsebenen zu den einzelnen Baugruppen sowie die Verteilung der zwei CAN-Bussysteme. Unten an der Messboxkante ist der Kombisensor TFI4 zu sehen. Unter dem TFI4 befinden sich die Magnetventile, die zwischen internem und externem Drucksignal umschalten. Bildmittig sind die vier Differentialdrucksensoren zur Messung des Staudruckes zu sehen. Der Drucksensor, rechts oben, mit nur einem angeschlossenen Schlauch wird für die Differenzdruckmessung zwischen Messrohr und Messbox verwendet. Die blaue Platine, Bildmitte oben, ist ein Breakout-Board des BME280s, der den Luftdruck und die Temperatur in der Messbox misst. Etwas links von der BME280-Platine, teilweise verdeckt vom Schlauch, ist die Sensorplatine mit angeschlossener Thermoelementleitung für die Messung der Abgastemperatur im Messrohr zu erkennen.

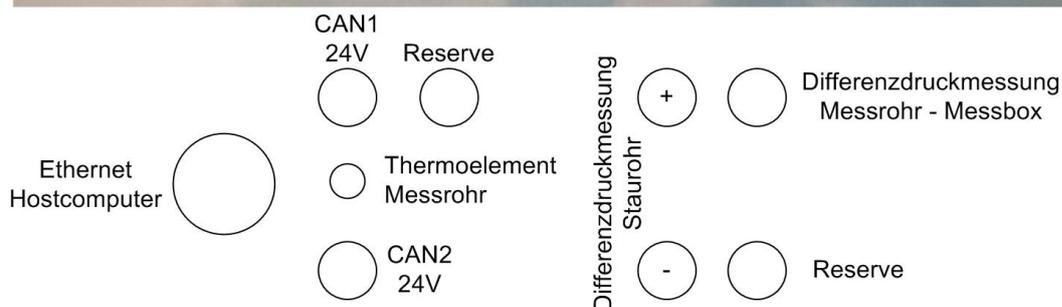
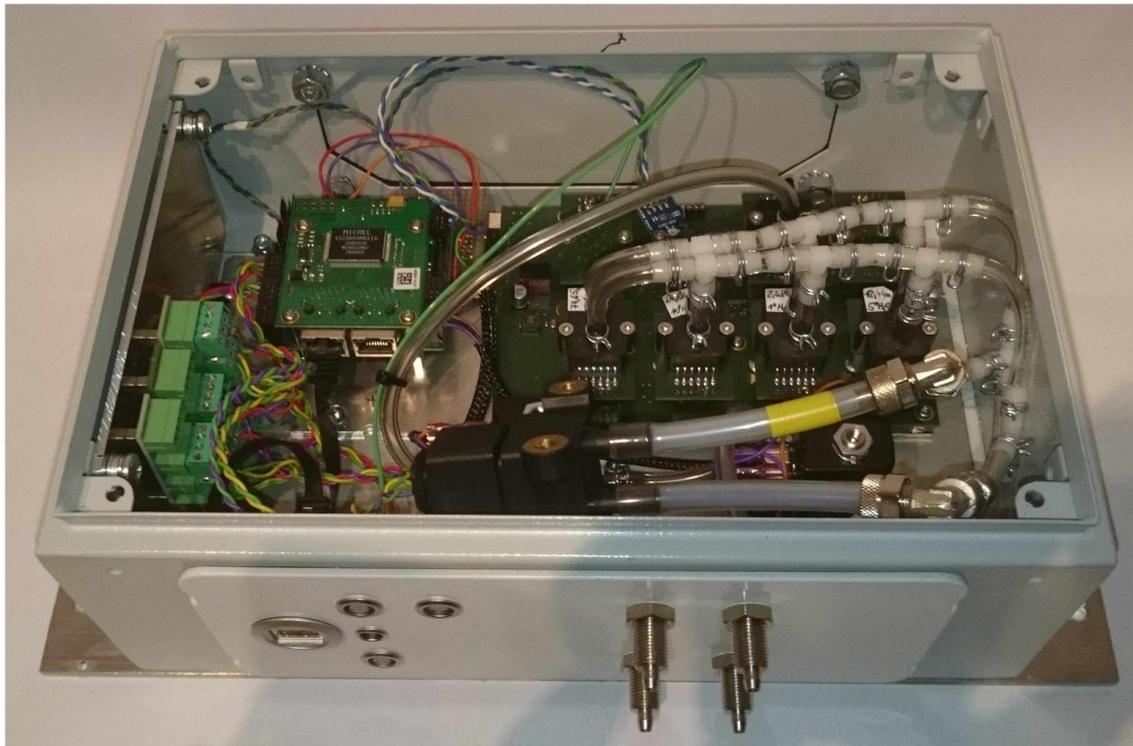


Abbildung 6.53: Innenansicht und Verbindungen der Messbox.

6.4 Software für Datenerfassung am PC

Für die Erfassung der Daten und Kommunikation mit dem Embedded System wurde in C# eine Software auf Konsolenbasis entwickelt. Durch Eingabe des Befehls Messen oder Nullpunkt wird eine TCP-Verbindung zum Embedded System aufgebaut und dies in den entsprechenden Zustand versetzt. Gleichzeitig werden zwei weitere Verbindungen zu den CAN-TCP-Servern aufgebaut. Die Daten des SPI-Interfaces werden von der TCP-Verbindung über den Port 3000 eingelesen und als Rohdaten sowie als vorzeichenbehaftete Ganzzahl in einer csv-Datei abgespeichert. Die CAN-Verbindungen lesen die Daten von den entsprechenden TCP-Verbindungen und führen eine Konvertierung der Blockdaten in CAN-ID, DLC und Datenbytes durch und speichern dies wiederum in csv-Dateien ab.

6.4.1 Signalverarbeitung / Postprocessing

Um in der Entwicklungsphase einen besseren Einblick und einen besseren Einfluss auf die aufgezeichneten Daten zu haben, werden diese in Matlab eingelesen und entsprechend eines Algorithmus, welcher hier näher vorgestellt wird, zu Größen wie Masse, Geschwindigkeit, usw. umgerechnet.

Um den Offset der einzelnen Messgrößen, im speziellen von der Schnittstellen-Platine zu kennen, ist eine Nullpunktmessung erforderlich. Hierfür wird der SC24 in den Zustand NULLPUNKT versetzt und Messdaten über einen Zeitraum von 10 Sekunden aufgezeichnet. Anschließend wird der Mittelwert für jede Messgröße berechnet und als Offset hinterlegt.

Daten die im Zustand MESSEN aufgezeichnet wurden, werden zuerst um den Offset korrigiert und dann, je nach Messwert und Sensor unterschiedlich, in die entsprechende Größe umgerechnet.

Anschließend erfolgen die Berechnung der Dichte und der Strömungsgeschwindigkeit. Bedingt durch die Bernoulligleichung besteht ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen Druck und Strömungsgeschwindigkeit. Aus diesem Grund muss für jeden Druckmesswert zuerst die Strömungsgeschwindigkeit berechnet werden und erst anschließend darf eine Mittelung der Strömungsgeschwindigkeit erfolgen. Andernfalls entsteht ein Fehler, der in der Literatur als „square root error“ [35] bezeichnet wird. Abbildung 6.54 zeigt grafisch den Fehler, der entsteht, wenn nur der Druckmittelwert zur Berechnung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit bzw. Durchflussrate verwendet wird.

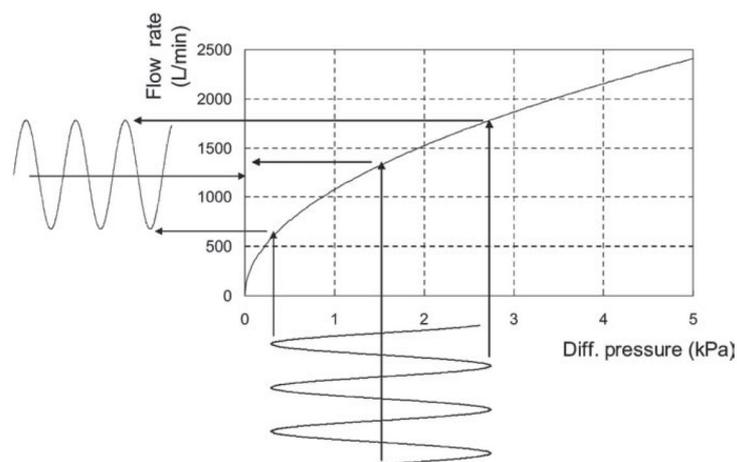


Abbildung 6.54: Zusammenhang zwischen dem Differenzdruck einer Staudrucksonde und dem square root error [35].

In [13] wurde der Einfluss der Rohrführung und Rohrleitungslänge nach dem Messrohr untersucht. Hierbei wurde festgestellt, dass der Mittelwert des Differenzdruckes an der Staudrucksonde kaum beeinflusst wird, jedoch die Pulsationsspitzen unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Diese Spitzen übertragen sich entsprechend auf die Strömungsgeschwindigkeit und erschweren eine Mittelwertbildung. Mit einem gleitenden Mittelwertfilter konnten keine vernünftigen Ergebnisse erzielt werden. Entweder wurde eine große Mittelungsdauer benötigt, welche wiederum träge auf Änderungen reagierte oder bei einer kurzen Mittelungsdauer waren die Pulsationen noch merklich ausgeprägt.

Aus diesem Grund wurde wie in [43] angeführt der Ansatz für eine rekursive Mittelwertberechnung gewählt. Hierbei wird mehrmals der Filter auf das gefilterte Signal angewendet. Unter der Verwendung eines rechteckigen Filterkerns ergibt sich nach mehrmaligem Anwenden eine gaußsche Filterform, obwohl kein gaußscher Filterkernel verwendet wurde. Abbildung 6.55 zeigt das Verhalten bei mehrfacher Anwendung eines rechteckigen Filterkerns auf das rechteckige Signal.

Natürlich könnte auch gleich ein gaußscher Filterkernel verwendet werden. Dieser benö-

tigt jedoch, bedingt durch die vielen unterschiedlichen Koeffizienten, viele Multiplikationen, die rechenintensiv sind. Mit der Implementierung eines gleitenden Mittelwerts mit rechteckigem Filterkernel, welcher nur Subtraktion und Addition benötigt, entsteht ein erheblicher Vorteil gegenüber einer direkten Gaußfilterung. Er ist damit hervorragend für eine Implementierung am Embedded System geeignet.

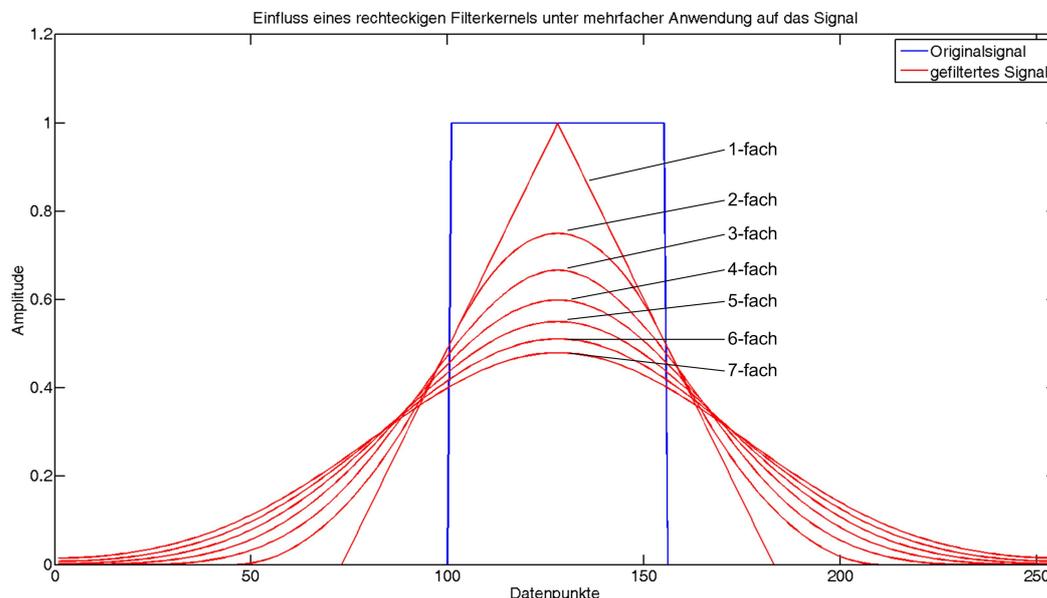


Abbildung 6.55: Verhalten bei mehrfacher Anwendung eines rechteckigen Filterkerns mit der Breite von 55 Datenpunkten auf das Originalsignal..

Durch die vierfache Anwendung eines rechteckigen Filterkerns mit der Breite von 127 Datenpunkten auf das gefilterte Signal konnte die Welligkeit des gefilterten Signals im Vergleich zu einer einfachen Mittelwertfilterung deutlich reduziert werden.

Mit Kenntnis des Rohrquerschnittes und der Dichte lässt sich der Abgasmassenstrom aus der gefilterten Strömungsgeschwindigkeit berechnen.

Fehlergrößen

In den folgenden Tabellen sind Fehlerquellen für jeden einzelnen Abschnitt der Signalkette aufgelistet. Es erfolgte eine Bewertung, ob der Fehler relevant sein kann bzw. sich durch spezielle Methoden eliminieren lässt. Die hier angegebenen Fehlerquellen wurden den Datenblättern entnommen.

Mögliche Fehler durch den Drucksensor

Bezeichnung	Berücksichtigung	Bemerkung
Offset @ 0 mbar	nein	Durch Offsetabgleich eliminierbar.
Offset Temperature Shift	ja	Durch temperierte Messboxtemperatur nur geringe Temperaturschwankungen.
Offset Warm Up Shift	nein	Ist nach einer Warmlaufphase, max. 1h, nicht mehr vorhanden. PEMS-Messgeräte brauchen eine gewisse Aufheizphase - somit kann dieser Fehler kompensiert werden.
Offset Sensitivity (1g)	ja	Einfluss durch Vibrationen - beobachten
LongTerm Drift	nein	kein Einfluss - Drift des Sensors über ein Jahr - kompensierbar mit Offsetabgleich vor Messbeginn
Linearity Hysteresis max	ja	nicht eliminierbar
Fullscale Shift	ja	nicht eliminierbar

Tabelle 6: Mögliche Fehler durch den Drucksensor.

Mögliche Fehler durch den Instrumentenverstärker

Bezeichnung	Berücksichtigung	Bemerkung
Offset max-Fehler mit 2*Offsetspannung	nein	Durch Offsetabgleich eliminierbar.
Temperaturdrift Offset	ja	Durch temperierte Messboxtemperatur nur geringe Temperaturschwankungen - beobachten.
Biasecurrents	ja	Einfluss beobachten

Tabelle 7: Mögliche Fehler durch den Instrumentenverstärker.

Mögliche Fehler durch den FDA

Bezeichnung	Berücksichtigung	Bemerkung
Offset Voltage	nein	Durch Offsetabgleich eliminierbar.
Offset Voltage Drift	ja	Durch temperierte Messboxtemperatur nur geringe Temperaturschwankungen.
Output Error Bias Current	nein	Durch Offsetabgleich eliminierbar.
Output Error Bias Current Drift	ja	Durch temperierte Messboxtemperatur nur geringe Temperaturschwankungen.
Input Offset Current	nein	Durch Offsetabgleich eliminierbar.
Input Offset Current Drift	ja	Durch temperierte Messboxtemperatur nur geringe Temperaturschwankungen.
Input-Output Common-mode Mismatch	nein	vernachlässigbar - sehr geringer Einfluss
Input Common-Mode Rejection	nein	vernachlässigbar - sehr geringer Einfluss
Power Supply Rejection	ja	Einfluss beobachten

Tabelle 8: Mögliche Fehler durch den FDA.

Mögliche Fehler durch den ADC

Bezeichnung	Berücksichtigung	Bemerkung
Offset Error	nein	Durch Offsetabgleich eliminierbar.
Offset Drift	ja	Durch temperierte Messboxtemperatur nur geringe Temperaturschwankungen.
Gain Error	ja	Kalibrierung, Abgleich / Korrelation mit anderen Drucksensor herstellen.
Gain Drift	ja	Durch temperierte Messboxtemperatur nur geringe Temperaturschwankungen.
Integral nonlinearity	ja	nicht eliminerbar
CMRR	ja	nicht eliminerbar
PSRR AVDD	nein	vernachlässigbar - sehr geringer Einfluss
PSRR IOVDD	nein	vernachlässigbar - sehr geringer Einfluss
PSRR DVDD	nein	vernachlässigbar - sehr geringer Einfluss

Tabelle 9: Mögliche Fehler durch den ADC.

Die hier angeführten Fehlergrößen wurden in einem Matlabskript erfasst und die Fehlerauswirkung bis zum Eingang des ADCs berechnet. In Abbildung 6.56 ist ein Größenvergleich der einzelnen Fehler am Eingang des ADC zu sehen, wobei farblich markiert wurde welche Fehler sich eliminieren lassen und welche nicht.

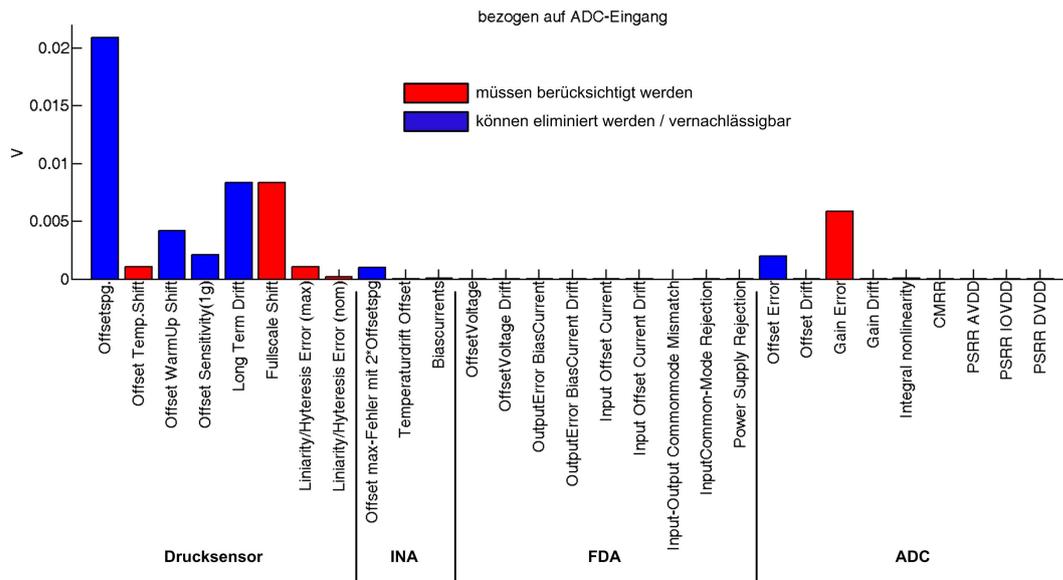


Abbildung 6.56: Übersicht der Fehler am Eingang des ADCs.

Werden sämtliche Fehler berücksichtigt, so ergeben sich Messunsicherheiten im Differenzdruck von $\pm 0,11$ mbar. Bei dieser Fehlerabschätzung wurden alle Fehlerquellen addiert, ohne Berücksichtigung eines Faktors oder statistischem Zusammenhangs.

6.5 Ergebnisse / Versuchsauswertungen

Evaluierung der Schaltung

Nach dem Löten der Platinen wurde der Einfluss von Störung und das Verhalten bei unterschiedlichen Betriebsarten untersucht. Die Beschaltung der ADC-Eingänge wurde entsprechend Tabelle 10 durchgeführt.

ADC-Eingang	Bemerkung
1	Sensorplatine mit Differentialdrucksensor ± 5 psi
2	Kurzschluss an den Eingangsklemmen zum ADC
3	Sensorplatine mit Differentialdrucksensor $\pm 12,5$ mbar
4	Sensorplatine mit Differentialdrucksensor $\pm 2,5$ mbar
5	Sensorplatine mit Differentialdrucksensor ± 25 mbar
6	Sensorplatine mit Differentialdrucksensor ± 75 mbar
7	Kurzschluss an den Eingangsklemmen zum ADC inkl. GND-Verbindung
8	1,25 V an den Eingangsklemmen zum ADC angelegt

Tabelle 10: Beschaltung der ADC-Eingänge für Betriebsarten- und Signaltest

Es wurden die Betriebsarten High-Resolution und Low-Speed bei unterschiedlicher Konfiguration des CLKDIV-Einganges untersucht. Für jede Betriebsart wurden sechs Messungen für je zehn Sekunden durchgeführt und der Mittelwert sowie die Standardabweichung

bestimmt. Zwischen den Messungen fand eine Pause von drei Minuten statt. Beim Umstellen der Betriebsart bzw. beim Umstellen der Versorgungsspannung für den Drucksensor am ADC-Eingang 4 erfolgte eine längere Pause. Hierbei wurde die Spannungsversorgung deaktiviert.

In Abbildung 6.57 sind die Ergebnisse der ADC-Eingänge 4 und 6 dargestellt. Eingang 4 wurde gewählt, weil hier die Versorgungsspannung des Drucksensors variiert wurde um den Einfluss auf den Messwert und die Standardabweichung zu sehen. Bei Eingang 6 ist bei fast allen Messblöcken relativ deutlich eine Zunahme des Messwertes zu sehen. Diese Messwertänderungen konnten bei anderen Sensoren ebenfalls festgestellt werden, jedoch nicht in diesem Ausmaß. Die Ursache dürfte hier die „Warm Up Shift“ sein. Das ist jene Zeit, die der Sensor braucht, um nach Anlegen der Versorgungsspannung einen stabilen Ausgangswert zur Verfügung zu stellen. Sie ist im Datenblatt mit einer Stunde angegeben. Die anderen Eingänge zeigen gleiches Verhalten wie die Eingänge 4 und 6 bei der Standardabweichung und weisen keine merkbaren Ausreißer bei den Mittelwerten auf.

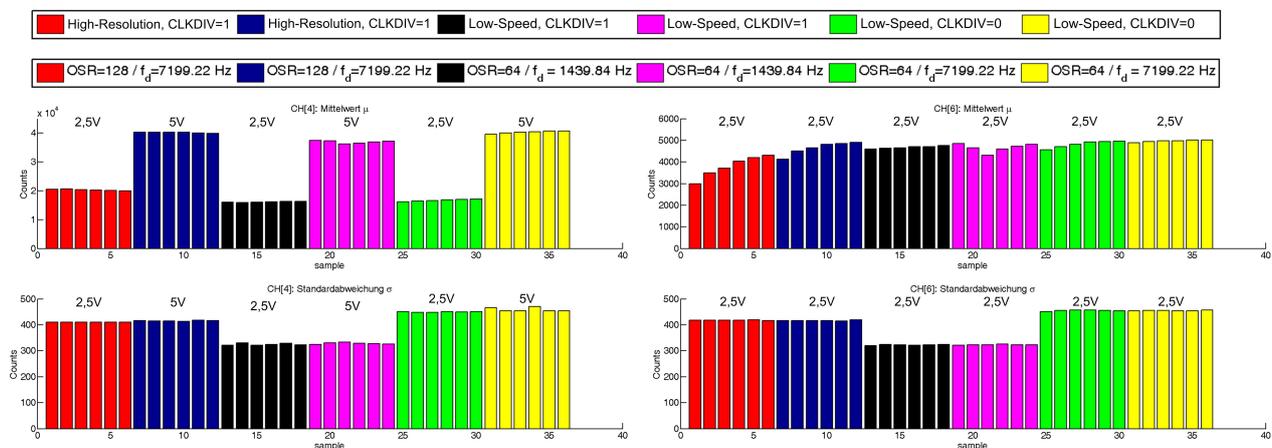


Abbildung 6.57: Einfluss der Betriebsarten und Versorgungsspannung auf Mittelwert und Standardabweichung.

Aus den Messergebnissen ist zu entnehmen, dass im Low-Speed-Mode bei einer Datenrate von $f_d \approx 1440 \text{ Hz}$ die Standardabweichung am geringsten ist. Basierend auf diesen Erkenntnissen wird für die weiteren Versuche der Low-Speed Modus mit einer Datenrate von 1440 Hz verwendet und der Drucksensor mit dem Eingangsbereich von $\pm 2,5 \text{ mbar}$, mit 5 V versorgt. Dies widerspricht zwar dem Datenblatt, denn hier sollte der High-Resolution Modus die besten Ergebnisse erzielen - mögliche Ursachen siehe Punkt 6.6.

Auflösung der Differenzdrucksensoren

In Abbildung 6.58 wurde zur Untersuchung, ob die unterschiedlichen Drucksensoren auch wirklich einen Vorteil bringen, mit einer Samplerate von 7,2 kHz der Differenzdruckverlauf an der Staudrucksonde im Leerlauf untersucht. Die höhere Samplerate wurde gewählt um eine bessere zeitliche Auflösung bei schnellen Signaländerungen zu haben.

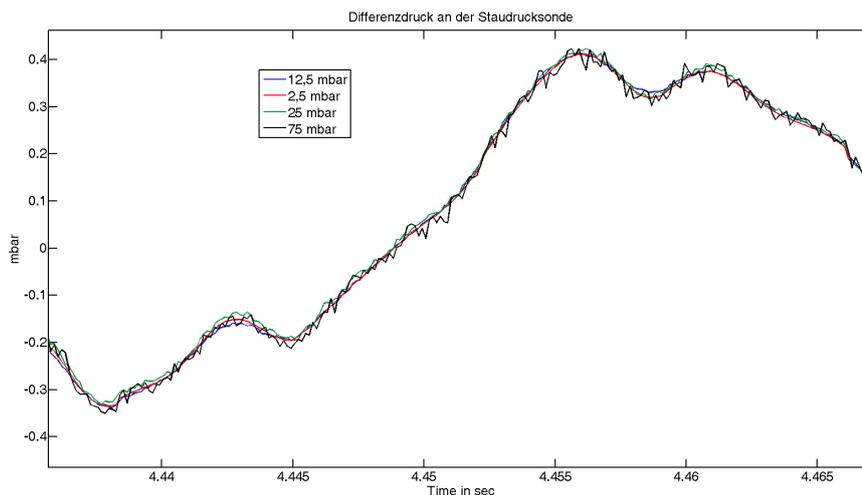


Abbildung 6.58: Vergleich der Drucksensoren bei Signaländerung.

In der Abbildung 6.58 ist zu erkennen, dass die Sensoren untereinander gut korrelieren und je nach Sensormessbereich unterschiedlich stark auf Druckänderungen reagieren. Man sieht, dass ein Drucksensor mit größerem Druckmessbereich nicht an die Auflösung eines Sensors mit kleinem Messbereich herankommt. Daraus wird ersichtlich, dass wirklich die Hardware des Drucksensors, in diesem Fall die Membrane, für jeden Messbereich unterschiedlich ist. Somit macht es durchaus Sinn mehrere unterschiedliche Drucksensoren zu verwenden, um eine bessere Auflösung zu erreichen.

Messen der Abgastemperatur

Die Abgastemperatur wird mit einem Thermoelement vom Typ-K erfasst. Für die Verstärkung der Thermoelements Spannung wird eine modifizierte Sensorplatine mit einem Verstärkungsfaktor von 40 verwendet. Das Thermoelement wird einseitig mit der Referenzspannung von 2,5 V versorgt um positive und negative Temperaturen messen zu können.

Zur Kompensation wird die vom BME280 gemessene Temperatur verwendet.

Evaluierung Staudrucksonde

Um den Effekt und die Auswirkungen der unterschiedlich konstruierten Staudrucksonden zu sehen wurde bei stehendem Fahrzeug und unterschiedlichen Drehzahlen der Differenzdruck aufgezeichnet.

In Abbildung 6.59 und 6.60 ist der gemessene Differenzdruck mit den vier unterschiedlichen Drucksensoren sowie der berechnete Mittelwert vom Drucksensor mit einem Eingangsbereich von $\pm 2,5$ mbar dargestellt. Der Differenzdruck wurde bei einer Drehzahl von ca. 830 U/min aufgezeichnet.

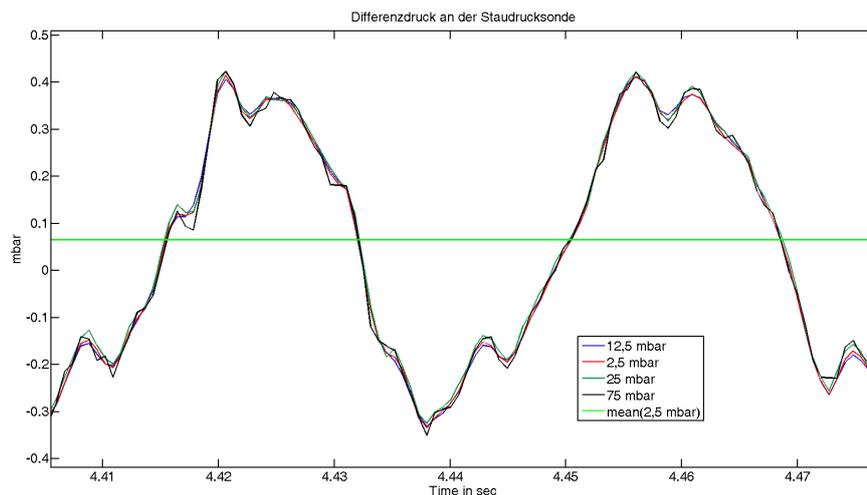


Abbildung 6.59: Gemessener Differenzdruck mit der Truckflow-Staudrucksonde bei ca. 830 U/min.

In Abbildung 6.59 sieht man die Pulsationen, welche durch den Ausschubtakt des Motors entstehen.

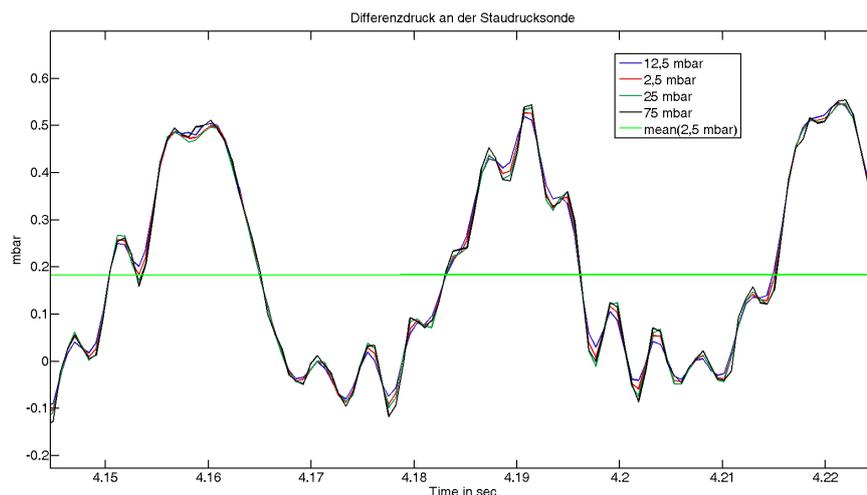


Abbildung 6.60: Gemessener Differenzdruck mit der SKI-Staudrucksonde bei ca. 830 U/min.

Der gemessene mittlere Staudruck beträgt bei der Truckflow-Sonde ca. 0,07 mbar und bei der SKI-Sonde mit ca. 0,18 mbar mehr als das Doppelte. Versuche bei höheren Drehzahlen zeigen, dass die Truckflow-Sonde im generellen einen um 30 bis 40% geringeren Differenzdruck als die SKI-Sonde misst. Da dies doch einen erheblichen Unterschied darstellt, wurden die weiteren Versuche nur mehr mit der SKI-Sonde durchgeführt um weitere Fehler bzw. Probleme, bedingt durch die Staudrucksonde, ausschließen zu können.

Einfluss durch Vibrationen

Im Datenblatt für die Differenzdrucksensoren wird eine Offset Position Sensitivity angegeben. Damit wird der Einfluss von Vibrationen und plötzlichen Positionsänderungen,

wie z.B. durch ein Schlagloch verursacht, auf das Sensorsignal beschrieben. Dieser Effekt ist lt. *All Sensors* auch bei mechanischen Einwirkungen auf die Druckanschlussstutzen und einer falschen Montage durch zu starkes Befestigen des Sensors beobachtbar. Bedingt durch die Montage der Messbox auf der Anhängerkupplung eines Autos kann es zu Vibrationen und leichten Erschütterungen kommen.

Um die Auswirkungen und den Einfluss auf den Messaufbau zu sehen wurde die Messbox auf einem Tisch fixiert und die Anschlussleitung zum Drucksensor mit der Hand, mit einer Frequenz von ca. 2-4 Hz, hin und her bewegt.

In Abbildung 6.61 wird das Verhalten der einzelnen Drucksensoren auf den Mittelwert und die Standardabweichung gezeigt.

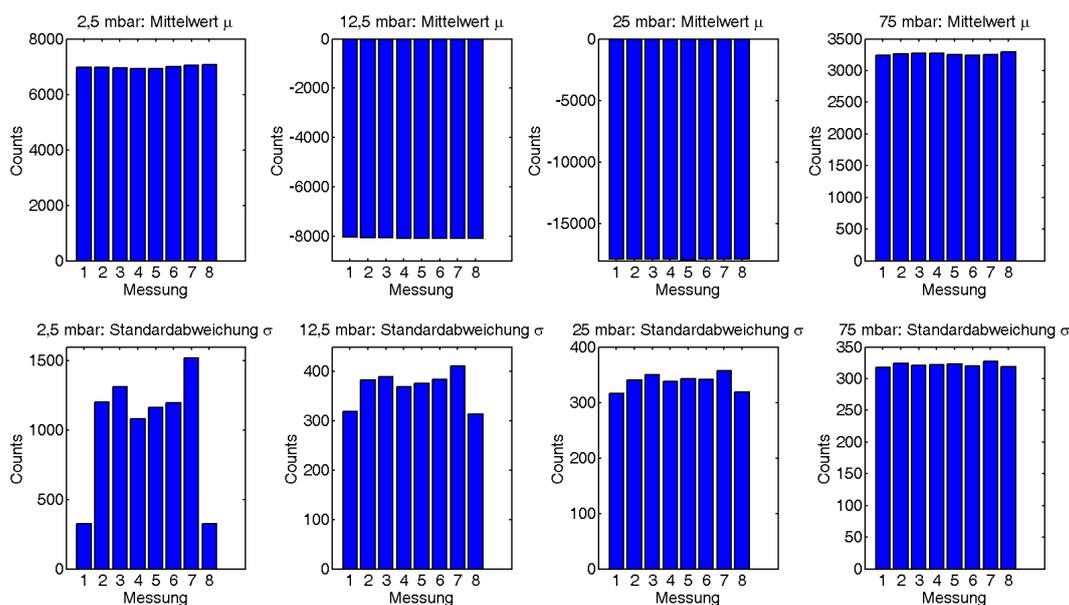


Abbildung 6.61: Auswirkung von Vibrationen auf die Drucksensoren.

Die Messungen 1 und 8 stellen Referenzmessungen dar und wurden ohne Bewegung der Anschlussleitungen durchgeführt. Bei den anderen Messungen erfolgte eine rhythmische Einwirkung auf die Anschlussleitungen, die eine Änderung der Standardabweichung verursachen. Der Mittelwert bleibt hingegen nahezu gleich. Zudem ist ersichtlich, dass mit größerem Messbereich des Drucksensors die Empfindlichkeit auf diese Art von Störungen immer geringer wird.

Abbildung 6.62 zeigt einen typischen Signalverlauf bei diesem Versuch und das dazugehörige Frequenzspektrum.

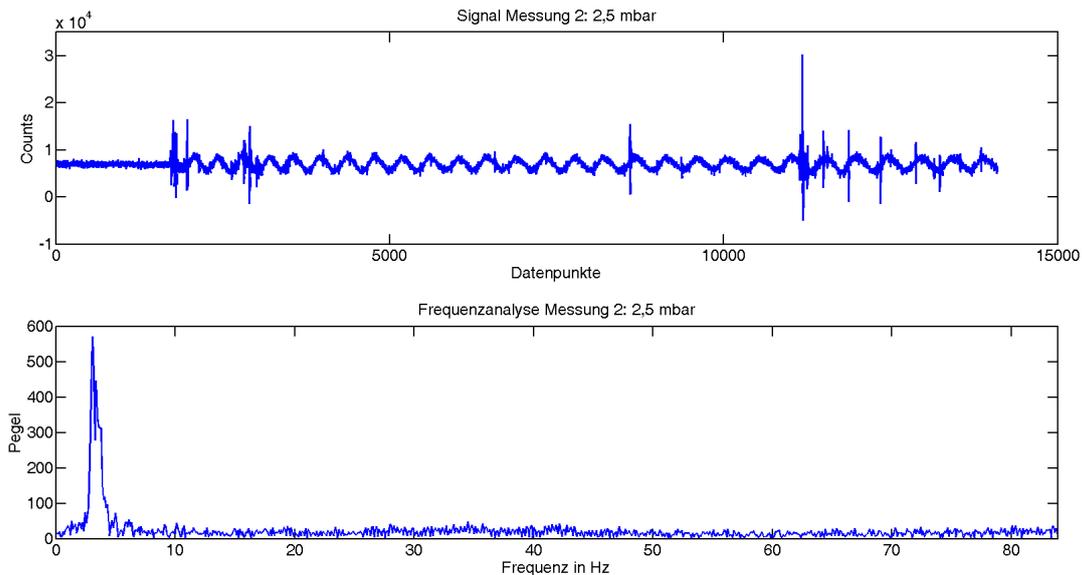


Abbildung 6.62: Signal und Frequenzspektrum unter Einfluss von Vibrationen.

Messungen im Stillstand

Es wurden mehrere Messungen im Stillstand des Fahrzeuges bei unterschiedlichen Drehzahlen durchgeführt. Zweck der Messungen war es, das entwickelte Messsystem bei relativ geringen Strömungsgeschwindigkeiten zu testen und mit anderen System zu vergleichen. Als Vergleichssysteme wurden der TFI4-Sensor von *sytec-controls* und OBD-Daten herangezogen. Aus diesem Grund wurde auch der Abgasmassenstrom berechnet, da beide Vergleichssysteme eine entsprechende Größe zum Vergleichen anbieten.

Von der OBD-Seite gibt es den Luftmassewert, der die angesaugte Luftmasse darstellt. Im Leerlauf ist dieser Wert relativ konstant und im Vergleich zur Abgasmasse etwas geringer. Der TFI4-Sensor bietet mit seinem M1-Wert einen Messwert an, der durch Multiplikation der Querschnittsfläche und der Korrektur der Abgastemperatur ebenfalls die Abgasmasse widerspiegelt. Die Abgastemperatur wird dem TFI4-Sensor via CAN mitgeteilt. Weil aber erst beim Postprocessing die Abgastemperatur bestimmt wird, wurde der Einfachheit halber die Abgastemperatur während der Messung mit 100°C angenommen und zyklisch übermittelt. Dadurch wurde vermieden, dass der TFI4-Sensor in einen Fehlerzustand geht und zudem wurden definierte Verhältnisse geschaffen für eine spätere Korrektur beim Postprocessing.

Zudem wurden vom TFI4-Sensor alle 2 ms der gemessenen Differenzdruck abgefragt. Dieser Differenzdruck dient als Vergleich zu dem gemessenen Differenzdruck vom entwickeltem Messsystem.

Weitere OBD-Daten, wie Drehzahl und Fahrgeschwindigkeit, wurden mitprotokolliert um zu sehen in welchem Betriebszustand die Messung durchgeführt wurde.

In den folgenden Abbildungen werden Messwerte sowie daraus berechnete Werte des Differenzdrucksensors mit einem Druckbereich von $\pm 2,5$ mbar dargestellt, wenn nicht anderes vermerkt. Mit $\text{mean}(x)$ wird der berechnete Mittelwert der Größe x bezeichnet.

In der Abbildung links oben ist ersichtlich bei welcher Drehzahl und Fahrgeschwindigkeit die Messung durchgeführt wurde. Rechts oben wird der Verlauf des gemessenen Differenzdruckes an der Staudrucksonde vom TFI4-Sensor und vom Messsystem dargestellt.

Links unten erfolgt die Darstellung der Strömungsgeschwindigkeit. Der Massenstrom der Ansaugluft bzw. des Abgases von den beiden Sensoren ist rechts unten dargestellt.

In Abbildung 6.63 ist eine Messung bei Leerlauf zu sehen. Die Pulsationen des Differenzdruckes sind deutlich ausgeprägt und nehmen auch negative Werte an. Beim Massenstrom ist zu sehen, dass der Wert des TFI4-Sensors kleiner als die angesaugte Luftmasse ist.

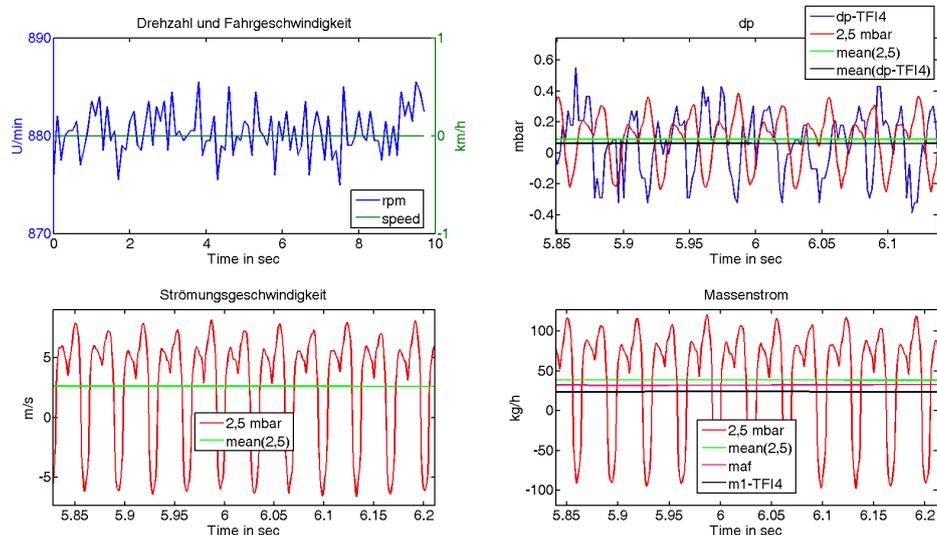


Abbildung 6.63: Verlauf der Messwerte bei 880 U/min.

In Abbildung 6.64 sind Ergebnisse aus einer Messung bei 2500 U/min im Stillstand des Fahrzeuges zu sehen. Die Druckpulsationen sind nicht mehr so deutlich ausgeprägt wie zuvor und nehmen keine negativen Werte mehr an. Der Abgasmassenstrom beider Messsysteme ist nahezu gleich und ist deutlich größer als die gemessene Luftmasse.

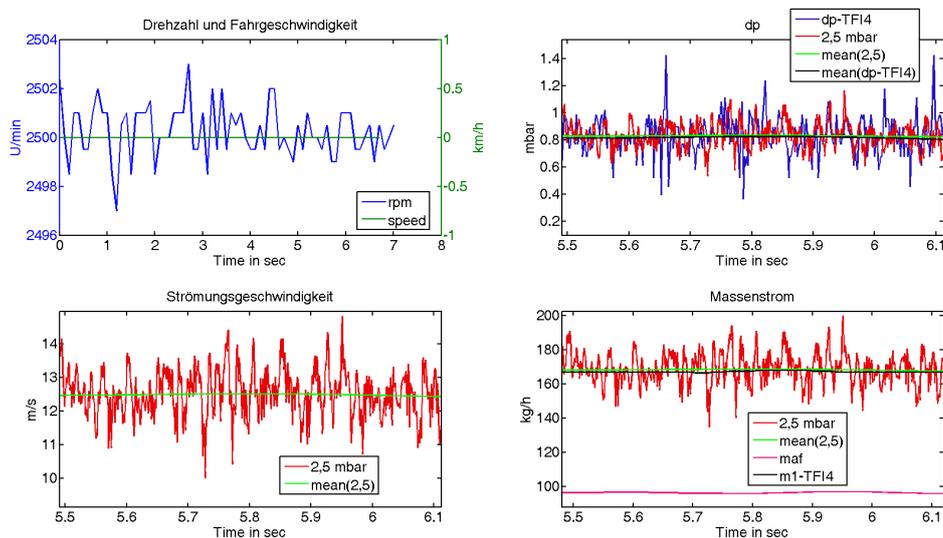


Abbildung 6.64: Verlauf der Messwerte bei 2500 U/min.

Messungen während der Fahrt

In diesem Abschnitt werden Messergebnisse präsentiert, die während einer Fahrt aufgezeichnet wurden.

In Abbildung 6.65 ist eine Beschleunigungsfahrt von 0 auf 40 km/h zu sehen. Hierbei korrelieren die Mittelwerte vom TFI4-Sensor und dem Messsystem relativ gut miteinander. Zudem ist ersichtlich, dass die Abgasmassen einen ähnlichen Verlauf wie die angesaugte Luftmasse haben.

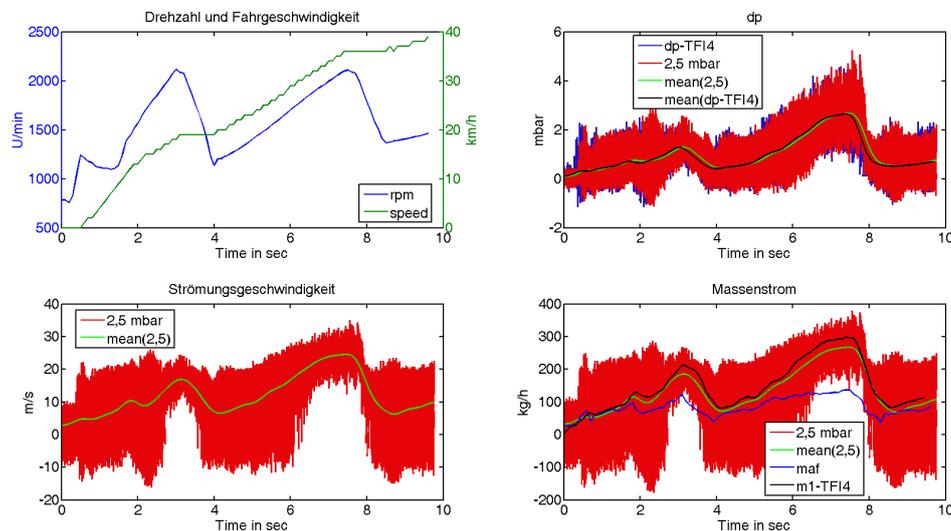


Abbildung 6.65: Verlauf der Messwerte bei Beschleunigung von 0 auf 40 km/h.

In Abbildung 6.66 wird das Fahrzeug von 110 auf 130 km/h beschleunigt. Es sind die Messwerte vom Differenzdrucksensor mit dem Messbereich $\pm 12,5$ mbar dargestellt. Auch hier kann eine gute Korrelation zu den Referenzgrößen festgestellt werden.

Dass im Massenstromdiagramm die Luftmasse etwas verkürzt ist, kann an eventuellen Kommunikationsproblemen mit dem OBD-System liegen. Wahrscheinlich wurden vom Fahrzeug nicht alle Anfragen beantwortet und deshalb fehlen einige Datenpunkte. Die Übermittlung der CAN-Nachrichten an das Hostsystem erfolgt ohne Zeitstempel. Dadurch kann es bei fehlenden Telegrammen zu dem hier ersichtlichen Effekt kommen.

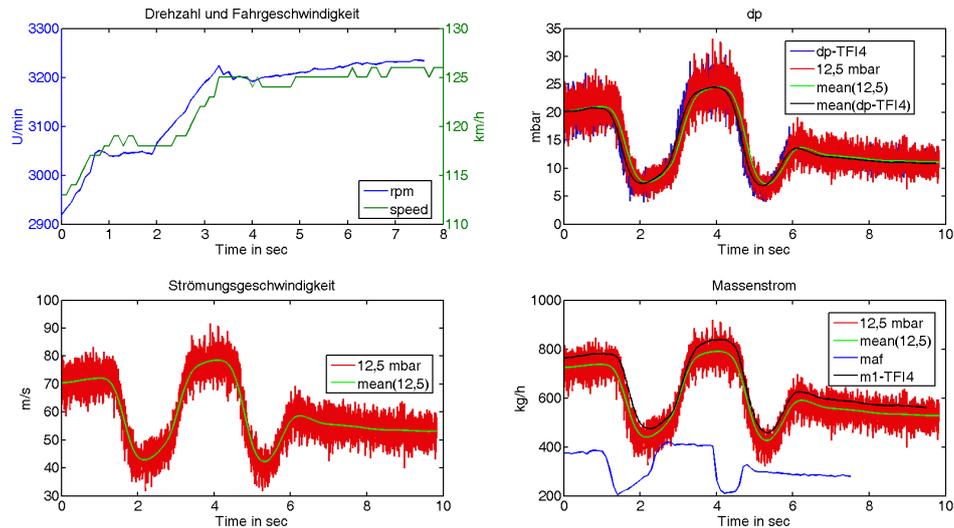


Abbildung 6.66: Verlauf der Messwerte bei Beschleunigung von 110 auf 130 km/h.

6.6 Diskussion

Die Messungen am Fahrzeug zeigen eine gute Korrelation mit anderen Messsystemen. Somit darf gesagt werden, dass von der Erfassung der Messwerte bis zur Ausgabe der Größen ein guter Ansatz bei der Signalaufbereitung, der Signalerfassung und im Postprocessing gefunden wurde. Um weitere Aussagen über das Messsystem machen zu können sind Messungen an einem Prüfstand mit entsprechenden Referenzmessgeräten nötig. Hierbei muss vor allem auf die Reproduzierbarkeit, die Langzeitstabilität und die Genauigkeit der erfassten Größen geachtet werden. Ein weiterer wichtiger Punkt stellt die Korrelation der einzelnen Differenzdruckwerte und der daraus berechneten Größen dar. Eventuell kann dadurch die Genauigkeit des Messsystems erhöht werden.

Für den TFI4-Sensor gilt, dass dieser ebenfalls plausible Messwerte lieferte und für genauere Aussagen eine Messung mit einem Referenzmessgerät am Prüfstand nötig ist.

Untere Messgrenze

Das hier verwendete Messsystem hat eine berechnete Spitze-Spitze-Rauschspannung von 1,63 mV am Eingang des ADCs. Die Umrechnung dieser Spannung in die entsprechenden physikalischen Größen sind in Tabelle 11 für zwei unterschiedliche Abgastemperaturen angegeben.

T_{Abgas}	ρ	Δp	v	\dot{m}
$^{\circ}C$	kg/m^3	mbar	m/s	kg/h
100	0,946	0,00486	1,01	12,17
400	0,524	0,00486	1,36	9,06

Tabelle 11: Untere Messgrenzen bei unterschiedlichen Abgastemperaturen

Aus der Tabelle 11 können die unteren theoretischen Grenzen des Messsystems abgelesen werden. So ermöglicht das Messsystem die Messung eines Abgasmassenstroms von

12,17 kg/h bei 100°C, was einer Strömungsgeschwindigkeit von 1 m/s entspricht. Hieraus wird ersichtlich, dass eine Geschwindigkeitsmessung kleiner 1 m/s nicht möglich ist.

Reduzierung von bekannten Fehlergrößen

Die durchgeführten Versuche und aufgezeigten Fehlerquellen zeigen, dass die Genauigkeit der Sensorik von vielen Faktoren beeinflusst wird.

Um den Einfluss der Sensibilität auf Erschütterungen zu minimieren, ist es nötig das Konzept der Sensorhalterung und des Druckanschlusses zu überdenken. Man könnte die Drucksensoren auf einem Metallblock fixieren und den zu messenden Differenzdruck über entsprechend ausgeführte Luftkanäle im Metallblock dem Sensor zuführen. Dadurch würde keine direkte Verbindung zwischen Verschlauchung und Sensoranschlussstutzen bestehen. Laut dem Hersteller übertragen sich Kräfte am Sensoranschlussstutzen direkt auf die Druckmesszelle und beeinflussen dadurch die Messung. Dies dürfte der Hauptgrund für die erhöhte Empfindlichkeit der Sensorik auf Bewegungen an den Druckzuleitungen beim hier durchgeführten Versuch sein.

Aus der Abbildung 6.57 ist ersichtlich, dass durch Temperatureinfluss Störungen verursacht werden. Um das Driften der Bauteile zu minimieren, wäre es möglich mit einem Peltierelement die Messbox auf eine konstante Temperatur zu regeln. Als Temperatursensor bietet sich der BME280 an. Eine andere Möglichkeit wäre es, den entstandenen Fehler durch die aktuelle Temperatur der Messbox rechnerisch zu kompensieren.

Denkbar wäre, in einem fixen zeitlichem Intervall, die Anschlüsse der Differenzdrucksensoren zu wechseln. So würde, bei einem positiven Eingangsdruck vorausgesetzt, einmal eine positive und einmal eine negative Größe gemessen. Die Differenz zwischen beiden Werten entspricht dem doppelten Messwert und ist vom Offset befreit. Inwiefern dieser Ansatz praktikabel ist, muss untersucht werden, da es zu Problemen bei schnellen Änderungen des Differenzdruckes kommen kann. Zudem müssen geeignete Magnetventile bzw. eine Umschaltlogik gefunden werden, welche relativ rasch schalten und keine großen Störungen auf der pneumatischen bzw. elektronischen Seite verursachen.

Es besteht ein Einfluss der durch die Länge und den Querschnitt der Verschlauchung bestimmt wird. Die Länge zwischen Staudrucksonde und Drucksensor soll relativ gering sein. Zudem muss der Querschnitt der Verschlauchung angepasst sein, nicht zu klein um dämpfend zu wirken und auch nicht zu groß um dynamischen Änderungen nach folgen zu können. In [11] wurden Untersuchungen zu pulsierenden Strömungen und Messungen mit einem Drucksensor unternommen und u.a. auch obige Punkte als Einflussfaktoren erwähnt.

Abgastemperaturmessung

Um den Messfehler bei der Erfassung der Abgastemperatur zu minimieren, wird es nötig sein mit einem geeigneten Auswertebaustein, beispielsweise dem MAX6675, die Temperatur zu erfassen. Wichtig ist hier, dass die Kompensationstemperatur so nah als möglich an der Übergabestelle des Thermoelements gemessen wird.

Abtastung

Dass Messwerte im Low-Speed Modus mit CLKDIV=1 eine geringere Standardabweichung als im High-Resolution Modus haben, kann daran liegen, dass die Chopperfrequenz von ca. 200 kHz bzw. ein Vielfaches davon bei der Abtastung ein Problem darstellen. Im High-Resolution Modus wird mit einer Frequenz $f_{mod} = 921,6 \text{ kHz}$ abgetastet und eventuell werden dabei Frequenzen aus dem Chopperbandbereich mit erfasst. Im Low-Speed Modus mit CLKDIV=1 wird hingegen mit einer Frequenz $f_{mod} = 92,16 \text{ kHz}$ gearbeitet, dies ist weniger als die Hälfte der Chopperfrequenz.

Es ist zwar auf der Schaltung in Abbildung 6.45 vor dem ADC-Eingang ein differentielles Filter, gebildet aus R_E bzw. R_F und C_3 aufgebaut. Allerdings liegt dessen Grenzfrequenz bei 725 kHz und trägt somit nicht viel zur Filterung der Chopperfrequenz bei. Ein Erhöhen von C_3 ist nur bedingt möglich, da ansonsten Beeinflussungen bei der Abtastung auftreten können. Eine Alternative wäre die Implementierung eines Filters zwischen INA und FDA. Hier wird der ADC nicht beeinflusst und es besteht die Möglichkeit die vom INA verursachten Frequenzen zu reduzieren bzw. zu eliminieren.

Embedded System

Um wirklich ein eigenständiges Messsystem zu erhalten, welches schlussendlich Geschwindigkeit, Abgasmassenstrom uvm. ausgibt, wird es nötig sein den aktuell verwendeten BECK-SC24 gegen ein anderes System auszutauschen. Das neue System soll zumindest eine Floating Point Unit und Direct Memory Access (DMA) für SPI besitzen.

Der SC24 besitzt keinen DMA. Deshalb ist das System immer sehr lange mit den SPI-Abfragen blockiert. Im Low-Speed Modus mit einer Datenrate von 1,44 kHz sind zwar keine Probleme zu erwarten, jedoch kommt der Prozessor bei einer Datenrate von 7,2 kHz schon an seine Grenzen. Es wird alle $138 \mu\text{s}$ ein Interrupt getriggert. Die SPI-Abfrage dauert bei einer SPI-Taktfrequenz von 3,686 Mhz ca. $55 \mu\text{s}$. Somit bleiben nur mehr ca. $80 \mu\text{s}$ um andere Aufgaben zu erledigen, bevor wieder ein neuer Interrupt kommt. Die maximale SPI-Taktfrequenz wird durch den ADS1278-Oszillator begrenzt und darf nicht höher als dessen Taktfrequenz sein.

Eine höhere Datenrate des ADCs wäre vor allem interessant um weitere Untersuchungen im High-Resolution Modus durchführen zu können. Zurzeit ist dies nur möglich, wenn mehr oder weniger nur die SPI-Abfrage und die Datenkommunikation am SC24 läuft.

Eine Floating Point Unit ist erforderlich, weil bedingt durch den „square root error“ [35] es zuerst nötig ist, aus den Druckmesswerten die Strömungsgeschwindigkeit zu berechnen bevor eine Mittelung stattfinden kann.

Elektronik

Verbesserung von Seiten der Elektronik können eventuell durch einen anderen FDA aber auch einen anderen Operationsverstärker Typ für den INA erreicht werden. Hierbei ist abzuwägen, ob weiterhin ein Operationsverstärker mit Choppertechnologie verwendet wird.

7 Schlussfolgerung

Im Zuge dieser Arbeit wurden mögliche Prinzipien für die Messung der Abgasgeschwindigkeit bei Verbrennungsmotoren erläutert und auf deren Vor- und Nachteile, speziell im Automotiven Umfeld eingegangen. Hierbei wurden auch grundlegende Punkte, die sich aus physikalischen Prinzipien ergeben angesprochen und behandelt.

Der Abgasstrom eines Verbrennungsmotors weist in der Regel Pulsationen auf. Um eventuell den Laufzeiteffekt der Pulsationen auszunützen wurde ein Versuch unternommen, mittels zwei örtlich versetzter Drucksensoren einen Laufzeitunterschied aus den gemessenen Druckverläufen zu generieren. Es konnte kein zeitlicher Unterschied festgestellt werden, da sich laut der Theorie der Raumakustik in einem Messrohr eine stehende Welle ausbildet.

In einem zweiten Versuch wurde die Geschwindigkeitsmessung mittels Differenzdruckmessung betrachtet. Neben der Evaluierung verschiedener Staudrucksonden erfolgte die Evaluierung eines am Markt befindlichen Differenzdruckmessgerätes mit CAN-Schnittstelle und die Entwicklung eines eigenen Messsystems. Das Messsystem besteht aus vier Differenzdrucksensoren mit unterschiedlichem Messbereich, die mit einer eigens dafür entwickelten Verstärkerstufe und Schnittstellen-Platine von einem Embedded System verwaltet werden.

Das Messsystem besteht aus einer Schnittstellen-Platine, welche über acht simultan abtastende ADC-Eingängen verfügt und als Trägerplatine für die Sensorplatinen dient. Die Schnittstellen-Platine wird von einem Embedded System verwaltet, das die Kommunikation zum Hostsystem und zu dem evaluierenden busfähigen Differenzdrucksensor integriert und die Kommunikation mit der CAN-ODB-II-Schnittstelle des Autos abwickelt.

Die Sensorplatine verfügt über eine Verstärkerstufe und bereitet damit das schwache Signal der verwendeten Differenzdrucksensoren für die Messung mit der Schnittstellen-Platine auf.

Über eine in C# entwickelte Konsolenanwendung erfolgt via Ethernetschnittstelle zum Embedded System der Datenaustausch mit dem Messsystem. Im Postprocessing werden durch einen eigens entwickelten Algorithmus die Messdaten ausgewertet und für die weitere Datenverarbeitung abgespeichert bzw. visualisiert.

Die ausgewerteten Messdaten wurden mit Werten von der OBD-II-Schnittstelle und dem busfähigen Differenzdrucksensor verglichen und zeigten eine gute Übereinstimmung.

Das busfähige Differenzdruckmessgerät und das entwickelte Messsysteme liefern beide plausible Messwerte. Weitere Aussagen werden nach Messungen mit einem Referenzmessgerät am Prüfstand möglich sein.

Literatur

- [1] *OBD-II PIDs*. <http://obdcon.sourceforge.net/2010/06/obd-ii-pids/>, Abruf: 15.01.2017
- [2] *Reale Gase und das Modell ideales Gas*. online. <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik-abitur/artikel/reale-gase-und-das-modell-ideales-gas>, Abruf: 10.01.2017
- [3] BÖSWIRTH, L. ; BSCHORER, S. : *Technische Strömungslehre*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-05668-1>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-05668-1>. – S. 6; Kap. 2; Kap. 11.3;
- [4] CONTROLS systec: *truckflow*. online. http://www.systec-controls.de/files/truck-web_d.pdf, Abruf: 06.01.2016
- [5] D. STEPANEK, S. V. N.-V. : *Was den Betreiber von Massedurchflussmessern nach dem CORIOLIS-Prinzip interessiert*. <http://www.inelektro.de/P051a.pdf>, Abruf: 14.12.2016
- [6] DEVICES, A. : *Datasheet AD7768*. online. <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7768-7768-4.pdf>, Abruf: 08.01.2017
- [7] DEVICES, A. : *Datasheet ADA4528*. online. http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADA4528-1_4528-2.pdf, Abruf: 08.01.2017
- [8] DEVICES, A. : *High Speed Differential ADC Driver Design Considerations*. online. <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-1026.pdf>, Abruf: 12.01.2017. – APPLICATION NOTE AN-1026
- [9] DEVICES, A. : *Low Noise Signal Conditioning for Sensor-Based Circuits*. <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/MS-2066.pdf?doc=an-1264.pdf>. Version: Nov 2010, Abruf: 12.01.2017
- [10] DEVICES, A. : *Lowest Noise Zero-Drift Amplifier Has 5.6 nV/ \sqrt{Hz} Voltage Noise Density*. online. <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-1114.pdf>. Version: Apr 2014, Abruf: 12.01.2017. – APPLICATION NOTE AN-1114
- [11] DOBLHOFF-DIER, K. ; KUDLATY, K. ; WIESINGER, M. ; GRÖSCHL, M. : Time resolved measurement of pulsating flow using orifices. In: *Flow Measurement and Instrumentation* 22 (2011), Nr. 2, S. 97–103. ISBN 0955–5986
- [12] FIEDLER, O. : *Strömungs- und Durchflußmeßtechnik*. Oldenbourg, 1992
- [13] FONSECA GONZÁLEZ, N. ; CASANOVA KINDELÁN, J. ; LÓPEZ MARTÍNEZ, J. M.: Methodology for instantaneous average exhaust gas mass flow rate measurement. In: *Flow Measurement and Instrumentation* 49 (2016), S. 52–62. ISBN 0955–5986
- [14] GERHARD GRABER, W. W.: *Vorlesungsskript Raumakustik*. WS 2015/16. – Version 5.6
- [15] GMBH, A. L.: *Montage- und Bedienungsanleitung Staurohre*. https://www.airflow.de/downloads/2638/Anleitung_Staurohre.pdf. Version: Mai 2013, Abruf: 10.01.2017

-
- [16] GMBH, B. I.: *Embedded Controller SC2x*. online. <https://www.beck-ipc.com/de/produkte/sc2x/>, Abruf: 13.01.2017
- [17] GMBH, H. : *Benutzerinformation Sonden FA*. <http://www.hoentzsch.com>,
- [18] GMBH, H. : *Vortex-Strömungssensor VA*. <http://www.hoentzsch.com>,
- [19] GMBH, M. : *Bedienungsanleitung FI Gardex Durchflussmessgerät*. online. www.mecon.de/de/fi-gardex.html?file=tl_files/uploads/product-files/fi_gardex/de/Anleitung.pdf. Version: 01/2015, Abruf: 14.12.2016
- [20] GMBH, S. S. . K. I.: *SDF-Durchflusssonden*. <https://www.ski-gmbh.com/cms/images/docs/de/datasheets/sdf/TI-SDF-de-1637.pdf>, Abruf: 26.12.2016
- [21] HOFFMANN, J. : *Taschenbuch der Messtechnik*. 7., aktualisierte Auflage. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2015. <http://dx.doi.org/10.3139/9783446445116>. <http://dx.doi.org/10.3139/9783446445116>. – Kap. 3
- [22] HONEYWELL: *Microstructure Pressure Sensors - SCX Series*. online. <https://sensing.honeywell.com/honeywell-sensing-scx-series-microstructure-pressure-sensors-product-sheet-008096-1-en.pdf>. Version: 2003, Abruf: 28.12.2016
- [23] INSTRUMENT, T. : *Datasheet ADS1278*. online. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1278.pdf>, Abruf: 08.01.2017
- [24] INSTRUMENT, T. : *Datasheet THS4521*. online. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/th4521.pdf>, Abruf: 08.01.2017
- [25] INSTRUMENT, T. : *DC Output Errors in a Fully-Differential Amplifier*. online. <http://www.ti.com/lit/an/slva417/slva417.pdf>. Version: May 2010, Abruf: 12.01.2017. – Application Report SLVA417
- [26] INSTRUMENT, T. : *Fully-Differential Amplifiers*. online. <http://www.ti.com/lit/an/sloa054e/sloa054e.pdf>. Version: Sep 2016, Abruf: 12.01.2017
- [27] INSTRUMENTS, T. : *Analysis of fully differential amplifiers*. online. <http://www.ti.com/lit/an/slyt157/slyt157.pdf>. Version: Nov 2000, Abruf: 12.01.2017
- [28] JØRGENSEN, F. E.: *How to measure turbulence with hot-wire anemometers - a practical guide*. <http://www.dantecdynamics.com/docs/support-and-download/research-and-education/practicalguide.pdf>. Version: 2002, Abruf: 15.12.2016
- [29] KÜMMEL, W. : *Technische Strömungsmechanik: Theorie und Praxis*. 3., überarbeitete und ergänzte Auflage. Wiesbaden : Teubner, 2007. – ISBN 3835101412;9783835101418;. – S. 54-57
- [30] KOMMISSION, E. : *VERORDNUNG (EU) 2016/427 DER KOMMISSION vom 10. März 2016 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 6)*. online. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32016R0427>, Abruf: 06.01.2016
- [31] KUPNIK, M. ; O’LEARY, P. ; SCHRODER, A. ; RUNGGER, I. : Numerical simulation of ultrasonic transit-time flowmeter performance in high temperature gas flows. In: *IEEE Symposium on Ultrasonics, 2003* Bd. 2, 2003, S. 1354–1359 Vol.2
- [32] KUPNIK, M. ; SCHRODER, A. ; O’LEARY, P. ; BENES, E. ; GROSCHL, M. : An ultrasonic transit-time gas flowmeter for automotive applications. In: *Proceedings of*
-

- [33] KUPNIK, M. ; SCHRODER, A. ; O’LEARY, P. ; BENES, E. ; GROSCHL, M. : Adaptive Pulse Repetition Frequency Technique for an Ultrasonic Transit-Time Gas Flowmeter for Hot Pulsating Gases. In: *IEEE Sensors Journal* 6 (2006), Aug, Nr. 4, S. 906–915. <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2006.876042>. – DOI 10.1109/JSEN.2006.876042. – ISSN 1530–437X
- [34] MICRO MOTION, I. : *Micro Motion® ELITE® Coriolis Flow and Density Meters*. <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Micro%20Motion%20Documents/ELITE-PDS-PS-00374.pdf>. Version: Nov 2015, Abruf: 14.12.2016. – Product Data Sheet PS-00374, Rev. AC
- [35] NAKAMURA, H. ; ASANO, I. ; ADACHI, M. ; SENDA, J. : Analysis of pulsating flow measurement of engine exhaust by a Pitot tube flowmeter. In: *International Journal of Engine Research* 6 (2005), Nr. 1, 85–93. <http://dx.doi.org/10.1243/146808705X7329>. – DOI 10.1243/146808705X7329
- [36] PISCHINGER, R. ; KLELL, M. ; SAMS, T. : *Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine*. Dritte Auflage. Vienna : Springer Vienna, 2009. – ISBN 3211992766;9783211992760;. – S. 446–449
- [37] RICHTER, H. : *Rohrhydraulik: ein Handbuch zur praktischen Strömungsberechnung*. 3., überpr. u. erg. Aufl. Berlin [u.a.] : Springer, 1958
- [38] SCHRODER, A. ; KUPNIK, M. ; O’LEARY, P. ; BENES, E. ; GROSCHL, M. : A capacitance ultrasonic transducer for fast flow-measurements in hot pulsating gases [automotive applications]. In: *Proceedings of IEEE Sensors, 2004.*, 2004, S. 240–243 vol.1
- [39] SENSORS, A. : *DLVR Series Low Voltage Digital Pressure Sensors*. online. https://www.allensors.com/datasheets/DS-0300_Rev_C1.pdf, Abruf: 07.01.2017. – DS-0300 Rev C
- [40] SENSORS, A. : *DLVR Series Low Voltage Digital Pressure Sensors*. online. <https://www.allensors.com/datasheets/DS-0091-Rev-C1.pdf>, Abruf: 07.01.2017. – 091 Rev C
- [41] SENSORS, A. : *White Papers - Pressure Point 4 Dual Die Compensation for MEMS Pressure Sensors*. online. <https://www.allensors.com/engineering-resources/white-papers/dual-die-compensation-for-mems-pressure-sensors>, Abruf: 07.01.2017
- [42] SENSORTEC, B. : *BME280*. https://www.bosch-sensortec.com/bst/products/all_products/bme280, Abruf: 07.01.2017
- [43] SMITH, S. W.: *The Scientist and Engineers Guide to Digital Signal Processing*. California Technical Publishing http://www.analog.com/en/education/education-library/scientist_engineers_guide.html. – Chap. 15
- [44] SUREK, D. ; STEMPIN, S. : *Angewandte Strömungsmechanik: für Praxis und Studium*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2007. – ISBN 3835101188;9783835101180;. – S. 80–87, 161–162, 302
- [45] SVETE, A. ; KUTIN, J. ; BOBOVNIK, G. ; BAJŠIĆ, I. : Theoretical and experimental investigations of flow pulsation effects in Coriolis mass flowmeters. In: *Journal of Sound and Vibration* 352 (2015), S. 30–45. ISBN 0022–460X

-
- [46] TECHNOLOGY, L. : *Precision Fully Differential Op Amp Drives High Resolution ADCs at Low Power*. online. <http://cds.linear.com/docs/en/lt-journal/LTJournal-V23N4-04-df-LTC6362-KrisLokere.pdf>. Version: Jan 2014, Abruf: 12.01.2017

Verwendete Tools

Eagle

Version: 7.2.0

Zum Erstellen der Platinenlayouts

Paradigm C++ Beck IPC Edition

Version: 7.00.054

Zur Erstellung der Software am Embedded System - BECK-SC24

Visual Studio Community 2015

Version: 10.0.23107.0 D14REL

Zur Erstellung einer auf C# basierenden Software zur Kommunikation via Ethernet und TCP zum Embedded System

MATLAB

Version: 8.1.0.604 (R2013a)

Zum Analysieren und Auswerten der aufgezeichneten Daten.

LTspice IV

Version: 4.23k

Programm zum Simulieren von elektronischen Schaltungen.

PCAN-VIEW

Version: 4.0.29.426

Softwaretool in Verbindung mit dem PEAK PCAN-USB CAN-Interface für USB zur Diagnose und Tests am CAN-Bus

Anhang

Folgende Dokumente sind im Anhang angeführt:

- A.1 Rauschspannungsberechnung Instrumentenverstärker
- A.2 Übersicht über OBD-II-Telegramme
- A.3 Schaltplan Schnittstellen-Platine
- A.4 Schaltplan Sensorplatine

A.1 Rauschspannungsberechnung Instrumentenverstärker

Abbildung A.1 zeigt das Schaltbild, welches als Basis für die Rauschspannungsberechnung verwendet wird. Mit R_s wird der Ausgangswiderstand der Sensormessbrücke und mit R_f ein eventuell implementierter Widerstand für die Signalfilterung berücksichtigt.

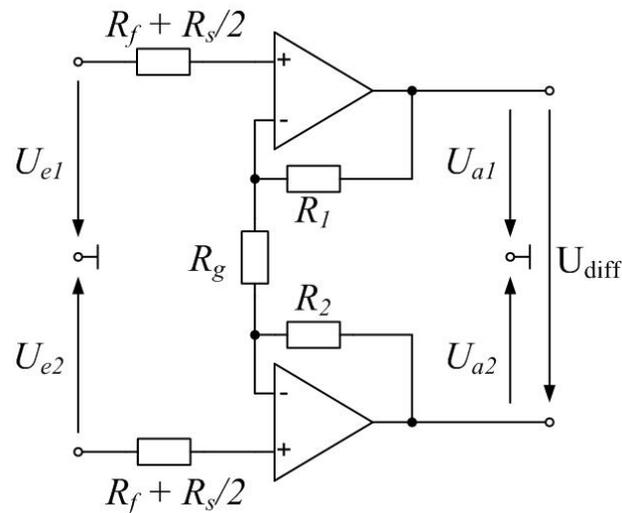


Abbildung A.1: Instrumentenverstärker.

Allgemein berechnet sich die effektive thermische Rauschspannung U_n eines Widerstandes R nach der Formel

$$U_n = \sqrt{4 \cdot k_b \cdot R \cdot T \cdot \Delta f}.$$

k_b Boltzmann-Konstante $1,3806504e^{-23} J/K$

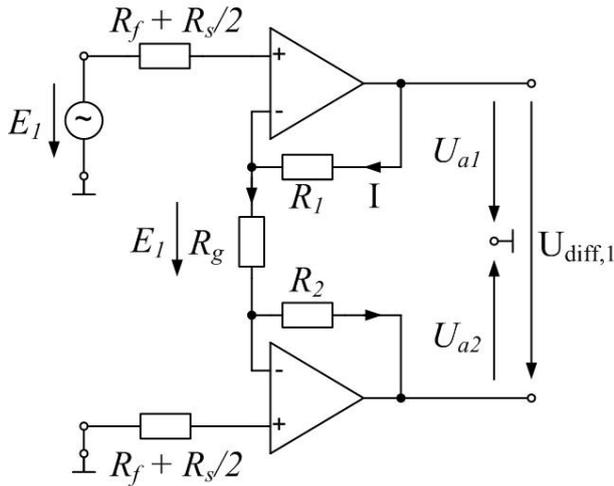
T absolute Temperatur in Kelvin

Δf Bandbreite des Signals in Hz

R Widerstandswert in Ω

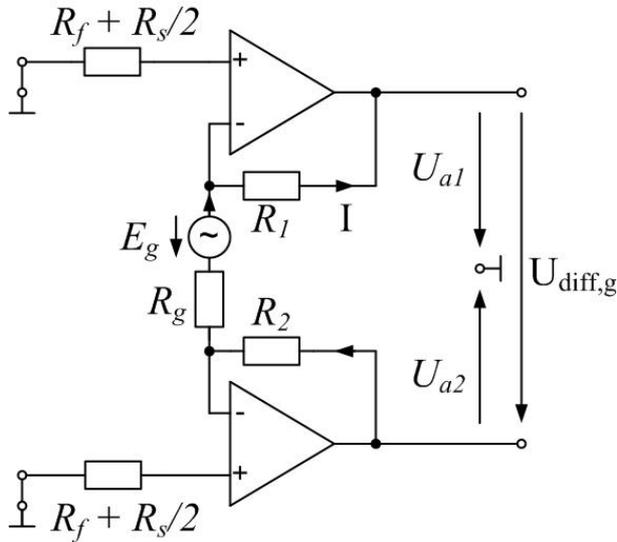
Im nachfolgenden wird mit E die Rauschspannungsquelle bezeichnet. Bei Widerständen wird mit $E(R)$ angegeben, welche Widerstände die Rauschspannungsquelle bilden. Negative Werte für die Rauschspannung sind nur durch die Wahl der Spannungs- und Stromrichtungen bedingt und haben keine Bedeutung.

Einfluss durch Eingangswiderstände



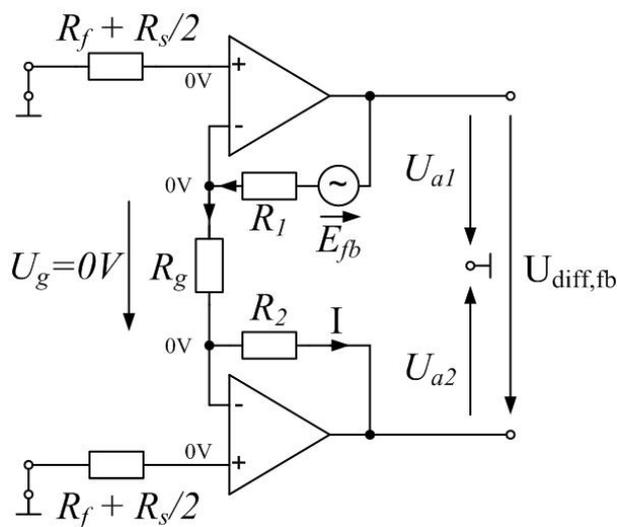
$$\begin{aligned}
 U_{diff,1} &= I \cdot R_2 + I \cdot R_g + I \cdot R_1 \\
 &= \frac{E_1}{R_g} \cdot (R_g + R_1 + R_2) \\
 &= E_1 \cdot \left(1 + \frac{R_1 + R_2}{R_g} \right) \\
 \text{mit } E_1 &= E \left(\frac{R_s}{2} + R_f \right)
 \end{aligned}$$

Einfluss durch den Verstärkerwiderstand



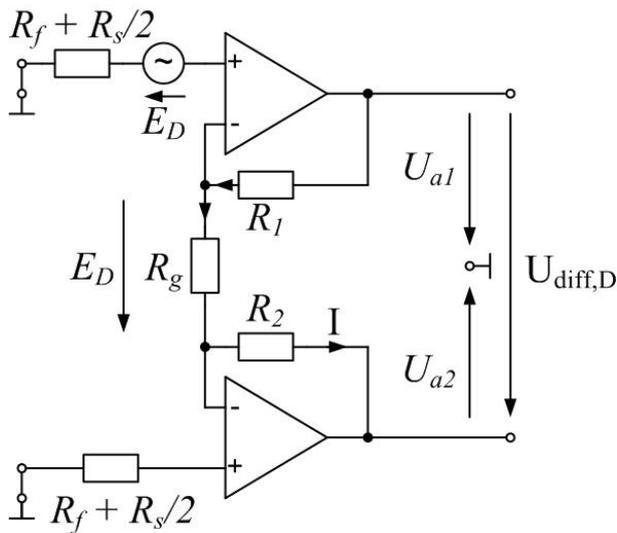
$$\begin{aligned}
 U_{diff,g} &= E_g - I \cdot R_2 + I \cdot R_g + I \cdot R_1 \\
 &= E_g - \frac{E_g}{R_g} \cdot (R_g + R_1 + R_2) \\
 &= -E_g \cdot \left(\frac{R_1 + R_2}{R_g} \right) \\
 \text{mit } E_g &= E(R_g)
 \end{aligned}$$

Einfluss durch den Rückkopplungswiderstand



$$\begin{aligned}
 U_{diff,fb} &= -E_{fb} + I \cdot (R_2 + R_g + R_1) \\
 \text{mit } I &= \frac{U_g}{R_g} = 0 \text{ A folgt} \\
 U_{diff} &= -E_{fb} \\
 \text{mit } E_{fb} &= E(R_1) \text{ bzw. } E(R_2)
 \end{aligned}$$

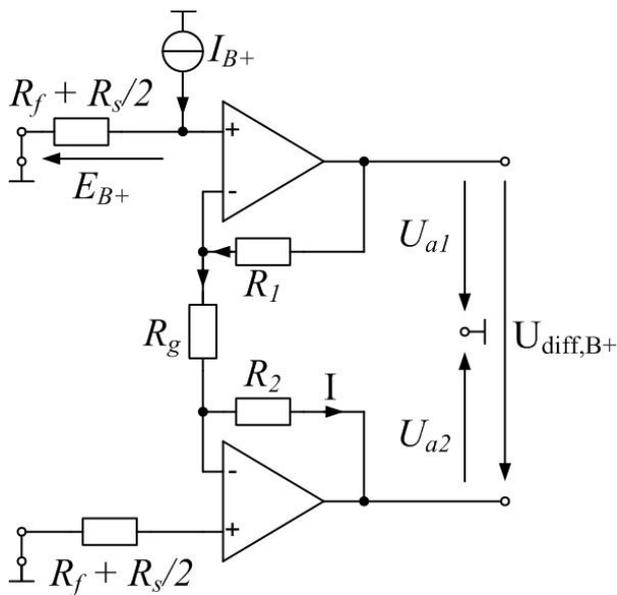
Einfluss durch das Spannungsrauschen des Verstärkers



$$\begin{aligned}
 U_{diff,D} &= I \cdot R_2 + I \cdot R_g + I \cdot R_1 \\
 &= \frac{E_D}{R_g} \cdot (R_g + R_1 + R_2) \\
 &= E_D \cdot \left(1 + \frac{R_1 + R_2}{R_g}\right)
 \end{aligned}$$

mit E_D = Spannungsrauschen des Operationsverstärkers

Einfluss durch das Stromrauschen am positiven Eingang des Verstärkers



$$U_{diff,B+} = I \cdot (R_g + R_1 + R_2)$$

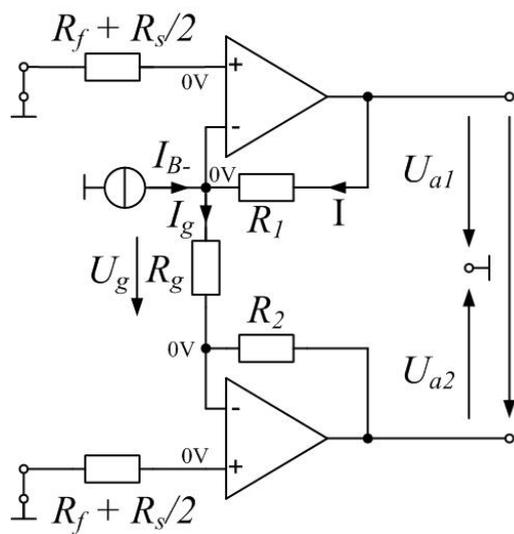
mit $I = \frac{E_{B+}}{R_g}$ folgt

$$U_{diff,B+} = E_{B+} \cdot \left(1 + \frac{R_1 + R_2}{R_g}\right)$$

mit $E_{B+} = I_{B+} \cdot \left(\frac{R_s}{2} + R_f\right)$

I_{B+} Stromrauschen am Pluseingang

Einfluss durch das Stromrauschen am negativen Eingang des Verstärkers



es gilt $U_g = 0\text{ V}$ und dadurch $I_g = 0\text{ A}$

somit $I_{B-} = -I$

$$U_{diff,B-} = I \cdot R_1$$

$$= -I_{B-} \cdot R_1$$

I_{B-} Stromrauschen am Minuseingang

Zusammenfassung

Die Rauschspannung am Ausgang $U_{a,diff}$ des Instrumentenverstärkers setzt sich aus der geometrischen Addition der einzelnen Teilrauschspannungen zusammen.

$$U_{a,diff} = \sqrt{2 \cdot U_{diff,1}^2 + U_{diff,g}^2 + 2 \cdot U_{diff,fb}^2 + 2 \cdot U_{diff,D}^2 + 2 \cdot U_{diff,B+}^2 + 2 \cdot U_{diff,B-}^2}$$

A.2 Übersicht über OBD-II-Telegramme

Übersicht über die Abfrage Parameter IDs (PID), im CAN-Telegramm das Datenbyte data[2], siehe [1].

Luftmasse

Anfrage-Luftmasse									
CAN-ID	DLC	data[0]	data[1]	data[2]	data[3]	data[4]	data[5]	data[6]	data[7]
0x7DF	8	0x02	0x01	0x10	-	-	-	-	-
Antwort-Luftmasse									
CAN-ID	DLC	data[0]	data[1]	data[2]	data[3]	data[4]	data[5]	data[6]	data[7]
0x7E8	8	0x04	0x01	0x10	maf_high	maf_low	-	-	-

Abbildung A.2: CAN-Telegramme für Anfrage und Antwort Luftmasse.

$$Luftmasse = \frac{(maf_high \cdot 256 + maf_low)}{100} \text{ in g/s}$$

Geschwindigkeit

Anfrage-Geschwindigkeit									
CAN-ID	DLC	data[0]	data[1]	data[2]	data[3]	data[4]	data[5]	data[6]	data[7]
0x7DF	8	0x02	0x01	0x0D	-	-	-	-	-
Antwort-Geschwindigkeit									
CAN-ID	DLC	data[0]	data[1]	data[2]	data[3]	data[4]	data[5]	data[6]	data[7]
0x7E8	8	0x02	0x01	0x0D	speed	-	-	-	-

Abbildung A.3: CAN-Telegramme für Anfrage und Antwort Geschwindigkeit.

$$Geschwindigkeit = speed \text{ in km/h}$$

Drehzahl

Anfrage-Drehzahl									
CAN-ID	DLC	data[0]	data[1]	data[2]	data[3]	data[4]	data[5]	data[6]	data[7]
0x7DF	8	0x02	0x01	0x0C	-	-	-	-	-
Antwort-Drehzahl									
CAN-ID	DLC	data[0]	data[1]	data[2]	data[3]	data[4]	data[5]	data[6]	data[7]
0x7E8	8	0x04	0x01	0x0C	rpm_high	rpm_low	-	-	-

Abbildung A.4: CAN-Telegramme für Anfrage und Antwort Drehzahl.

$$Drehzahl = \frac{(rpm_high \cdot 256 + rpm_low)}{4} \text{ in U/min}$$

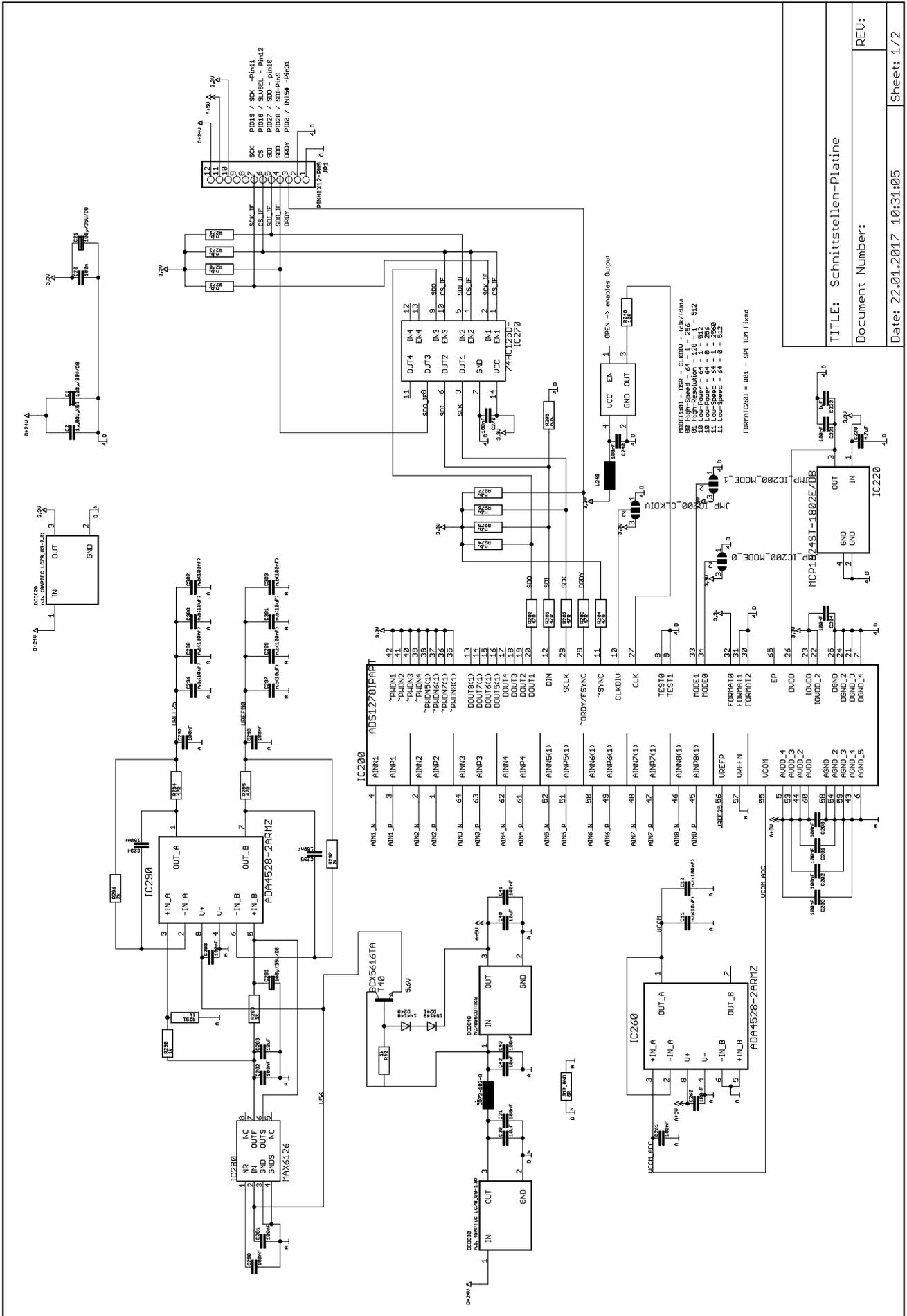
Außentemperatur

Anfrage-Außentemperatur									
CAN-ID	DLC	data[0]	data[1]	data[2]	data[3]	data[4]	data[5]	data[6]	data[7]
0x7DF	8	0x02	0x01	0x46	-	-	-	-	-
Antwort-Außentemperatur									
CAN-ID	DLC	data[0]	data[1]	data[2]	data[3]	data[4]	data[5]	data[6]	data[7]
0x7E8	8	0x03	0x01	0x46	temp	-	-	-	-

Abbildung A.5: CAN-Telegramme für Anfrage und Antwort Außentemperatur.

$$Aussentemperatur = [temp - 40] \text{ in } ^\circ\text{C}$$

A.3 Schaltplan Schnittstellen-Platine



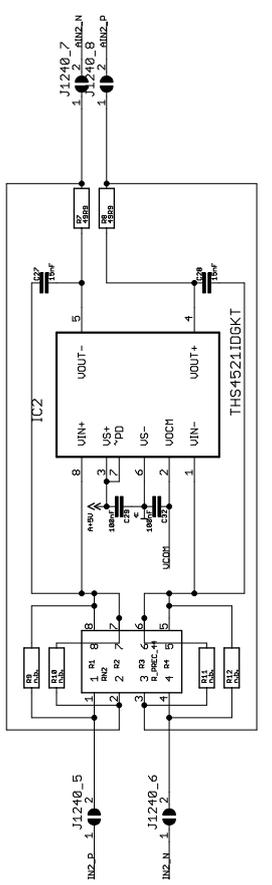
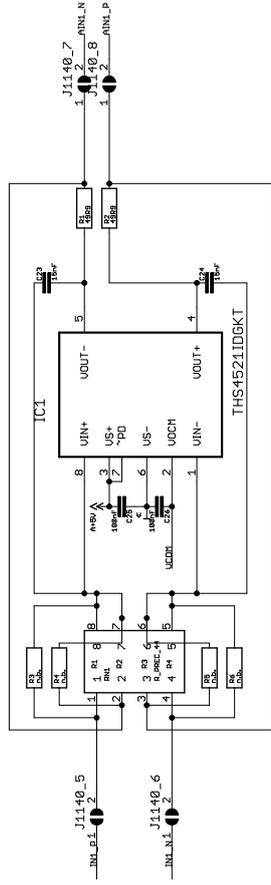
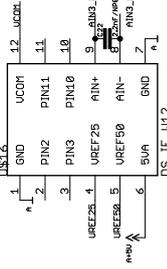
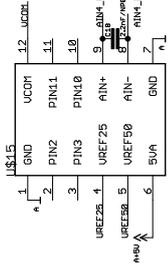
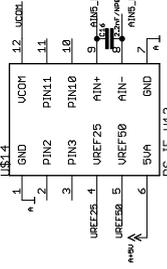
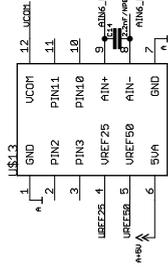
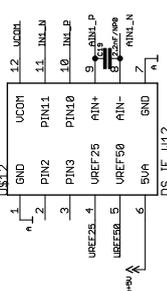
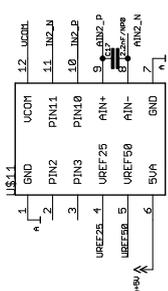
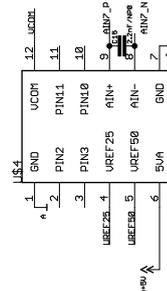
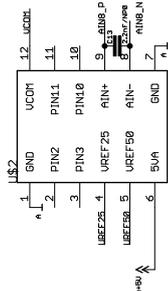
TITLE: Schnittstellen-Platine

Document Number:

REV:

Date: 22.01.2017 10:31:05

Sheet: 1/2



TITLE: Schnittstellen-Platine

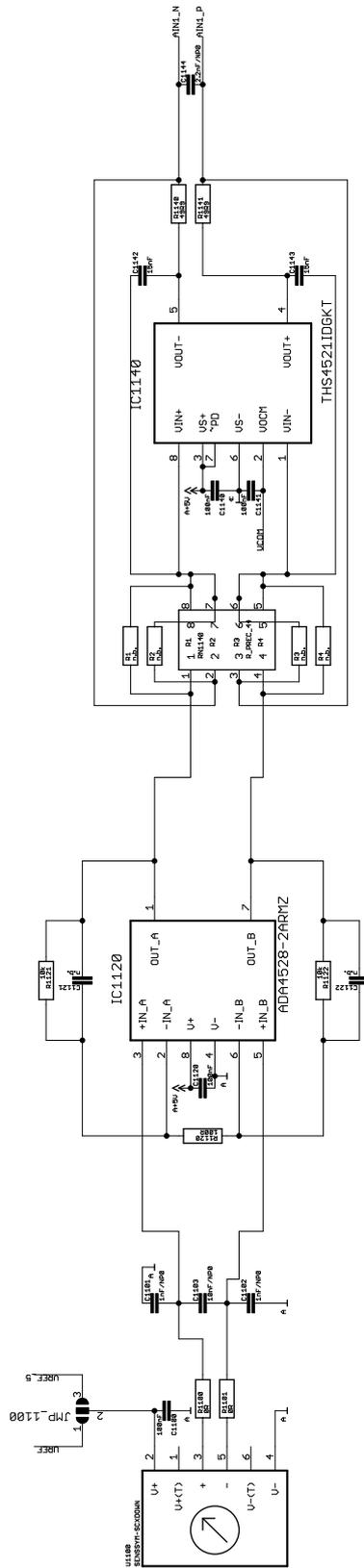
Document Number:

REV:

Date: 22.01.2017 10:31:05

Sheet 2/2

A.4 Schaltplan Sensorplatine



TITLE: Sensorplatine

Document Number:

Date: 17.01.2017 18:43:44

Sheet: 1/1