

Selbstüberwachung differenz- druckbasierter Durchflussmess- verfahren für Flüssigkeiten

Vom Fachbereich 18
Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Ralf Müller
geboren am 25. September 1973
in Bad Homburg v. d. H.

Referent:	Prof. Dr.-Ing. habil. R. Werthschützky
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. habil. G. Gerlach
Tag der Einreichung:	15. September 2005
Tag der mündlichen Prüfung:	20. Januar 2006

D 17

Darmstädter Dissertation

Vorwort

Die hier vorliegende Arbeit entstand als Ergebnis meiner Zeit von 2000 bis 2005 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektromechanische Konstruktionen der Technischen Universität Darmstadt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. R. Werthschützky für die Anregung der Arbeit auf diesem interessanten und vielseitigen Gebiet und die engagierte Betreuung. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. G. Gerlach danke ich für das der Arbeit entgegen gebrachte Interesse und die Übernahme des Korreferats.

Den wissenschaftlichen und administrativ-technischen Kolleginnen und Kollegen des Instituts danke ich recht herzlich für die freundschaftliche Atmosphäre, die eine angenehme und kreative Arbeit ermöglichte. Die Gelegenheit jederzeit über fachliche und nicht-fachliche Problemstellungen diskutieren zu können haben ganz entscheidend zum Gelingen der Arbeit und zur Freude an der Tätigkeit am Institut beigetragen.

Besonders bedanke ich mich bei meinen Eltern, die mir das Studium und somit auch die Promotion ermöglichten, für ihre immer vorhandene Unterstützung. Meinen Freunden danke ich für das entgegen gebrachte Verständnis während der Zeit des Zusammenschreibens der Arbeit.

Darmstadt, im Februar 2006

Ralf Müller

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	1
1.1 Entwicklungspotenzial bei Sensoren mechanischer Größen.....	2
1.2 Ziele und Aufbau dieser Arbeit.....	3
2 Stand der Technik der Selbstüberwachung von Sensoren.....	9
2.1 Sensoren mit Selbstüberwachung und Störungstoleranz.....	9
2.2 Selbstüberwachende Sensoren in der Prozessmesstechnik.....	13
2.3 Schlussfolgerung zum Stand der Selbstüberwachung.....	23
3 Definitionen und Strukturierung der Selbstüberwachung von Sensoren.....	25
3.1 Messfehler, Störung und Ausfall von Sensoren.....	26
3.2 Definition der Selbstüberwachung und von verwandten Begriffen.....	32
3.3 Zielstellung der Sensor-Selbstüberwachung.....	35
3.4 Anforderungen an Prozesssensoren.....	40
3.5 Methoden und Verfahren zur Selbstüberwachung von Sensoren.....	45
3.5.1 Einsatz von Redundanz.....	48
3.5.2 Erzeugung einer Referenzgröße.....	49
3.5.3 Analyse des Messsignals.....	50
3.5.4 Analyse des Einflusses einer Störgröße.....	51
3.5.5 Analyse von Zusatzsignalen und Zusatzgrößen.....	52
3.5.6 Gültigkeit dieser Einteilung.....	53
4 Durchflussmessverfahren der Prozessmesstechnik.....	55
4.1 Übersicht industrieller Durchflussmessverfahren.....	55
4.2 Druckbasierte Durchflussmessung.....	56
4.2.1 Theoretische Grundlagen und Randbedingungen.....	56
4.2.2 Druckbasierte Verfahren.....	60
4.3 Störungsursachen von Wirkdrucksensoren.....	67
4.3.1 Die Ausfalleffektanalyse (FMEA).....	68
4.3.2 Mögliche Störungen eines Wirkdruckdurchflusssensors.....	69

5	Möglichkeiten der Selbstüberwachung bei Wirkdrucksensoren.....	77
5.1	Anforderungen an die Sensor-Selbstüberwachung.....	77
5.2	Lösungsansätze zur Selbstüberwachung von Wirkdrucksensoren.....	79
5.2.1	Redundanz.....	79
5.2.2	Referenz.....	81
5.2.3	Analyse des Messsignals.....	83
5.2.4	Analyse einer Störgröße.....	84
5.2.5	Analyse von Zusatzsignalen oder Zusatzgrößen.....	85
5.3	Auswahl der zu untersuchenden Selbstüberwachungsmöglichkeiten.....	86
6	Durchflussmessplatz und Simulation der Störungen.....	89
6.1	Messplatz zur Durchflussmessung.....	89
6.2	Messabweichungen des Durchflussmessplatzes.....	93
6.3	Versuchsvorbereitung.....	94
7	Konzeption, Entwurf und Test der ausgewählten Varianten.....	99
7.1	Redundanz - Wirbel-Wirkdruckmessung.....	99
7.1.1	Merkmale zur Störungserkennung.....	100
7.1.2	Aufbau des Wirbel-Wirkdruck-Sensors.....	102
7.1.3	Messergebnisse zur Wirbel-Wirkdruck-Durchflussmessung.....	111
7.1.4	Fazit zum Wirbel-Wirkdruck-Durchflusssensor.....	119
7.2	Referenz - passiver Bypass.....	120
7.2.1	Konzeption des Bypasses.....	121
7.2.2	Messergebnisse zum passiven Bypass.....	126
7.2.3	Fazit zum passiven Bypass.....	130
7.3	Analyse von Zusatzsignalen - Wheatstone-Brücken-Überwachung.....	131
7.3.1	Konzeption der Brückenüberwachung.....	132
7.3.2	Aufbau des Prototypen.....	139
7.3.3	Fazit zur Brückenüberwachung.....	140
7.4	Gegenüberstellung der Konzepte zur Selbstüberwachung.....	141
8	Resümee und Ausblick.....	145
8.1	Gegenüberstellung der Verfahren zur Selbstüberwachung autarker Sensoren...	145
8.2	Schlussfolgerungen.....	149
8.3	Ausblick.....	151
	Literatur.....	153
	Anhang.....	165
	A Ergänzungen.....	165

B	Zusätzliche Definitionen.....	168
C	Störungen eines Wirkdrucksensors.....	177

Abkürzungen und Formelzeichen

Formelzeichen

A	[m ²]	Strömungsquerschnitt
A_1	[m ²]	Strömungsquerschnitt vor einer Engstelle
A_2	[m ²]	Strömungsquerschnitt in einer Engstelle
B	[...]	Übertragungsfaktor (z.B. [V·Pa ⁻¹])
B	[T]	magnetische Induktion
C	[1]	Durchflusskoeffizient
C	[F]	Kapazität
C_v	[1]	Druckverlustkoeffizient
D	[m]	Rohrdurchmesser
D_h	[m]	hydraulischer Rohrdurchmesser
d	[m]	Durchmesser einer Engstelle
$d_{\text{Körper}}$	[m]	Durchmesser eines Staukörpers
f	[Hz]	Frequenz
F	[N]	Kraft
$F(t)$	[%]	Ausfallwahrscheinlichkeit
G	[1]	Verstärkungsfaktor
g	[9,81 m·s ⁻²]	Erdbeschleunigung
H	[A·m ⁻¹]	magnetische Feldstärke
I, i	[A]	elektrischer Strom
k	[1]	Rauigkeitswert
L	[m]	Rohrlänge
L	[H]	Induktivität
m	[kg]	Masse
m	[1]	Öffnungsverhältnis

n	[1]	Anzahl
p	[Pa]	Druck
Q	[1]	Güte
q_v	[l·h ⁻¹] bzw. [m ³ ·s ⁻¹]	Volumendurchfluss
q_m	[kg·s ⁻¹]	Massedurchfluss
r	[m]	Radius
R	[Ω]	elektrischer Widerstand
Re	[1]	Reynoldszahl
$R(t)$	[%]	Überlebenswahrscheinlichkeit
Sr	[1]	Strouhalzahl
S	[1]	mechanische Dehnung
T	[N·m ⁻²]	mechanische Spannung
t	[s]	Zeit
U	[m]	Umfang
U, u	[V]	Elektrische Spannung
u	[...]	Ausgangssignal
v	[m·s ⁻¹]	Geschwindigkeit
x	[1]	Durchflussverhältnis
x	[...]	Prozessausgangsgröße
y	[...]	Stellgröße
Z	[Pa·s·m ⁻³]	akustische Impedanz
$z, z(t)$	[...]	Störgrößen
α_p, α_R	[K ⁻¹]	Temperaturkoeffizienten
β	[1]	Durchmesser Verhältnis
η	[Pa·s]	dynamische Viskosität
$\phi(t)$	[...]	Schwankung der Wirbelablösefrequenz
λ	[1]	Rohrreibungszahl
λ_{DD}	[%]	Wahrscheinlichkeit der erkannten gefahrbringenden Ausfälle
λ_{Dtotal}	[%]	Wahrscheinlichkeit aller gefahrbringender Ausfälle

μ	[...]	Messgröße
ϑ	[°C]	Temperatur
ρ	[kg·m ⁻³]	Dichte
ω	[s ⁻¹]	Kreisfrequenz
ξ	[m]	Auslenkung
ζ	[1]	Widerstandszahl

Abkürzungen

<i>DC</i>	Diagnostic Coverage (Diagnosedeckungsgrad)
<i>DN</i>	Nenndurchmesser
<i>EG</i>	Erkennungsgrad
<i>ETA</i>	Event Tree Analysis (Ereignisbaumanalyse)
<i>ESP</i>	Elektronisches Stabilitätsprogramm
<i>FMEA</i>	Failure Mode and Effect Analysis (Ausfalleffektanalyse)
<i>FTA</i>	Fault Tree Analysis (Fehlerbaumanalyse)
<i>GUM</i>	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
<i>MTBF</i>	Mean Time Between Failure (mittlere Betriebsdauer)
<i>MTTR</i>	Mean Time To Repair (mittlere Störungsdauer)
<i>MID</i>	Magnetisch-Induktiver-Durchflusssensor
<i>RPZ</i>	Risikoprioritätszahl
<i>SSR</i>	Solid-State-Relay (Festkörperrelais)
<i>v.E.</i>	vom Endwert
<i>v.M.</i>	vom Messwert
<i>WWD</i>	Wirbel-Wirkdruck-Durchflusssensor

1 Einleitung

Die Bedeutung von Sensoren nimmt in nahezu allen technischen Bereichen stetig zu. Zur Erfassung von Prozessgrößen zur Anzeige oder zur Regelung und Steuerung von Prozessen werden elektrische Sensoren für nichtelektrische Messgrößen benötigt. Mit steigendem Einsatz nehmen auch die Auswirkungen zu, die durch Falschmessungen verursacht werden können. Besonders dramatisch können die Auswirkungen in sicherheitskritischen Anwendungen sein. Ein anschauliches Beispiel aus der Kfz-Technik ist das elektronische Stabilitätsprogramm (kurz ESP). Ein durch eine fehlerhafte Messung verursachter Eingriff in die Fahrdynamik kann ein sofortiges Ausbrechen des Fahrzeugs zur Folge haben. Daher ist in solchen direkt gefährdeten Prozessen sicherzustellen, dass Ausfälle^{*)} oder Störungen^{*)} der beteiligten Sensoren rechtzeitig erkannt werden, damit von ihnen keine Gefahr ausgehen kann. Sind Ausfälle eines Aktors meist ohne weiteres aufgrund des Ausbleibens der angeforderten Leistung erkennbar, kann ein Sensor nach wie vor ein Ausgangssignal^{*)} ausgeben, obwohl eine Störung stattgefunden hat. Daher müssen Sensoren genauer betrachtet werden.

Zur Erkennung von Sensorstörungen oder -ausfällen werden vermehrt Funktionen wie „Selbstdiagnose“, „Selbsttest“ oder „Selbstüberwachung^{*)}“ von Herstellern in Sensoren implementiert. Teilweise wird sogar von „Fehler-“ oder „Ausfalltoleranz^{*)}“ gesprochen. Verstanden werden darunter Funktionen, die den Ist-Zustand des Sensors ständig oder in definierten Zeitabständen überwachen und interpretieren, um im Falle eines Defekts eine Meldung anzeigen zu können. Bei Toleranz von Ausfällen kann der Sensor sogar trotz eines Defekts im System weiterhin seine Funktion – also das Erfassen und Ausgeben der Messgröße – erfüllen.

^{*)} Definitionen in Anhang B ab Seite 168.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Implementierung von Selbstüberwachung in Sensoren. Dabei liegt der Fokus auf Sensoren der Prozessmesstechnik. Die Prozessmesstechnik findet ihren Einsatz in der Verfahrenstechnik (Chemie, Kraftwerke, Pharmazie, Petrochemie, Lebensmittelindustrie, etc.) und zunehmend in Bereichen wie Automatisierungs- und Fertigungstechnik [Prock97]. Als Messgrößen werden hauptsächlich mechanische Größen betrachtet. Die konkreten Konzepte, die in dieser Arbeit vorgestellt werden, beziehen sich auf die Durchflussmessung von Flüssigkeiten. Daher sind auch die allgemeinen Betrachtungen meist mit Beispielen der Durchflussmessung belegt.

1.1 Entwicklungspotenzial bei Sensoren mechanischer Größen

Sensoren wurden in der Vergangenheit hauptsächlich hinsichtlich der Verbesserung der Messunsicherheit, einer Erhöhung der Messspanne, der Robustheit der Sensoren oder bezüglich minimaler Anschaffungskosten optimiert. Durch die zunehmende Integration digitaler Signalverarbeitung in die Sensoren und deren Kommunikation mit übergeordneten Einrichtungen zur Informationsverarbeitung über Bus-Netze ergeben sich zusätzliche Möglichkeiten, auch den Funktionsumfang der Sensoren deutlich zu erhöhen.

Nach SCHAUDEL [Schaud98] stehen Kosten-Nutzen-Vorteile bei der Sensorweiterentwicklung vor inkrementellen Verbesserungen von Spezifikationsdaten im Vordergrund. Die ursprüngliche Aufgabe, das reproduzierbare Bestimmen einer Messgröße, wird demnach ausreichend erfüllt. Unzureichende Dauergebrauchstauglichkeit und fehlende Selbstüberwachung müssen stärker beachtet werden.

Einen Schritt weiter geht die Forderung nach vorausschauender Wartung (engl. *predictive maintenance*) [Colucc01]. Dabei soll der Sensor selbst seinen Ist-Zustand dahingehend erfassen und bewerten, dass eine Vorhersage über die zukünftige Einsatzbereitschaft möglich ist. Störungen und notwendige Wartungen sollen auf diese Weise vorhersehbar bzw. planbar sein, wodurch die Gesamtkosten gesenkt werden. Den Gesamtkosten eines Sensors werden dabei neben den Investitionskosten auch Installations-, Inbetriebnahme-, Wartungs- und Reparaturkosten, sowie Kosten infolge eines Produktionsausfalls zugerechnet.

Welches Potenzial die vorausschauende Wartung hat, zeigt das Beispiel, dass Untersuchungen zufolge etwa 30 % der „Betriebsmittel“ vorbeugend gewartet werden (engl. *preventive maintenance*). Zwei Drittel der Wartungen wären dabei nicht notwendig gewesen [Colucc01], könnten also eingespart werden, sofern die Geräte den Wartungsbedarf zuverlässig anzeigen. Nach einer *Technologie-Roadmap für Prozesssensoren* [NAMUR05] sollen Wartungen und Inspektionen von Sensoren in Zukunft gänzlich vermieden werden. Allerdings ist die absolute Wartungsfreiheit nicht allein erstrebenswert, sondern auch hier eine „optimale Wartung“, die nur bei Bedarf durchgeführt wird, als Ziel genannt. Die hierfür notwendige Diagnoseinformation zum Wartungsbedarf muss verlässlich sein und alle relevanten Komponenten und Zustände des Sensors umfassen.

In Anwendungen, die eine sehr hohe Verfügbarkeit fordern, ist eine Wartung, ein Austausch defekter Sensoren oder ein Abschalten des Prozesses nicht möglich. Da Defekte nie ganz auszuschließen sind, werden für solche Anwendungen Sensoren benötigt, die ihre Funktion auch nach Eintritt einer begrenzten Anzahl von Störungen oder Ausfällen weiterhin sicherstellen. Auch wenn die Funktion nicht mehr in vollem Umfang zur Verfügung gestellt werden kann, soll zumindest ein eingeschränkter Betrieb nach wie vor ermöglicht werden. Eine solche Toleranz gegen Störungen und Ausfälle, auch *Ausfalltoleranz* [VDI/VDE 3542] oder meistens *Fehlertoleranz* [VDI/VDE 3698] genannt, wurde zuerst für Software und Rechnersysteme realisiert. Wenn es gelingt, die zusätzlichen Kosten eines gegenüber Störungen und Ausfällen toleranten Sensors in einem vertretbaren Rahmen zu halten, stellt die im folgenden *Störungstoleranz*^{*)} genannte Eigenschaft für viele Anwendungsgebiete der Messtechnik eine erstrebenswerte Funktionalität dar.

Sowohl vorausschauende Wartung, wie auch Störungstoleranz, setzt eine Überwachung des Ist-Zustands des Sensors voraus. Daher bietet die Entwicklung effizienter Konzepte zur Selbstüberwachung von Sensoren in Hinblick einer Überwachungsfunktion, aber auch in Hinblick auf weiterführende Funktionen, großes Potenzial.

1.2 Ziele und Aufbau dieser Arbeit

Wie unter Abschnitt 1.1 dargestellt, besteht in der Prozessmesstechnik ein zunehmender Bedarf an Sensoren, die sich selbst überwachen können. Daher befasst sich

*) Definitionen in Anhang B ab Seite 168.

die vorliegende Arbeit mit der Implementierung von Selbstüberwachungsfunktionen in Sensoren. Die Besonderheiten von Selbstüberwachung bei Sensoren im Vergleich zu Selbstüberwachung anderer Systeme sollen erarbeitet werden. Hierzu ist es zunächst notwendig, die erforderlichen und teilweise unterschiedlich benutzten Begriffe aus den beteiligten Gebieten wie Messtechnik, Qualitätssicherungswesen und Zuverlässigkeitsforschung zu definieren, um Missverständnissen und Mehrdeutigkeiten vorzubeugen.

Aufgrund der Vielzahl verschiedener Messgrößen und Einsatzbereiche existiert ebenfalls eine hohe Anzahl von *Messprinzipien*^{*)} und *Messverfahren*^{*)}. Entsprechend dieser Vielfalt werden völlig unterschiedliche Wege zur Selbstüberwachung der jeweiligen Sensoren eingesetzt. Es wird versucht, die verschiedenen Wege zur Selbstüberwachung in für alle Sensoren gültige Verfahren zusammenzufassen und zu strukturieren.

Für die prozessmesstechnische Durchflussmessung wird der Stand der Technik selbstüberwachender Sensoren erfasst und Anforderungen von Seiten der Anwender und Hersteller ermittelt.

Ausgehend von der Strukturierung der Selbstüberwachungsverfahren für Sensoren erfolgt deren Anwendung für die druckbasierte Durchflussmesstechnik von Flüssigkeiten. Die Einschränkung auf druckbasierte Durchflussmessverfahren beruht unter anderem darauf, dass es sich bei der Erfassung des Durchflusses um eine der wichtigsten Messaufgaben der Prozessmesstechnik handelt. Vielfältige Verfahren und Messprinzipien kommen aufgrund der weitreichenden Unterschiede der Applikationen zum Einsatz. Dabei nimmt die Bedeutung der Durchflussmessung in chemischer, petrochemischer, pharmazeutischer Industrie, Lebensmittelindustrie und bei Öl- und Gasversorgern aufgrund der Optimierung von Prozessen zur Kostenreduktion, Produktoptimierung und Umweltschutz durch Ressourcen-Einsparung weiterhin zu [Kohlma02]. Weiterhin kann auf am Institut vorhandene Forschungsergebnisse zur Durchflussmessung von SCHNELL [Schnel95] und SCHÄFER [Schäfe99] zurück gegriffen werden. Auf Basis einer systematischen Bewertung werden Erfolg versprechende Selbstüberwachungskonzepte ausgewählt.

Stichpunktartig zusammengefasst ergeben sich die folgenden Arbeitsschwerpunkte der

*) Definitionen in Anhang B ab Seite 168.

- Erarbeitung des Stands der Technik selbstüberwachender Sensoren (Durchflusssensoren der Prozessmesstechnik),
- Definition zentraler Begriffe,
- Benennung der Besonderheiten von Selbstüberwachung bei Sensoren,
- Erörterung der Anforderungen an prozessmesstechnische Durchflusssensoren,
- Strukturierung und Beurteilung der Verfahren zur Selbstüberwachung von Sensoren,
- Anwendung der Strukturierung zur Suche viel versprechender Möglichkeiten der Selbstüberwachung am Beispiel der Wirkdruckmessung,
- Konzeption, Aufbau und Test von Experimentalmustern der gefundenen Lösungsmöglichkeiten und der
- Ableitung von allgemein gültigen Schlussfolgerungen zur Implementierung von Selbstüberwachungsfunktionen in Sensoren.

In Abbildung 1.1 ist der Aufbau eines Wirkdrucksensors mit Venturirohr und piezoresistivem Differenzdrucksensor dargestellt. Diese Anordnung bildet die messtechnische Ausgangsbasis für die im Rahmen der Arbeit durchgeführten Untersuchungen, wobei die Ausführung der Drosselstelle nicht auf Venturirohre beschränkt ist. Ersichtlich ist, dass der Differenzdrucksensor über die Membranen direkten Kontakt zum Messmedium hat. Bei den Messmedien kann es sich um aggressive, ablagernde oder abrasive Flüssigkeiten bzw. Gase handeln, die die Messstrecke und den Drucksensor negativ beeinflussen können.

Der Aufbau der Arbeit unterteilt sich in einen allgemeinen theoretischen und in einen spezifischen praktischen Teil. Im theoretischen Teil werden in Kapitel 2 der Stand der Technik der Selbstüberwachung von Sensoren der Prozessmesstechnik erörtert und Folgerungen zum eigenen Vorgehen gezogen. Gegenstand des dritten Kapitels ist die Abgrenzung der Begriffe Messfehler, Störung und Ausfall von Sensoren, sowie die exakte Definition der oftmals mehrdeutig gebrauchten Begriffe zur Selbstüberwachung. Zur Abschätzung sinnvoller Weiterentwicklungen von Sensoren und zur Wahl aussichtsreicher Arbeitsschwerpunkte erfolgt anschließend die Zusammenstellung der gegenwärtig und in naher Zukunft entscheidenden Anforderungen an Durchflusssensoren. Die Strukturierung der Methoden und Verfahren zur Selbstüberwachung bildet den Abschluss des dritten Kapitels.

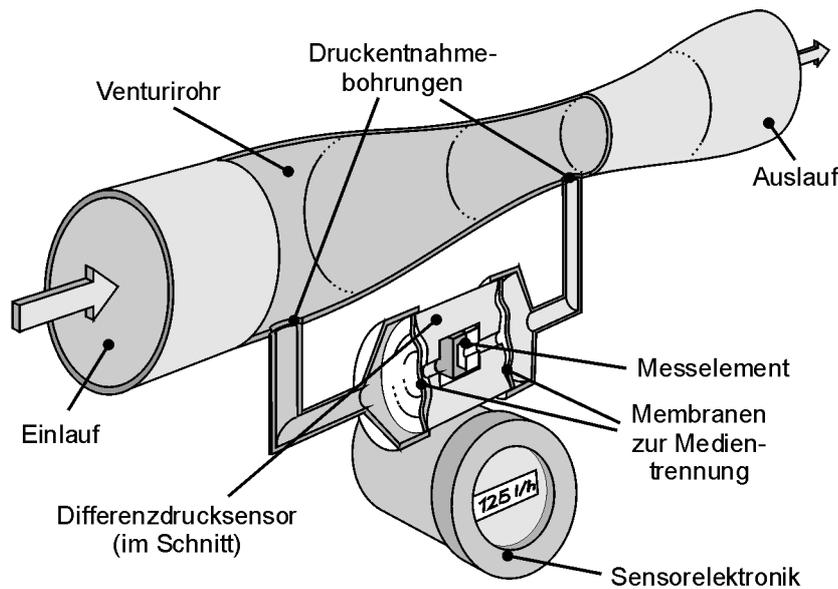


Abbildung 1.1: Wirkdrucksensor mit Venturirohr und piezoresistiver Differenzdruckmesszelle.

Der praktische Teil umfasst die Kapitel 4 bis 7. Im vierten Kapitel werden ausgehend von einer Übersicht zu den industriellen Durchflussmessverfahren die theoretischen Grundlagen und Merkmale der druckbasierten Durchflussmessung erläutert. Außerdem werden die typischen Störungsursachen, beschränkt auf die Wirkdruckmessung, zusammengestellt. Ausgehend von den Anforderungen an die Sensor-Selbstüberwachung bei Wirkdrucksensoren werden im fünften Kapitel grundsätzliche Lösungsansätze diskutiert. Zur experimentellen Untersuchung der ausgearbeiteten Lösungsvarianten wird im sechsten Kapitel der angepasste Durchflussmessplatz vorgestellt. In Kapitel 7, dem Kernkapitel des praktischen Teils der Arbeit, werden ausgehend von den unterschiedlichen Lösungskonzepten zur Selbstüberwachung, deren Entwurf, Gestaltung und Testergebnisse vorgestellt. Ein kurzer zusammenfassender Vergleich der Eigenschaften der Konzepte schließt dieses Kapitel und den praktischen Teil der Arbeit ab.

Kapitel 8 zieht ein Resümee der Arbeit und stellt eine allgemeine Aufstellung der Eigenschaften bzw. Vor- und Nachteile der Verfahren zur Selbstüberwachung von Sensoren dar.

Im Anhang werden neben zusätzlichen Informationen vor allem ergänzende Begriffsdefinitionen gegeben. Abbildung 1.2 zeigt den Aufbau der Arbeit.

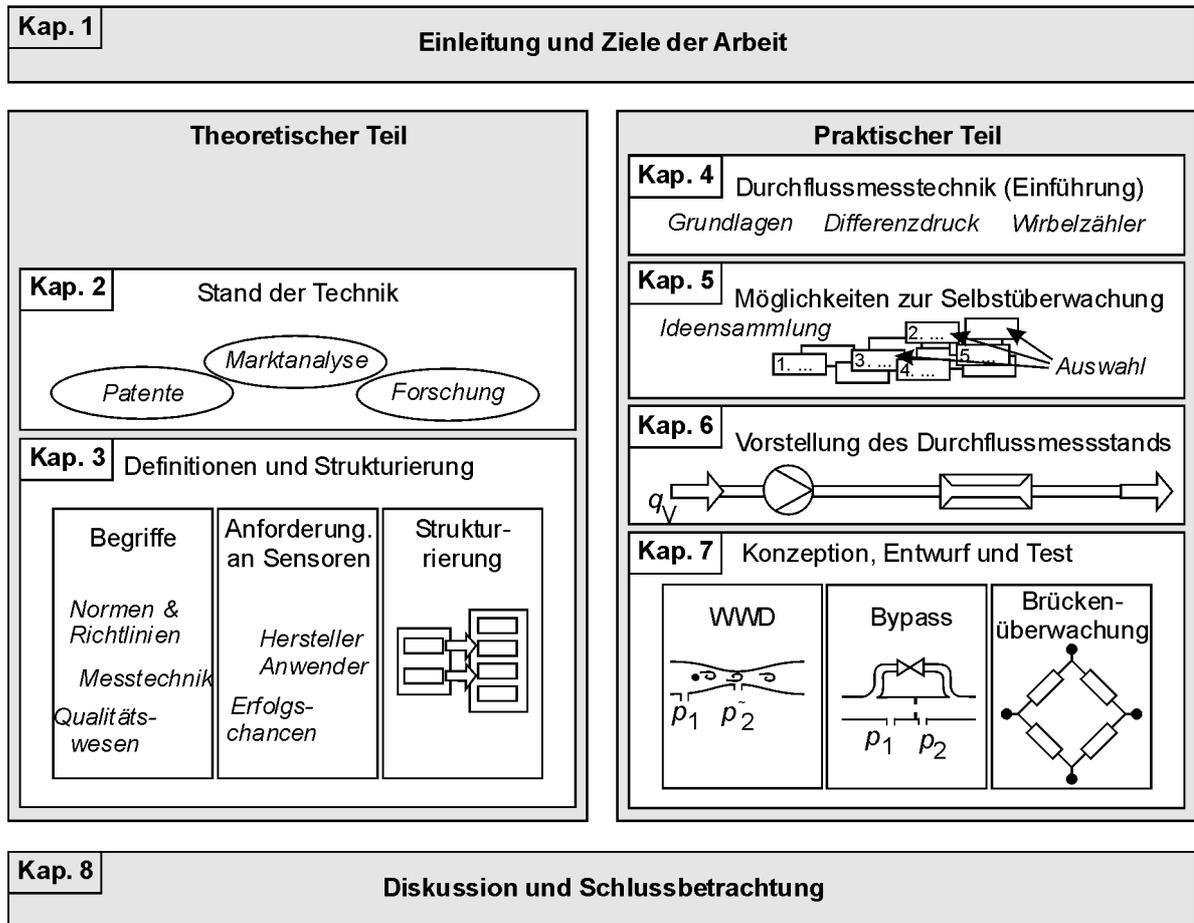


Abbildung 1.2: Aufbau der Arbeit mit Trennung in einen theoretischen und einen praktischen Teil.

2 Stand der Technik der Selbstüberwachung von Sensoren

Der Markt von Sensoren und Messsystemen ist aufgrund der Vielzahl an Messgrößen und Einsatzgebieten sehr vielschichtig. Die folgende Betrachtung soll zunächst bewusst nicht auf die Prozessmesstechnik eingeschränkt werden. Das Spektrum von Messgrößen reicht von physikalischen, wie thermische oder mechanische Größen, über chemische, wie pH-Wert oder Gaskonzentrationen, bis hin zu elektrischen Größen. Das Einsatzgebiet kann von der Luft- und Raumfahrttechnik bis zur Medizintechnik oder Hausinstallation variieren. Die Ausführungen der Sensoren unterscheiden sich teils sehr deutlich bei den jeweiligen Einsatzgebieten, da völlig andere Anforderungen an Robustheit, Genauigkeit, Langzeitstabilität oder Kosten gestellt werden [Werths05] (Tab. B1 auf Seite 169). Dementsprechend groß und unterschiedlich ist auch der Einsatz von Selbstüberwachung bei Sensoren.

2.1 Sensoren mit Selbstüberwachung und Störungstoleranz

Die Überwachung der korrekten Funktion der Systeme und somit auch der Sensoren ist bei sicherheitskritischen Anwendungen bereits seit langem etabliert. In der Luft- und Raumfahrt oder Medizintechnik sind die Sicherheitsanforderungen sehr hoch. Allerdings handelt es sich bei Sensoren dieser Anwendungen häufig um solche mit relativ geringen Stückzahlen ohne hohen Kostendruck, weshalb oft eine redundante Ausführung der kritischen Sensoren gewählt wird.

In der Kfz-Technik gelten mittlerweile ähnlich hohe Anforderungen an die Sicherheit wie in der Luft- und Raumfahrttechnik. Neue mechatronische Systeme wie

2 Stand der Technik der Selbstüberwachung von Sensoren

Fahrdynamikregelungen oder X-by-Wire-Systeme benötigen eine Vielzahl von verlässlichen Informationen bzgl. des Fahrzustands des Autos, die ein zielgenaues Eingreifen ermöglichen. Erschwerend kommt hinzu, dass der hohe Kostendruck die Vervielfachung der Messsysteme zur redundanten Messgrößenerfassung ausschließt und somit andere Lösungen zur Überwachung der Sensoren und Messsysteme favorisiert werden. Da allerdings das System *Kraftfahrzeug* sehr gut bekannt ist und die notwendigen Sensoren und Aktoren zu Sensor-Aktor-Systemen vereinigt sind, besteht die Möglichkeit, mittels analytischer Redundanz, eine Überwachung der beteiligten Komponenten zu realisieren, z.B. [Iserma02], [Iserma94], [Ding04] und [Arndt04]. Dabei werden analytische Modelle des zu überwachenden Prozesses erstellt. Eingangs- und eventuell auch bekannte (messbare) Zwischengrößen des Prozesses dienen, wie die von Sensoren erfassten Ausgangsgrößen, als Eingänge des Prozessmodells (Abb. 2.1). Stimmt das Modell mit der Realität überein und liegt keine Störung vor, so besteht kein Unterschied zwischen realer Ausgangsgröße und berechneter, bzw. die Differenz liegt unter einem zuvor definierten Grenzwert.

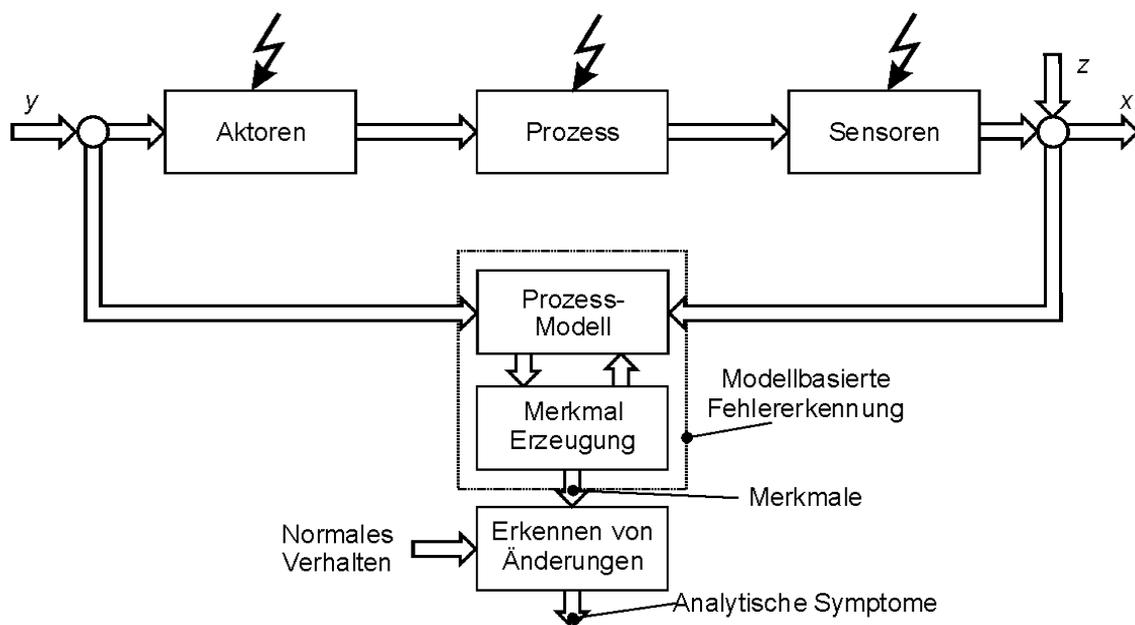


Abbildung 2.1: Modellbasierte Überwachung eines Prozesses [Iserma96].
 y entspricht den Stell-, x den Ausgangsgrößen des Gesamtprozesses und z repräsentiert additive Störgrößen

Auf diese Weise können der gesamte Prozesse mit Aktoren, mechanischen oder chemischen Abläufen und Sensoren überwacht werden. Entscheidend ist, dass der Prozess modelliert werden kann und Eingangs-, Zwischen- und Ausgangsgrößen

messbar sind. Bei einem einzelnen Sensor kann man davon im Allgemeinen nicht ausgehen.

Der „Prozess“ der Messkette im Innern des Sensors ist nicht zugänglich. Bei der Eingangsgröße handelt es sich um eine unbekannte Messgröße^{*)}, die folglich nicht zur Überwachung des Sensors heran gezogen werden kann. Die Messgröße wird durch die Messkette^{*)} in das Ausgangssignal^{*)} des Sensors gewandelt. Auch die Zwischengrößen der Messkette sind von außen nicht zugänglich und somit für eine Überwachung nicht geeignet. Folglich lässt sich im Allgemeinen bei Sensoren die modellbasierte Überwachung nicht anwenden.

Wobei auch für Sensoren Ausnahmen existieren, bei denen das Messsystem selbst ein Sensor-Aktor-System bildet. Dabei wird die Übertragung der Messkette von außen durch Stellgrößen direkt beeinflusst. Dadurch lassen sich modellbasierte Methoden zur Überwachung bzw. Korrektur von Abweichungen anwenden, z.B. Coriolis-Massesensoren [Storm02] oder auch thermische Strömungswächter [Kolahhi01].

Die modellbasierte Überwachung eines größeren Gesamtprozesses kann jedoch durch Informationen einer im Sensor integrierten Selbstüberwachung sehr gut ergänzt werden. So greift die Überwachung eines elektronischen Stabilitätsprogramms (ESP) in einem Auto auf die Selbstüberwachung des Gierraten-, Beschleunigungs- und Lenkwinkelsensors zurück, um die Gültigkeit der Messsignale zu überprüfen [Ding04]. Übergreifende Überwachung und Selbstüberwachung auf Sensorebene ergänzen sich an dieser Stelle.

Für den Anwendungsfall von Sensoren in mechatronischen Systemen, wie zum Beispiel in der Automobilindustrie, wird eine Sensor-Selbstüberwachung hauptsächlich auf der Ebene des Messelements favorisiert – einen Überblick geben [Weiler01], [Koppen04] oder [Damm98].

Die Überwachung auf der Ebene des Messelements ist ausreichend, da bei den meisten Anwendungsfällen die Ankopplung der Messgröße nicht im Vordergrund steht, wie bei Gierratensensoren oder Beschleunigungssensoren [Osajda99]. In der Prozessmesstechnik werden häufig Drücke, Durchflüsse, Füllstände etc. von aggressiven oder korrosiven Medien bestimmt. Dabei muss das Messmedium direkt angekoppelt werden, was eine gegenüber den Umgebungsbedingungen resistente Gehäusung voraussetzt (siehe z.B. [Hohlfe01] [Sindli04]). Daher stehen hier andere

^{*)} Definitionen in Anhang B ab Seite 168.

Anforderungen an eine Selbstüberwachung der Sensoren und Messsysteme im Vordergrund, die nach Möglichkeit auch die *Einleitung der Messgröße* in die Überwachung mit einbezieht.

Im Rahmen dieser Arbeit wird als Anwendungsbeispiel für die Integration einer Selbstüberwachungsfunktion die druckbasierte Durchflussmessung von Flüssigkeiten in der Prozessmesstechnik ausgewählt. Gründe für diese Wahl sind:

- Die Nutzung der vorhandenen Forschungsergebnisse von SCHÄFER und SCHNELL [Schäfe99] [Schnel95] bzgl. Lösungsansätze zur Reduzierung der Messunsicherheit des Wirkdruckverfahrens.
- Ein vorhandener Durchflussmessplatz für Flüssigkeiten (siehe Abschnitt 6.1).
- Der nach wie vor sehr hohe Marktanteil des Wirkdruckverfahrens (bis zu 50 % der Durchflussmessstellen in der chemischen Industrie [Freude00]).
- Das finanzielle Einsparpotenzial durch Selbstüberwachung aufgrund der hohen, bei Durchflusssensoren in der Prozessmesstechnik aufzuwendenden Kosten für Wartung und Inspektion [Trilli01].

Vor allem der letzte Punkt ist hervorzuheben. Im Idealfall kann mittels einer umfassenden Selbstüberwachung gänzlich auf Wartung und Inspektion verzichtet werden, um diese Kosten einzusparen. Nach SCHNEIDER [Schnei01] verschiebt sich das Verhältnis von *technischen-* hin zu *Anwender-* (*Nutzer-*)*Störungen*, folglich zu von der Anwendung bzw. vom Anwender verursachten Störungen. Die Ursache hierfür liegt darin, dass der Aufbau und vor allem die Elektronik der Geräte immer zuverlässiger wird und somit die Einflüsse der Anwendung (z.B. Ablagerungen) und des Anwenders (z.B. Fehlbedienung) verhältnismäßig immer stärker ins Gewicht fallen. Insbesondere bei der Messung des Durchflusses, vor allem von Flüssigkeiten, ist der Sensor vielen äußeren Einflüssen ausgesetzt. Flüssigkeiten können unter anderem aggressiv, korrosiv oder abrasiv sein, eine hohe Neigung zu Ablagerungen zeigen und Gasblasen oder Feststoffpartikel mitführen. Da Durchflusssensoren Kontakt zum Fluid haben müssen, wenn auch nur in Form eines Messrohrs (z.B. Coriolisensoren) oder Elektroden (MID), können die Eigenschaften des Fluids die Funktion des Sensors auf Dauer negativ beeinflussen und so zu einer Erhöhung der Messunsicherheit bzw. einer Störung oder sogar zum Ausfall führen. Eine Einbeziehung der Störungen, die durch äußere Einflüsse verursacht werden, in die Selbstüberwachung eines Sensors, bietet demnach großes Verbesserungspotenzial für den Sensor. Des Weiteren handelt es sich bei Durchflusssensoren, verglichen mit den ande-

ren Sensoren für physikalische Größen um komplexere Systeme, die zusätzliche Möglichkeiten zur Implementierung von Baugruppen und Entwicklungsmöglichkeiten in der Software für Algorithmen zur Selbstüberwachung bieten.

Im folgenden Abschnitt 2.2 soll zur Kennzeichnung des Standes der Technik ein Überblick über selbstüberwachende Prozesssensoren anhand ausgewählter Beispiele gegeben werden.

2.2 Selbstüberwachende Sensoren in der Prozessmesstechnik

Das Angebot an Sensoren und Messsystemen der Prozessmesstechnik, die mit einer Selbstüberwachung ausgestattet sind, hat sich in den letzten Jahren deutlich erhöht. Die Hersteller werben konkret mit „permanenter Diagnose“ oder „self monitoring“ als zusätzliche Funktionen, die den Nutzen des Sensors steigern sollen. Weniger konkret sind die Angaben über die Störungen und Ausfälle der Sensoren, die durch die Selbstüberwachung erkannt und an den Bediener gemeldet werden. Dies würde nach Meinung einiger Hersteller den Eindruck eines anfälligen und somit unzuverlässigen Produktes erwecken, das eine besondere Überwachung gefährdeter Komponenten benötigt. Besonders schwierig ist es, Informationen über die Realisierung der Selbstüberwachung zu erhalten, da hier die Geheimhaltung von eigenen Entwicklungen und Erfindungen im Vordergrund steht.

In den meisten Fällen handelt es sich um eine Überwachung der elektrischen und elektronischen Bauteile, wie Speicherbausteine oder Prozessoren. Diese mittlerweile nahezu selbstverständlichen Überwachungsfunktionen sollen hier nicht im Vordergrund stehen, da bei dieser Art der Selbstüberwachung Störungen und Ausfälle, die beispielsweise Messelement, Prozessankopplung oder mechanische Komponenten betreffen, nicht beachtet werden. Es sollen im Folgenden ausgewählte Beispiele von selbstüberwachenden Sensoren vorgestellt werden, um die Breite und den Nutzen der beschrittenen Wege darzustellen.

Doppelt ausgeführter Wirbelzähler

Eine nahe liegende Möglichkeit einen Sensor zu überwachen, ist dessen Ausgangswert mit dem eines anderen, in *funktionsbeteiligter (heißer) Redundanz* betriebenen Sensors zu vergleichen. Einfache Doppelsensoren werden von manchen Herstellern

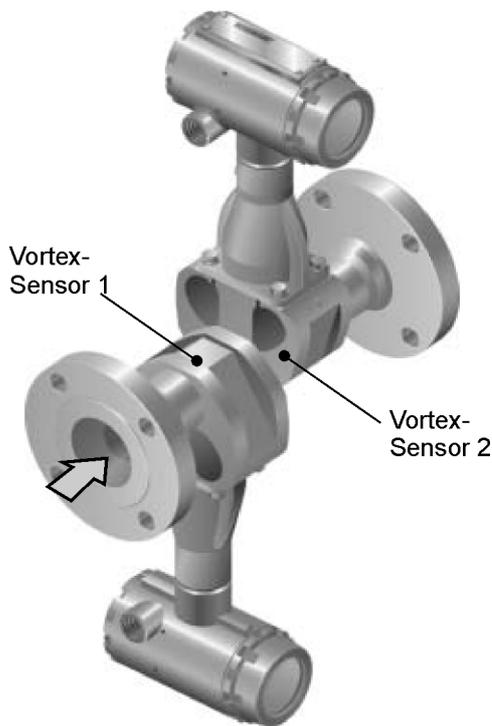


Abbildung 2.2: ROSEMOUNT Wirbelzähler 8800C als Doppelsensor [Rosemo04].

für bestimmte Einsatzbedingungen angeboten. So wird der Sensor *Rosemount 8800C* (Abb. 2.2), der das Wirbelzählverfahren (Vortex) nutzt (siehe Abschnitt 4.2.2, ab Seite 65), auch als direkt verbundenen Doppelsensor angeboten. Dabei sind beide Vortex-Sensoren vollkommen eigenständig aufgebaut, wodurch eine komplette Redundanz ermöglicht wird. Die elektronischen Komponenten werden bei diesem Sensor auch schon in der normalen Version überwacht [Rosemo04]. Nachteilig kann sich die *homogene (gleichartige) Redundanz*^{*)} auswirken, da beide Sensoren einen identischen Aufbau aufweisen, folglich in gleicher Weise auf Einflüsse von außen reagieren. So werden beispielsweise störgrößeninduzierte Änderungen des Übertragungsfaktors beide Sensoren gleichermaßen betreffen.

Dadurch können beide Sensoren Abweichungen aufweisen, die außerhalb der Spezifikationen liegen, ohne dass eine Abweichung der Messsignale registriert wird. Eine Diagnose welche Störung vorliegt oder welcher der beiden Sensoren eine Fehlfunktion aufweist, ist ebenfalls nicht möglich.

Ultraschalldurchflusssensor mit redundanten Messpfaden

Der Ultraschalldurchflusssensor *Krohne Altosonic V* (Abb. 2.3) stellt eine integrierte Lösung dar, indem fünf redundante Ultraschallmesspfade in verschiedenen Ebenen in einem Gerät vereint sind [Hofman00]. Die Durchflussberechnung geschieht auf Basis des Laufzeitverfahrens, das Laufzeitdifferenzen des Schalls in und entgegengesetzt der Strömungsrichtung des Fluids misst. Bei einfach ausgeführten Messwegen können Unsymmetrien und Störungen im Strömungsprofil, wie sie durch Rohreinbauten, Ventile, Krümmer o.ä. verursacht werden, erhebliche Messfehler hervorrufen. Durch die Verkipfung und Verdrehung der fünf Messwege ist es bei diesem

^{*)} Definitionen in Anhang B ab Seite 168.

Ultraschallsensor möglich, den Durchfluss auch bei unsymmetrischem Strömungsprofil korrekt aufzunehmen und so die Messunsicherheit zu verringern. Weiterhin ermöglicht die vierfache Redundanz eine Erkennung eines defekten Messpfads und eine Rekonfiguration, indem mit den übrigen Messpfaden mit übereinstimmenden Messergebnissen die Messung fortgesetzt werden kann. Durch die unterschiedlichen Anstellwinkel der Ultraschallaktoren kommt es zu unterschiedlichen

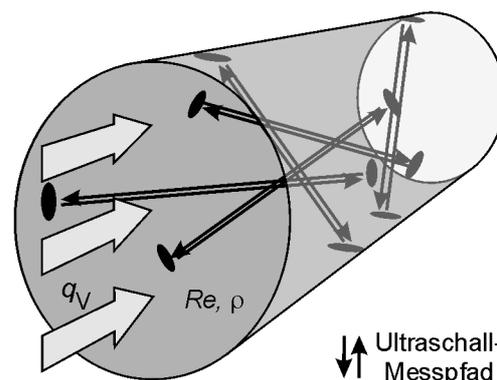


Abbildung 2.3: Krohne Altosonic V, Ultraschall-durchflusssensor mit fünf Messpfaden.

Ablagerungsdicken an den Aktoren bei Betrieb in anhaftenden Medien. Dadurch werden einige der fünf Messwege bei Ablagerungen stärker gedämpft als andere, so dass auch diese Art der Störung früh genug erkannt werden kann. Dieses Beispiel zeigt, dass es bei geeigneter Ausführung auch wirtschaftlich sinnvoll sein kann, eine mehrfache Redundanz in einem Sensor vorzusehen. Der Nutzen beschränkt sich dabei nicht nur auf die Überwachung, sondern reduziert auch die Messunsicherheit des Sensors unter schwierigen Bedingungen.

Wirbelzähler mit zweifach ausgeführtem Messelement

Bopp & Reuther setzt bei dem *Vortexsensor VTX 2* ebenfalls Redundanz ein [Bopp04]. Die sich am umströmten Körper bildenden Wirbel werden hier mittels zweier piezoelektrischer Messelemente detektiert (Abb. 2.4). Da die Wirbelbildung an dem mittig angeordneten Körper wechselseitig ist (siehe Abschnitt 4.2.2, ab Seite 65), werden durch die Anordnung mit einem Messelement jeweils die kleinen Druckimpulse der Wirbel an einer Seite aufgenommen. Durch einen Vergleich und eine Filterung der beiden Signale werden Pulsationen und Druckstöße, die auf beide Messelement zeitgleich wirken, heraus gerechnet. Dadurch kann das bei vielen Wirbelzählern im Vergleich zum Strömungsrauschen sehr schwache Wirbelsignal sehr viel besser erkannt werden. Durch die redundante Ausführung der Messelemente wird durch einen Vergleich der Signalpegel zwischen dem linken und dem rechten piezoelektrischen Messelement eine Überwachung realisiert. Auf einen Defekt eines Elements kann geschlossen werden, wenn beide Signalamplituden nicht

gleich groß sind. Dies kann neben einem Defekt der piezoelektrischen Messelemente zum Beispiel auch durch Ablagerungen oder Gaseinschlüsse in den Impulsleitungen verursacht werden.

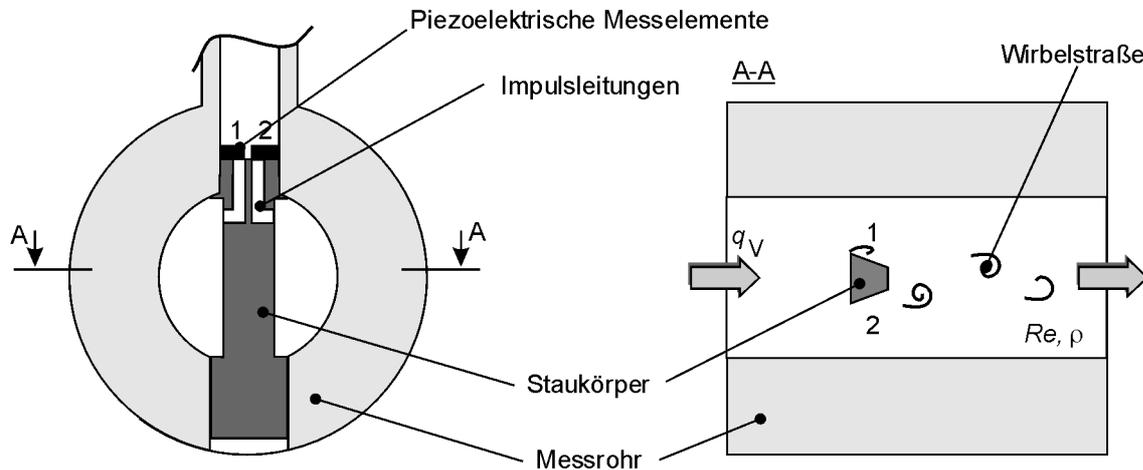


Abbildung 2.4: BOPP & REUTHER Wirbelzähler VTX 2 mit zwei piezoelektrischen Messelementen [Bopp04]. links in Fließrichtung, rechts von oben geschnitten

Überwachung der normalen Vibrationen eines Schwebekörper-Durchflusssensors

Ohne Redundanz kommt die Selbstüberwachung eines Schwebekörper-Durchflusssensors von Yokogawa aus [Yokoga05] [Hüchte03]. Die meist rein mechanischen Schwebekörpermesser verfügen über einen im vertikalen, konischen Rohr gelagerten Körper, der vom fließenden Medium nach oben gedrückt wird, bis die Kraft aufgrund des Strömungswiderstands und die Gewichtskraft des Schwebekörpers im Gleichgewicht sind. Die Lage kann bei den meisten Schwebekörpermessern durch ein Fenster von außen abgelesen werden. Bei dem Schwebekörper-Durchflusssensor *Rotameter* von *Yokogawa* (Abb. 2.5) wird der Schwebekörper aufgrund seiner Formgebung nicht nur vertikal angehoben, sondern durch das fließende Medium auch zur Rotation gebracht. Die Position des Körpers wird mittels einer magnetischen Kopplung nach außen auf eine mechanische Anzeige übertragen und zudem elektrisch aufgenommen. Die Führungen des Schwebekörpers lassen Taumelbewegungen des Körpers bei der Drehung zu, wodurch der Körper nahezu hysteresefrei

beweglich ist. Diese Taumelbewegungen können bei der elektrischen Detektion als Schwankungen des Positionssignals registriert werden. Bei Nulldurchfluss wird die maximale Amplitude (multipliziert mit einem Sicherheitsfaktor) des normalen Rauschens der magnetischen Positionsübertragung, hervorgerufen durch externe Magnetfelder, Vibrationen der Anlage oder Temperatureinflüsse, aufgenommen und gespeichert. Wird der Rotameter durchflossen sind die Schwankungen beim intakten Gerät hervorgerufen durch das Taumeln deutlich größer. Sollte durch Ablagerungen oder Partikel, die die Führungen blockieren, eine Blockade des Schwebekörpers im ausgelenkten Zustand auftreten, liegen die Schwankungen deutlich unter dem als normal gespeicherten Wert. So kann eine Blockade durch die *Analyse des Messsignals* erkannt werden. Bei hochviskosen Fluiden oder Gasen versagt diese Überwachung, da aufgrund der hohen Dämpfung die Schwankungen im Signal zu gering sind - es kommt somit zu Fehlalarmen, die ein Abschalten der Überwachungsfunktion erfordern.

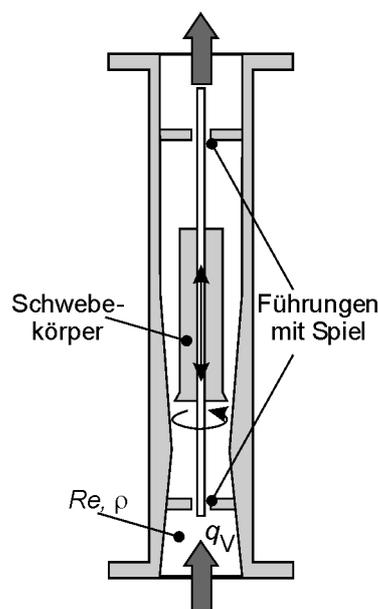


Abbildung 2.5: Yokogawa Rotameter mit Blockadeerkennung [Yokoga05].

Überwachung von zusätzlichen Signalen eines Coriolis-Massedurchflusssensors

Coriolis-Massedurchflusssensoren bilden aufgrund ihres Messprinzips gekoppelte Sensor-Aktor-Systeme. Gemessen wird bei diesem Durchflussmessverfahren eine Verbiegung von zu Schwingungen angeregten, massedurchflossenen Messrohren aufgrund der Corioliskraft. Es gibt viele verschiedene Ausführungen von Coriolis-Massedurchflusssensoren mit Rohrschleifen, geraden Rohren oder nur mit einem Rohr. Eine prinzipielle Anordnung eines Coriolis-Massedurchflusssensors ist in Abbildung 2.6 dargestellt. Zwei parallele Rohre schwingen in einer Ebene. Ist der Durchfluss gleich Null, schwingen die Rohre am Einlauf und Auslauf gleichförmig. Fließt eine Masse durch die Rohre, so wirkt aufgrund der Schwingung eine Schein-

kraft auf die Messrohre - die Corioliskraft. Dadurch eilt die Schwingung am Einlauf nach und am Auslauf vor. Diese Phasenverschiebung wird mit einlauf- und auslaufseitigen Wegsensoren auf den Messrohren erfasst und daraus der Massedurchfluss q_m berechnet. Die Schwingungsanregung der Messrohre erfolgt stets in Resonanz, somit ergibt sich aus der Frequenz die Dichte ρ des strömenden Mediums. Es stehen in Coriolis-Massedurchflusssensoren eine Reihe unterschiedlicher und unabhängiger Signale zur Verfügung, wie die Schwingfrequenz, die Schwingungsamplitude, die benötigte Energie zur Schwingungsanregung etc. Zusätzlich werden häufig Temperatursensoren zur Korrektur temperaturabhängiger Sensorfehler eingebaut. Aufgrund der zahlreichen zur Verfügung stehenden Signale kann relativ leicht eine Überwachung der Funktionsfähigkeit des Sensors erfolgen. Durch die *Analyse von Zusatzsignalen*, die zur eigentlichen Durchflussbestimmung nicht notwendig sind, wie der Erregerenergie zur Aufrechterhaltung der Schwingung und der daraus resultierenden Schwingungsamplitude, können auch Prozessparameter überwacht werden, wie zum Beispiel teilgefülltes Rohr, Gasanteil im Medium, Ablagerungen an den Messrohren etc. [ABB04].

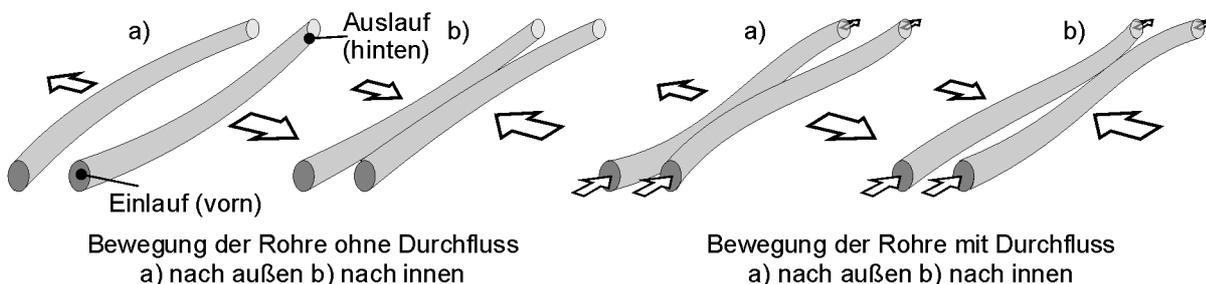


Abbildung 2.6: Darstellung des Messprinzips von Coriolis-Massedurchflussmessern mit zwei geraden Messrohren [ABB04].

Magnetisch-Induktiver-Durchflusssensor mit Überwachung der Leitfähigkeit und Variation des Magnetfelds

Ebenfalls auf zusätzliche Signale bzw. Größen, die nicht zur Durchflussmessung notwendig sind, basiert ein Teil der Selbstüberwachung des Magnetisch-Induktiven-Durchflusssensors (kurz MID) *Optiflux* von *Krohne* [Hofman04]. MID eignen sich nur für flüssige Medien, die eine elektrische Mindestleitfähigkeit von etwa $5 \mu\text{S}/\text{cm}$ aufweisen, da sie auf der Messung der von einem erzeugten Magnetfeld in-

duzierten Spannung, senkrecht zu Magnetfeld und Fließgeschwindigkeit, beruhen. Das Magnetfeld wird von Spulen an der Rohrwand erzeugt und die Spannung mittels eines Elektrodenpaars abgegriffen, wie schematisch in Abbildung 2.7 dargestellt ist. Korrosion oder Ablagerungen können einen zu hohen Übergangswiderstand vom Fluid zu den Elektroden hervorrufen und die Messung auf diese Art verfälschen. Daher wird bei diesem MID der Widerstand zwischen den Elektroden in definierten Zeitabständen gemessen,

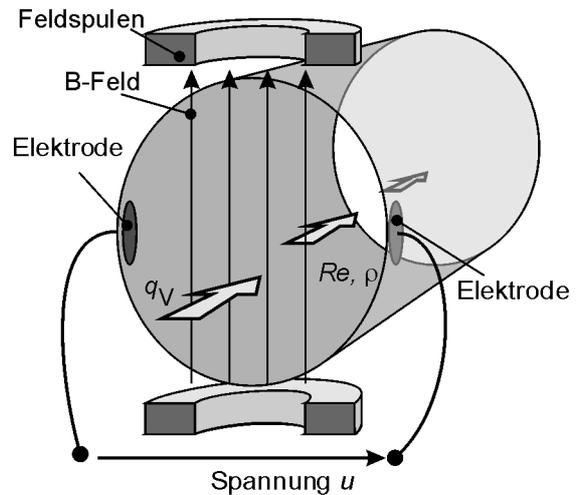


Abbildung 2.7: Schematische Darstellung des Magnetisch-Induktives-Durchflussmessverfahrens.

um einen solchen Einfluss sicher detektieren zu können. Eine weitere Prüfung des MID ist mittels einer Variation des Magnetfeldes durch eine periodische Verringerung des Feldstroms I_F um 50 % realisiert (Abb. 2.8). Aufgrund der proportionalen Abhängigkeit vom Feldstrom müssen Magnetfeld und so auch die Messspannung u auf 50 % ihrer vorherigen Werte fallen. Treten Nichtlinearitäten in der Elek-

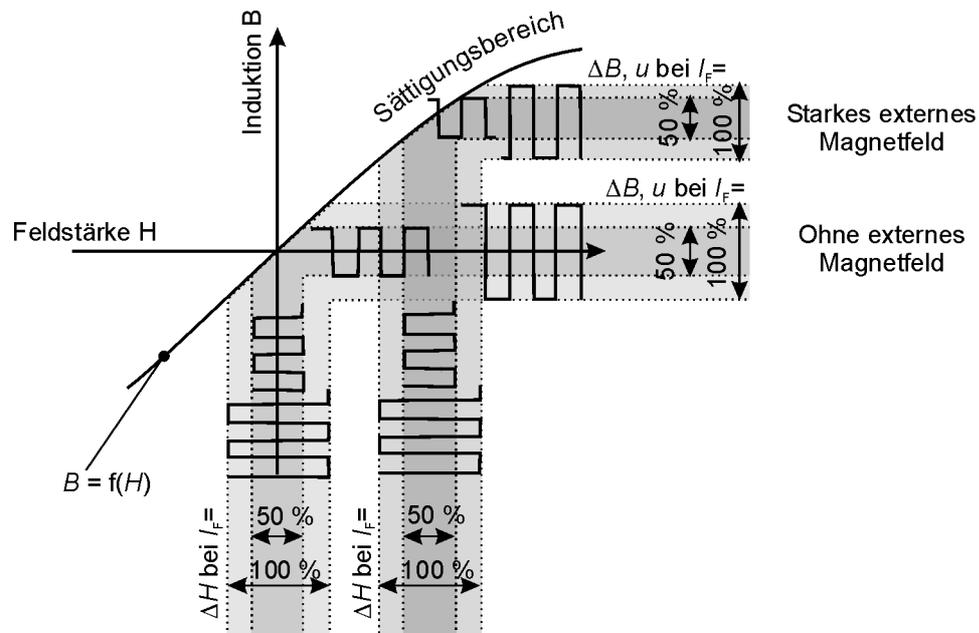


Abbildung 2.8: Erkennung des Einflusses starker externer Magnetfelder durch die Reduzierung des Feldstroms I_F auf 50 % [Hofman04].

tronik oder im Magnetkreises auf, z.B. durch Sättigung des magnetischen Kreises, hervorgerufen durch externe Magnetfelder, so können diese über diesen Test mittels einer relativen *Referenz* detektiert werden.

Differenzdrucksensor mit Aktor zur Druckerzeugung

Ein von der Firma *Siemens* patentierter Differenzdrucksensor, der ebenfalls zur Wirkdruckdurchflussmessung eingesetzt werden kann, erzeugt ebenfalls eine relative Referenz in der Messkette (Abb. 2.9) [Breime96]. Der gehäusete Differenzdrucksensor verfügt über Kapillaren zur Leitung des Drucks p_1 bzw. p_2 mittels eines Füllmediums (z.B. Silikonöl) zu einem piezoresistiven Messelement aus Silizium. Auf einer Seite des Drucksensorgehäuses befindet sich zudem ein piezoelektrischer Wandler im Füllmedium, der als Aktor angesteuert werden kann und so periodische Druckwellen p_{\sim} in das Füllmedium einleitet. Dadurch wird der Druck p_2 variiert zu $p_2' = p_2 + p_{\sim}$ und der vom Messelement aufgenommene Differenzdruck $\Delta p = p_1 - p_2$ verändert sich zu $\Delta p' = p_1 - p_2' = p_1 - p_2 - p_{\sim}$. Diese Variation der Messgröße kann nur bei intaktem Messelement und korrekt arbeitender Signalverarbeitung detektiert werden. Wie bei dem oben vorgestellten MID kann diese Variation im laufenden Messbetrieb stattfinden, ohne Rückwirkungen auf den Prozess auszuüben. Die Überwachung schließt bei diesem Verfahren allerdings die Ankopplung des Prozesses über Trennmembranen oder Impulsleitungen nicht mit ein. Sollte hier durch Korrosion, Ablagerungen oder mechanische Beschädigungen eine Änderung der Druckeinleitung stattfinden, kann sie mit dieser Art der Überwachung nicht erfasst werden.

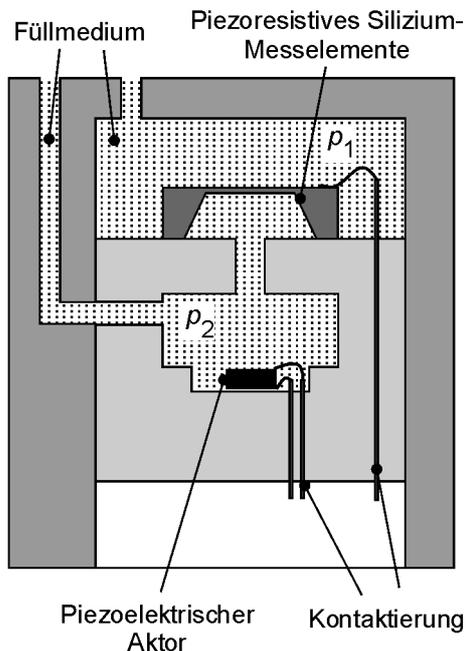


Abbildung 2.9: Differenzdrucksensor mit piezoelektrischem Aktor zur Druckerzeugung [Breime96].

Messgrößenvariation eines Staudrucksensors durch kinematische Umkehr

Ein sich selbst kalibrierender Durchflusssensor mit Stauscheibe ist in [Wagner81] bzw. [Mirahm81] vorgestellt. Der Staudruck wirkt auf eine Stauscheibe und ist quadratisch von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig. Erfasst wird die auf die Stauscheibe wirkende Kraft von einem elektromagnetischen Aktor, der im Kompensationsverfahren betrieben wird, also durch eine Gegenkraft ein Gleichgewicht bildet (Abb. 2.10). Durch die quadratische Abhängigkeit der erzeugten Kraft F_{mag} vom elektrischen Strom i , kann auf die beim Staudruck normalerweise notwendige Radizie-

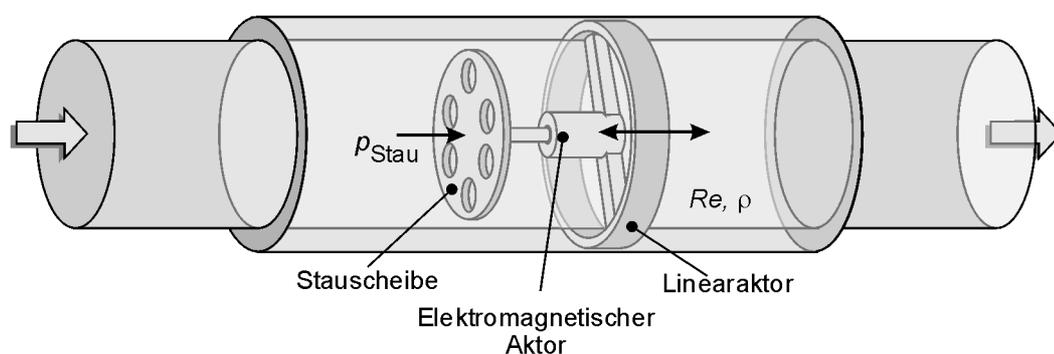


Abbildung 2.10: Selbstkalibrierender Durchflusssensor mit Stauscheibe und Referenzerzeugung [Wagner81].

rung zur Durchflussberechnung verzichtet werden ($F_{\text{mag}} \sim i^2$). Zur Selbstkalibrierung kann mit Hilfe eines Linearaktors das Modul aus Stauscheibe und Kompensationsaktor mit einer konstanten Geschwindigkeit in und entgegen der Strömungsrichtung bewegt werden. Durch die Relativgeschwindigkeit wird ein konstanter Offset zur Strömungsgeschwindigkeit addiert bzw. subtrahiert. Auf diese Weise soll der Durchflusssensor kalibriert werden können. Folglich wäre auch eine Überwachung der Funktion möglich. Insgesamt bedeutet dies allerdings eine deutliche Erhöhung der Komponenten mit bewegten Teilen mit Medienberührung, was stark kostenerhöhend wirkt und die Zuverlässigkeit vermutlich deutlich herabsetzt.

Kapazitiver Differenzdrucksensor mit Erfassung der Temperatursausdehnung des Füllmediums

Ein anderer Weg zur Selbstüberwachung von Sensoren wird durch die Firma *Endress & Hauser* bei einem kapazitiven Einkammer-Differenzdrucksensor eingeschla-

gen [Gerst93] [Endres04]. Dieser Sensor verfügt über zwei Druckmessplatten, die sich bei einwirkendem Druck durchbiegen und so die als Kondensatorelektroden kontaktierten Innenseiten der Platten an eine ortsfeste Innenelektrode annähern bzw. von ihr weg bewegen. Dadurch ändert sich die Kapazität der zwei Messkondensatoren entgegengesetzt (Abb. 2.11). Gekoppelt sind beide Messkondensatoren über ein inkompressibles Füllmedium. Ändert sich nun die Temperatur der Messzelle, wird sich das flüssige Füllmedium stärker als die Messzelle ausdehnen, was zu einer gleichförmigen Änderung beider Kapazitäten führt. Diese gleichförmige Kapazitätsänderung wird ebenfalls erfasst. Zusätzlich wird die einwirkende Störgröße Temperatur mit einem Temperatursensor gemessen. Einerseits kann auf diese Weise der Temperatureinfluss auf die Druckmessung herausgerechnet werden, um die Genauigkeit der Messung zu steigern. Andererseits kann durch einen Vergleich der gemessenen Temperatur mit der aus den Kapazitäten berechneten auf Fehlfunktionen des Sensors geschlossen werden. Die mit einer solchen *Überwachung der Störgröße* „Temperatur“ detektierbaren Störungen sind Ölverlust im Einkammer-Differenzdrucksensor, z.B. in Folge von Undichtigkeiten der Druckmessplatten, Defekte der Kapazitätsmessschaltung, Kabelbruch und Defekte des Temperatursensors oder der Temperaturmessschaltung.

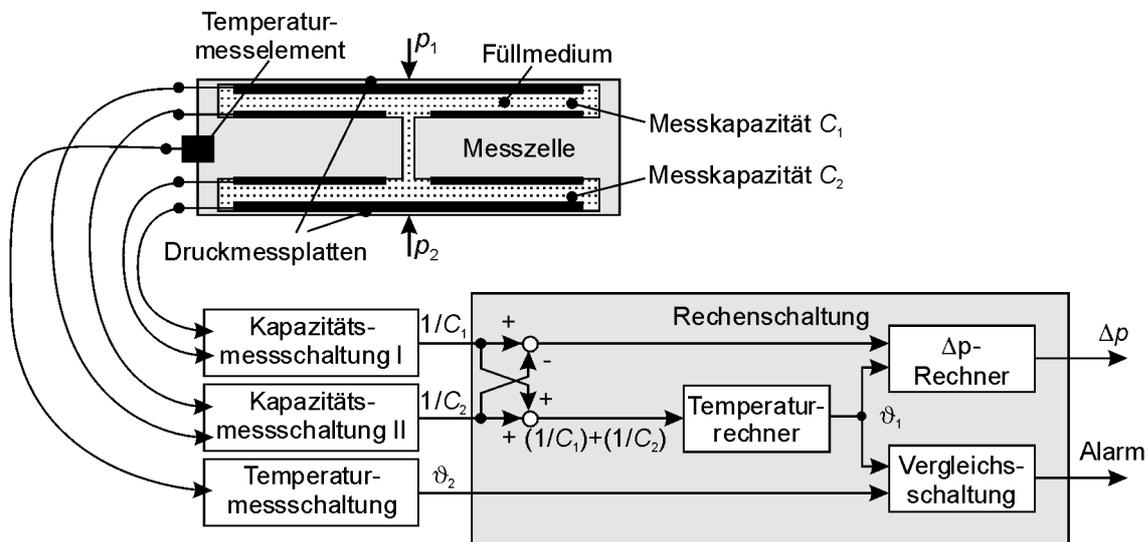


Abbildung 2.11: Kapazitiver Einkammer-Differenzdrucksensor mit Selbstüberwachung durch Bestimmung des Temperatureinflusses [Gerst93].

2.3 Schlussfolgerung zum Stand der Selbstüberwachung

Die hier vorgestellten Beispiele sollen die bereits vorhandene Vielfalt der industriell genutzten Möglichkeiten und Verfahren zur Selbstüberwachung von Sensoren in der Prozessmesstechnik darstellen. Außerdem soll deutlich werden, dass die gewählten Möglichkeiten zur Realisierung einer Selbstüberwachungsfunktion nie alle möglichen Störungen, die auftreten können, detektieren können. Die Selbstüberwachung ist daher immer nur für spezielle Störungen, die für das betreffende Messprinzip oder die betreffenden Einsatzbedingungen als besonders kritisch betrachtet werden, angepasst. Anhand einer Analyse des Marktangebots ist es aufgrund der Abhängigkeit von Messgröße, -prinzip, -verfahren und Sensorentwurf nicht möglich, eine Aussage über die Chancen bzw. Vor- und Nachteile bestimmter Möglichkeiten zur Selbstüberwachung im Allgemeinen zu treffen.

Die in einer Studienarbeit zur Beurteilung des Standes der Technik [Noack04] gefundenen Verfahren zur Selbstüberwachung können in fünf Gruppen zusammengefasst werden: Einsatz von *Redundanz*, Erzeugung eines bekannten *Referenzwerts* der Messgröße oder einer Zwischengröße zum Vergleich, *Analyse des Messsignals*, *Analyse einer Störgröße* sowie *Analyse von Zusatzsignalen und -größen* (siehe auch Kapitel 3.5). Dadurch ergibt sich eine Verteilung der analysierten Sensoren unter diesen fünf Gruppen wie in Abbildung 2.12 gezeigt. Bei dieser Arbeit war die insgesamt gefundene Anzahl selbstüberwachender Sensoren zwar groß, die Anzahl der Sensoren, von denen detaillierte Informationen über die Realisierung der Selbstüberwachung zu bekommen waren, mit nur 25 Sensoren relativ gering. Bei der Verteilung in Abbildung 2.12 ist zu beachten, dass einfache Doppelsensoren genauso wenig Beachtung gefunden haben, wie eine reine Überwachung der Elektronik. Diese Grafik gibt keine Verteilung der am Markt befindlichen selbstüberwachenden Sensoren wieder. Sie soll nur zeigen, dass, abgesehen vom Verfahren der *Analyse einer*

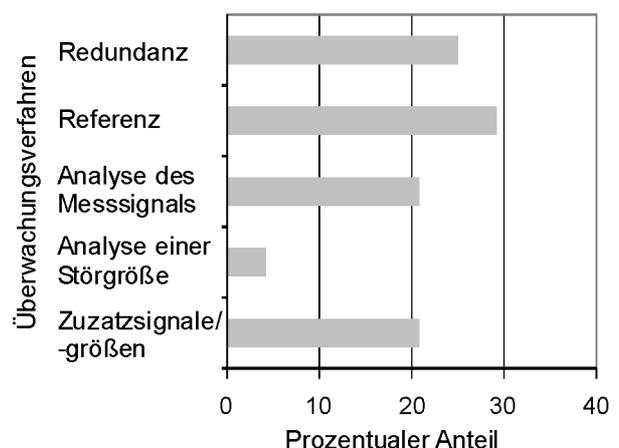


Abbildung 2.12: Verteilung der analysierten Verfahren zur Selbstüberwachung bei Prozesssensoren [Noack04].

Störgröße, alle anderen vier Verfahren nahezu gleich häufig bei den betrachteten Sensoren Anwendung finden. Häufig werden auch Kombinationen aus mehreren Verfahren zur Selbstüberwachung eingesetzt, um eine möglichst umfassende Überwachung mit Erkennung aller relevanten Störungen und Ausfälle zu erreichen.

Eingesetzt wird Selbstüberwachung von Durchflusssensoren meist bei neueren Messverfahren wie Coriolis-Massedurchflusssensoren oder MID. Hier bietet sich aufgrund der höheren Anzahl an nutzbaren Signalen und vorhandener Elektronik und Mikrorechnern eine Implementierung einer Überwachungsfunktion an. Zu dem relativ „alten“ Durchflussmessverfahren der Wirkdruck- oder Staudruckmessung konnten trotz nach wie vor großer Verbreitung keine industriellen Anwendungen gefunden werden. Einzig zu Differenzdrucksensoren sind Beispiele vorhanden, die allerdings, wenn sie zur Durchflussmessung eingesetzt werden, einen großen Teil der Messkette eines Durchflusssensors nicht berücksichtigen. Auch aus der Forschung zur Selbstüberwachung von Wirkdruck- oder Staudrucksensoren sind Ergebnisse nur von der UNIVERSITY OF GREENWICH (z.B. [Amadi94-1]) oder der oben vorgestellte, recht aufwändig aufgebaute Staudruckmesser mit Linearaktorik von WAGNER bekannt. Daher ergibt sich auf dem Gebiet der Selbstüberwachung differenzdruckbasierter Durchflusssensorik ein wichtiges Betätigungsfeld. Aus der Analyse des Standes der Technik können folgende Defizite festgehalten werden:

- Eine klare Strukturierung der Methoden und Verfahren zur Selbstüberwachung ist nicht vorhanden.
- Methodik zum Vorgehen bei Integration von Selbstüberwachung fehlt.
- Es ist keine Bewertung der möglichen Methoden und Verfahren vorhanden.
- Differenzdruckbasierte Durchflusssensoren wurden bisher zu wenig betrachtet.

In dieser Arbeit sollen daher die Wege zur Realisierung einer Selbstüberwachung autarker Sensoren systematisch aufgezeigt werden. Die Eignung bzw. die Eigenschaften der verschiedenen Verfahren müssen allgemein gültig abgeschätzt werden. Das Vorgehen bei der Integration von Selbstüberwachungsfunktionen soll am Beispiel der Wirkdruckmessung dargestellt werden, für das konkrete Realisierungsmöglichkeiten theoretisch und messtechnisch zu charakterisieren sind.

3 Definitionen und Strukturierung der Selbstüberwachung von Sensoren

Elektrische Sensoren für physikalische Größen umfassen als zentrale Komponente einen Primärsensor, welcher die Messgröße in eine elektrische Größe wandelt. Die elektrische Größe wird anschließend weiterverarbeitet, z.B. in Form einer Verstärkung, einer Korrektur (z.B. Offset, Temperaturfehler) oder einer Analog-Digital-Wandlung. Anschließend wird der Ausgangswert angezeigt oder an eine höhere Ebene (z.B. Prozessleitsystem) weitergegeben. Für den Fall einer mechanischen Messgröße ist die typische Messkette in Abbildung 3.1 dargestellt.

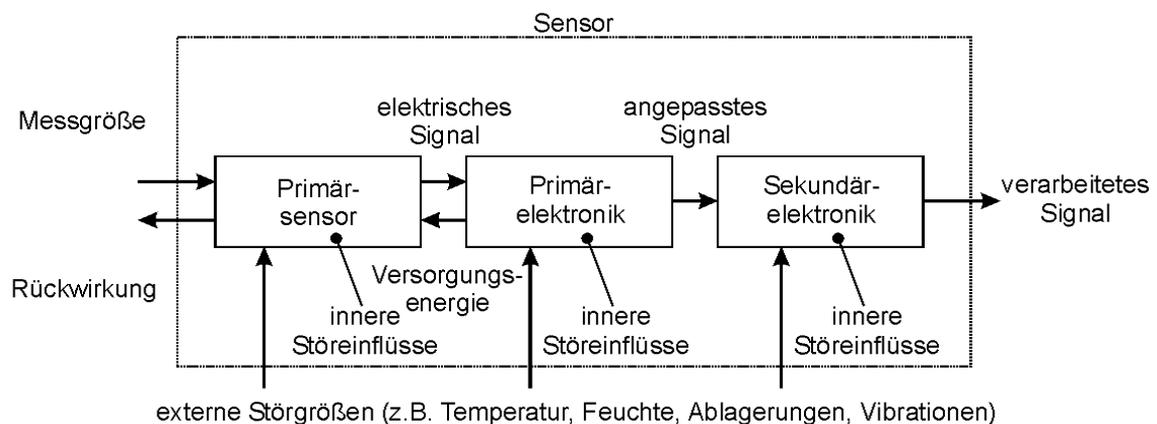


Abbildung 3.1: Messkette eines elektrischen Sensors für mechanischen Größen mit externen und internen Störeinflüssen.

Durch den Primärsensor wird die Messgröße in eine elektrisch verwertbare Zwischengröße gewandelt, die in einem definierten Zusammenhang zur Eingangsgröße des Primärsensors steht. Der Primärsensor selbst kann sich in zwei weitere Blöcke unterteilen: einem internen mechanischen Wandler und einem elektromechni-

schen Wandler, dessen Ausgangsgröße die elektrisch verwertbare Größe ist. Teilweise ist eine zusätzliche Messgrößeneinleitung, z.B. in Form eines Gehäuses zur Medientrennung, notwendig. In einem solchen Fall wird hier der Begriff *Messzelle* eingeführt (Abb. 3.2). Idealerweise sollte ein mit einer Selbstüberwachung ausgestatteter Sensor erkennen können, wenn der Ausgangswert der gesamten Messkette nicht mehr dem kalibrierten Verhältnis zur Messgröße entspricht, gleichgültig in welchem Block der Messkette eine Störung zu Abweichungen von der Spezifikation geführt hat. Es soll somit die gesamte Messkette überwacht werden. Die Störgrößen, die auf die einzelnen Blöcke wirken, sind im Allgemeinen unterschiedlich. Zum Beispiel wirkt auf den Primärsensor bzw. die Messgrößeneinleitung die Temperatur des Messmediums über die Prozessschnittstelle, die auf die Sensorelektronik wirkende Temperatur kann sich von der Prozesstemperatur jedoch deutlich unterscheiden.

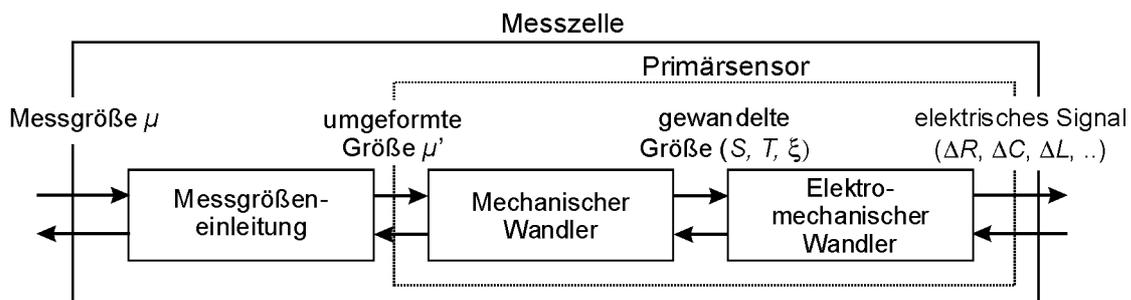


Abbildung 3.2: Messzelle und Primärsensor mit den zugehörigen Unterblöcken der Messgrößeneinleitung und internen Wandlern.

Die Herausforderung bei der Realisierung von Selbstüberwachung autarker Sensoren ist es also, alle relevanten Störungen in der Messkette mit möglichst geringem Aufwand zu detektieren, ohne dass der wahre Wert der Messgröße bekannt ist. Erschwerend kommt hinzu, dass jeder Sensor aufgrund des Messprinzips und des Messverfahrens auch im intakten Zustand *Messabweichungen* (geläufig *Messfehler*) bei der Erfassung der Messgröße aufweist. Somit muss erkannt werden, ob die Messabweichung spezifikationsgemäß ist oder darüber hinaus geht.

3.1 Messfehler, Störung und Ausfall von Sensoren

Das typische quasi-statische Übertragungsverhalten im stationären Zustand eines Sensors ist in Abbildung 3.3 (links) qualitativ dargestellt [Werths05]. Dargestellt

sind die systematischen Abweichungen, Linearitäts- und Hysteresefehler, und die zufälligen Kennlinienstreuungen bei mehrmaligem Durchlaufen des Messbereichs.

Abweichungen von der idealen, linearen Sensorübertragungsfunktion mit dem Übertragungsfaktor B_0 und der Offsetspannung u_0 resultieren aus den Einflüssen von externen Störgrößen wie Temperatur, Feuchtigkeit etc. und von internen Einflüssen, die vom Messprinzip und -verfahren herrühren. Dabei wird zwischen Linearitätsfehler, Hysteresefehler, Offsetfehler usw. unterschieden. Diese sind systematische Messabweichungen, die grundsätzlich durch die Sensorelektronik korrigiert werden können. Beim Hysteresefehler gilt dies nur stark eingeschränkt, da hierfür die Historie des Messgrößenverlaufs bekannt sein muss. Neben den systematischen Messabweichungen existieren ebenfalls zufällige Abweichungen, die nicht mehr korrigiert werden können. Diese beschreiben ein stochastisches Schwanken des Ausgangssignals um einen Mittelwert, das durch die Messgröße aber auch von Störgrößen beeinflusst werden kann. Diese Messabweichungen sind Kennwerte des Sensors und ergeben einen Toleranzbereich, in dem das Ausgangssignal um den wahren Wert schwankt. Eine Störung tritt erst dann auf, wenn der Sensor diesen spezifizierten Toleranzbereich verlässt (Abb. 3.3 rechts).

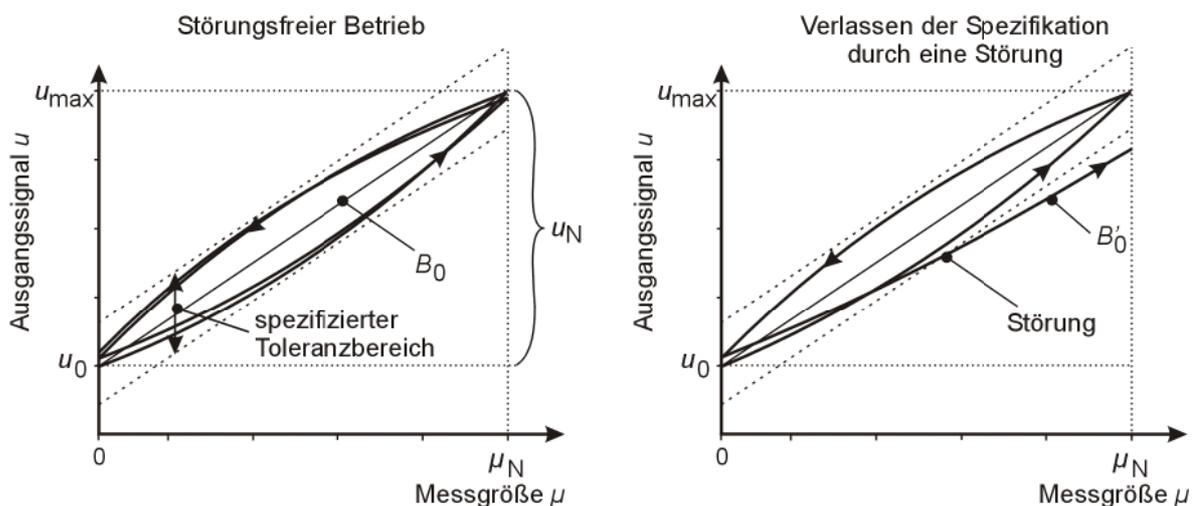


Abbildung 3.3: Statisches Sensor-Übertragungsverhalten im störungsfreien und störungsbehafteten Betrieb.

Auch im dynamischen Fall kann es zum Verlassen der Spezifikationen kommen. In Abbildung 3.4 ist der Amplitudengang des dynamischen Übertragungsverhaltens eines Sensors mit Tiefpassverhalten allgemein dargestellt [Werths05]. Der Verlauf zeigt eine Resonanzüberhöhung im oberen Frequenzbereich und tieffrequente Ab-

weichungen, hervorgerufen durch zeitabhängige Kriechvorgänge. Der Arbeitsfrequenzbereich liegt im spezifizierten Toleranzbereich des Übertragungsfaktors B_0 . Es kann zum Beispiel zum Verlassen der Spezifikationen kommen, wenn der Sensor durch Veränderungen ein zusätzliches Tiefpassverhalten mit einer Grenzfrequenz im Arbeitsfrequenzbereich (in Abb. 3.4 links dargestellt) aufweist. Eine Möglichkeit für eine solche Störung kann zum Beispiel ein teilweiser Verschluss des Prozessanschlusses eines Drucksensors, der aufgrund der Viskosität des Messmediums einen fluidischen Tiefpass bildet, sein. Diese Störung macht sich nur im dynamischen Verhalten bemerkbar. In einem eingeschränkten Frequenzbereich ist im Sensor-Übertragungsverhalten keine Abweichung feststellbar.

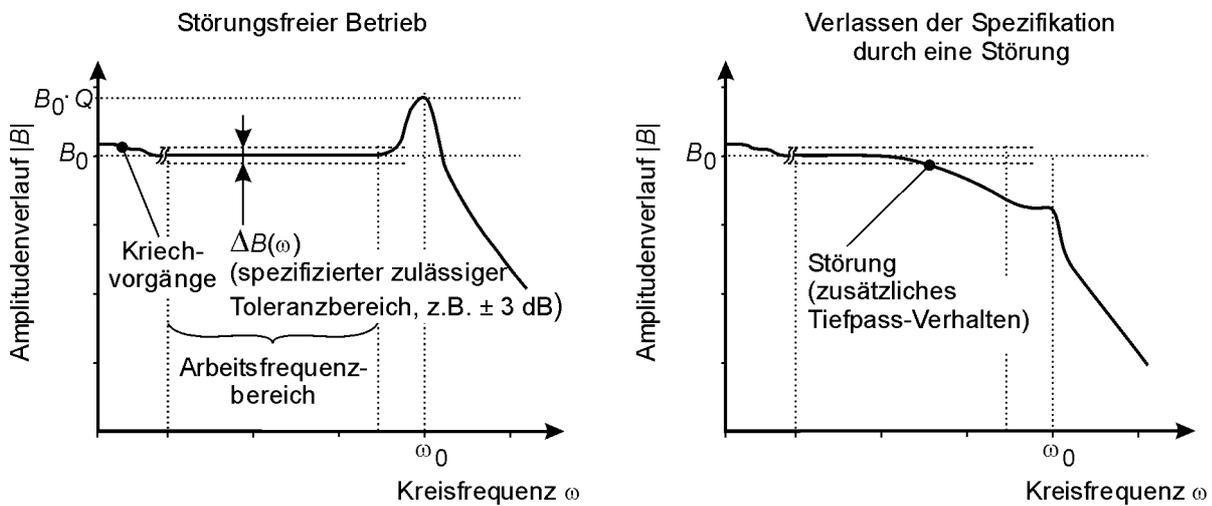


Abbildung 3.4: Amplitudengang des dynamischen Sensor-Übertragungsverhaltens im störungsfreien und störungsbehafteten Betrieb.

Die Aufgabe einer Sensor-Selbstüberwachung ist es daher, das Verlassen des spezifizierten Toleranzbereichs festzustellen, d.h. wenn die Abweichungen des Ausgangssignals vom wahren Wert der Messgröße größer als die zulässigen Messabweichungen sind. Dies muss so schnell geschehen, dass abhängig von der Anwendung noch keine Auswirkungen durch die Störung stattgefunden haben.

Ausgehend von den erläuterten Unterschieden zwischen *Störungen* und *Messabweichungen* sollen jetzt die Begriffe der Selbstüberwachung von Sensoren definiert werden. Die Thematik der Selbstüberwachung von Sensoren stellt eine interdisziplinäres Arbeitsgebiet dar, da sie Bereiche des Qualitätswesens und der Zuverlässigkeitsforschung sowie zum anderen das Gebiet der Messtechnik und Sensorik berührt. Weiterhin führen Ergebnisse und Fortschritte der Überwachung und Diagno-

se auf dem Gebiet der Informatik, Automatisierungs-, Prozessleit- und Verfahrenstechnik zu einer weiteren Erhöhung der Vielzahl an gebräuchlichen Begriffen.

Im Rahmen der Normung innerhalb der Bereiche Zuverlässigkeit, Sicherheit und Qualitätssicherung (z.B. [DIN EN 61508] [VDI/VDE 3542]) wird der Zustand nach erfolgter Störung als *fehlerhafter Zustand* oder *Fehler* bezeichnet. Dieser Begriff wird ebenfalls im Entwurf der VDI/VDE-Richtlinie *Anforderungen an Selbstüberwachung und Diagnose in der Feldinstrumentierung* [VDI/VDE 2650] übernommen. Im messtechnischen Zusammenhang wurde der Begriff *Fehler* bereits im 19. Jahrhundert von CARL FRIEDRICH GAUSS mit der Bedeutung der Abweichung des Messwerts vom wahren Wert der Messgröße eingeführt und hat sich im Sprachgebrauch etabliert [Profos97]. Obwohl seit 1983 in [DIN 1319] (*Grundlagen der Messtechnik*) der Begriff *Fehler* durch *Messabweichung* ersetzt wurde, ist er immer noch gebräuchlich (s.o.: Linearitätsfehler, Hysteresefehler, etc.). So sind sogar in [DIN 1319] selbst mit *Fehlergrenzen* die *Abweichungsgrenzbeträge für Messabweichungen eines Messgerätes* beschrieben. Damit ist die obere und untere Grenzabweichung unter Berücksichtigung der systematischen und zufälligen Messabweichung gemeint – also keine unzulässige nicht spezifikationsgemäße Abweichung. Daher soll in dieser Arbeit der Begriff *Fehler* weder in der einen noch in der anderen Bedeutung verwendet werden, um Missverständnisse zu vermeiden.

Es gelten in dieser Arbeit folgende Definitionen:

<i>Funktion</i> (<i>function</i>)	⇨ Tätigkeit, Wirken einer Betrachtungseinheit	[VDI/VDE 3542]
--	---	----------------

Der Zustand des Nichterfüllens einer Forderung wird *Fehlfunktion* genannt. Tritt eine *Fehlfunktion* ein, so wird der Übergang *Störung* oder *Ausfall* genannt. Die Fehlfunktionen sind also die Ursachen für Störungen bzw. Ausfälle.

<i>Fehlfunktion</i> (<i>fault, dysfunction</i>)	⇨ Funktion, die nicht bestimmungsgemäß ausgeführt wird oder unterbleibt	[VDI/VDE 3542]
--	---	----------------

Nach [VDI/VDE 3542] besteht der Unterschied zwischen Ausfall und Störung darin, ob die Funktion dauerhaft nicht mehr erfüllt wird (Ausfall) oder ob das System nach einer begrenzten Zeit wieder zum „korrekten Wirken“ zurückkehrt (Störung).

Hier wird der Begriff „Störung“ mit einer anderen Bedeutung belegt, da bei Sensoren durch Verschleiß oder Alterung durchaus eine grundsätzliche Erfüllung der Funktion gegeben sein kann, obwohl die tatsächlichen Abweichungen über die spezifizierten Abweichungen hinausgehen. Es besteht jedoch die grundsätzliche Möglichkeit, mittels einer Rekalibrierung die volle Funktionsfähigkeit wieder herzustellen. Demnach erfüllt der Sensor noch die Funktion unter Einschränkungen z.B. eines größeren Toleranzbandes. Diese Definition entspricht grundsätzlich der in [DIN 40041] genannten als „...unvollständige Erfüllung einer geforderten Funktion durch eine Einheit“. Der Unterschied zwischen einem *Ausfall*, der keinen Rückschluss aus dem Ausgangssignal auf die Messgröße zulässt und einer *Störung*, bei deren Eintritt das Ausgangssignal zwar außerhalb der Toleranz liegt, aber noch eindeutig mit der Messgröße verknüpft ist, ist in Abbildung 3.5 schematisch dargestellt. Nach Eintritt einer Störung kann das Ausgangssignal noch zur Bestimmung bzw. zur Schätzung der Messgröße genutzt werden, nach einem Ausfall ist dies nicht mehr möglich.

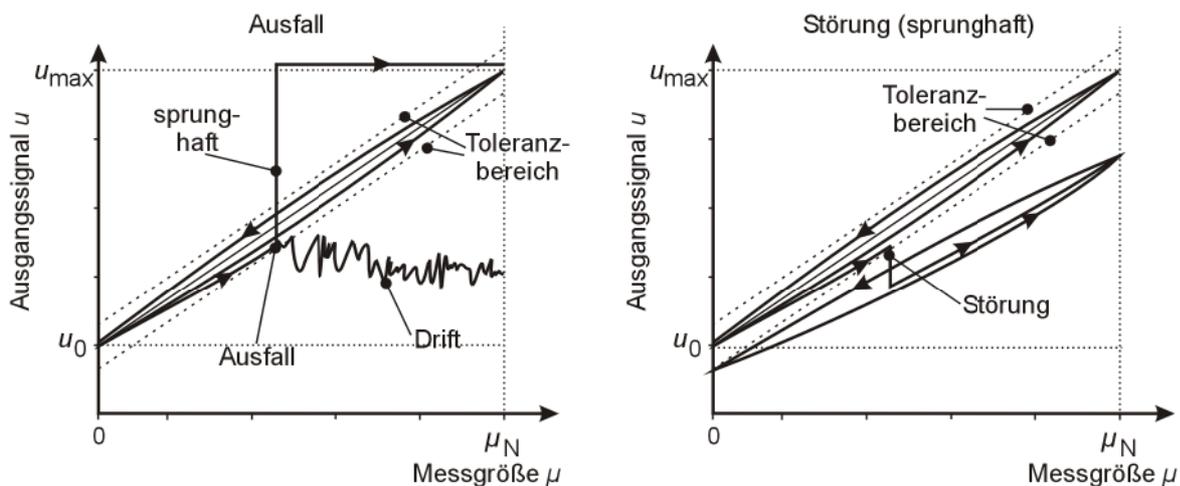


Abbildung 3.5: Der Unterschied zwischen einem Ausfall (links) und einer Störung (rechts).

Es soll hier folgende Definition für eine Störung gelten:

<p><i>Störung</i> (malfunction, deficiency)</p>	<p>⇒ Verlassen der zulässigen Abweichungen bei grundsätzlichem Erfüllen der geforderten Funktion (eine Störung stellt das Ereignis des Übergangs von korrekter Funktion zu Fehlfunktion dar)</p>	<p><i>Eigendefinition</i></p>
---	--	-------------------------------

Die Definition von Ausfall wird aus [VDI/VDE 3542] übernommen:

<i>Ausfall</i> (<i>failure</i>)	⇨ Beendigung der Fähigkeit einer Funktionseinheit, eine geforderte Funktion auszuführen (ein Ausfall stellt das Ereignis des Übergangs von korrekter Funktion zu Fehlfunktion dar)	[DIN EN 61508]
--------------------------------------	---	----------------

Die immer vorhandenen Abweichungen des Ausgangswertes vom wahren Wert sind in den Unterlagen des Sensors spezifiziert und werden Messabweichung genannt. Eine Definition für Messabweichungen findet sich in [DIN 1319].

<i>Messabweichung</i> (<i>error of measurement</i>)	⇨ Abweichung eines aus Messungen gewonnenen und der Messgröße zugeordneten Wertes vom wahren Wert (setzt sich additiv aus systematischer und zufälliger Messabweichung zusammen)	[DIN 1319] Teil 1
--	--	----------------------

Nach dem *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen*, (kurz GUM von engl.: *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*) [DIN ENV 13005] wird zur Angabe eines Wertebereichs innerhalb dessen der *wahre Wert* der Messgröße um das *Messergebnis* liegt der Begriff *Messunsicherheit* verwendet. Dabei werden nach [DIN 1319] alle Messabweichungen als Toleranzbereich zusammengefasst und jedem Messergebnis zugeordnet. Der *wahre Wert* der Messgröße liegt folglich im Intervall *Messergebnis* ± *Messunsicherheit*.

<i>Messunsicherheit</i> (<i>uncertainty of measurement</i>)	⇨ Dem Messergebnis zugeordneter Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgröße zugeordnet werden könnte	[DIN ENV 13005]
--	--	-----------------

3.2 Definition der Selbstüberwachung und von verwandten Begriffen

Für den Begriff der *Selbstüberwachung* findet man in Literatur wie Firmenschriften und Fachartikeln gegenwärtig keine einheitliche Verwendung. Unter ähnlichen Begriffen, wie *Selbstdiagnose*, *Selbstkalibrierung*, *Selbstvalidierung* oder *Selbsttest*, sogar *Smart* oder *Intelligent Sensor*, findet man durchaus Formen und Methoden der Selbstüberwachung. Die Begriffe werden jedoch auch kontrovers gebraucht.

Selbstüberwachung und *Selbsttest* sind Methoden der Instandhaltung, die den Zustand eines Systems überwachen, *Selbstkalibrierung* und *-validierung* sind dagegen Methoden zur Reduzierung der Messunsicherheit. Man gewinnt mit Hilfe von Selbstkalibrierung und *-validierung* Informationen über die Gültigkeit des Messsignals. Wobei die Funktionalitäten auch Gemeinsamkeiten aufweisen, da ein nicht validierbares System ausgefallen oder gestört sein muss [Mesch01].

Der Begriff *Selbsttest* wird ähnlich verwendet wie *Selbstüberwachung*. Häufig ist dabei ein Selbstüberwachungsalgorithmus gemeint, der in bestimmten Zeitintervallen, häufig mit einer Unterbrechung des Betriebs verbunden, durchgeführt wird. Der Selbsttest kann hier also als Untergruppe von Selbstüberwachung verstanden werden.

Nach [VDI/VDE 2650] ist die Funktion der Selbstüberwachung nur die Erzeugung von Zustandsinformationen aus internen oder applikationsabhängigen Informationen. In [VDI/VDE 2180] wird *Selbstüberwachung* konkreter definiert als „*Betrachtungseinheit, die so ausgeführt ist, dass sie unter dem Vorbehalt des Ausschlusses bestimmter Fehler alle anderen Fehler erkennt*“. Aufgrund der nicht ausreichenden Definitionen und Zielstellungen von Selbstüberwachung von Sensoren, werden im Folgenden eigene Überlegungen vorgestellt.

Zur Selbstüberwachung gehört die *Erkennung* der erfolgten Störung bzw. des Ausfalls und auch die *Diagnose*, welcher Art die Fehlfunktion und welche Ursache verantwortlich ist. Hierzu ist eine genaue Kenntnis der Auswirkungen der verschiedenen Störungen im Sensor bzw. in den Subsystemen des Sensors notwendig. Ein möglicher Ablauf ist in Abbildung 3.6 gezeigt. Zunächst muss eine Störung aufgetreten sein, die vom Sensor detektiert wird. Anschließend müssen die registrierten Auswirkungen mit dem vorhandenen Wissen der Auswirkungen bekannter Fehl-

funktion und Störungen verglichen werden. Der Algorithmus umfasst ebenfalls die Anzeige bzw. Meldung einer Störung.

<p><i>Selbstüberwachung</i> (<i>self monitoring</i>)</p>	<p>⇒ Funktion, die den Ist-Zustand des Systems „Sensor“ und somit alle Fehlfunktionen, unter Ausschluss bestimmter Fehlfunktionen, erkennt und diesen Ist-Zustand bezüglich möglicher Zusammenhänge und Ursachen interpretiert und diagnostiziert</p>	<p><i>Eigendefinition</i></p>
--	---	-------------------------------

Auf Basis der Informationen und des Wissens aus der Diagnose der Ursache könnte sich eine gezielte Rekonfiguration des Sensors anschließen. In diesem Fall spricht man von einem gegen Störungen bzw. gegen Fehlfunktionen toleranten Sensor. Die hierfür gebräuchliche Bezeichnung ist *Fehlertoleranz*. Dieser Begriff wird jedoch auch für Sensoren mit einer geringen Messunsicherheit benutzt. Daher soll hier *Störungstoleranz* benutzt werden.

Nach der oben genannten Definition wird mit *Selbstüberwachung* die *Erkennung* und die *Diagnose* von Störungen und Ausfällen zusammengefasst. Dabei hat *Erkennung* nur die Aufgabe, aufgetretene Störungen und Ausfälle zu detektieren und dem Anwender anzuzeigen bzw. an eine übergeordnete Ebene (Prozessleitebene) zu melden.

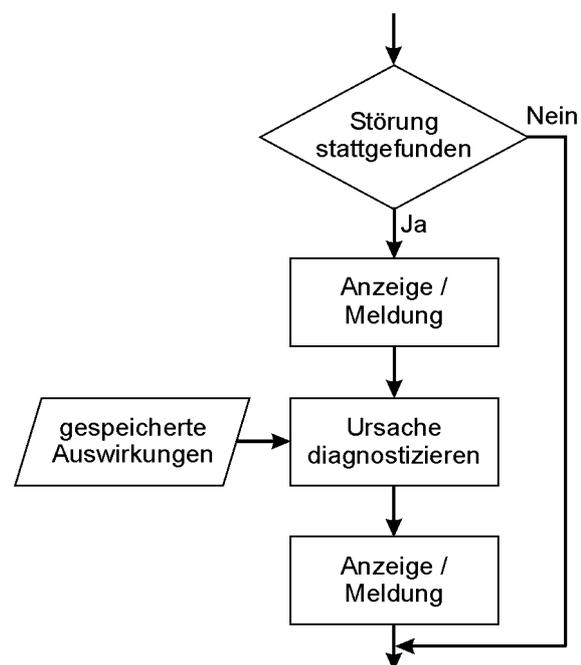


Abbildung 3.6: Schematischer Ablauf eines Selbstüberwachungs-Algorithmus.

<p><i>Störungserkennung</i> (<i>detection</i>)</p>	<p>⇒ Fähigkeit den Ist-Zustand des Systems „Sensor“ und somit alle möglichen Störungen und Ausfälle, unter Ausschluss bestimmter (benannter) Störungen und Ausfälle, zu erkennen</p>	<p><i>Eigendefinition</i></p>
--	--	-------------------------------

Die *Diagnose* schließt sich an die Erkennung an und versucht, anhand von Zusatzinformationen im Sensor, die Ursachen für Störungen und Ausfälle zu diagnostizieren. Es handelt sich also um eine Interpretation des Ist-Zustands, um Ort und Art der Fehlfunktion bzw. das Bauteil oder Subsystem, das nicht mehr der Spezifikation entspricht, benennen zu können. Dabei beruht die Durchführung einer Diagnose immer auf einer Hypothese, die stets die Möglichkeit einer Fehlinterpretation beinhaltet [Stiele01].

<i>Selbstdiagnose</i> (<i>self diagnosis</i>)	⇒ Fähigkeit den Ist-Zustand des Systems „Sensor“ bezüglich möglicher Zusammenhänge und Ursachen von Störungen und Ausfällen zu interpretieren und zu diagnostizieren.	<i>Eigendefinition</i>
--	---	------------------------

Die Rekonfiguration beschreibt das Wiederherstellen der Funktionsfähigkeit nach stattgefundener Störung oder Ausfall im Sensor. Somit steht zumindest die Hauptfunktion auch nach einer Störung oder eines Ausfalls in einem Subsystem nach wie vor zur Verfügung, wenn auch nicht in vollem Maße. Nach [VDI/VDE 3698] werden bei der Rekonfiguration die ausgefallenen Komponenten aus dem System ausgegliedert und davon betroffene Funktionen anderen Komponenten zugeordnet. Im Falle von Sensoren können verschiedene Störungen, wie zum Beispiel eine zeitliche Änderung des Übertragungsfaktors B_0 , dazu führen, dass bei einer Rekonfiguration eine Rekalibrierung durchgeführt werden muss. Dabei werden die Sensor-Funktionen nach wie vor von den ursprünglichen Komponenten ausgeführt. Daher wird hier Rekonfiguration wie folgt definiert:

<i>Rekonfiguration</i> (<i>reconfiguration</i>)	⇒ Fähigkeit eines Systems, sich nach aufgetretener Störung bzw. aufgetretenem Ausfall selbst in dem Maße zu konfigurieren, dass die kritische Funktion (das Erfassen der Messgröße) weiterhin, wenn auch mit Einschränkungen, erfüllt wird	<i>Eigendefinition</i>
--	--	------------------------

Mit Einschränkungen sind Begrenzungen der Funktionserfüllung gemeint, z.B. bezüglich des Messbereichs oder der Genauigkeit. Es können jedoch auch Störungen oder Ausfälle stattfinden, die nicht durch eine Rekonfiguration des Systems behoben werden können, da ansonsten eine unendliche Redundanz aller Teile des

Systems notwendig wäre. Demzufolge ist eine Entscheidung notwendig, ob eine Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit möglich ist oder nicht (Abb. 3.7). Bei der Rekonfiguration selbst kann ebenfalls nach verschiedenen Klassen unterschieden werden, je nachdem, wie groß die Einschränkungen nach der Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit sind [Monten99].

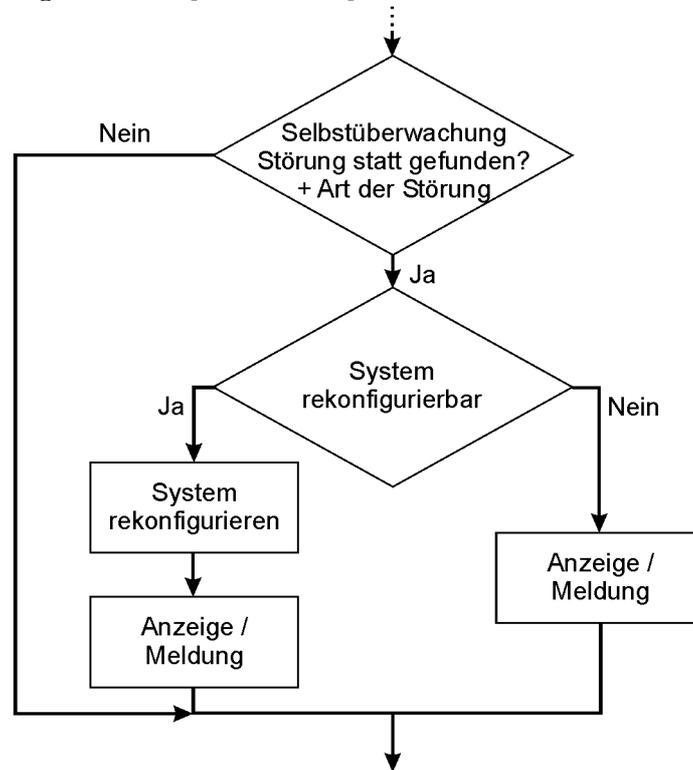


Abbildung 3.7: Störungstoleranz durch gezielte Rekonfiguration, die an die Selbstüberwachung anschließt.

3.3 Zielstellung der Sensor-Selbstüberwachung

Als Ziel der für Sensoren neuartigen Funktionalität Selbstüberwachung wird häufig die Erhöhung der Zuverlässigkeit genannt, z.B. [Mesch01]. Allerdings sind die Definitionen von Zuverlässigkeit nicht konsistent. In [DIN 40041] wird Zuverlässigkeit als

„Beschaffenheit einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, während oder nach vorgegebenen Zeitspannen bei vorgegebenen Anwendungsbedingungen die Zuverlässigkeitsanforderung zu erfüllen“

definiert. In einigen Definitionen wird Zuverlässigkeit als Unterpunkt der Verfügbarkeit gesehen (z.B. [DIN EN 61069]). In der Norm [DIN EN 60300] ist der Zusammenhang umgekehrt und teilweise werden die zwei Begriffe gleichrangig eingestuft. Die Norm [DIN EN 60300] sieht Zuverlässigkeit als *nicht quantitativ angebbbar*. In anderen Normen wird die Überlebenswahrscheinlichkeit R bzw. $R(t)$ [DIN EN 61164] zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit herangezogen. Allen gemein ist aber, dass Zuverlässigkeit die Erfüllung der geforderten Funktionen über einen geforderten Zeitraum kennzeichnet. Als Zuverlässigkeitsparameter können Ausfallrate, Lebensdauerverteilung, mittlere Lebensdauer, Ausfallwahrscheinlichkeit, Überlebenswahrscheinlichkeit, etc. [DIN 40041] herangezogen werden. Dies alles sind zeitliche Größen oder Wahrscheinlichkeiten, die die Zuverlässigkeit eines Systems beschreiben.

In dieser Arbeit wird die Definition der Zuverlässigkeit von *BIROLINI* [Biroli97] übernommen:

Zuverlässigkeit (reliability) \Leftrightarrow Wahrscheinlichkeit, dass eine Betrachtungseinheit die geforderte Funktion unter vorgegebenen Arbeitsbedingungen während einer festgelegten Zeitdauer ausfallfrei ausführt [Biroli97]

Nach [Biroli97] wird die Zuverlässigkeit über die Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$ - auch Zuverlässigkeitsfunktion genannt - quantifiziert. Dabei kann die Überlebenswahrscheinlichkeit auch über die Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ berechnet werden.

$$R(t) = 1 - F(t) \tag{3.3.1}$$

Mittels Zuverlässigkeitsschalbildern kann die Gesamtzuverlässigkeit eines Systems bestehend aus mehreren Subsystemen berechnet werden. Dabei werden alle Subsysteme durch Elemente ersetzt und zusammengefügt. Die Elemente können zwei Zustände annehmen: „leitend“ (intakt) und „nichtleitend“ (defekt). Das Gesamtsystem ist intakt, wenn eine „leitfähige“ Verbindung zwischen Eingang und Ausgang besteht (Abb. 3.8). Ist ein Subsystem für die Funktion des Gesamtsystems unabdingbar, so wird es in Reihe geschaltet, existieren redundante Subsysteme, werden diese parallel geschaltet. Im Falle einer Reihenschaltung multiplizieren sich

die Überlebenswahrscheinlichkeiten der Subsysteme Gl. (3.3.2); bei einer Parallelschaltung multiplizieren sich die Ausfallwahrscheinlichkeiten Gl. (3.3.3).

$$\text{Reihenschaltung: } R_g(t) = \prod_i R_i(t), \quad i = 1 \dots n \quad (3.3.2)$$

$$\text{Parallelschaltung: } R_g(t) = 1 - \prod_i (1 - R_i(t)), \quad i = 1 \dots n \quad (3.3.3)$$

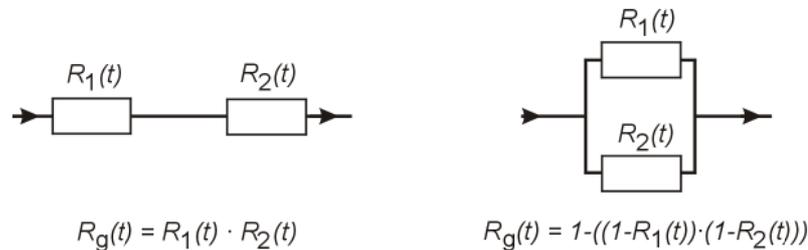


Abbildung 3.8: Zuverlässigkeitsschaltbilder zur Berechnung der Gesamt-Überlebenswahrscheinlichkeit von Systemen aus den Überlebenswahrscheinlichkeiten der Subsysteme.

Ein mit Selbstüberwachung ausgestatteter Sensor fällt aus, sobald eine Störung oder ein Ausfall gemeldet wird. Dies kann bei einer Störung bzw. einem Ausfall des Sensors der Fall sein, aber auch bei einer Störung der Selbstüberwachung, die einen Fehlalarm hervorruft, obwohl der Sensor noch intakt ist. Demnach befindet sich Sensor und Selbstüberwachung in einer Reihenschaltung – die Überlebenswahrscheinlichkeiten multiplizieren sich und die Gesamt-Überlebenswahrscheinlichkeit ist somit geringer als die kleinste Überlebenswahrscheinlichkeit der Subsysteme.

Folglich sinkt die Zuverlässigkeit, indem man einen Sensor mit einer Selbstüberwachung ausstattet. Erst wenn man den Sensor durch eine Rekonfiguration erweitert, wird die Zuverlässigkeit und somit die Überlebenswahrscheinlichkeit erhöht.

Wo liegt nun der Nutzen der Selbstüberwachung von Sensoren? Die Antwort ergibt sich aus der Betrachtung der Folgen eines Sensorausfalls. Eine Überwachung eines Systems ist immer dort vorgeschrieben, wo Ausfälle und Störungen schwerwiegende Folgen und Gefährdungen haben können, z.B. in der Luft- und Raumfahrttechnik oder der Medizintechnik. Es soll sichergestellt werden, dass das Sys-

tem im Falle einer Störung in einen sicheren Zustand gebracht wird, in dem keine Gefährdung mehr von ihm ausgeht. Ziel ist es hier, kritische Zustände zu vermeiden, die durch Ausfälle oder Störungen im System oder dessen Subsystemen entstehen können. Im Hinblick auf Sensoren geht die Gefährdung nicht vom Sensor selbst aus, sondern entsteht, wenn durch falsche Messwerte kritische Grenzwerte überschritten oder falsche Maßnahmen im Prozess eingeleitet werden. Der gestörte oder ausgefallene Sensor zwingt seiner Umgebung somit Gefahren, also Folgeschäden, auf.

Demnach ist eine Erhöhung der *Sicherheit* eines Sensors anzustreben, um das Risiko, das von ihm ausgeht, zu verringern.

<i>Sicherheit</i> (<i>safety</i>)	⇒ Der Grad mit dem das System seiner Umgebung nicht selbst mögliche gefährliche Bedingungen aufzwingt	[DIN EN 61069]
--	---	----------------

Es existieren Systeme, die ihren Abnutzungsvorrat überwachen und frühzeitig, bevor das System nicht mehr einsatzfähig ist, ein Signal bereitstellen, damit mittels bedarfsgesteuerter Wartung die Funktionsfähigkeit weiterhin sicher gestellt werden kann. Dadurch wird die mittlere Reparaturdauer verringert, beziehungsweise die Wartungsintervalle erhöhen sich, da auf vorbeugende Wartung verzichtet werden kann. Somit steigt die *stationäre Verfügbarkeit* des Systems und die Kosten sinken, da Wartung nur noch im Bedarfsfall durchgeführt werden muss.

<i>Stationäre Verfügbarkeit</i> (<i>steady state availability</i>)	⇒ Mittlere Betriebsdauer zwischen zwei Ausfällen dividiert durch die Summe aus mittlerer Betriebsdauer zwischen zwei Ausfällen und mittlerer Störungsdauer	[DIN 40041]
---	--	-------------

Die stationäre Verfügbarkeit reparierbarer Systeme kann als Quotient aus mittlerer Betriebsdauer MTBF (mean time between failure) und Summe aus mittlerer Betriebsdauer und mittlerer Störungsdauer MTTR (mean time to repair) berechnet werden.

Es können demnach verschiedene Ziele mittels einer Sensor-Selbstüberwachung verfolgt werden. Am treffendsten lässt sich das Ziel mit einer Erhöhung der *Verlässlichkeit* zusammenfassen. Solange keine Störung oder kein Ausfall angezeigt wird,

kann man sich in einem hohen Maß darauf verlassen, dass der Sensor seine Funktion gemäß den Spezifikationen erfüllt - also der vom Sensor ermittelte Messwert der Messgröße mit den zulässigen Toleranzen entspricht. Die Verlässlichkeit eines selbstüberwachenden Sensors ist höher als bei einem hoch zuverlässigen Sensor, der zum Beispiel langsam zu driften beginnen kann, ohne dass der Anwender von der größeren Messunsicherheit Kenntnis erhält.

<i>Verlässlichkeit</i> (dependability)	⇒ Verlässlichkeit ist das Ausmaß, in dem man sich darauf verlassen kann, dass das System seine vorgesehene Funktion unter gegebenen Betriebs- und Umgebungsbedingungen erfüllt.	[DIN EN 61069]
---	---	----------------

Nach [DIN EN 61069] umfasst die Verlässlichkeit die Merkmale der *Verfügbarkeit*, *Sicherheit*, *Zuverlässigkeit*, *Wartbarkeit* und *Unempfindlichkeit gegen Störungen* bzw. wird von diesen Merkmalen beeinflusst. Wie oben erläutert kann sich das Maß, in dem man sich auf die korrekte Funktion des Systems verlassen kann, auch erhöhen, wenn es überwacht wird bzw. sich selbst überwacht. Daher wird die *Überwachung* zu den Einflussgrößen zur Erhöhung der Verlässlichkeit hinzugefügt (Abb. 3.9).

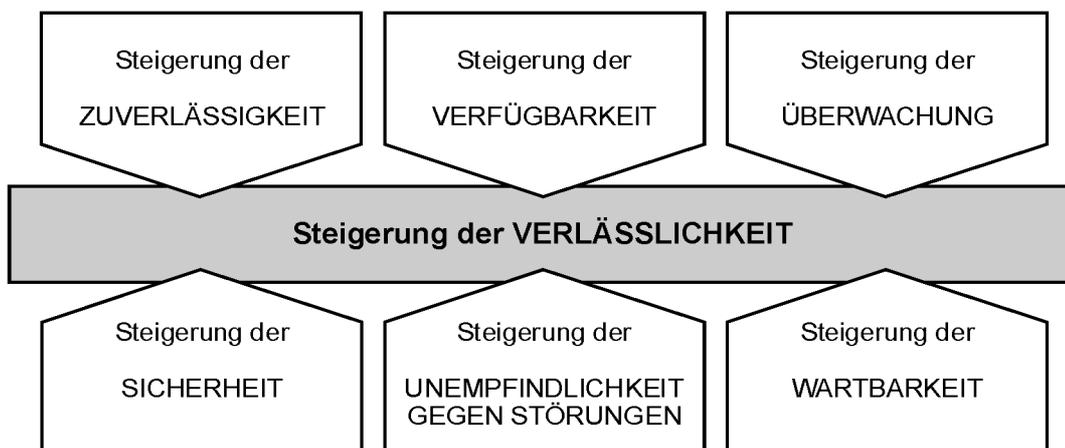


Abbildung 3.9: Erhöhung der Verlässlichkeit als Hauptziel der Selbstüberwachung für Sensoren mit den möglichen Einflussgrößen.

3.4 Anforderungen an Prozesssensoren

Die genaue Kenntnis der Anwenderanforderungen und -wünsche an Sensoren bilden den Ausgangspunkt für eine erfolgreiche Sensorentwicklung. Auf Basis einer selbst durchgeführten Befragung von Anwendern und Herstellern von Prozesssensoren [Nuber02] [Müller03A] und durch Auswerten vorhandener Marktstudien können die Erfolgsfaktoren für Sensoren, besonders auch im Hinblick auf die Sensor-Selbstüberwachung, abgeleitet werden.

In den betrachteten Studien und Artikeln sind folgende Kriterien genannt, die Sensoren in der Prozessmesstechnik als besonders geeignet herausstellen:

- Günstiger Anschaffungspreis [Chemie01], [Kehrer00]
- niedrige Produktnebenkosten [Kehrer00]
- Selbstüberwachung und -diagnose [Trilli01], [Schaud98]
- Smart Sensors [Kehrer00]
- hohe Zuverlässigkeit [Chemie01] und Dauergebrauchstauglichkeit [Schaud98]
- geringe Messunsicherheit (hohe Genauigkeit) [Chemie01], [Breiha00]

Da die Studien nicht unter identischen Voraussetzungen entstanden sind, widersprechen sich die Ergebnisse teilweise. Dies ist die Motivation für die eigene Befragung, die ganz gezielt auf die Anforderungen und Wünsche von Seiten der Anwender und Hersteller an Durchflusssensoren der Prozessmesstechnik orientiert ist.

Die von den Teilnehmern der Befragung (31 Hersteller, 27 Anwender) genutzten bzw. angebotenen Durchflussmessverfahren sind in Abbildung 3.10 aufgelistet. Dabei handelt es sich um die Anzahl der Nennungen, also weder um Stückzahlen noch Marktvolumen. Erkennbar ist, dass bei den befragten Anwendern neuere Verfahren, wie MID, Coriolis- oder Vortextmessung, aber auch ältere wie Schwebekörper- und Wirkdruckmessung weite Verbreitung haben. Vor allem die Verbreitung der Schwebekörpersensoren fällt mit 21 Nennungen besonders auf.

Die Zukunftschancen der verwendeten bzw. angebotenen Messverfahren nach Einschätzung der befragten Firmen sind in Abbildung 3.11 aufgeführt.

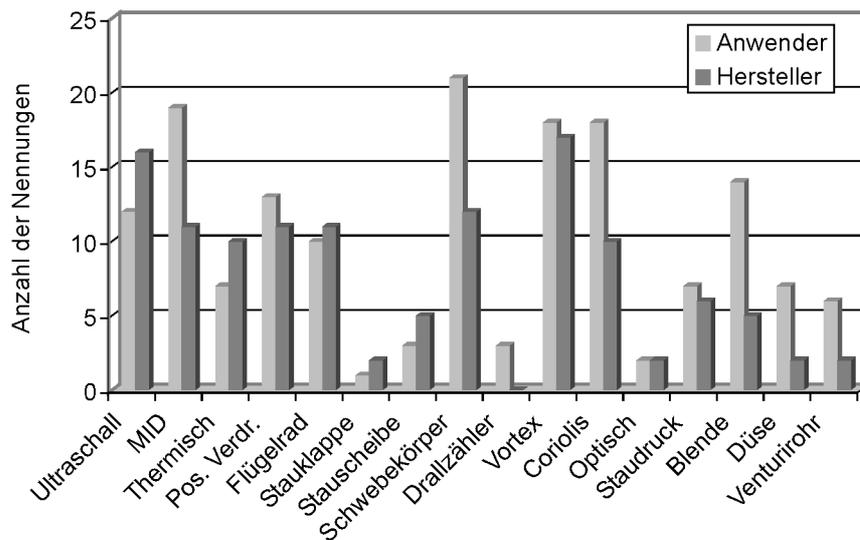


Abbildung 3.10: Von den Herstellern angebotene bzw. von den Anwendern genutzte Messverfahren. Mehrfachnennungen möglich, Wirkdruck aufgeteilt in Blenden-, Düsen- und Venturirohrmessung

Von Anwendern werden die Marktchancen von MID, Coriolis-Massedurchflusssensoren und Vortexsensoren als zunehmend bewertet. Schwebekörpersensoren, positive Verdränger- und Wirkdrucksensoren werden von den Anwendern in Zukunft schlechtere Chancen eingeräumt. Die Hersteller beurteilen die Chancen der einzelnen Verfahren durchweg positiver als die Anwender. Der Grund hierfür kann

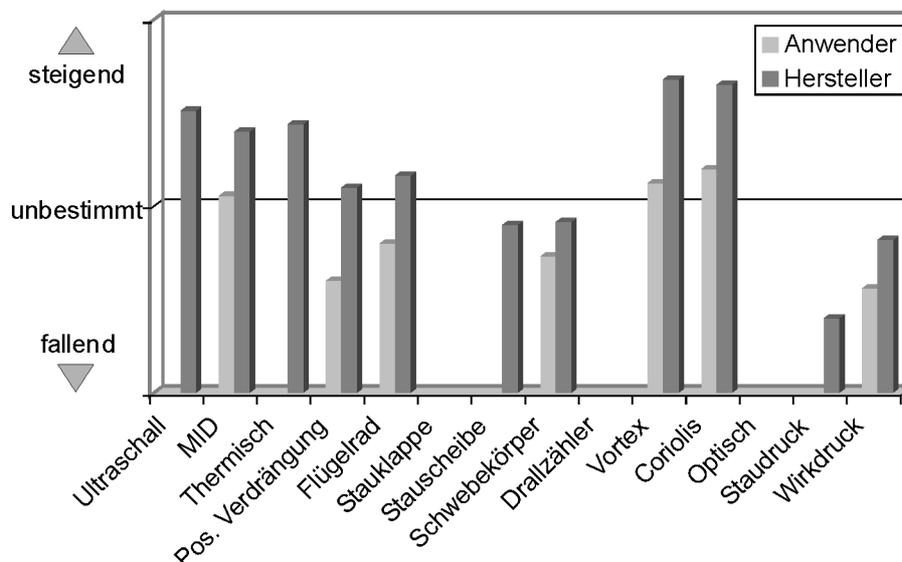


Abbildung 3.11: Zukünftige Marktentwicklung nach Einschätzung der befragten Anwender und Hersteller.
für einige Verfahren liegen keine Daten vor, da die Anwender und Hersteller jeweils nur zu den verwendeten bzw. hergestellten Verfahren befragt wurden

3 Definitionen und Strukturierung der Selbstüberwachung von Sensoren

daran liegen, dass sie zu den von ihnen selbst angebotenen Verfahren befragt wurden und die Zukunftschancen der eigenen Produkte generell positiver gesehen werden. Übereinstimmend mit anderen Studien ist hier ebenfalls ein Ergebnis, dass neuere Verfahren Marktanteile gewinnen und ältere Verfahren, wie Wirkdruck oder Schwebekörper, Anteile verlieren werden. Auch die Entwicklung des Marktes bestätigt diese Ergebnisse.

Diese Einschätzung korreliert mit der Zufriedenheit in Bezug auf Langzeitstabilität, Zuverlässigkeit, Selbstüberwachung, Unempfindlichkeit gegenüber Ablagerung und Abrasion und Unempfindlichkeit gegenüber Pulsationen, mit den Verfahren in Abbildung 3.12.

Das Ultraschallverfahren wird hier insgesamt am besten bewertet, gefolgt von MID, Coriolis- und Vortexsensoren, jeweils im Durchschnitt aller Bewertungen. Am schlechtesten schneiden Schwebekörpersensoren ab, trotz ihrer bei den Befragten weiten Verbreitung. Wirkdrucksensoren liegen bei der Gesamtzufriedenheit hinter den neueren Verfahren, werden aber generell als zufrieden stellend bewertet. Vor

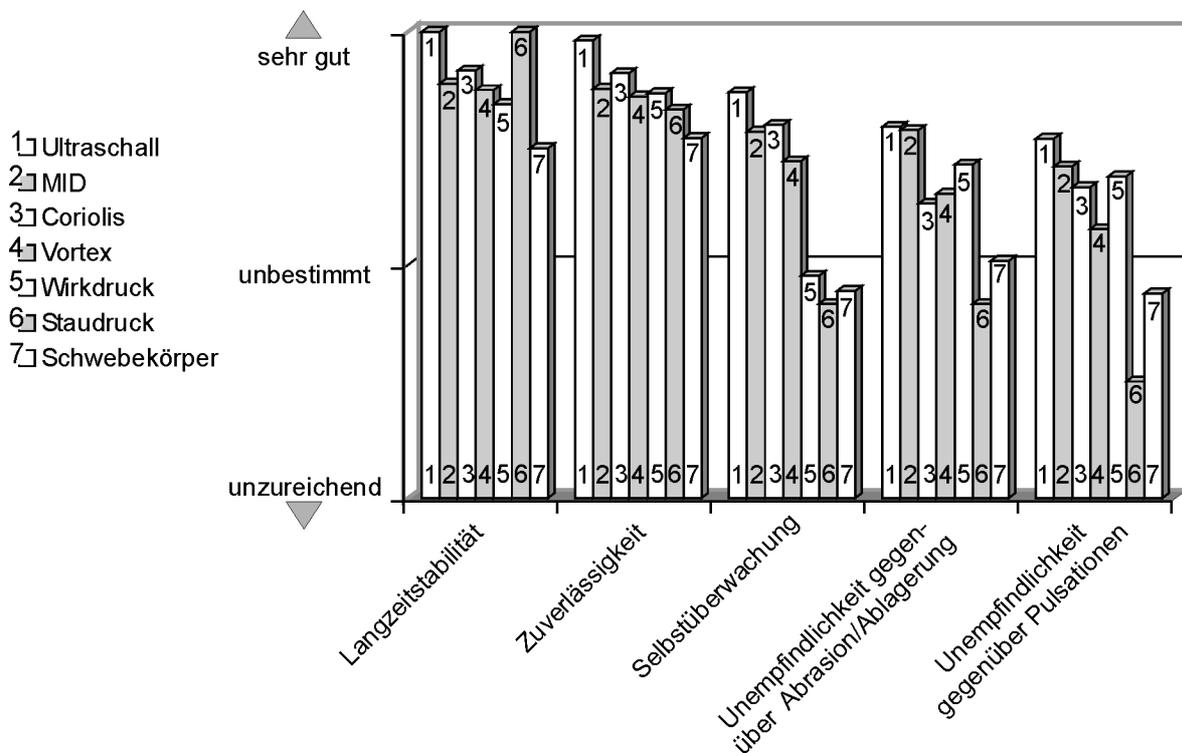


Abbildung 3.12: Zufriedenheit mit den Durchflussmessverfahren von Seiten der Hersteller und Anwender im Durchschnitt.

allem im Punkt der Selbstüberwachung hat dieses Verfahren allerdings deutlichen Nachholbedarf.

Grundsätzlich zeigen die Antworten, dass die überwiegende Mehrheit der Verfahren als langzeitstabil und zuverlässig gilt. Bei Selbstüberwachung und Unempfindlichkeit sowohl gegen Ablagerung und Abrasion als auch gegen Pulsationen ist dagegen Verbesserungspotenzial vorhanden.

Nach den zufrieden stellenden Merkmalen bzw. den Verbesserungspotenzialen der Verfahren wird in der Befragung auch eine Bewertung verschiedener Faktoren, die den Markterfolg von Durchflusssensoren beeinflussen, erfragt. Die abgefragten Faktoren sind *Selbstüberwachung der Elektronik*, *Selbstüberwachung des gesamten Sensors*, *Selbstkalibrierung*, *Wartungsfreiheit*, *Wartungsbedarfsanzeige* sowie *Anschaffungspreis* (Abb. 3.13). Beim Anschaffungspreis wurde allerdings davon ausgegangen, dass ein günstigerer Preis nur zu Lasten anderer Eigenschaften wie *Messunsicherheit*, *Messspanne*, *Abtastfrequenz* oder *Funktionsumfang* realisiert werden kann. Die Faktoren sind auf einer sechsstufigen Skala von kaum nutzensteigernd bis stark nutzensteigernd bewertet.

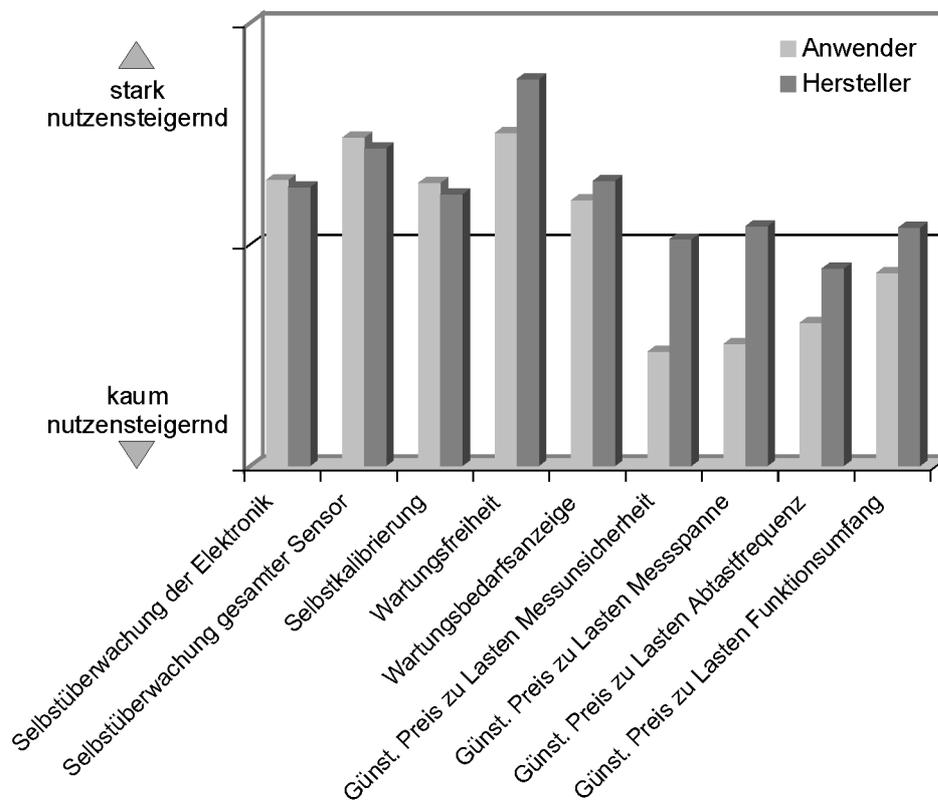


Abbildung 3.13: Bewertung der Erfolgsfaktoren von Durchflusssensoren aus Sicht von Anwendern und Herstellern.

Zu erkennen ist, dass in Zusammenhang mit den ersten fünf Faktoren gute Übereinstimmung zwischen Anwendern und Herstellern besteht. Diese Faktoren werden auch durchweg als sehr nutzensteigernd angesehen. Am deutlichsten können die Wartungsfreiheit und die Selbstüberwachung des gesamten Sensors den Anwendungsnutzen eines Sensors steigern. Die Selbstüberwachung der Elektronik, die Selbstkalibrierung und die Wartungsbedarfsanzeige liegen an zweiter Stelle und sind nahezu gleich nutzensteigernd. Die Faktoren, die den Anschaffungspreis betreffen, werden von den Anwendern und Herstellern teils signifikant unterschiedlich bewertet. Während die Hersteller den Nutzen eines günstigeren Preises zu Lasten anderer Eigenschaften meist im mittleren Bereich sehen, liegen die Anwender deutlich darunter. Vor allem beim Preis zu Lasten der Messunsicherheit und zu Lasten der Messspanne sehen die Anwender keinen Nutzen.

Abschließend ist aus der Studie zu ersehen, dass Durchflusssensoren in Punkten wie Selbstüberwachung und Unempfindlichkeit gegenüber Abrasion, Ablagerung und Pulsationen noch nicht den Erwartungen der Anwender entsprechen. Dies gilt trotz Unterschieden generell für alle abgefragten Verfahren. Die Anforderungen in Bezug auf die Langzeitstabilität und die Zuverlässigkeit erfüllen die Sensoren in zufrieden stellendem Maß. Trotzdem ist einer der erfolgversprechensten Merkmale die Selbstüberwachung des gesamten Sensors, was die unter Kapitel 3.3 getroffene Definition des Ziels von Selbstüberwachung unterstützt. Wäre das einzige Ziel von Selbstüberwachung die Erhöhung der Zuverlässigkeit, würde hier ein Widerspruch bestehen, da die Sensoren als ausreichend zuverlässig gelten (Abb. 3.12) und dennoch eine Sensor-Selbstüberwachung gefordert wird. Vor allem die Anwender sehen in der Selbstüberwachung des gesamten Sensors einen besonders großen Nutzen, nahezu genauso, wie von einem wartungsfreien Sensor. Die Wartungsfreiheit wird vor allem von Herstellern als besonders nutzensteigernd gesehen.

Das Ergebnis der Befragung widerspricht anderen Studien deutlich, vor allem was die Bedeutung des Anschaffungspreises betrifft. Hier sind die Anwender offensichtlich davon überzeugt, dass ein günstigerer Preis nicht vordergründig nutzensteigernd ist, wenn andere Eigenschaften dadurch eingeschränkt werden. Einzig der Funktionsumfang könnte auf ein überschaubares und sinnvolles Maß reduziert werden. Die Hersteller schätzen die Wichtigkeit des Preises etwas höher ein, aber auch sie sehen die zuerst genannten Punkte als entscheidender an. Der zunehmende Marktanteil von Sensoren neuerer Verfahren, die in ihrem Anwendungsnutzen

besser bewertet werden, aber höhere Anschaffungspreise haben, belegt diese Vermutung.

Aus der Studie kann man schließen, dass sich Weiterentwicklungen für Durchflusssensoren bezüglich Wartungsfreiheit, Selbstüberwachung, Wartungsbedarfsanzeige und Selbstkalibrierung erfolgreich am Markt platzieren lassen. Gleiches gilt für Sensoren, die gegenüber Störeinflüssen wie Ablagerung, Abrasion oder Pulsationen eine große Unempfindlichkeit zeigen. Für die Sicherung dieser Merkmale akzeptieren die Sensoranwender auch einen höheren Anschaffungspreis.

3.5 Methoden und Verfahren zur Selbstüberwachung von Sensoren

Jeder Sensor verfügt über eine Verbindungsstelle mit dem Prozess - der Prozessschnittstelle, mittels derer er die Messgröße, z.B. Druck oder Temperatur, erfassen kann. Den Messwert gibt er entweder als Signal an ein übergeordnetes System, z.B. an das Prozessleitsystem, oder über eine Anzeige direkt an den Anwender aus. Selbstüberwachung eines solchen Sensors kann nach MESCH [Mesch01] durch die drei grundsätzlich unterschiedliche Methoden

- *Prozesskopplung*,
- *Auswerten von Vor- und Erfahrungswissen* oder
- *intern im autarken Sensor*

realisiert werden.

Prozesskopplung beschreibt den Datenaustausch benachbarter Feldgeräte, wie Sensoren und Aktoren. Dabei wird normalerweise nur ein kleiner Teil des Prozesses berücksichtigt, der Gesamtprozess wird zur Überwachung nicht herangezogen. Nach der Richtlinie [VDI/VDE 2650] wird diese Methode der übergreifenden Überwachung zugerechnet und nicht der Selbstüberwachung. In dieser Arbeit wird auch die Prozesskopplung zur Selbstüberwachung gezählt, wenn der Algorithmus zur Überwachung in den Feldgeräten selbst implementiert ist. Nutzen erbringen schon sehr einfache Plausibilitätstests, die ohne detaillierte Kenntnis des Prozessverhaltens implementiert werden können. Bei einer solchen Überwachung auf Feldgeräte-Ebene besteht allerdings das Problem, in welchem Feldgerät die Überwa-

chung implementiert wird und über welche Schnittstelle die Geräte miteinander kommunizieren.

Bei *Vor- und Erfahrungswissen* handelt es sich um eine nahe liegende Methode, um ein Ausgangssignal eines Sensors zu überwachen. Dabei wird die Vorgeschichte mit in Betracht gezogen und mit einfachen Plausibilitätstests überprüft, ob das Signal realistisch ist oder eine Störung vorliegt. Überprüfungen können anhand von im Prozess vorhandenen Grenzwerten, Trends, spektralen Eigenschaften, statistischen Parameter oder qualitativen Signalverläufen durchgeführt werden [Mesch01]. Es handelt sich dabei um Wissen, das aus dem Prozess kommt, d.h. die Überwachung muss auch hier individuell auf den Prozess angepasst werden.

Festzuhalten ist, dass sowohl die Überwachung mittels Prozesskopplung wie auch mittels der Nutzung von Vor- und Erfahrungswissen eine Kenntnis des Prozesses voraussetzt. Es ist also nicht möglich, einen beliebigen Sensor zu verwenden, der wie bisher in den Prozess entsprechend seiner Spezifikationen integriert wird und sich zeitgleich selbst überwacht. Da sich beide bisher genannten Methoden der Überwachung auch mittels eines Prozessleitsystems realisieren lassen, dem alle notwendigen Informationen vorliegen, liegt es nahe, diese Methoden dort zu integrieren. Auf diese Weise bleibt der Anwender bei einem Austausch von Feldgeräten unabhängig vom Hersteller und auch Änderungen im Prozess sind ohne Folgen für die Feldgeräte. Hersteller können nach wie vor unabhängige, autarke Feldgeräte produzieren und anbieten.

Diesem Umstand trägt die dritte Methode *autarke Sensoren* Rechnung. Dabei handelt es sich um Sensoren, die sämtliche, zur Überwachung ihrer Funktion notwendigen Informationen intern erzeugen bzw. selbst erfassen. Nach TORTORA [Tortor02] bietet die Überwachung auf Sensorebene drei Hauptvorteile im Vergleich zu einer übergreifenden Überwachung. Es ist *kostengünstiger*, da die Sensoren in jeden Prozess ohne Anpassung eingebaut werden können. Die nutzbaren Informationen sind „*reichhaltiger*“ als bei einer übergeordneten Überwachung, die meist nur eine Intakt/Defekt-Information bzgl. der Feldgeräte zur Verfügung stellt. Weiterhin sind die Informationen *standardisiert*, bzw. werden dies in Zukunft sein. Eine solche Überwachung auf Basis des autarken Sensors kann eine zusätzliche übergreifende Überwachung des Prozesses ergänzen. Durch die konkrete Information über den Zustand des jeweiligen Feldgeräts kann das Prozessleitsystem bei eingetretener Störung gezielter und schneller reagieren.

Aus den genannten Gründen beschränkt sich die vorliegende Arbeit im Folgenden auf die *Selbstüberwachung* nach der Methode der *autarken Sensoren*. Zunächst soll eine Strukturierung möglicher Verfahren erstellt werden, nach denen eine Selbstüberwachung eines autarken Sensors realisiert werden kann. Die in dieser Arbeit abgeleiteten Verfahren sind, wie schon in Kapitel 2 zum Stand der Technik vorgestellt, der

- Einsatz von *Redundanz*, die
- Erzeugung einer *Referenzgröße*, eine
- zusätzlichen *Analyse des Messsignals*, die
- *Analyse einer Störgröße* bzw. deren Einfluss und die
- *Analyse von Zusatzsignalen und Zusatzgrößen*

auf die nun im Einzelnen eingegangen werden soll. Abbildung 3.14 stellt die Strukturierung der Sensor-Selbstüberwachung zusammenfassend dar. Die weiteren Betrachtungen beziehen sich auf die grau hinterlegten Verfahren der Selbstüberwachung autarker Sensoren.

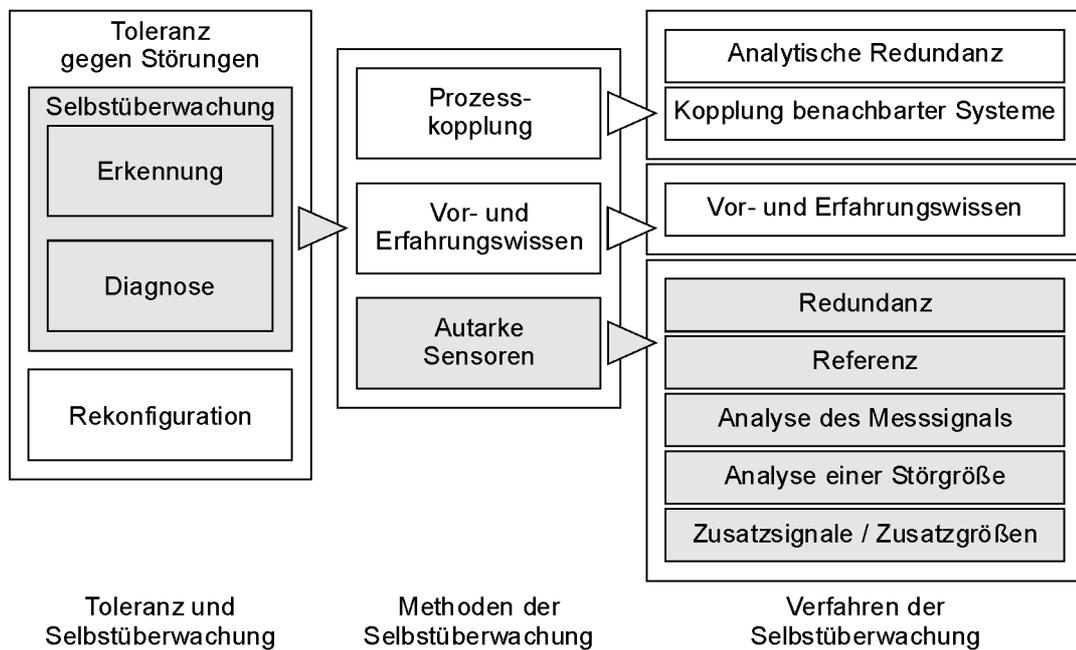


Abbildung 3.14: Einteilung von Selbstüberwachung für Sensoren nach verschiedenen Möglichkeiten und Verfahren.

3.5.1 Einsatz von Redundanz

Zur Überwachung aber auch zur Erhöhung der Zuverlässigkeit wird häufig das Verfahren der Redundanz verwendet. Die gleiche Funktion wird dabei von mehreren Einheiten ausgeführt. Zur Zuverlässigkeitserhöhung wird häufig *nicht funktionsbeteiligte (kalte) Redundanz* eingesetzt. Der Vorteil liegt darin, dass die redundante Einheit keinem Verschleiß unterliegt und ihr „Abnutzungsvorrat“ nicht aufgebraucht wird. Die Information, wann auf die redundante Einheit umgeschaltet wird, muss dabei auf anderem Weg generiert werden. Daher muss für eine Selbstüberwachung durch redundante Einheiten *funktionsbeteiligte (heiße) Redundanz* eingesetzt werden, wenn auch nur sporadisch. Für die Selbstüberwachung von Sensoren bedeutet das, dass die Messgröße durch mehrere Sensoren aufgenommen und anschließend verglichen wird (Abb. 3.15). Bewegen sich alle Signale in einem Toleranzband zueinander geht man von intakten Sensoren aus, weicht einer der Werte ab, so wird eine Mehrheitsentscheidung durchgeführt. Zur Tolerierung einer Störung müssten folglich mindestens drei Sensoren eingesetzt werden. Bei nur zwei Sensoren ist bei der Abweichung eines Sensors nicht erkennbar, welcher der beiden Messungen man vertrauen kann. Es kann die Störung oder der Ausfall also nur erkannt, aber nicht diagnostiziert und rekonfiguriert werden.

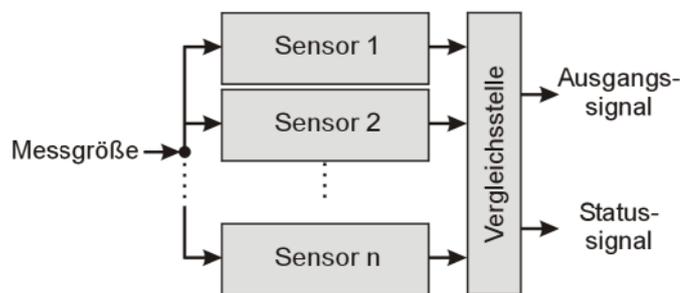


Abbildung 3.15: Anwendung des Verfahrens der funktionsbeteiligten (heißen) Redundanz zur Sensor-Selbstüberwachung.

Unterschieden wird ebenfalls *homogene* und *diversitäre Redundanz*. Bei *homogener Redundanz* sind die redundanten Baugruppen technologisch gleichartig oder nach gleichen Prinzipien ausgeführt, bei *diversitärer* werden bewusst verschiedene Prinzipien und Ausführungen der redundanten Einheiten eingesetzt. Dies verhindert, dass Umwelteinflüsse, Störgrößen aber auch Entwicklungsfehler gleiche Auswirkungen auf die Einheiten haben (engl. *common mode failure*). So können z.B. bei Durchflusssensoren Ablagerungen bei homogener Redundanz der Sensoren eine

identische Änderung der Übertragungseigenschaften aller Sensoren hervorrufen. Es wird also keine Abweichung der Ausgangssignale untereinander feststellbar sein und das Messergebnis als gültig bewertet werden. Werden die Durchflusssensoren diversitär ausgeführt, sollten die Messverfahren bzw. -prinzipien derart gewählt werden, dass die relevanten Störungsursachen unterschiedliche Auswirkungen haben und folglich eine erkennbare Abweichung hervorrufen.

3.5.2 Erzeugung einer Referenzgröße

Ein Sensor wird kalibriert, indem man eine bekannte Referenzgröße an den Eingang legt und das Ausgangssignal des Sensors zu der Eingangsgröße ins Verhältnis setzt. Unterliegt ein Sensor einer Alterung oder verändert durch andere Einflüsse seine Eigenschaften, kann er rekali­briert werden. Dies ist eigentlich ein Verfahren zur Bewertung der Gültigkeit des Messwertes. Ist es jedoch nicht möglich, den Sensor zu rekali­brieren, hat eine Störung stattgefunden und er muss instand gesetzt oder ausgetauscht werden. Mittels einer Referenzgröße, die vom Sensor generiert wird, kann er sich selbst überwachen und eventuell selbst rekali­brieren. Dabei kann die Referenz der Messgröße oder einer Zwischengröße der Messkette überlagert werden. Soll in diesem Fall eine Rekalibrierung durchgeführt werden, so ist bei der Überlagerung der Referenzgröße maximal eine Kalibrierung des Übertragungsfaktors möglich, nicht aber ein Nullpunktgleich. Eine andere Möglichkeit besteht im regelmäßigen Umschalten auf die Referenzgröße während des Betriebs.

Da im Sinne der Verfügbarkeit eine Unterbrechung des Betriebs für einen Selbsttest für die meisten Anwendungen nicht in Frage kommt, ist eine Aufschaltung der Referenzgröße im laufenden Betrieb vorteilhaft. Die Referenzgröße kann dabei an beliebiger Stelle der Messkette eingekoppelt werden (Abb. 3.16), wobei nur der Teil der Messkette ab der Einkopplung auch überwacht bzw. rekali­briert werden kann.

Daher ist es sinnvoll, die Referenzgröße möglichst in Eingangsnähe einzukoppeln. Bei einem wirkdruckbasierten Durchflusssensor kann zum Beispiel ein zusätzlicher Durchfluss aufgebracht werden, der vom Sensor erfasst werden muss. Genauso ist es ebenfalls möglich, durch einen kleinen Aktor eine zusätzliche Druckdifferenz im Differenzdrucksensor zu erzeugen. Beides wären Referenzsignale, die von der Messkette übertragen werden müssen. Bei der zweiten Variante ist allerdings keine Aussage über den Zustand der Messblende oder der Wirkdruckleitungen möglich. Bei den Referenzsignalen kann es sich jeweils um statische oder

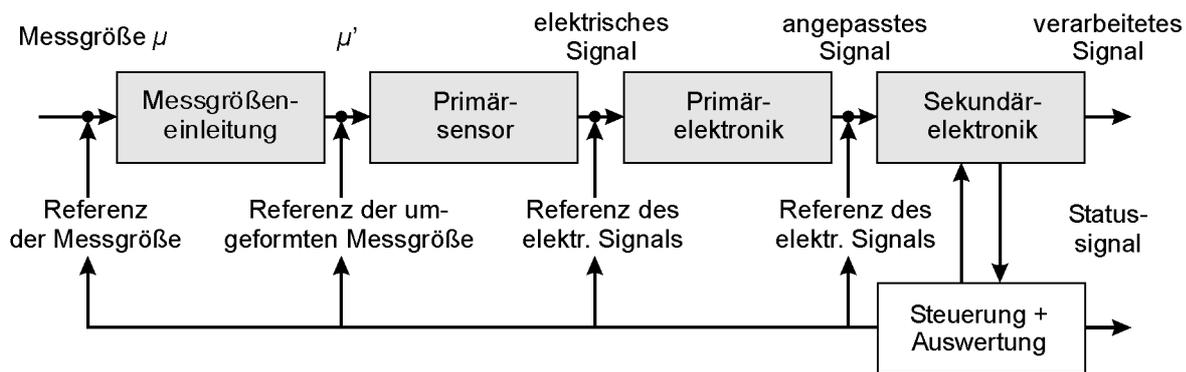


Abbildung 3.16: Einkopplung von Referenzgrößen im Signalverarbeitungspfad eines Sensors zur Selbstüberwachung.

dynamische Signale im Arbeitsfrequenzbereich des Sensors handeln, wobei eine Rückwirkung auf den Prozess vermieden werden muss.

3.5.3 Analyse des Messsignals

Das Verfahren der Analyse des Messsignals lässt sich meist ohne Veränderung des Sensoraufbaus integrieren. Hierzu zählen die Überwachung von sensorspezifischen Grenzwerten und Trends, um z.B. den spezifikationskonformen Betrieb sicherzustellen. Des Weiteren können im Messsignal Informationen enthalten sein, die nicht direkt zur Bestimmung der Messgröße herangezogen werden, sich jedoch zur Beurteilung des Zustands des Sensors eignen.

Beispielsweise können bei Messungen, bei denen im stationären Zustand gemessen wird (quasi-statische Messung), in den höheren Frequenzanteilen durchaus Informationen bzgl. des Zustands des Sensors enthalten sein. Diese Anteile werden häufig in der Primärelektronik mittels Tiefpässen heraus gefiltert. Eine Änderung der Primärelektronik mit anschließender Daten-Interpretation ermöglicht eine Überwachung.

Bei frequenzanalogen Sensoren wird nur eine Frequenz erfasst. Dabei spielt die Amplitude des frequenten Signals zur Messung keine Rolle, solange das Signal erfasst werden kann. In der Amplitude kann jedoch die Information über die Signalgenerierung, sprich über die Messkette, vorhanden sein. Daher kann eine einfache Überwachung der Amplitude eine Selbstüberwachung des Sensors ermöglichen, z.B. die Amplitude der Wirbelablösung bei Wirbelzählern - Vortex-Durchflusssensoren - oder eine Überwachung der Schwingungsamplitude der Anregungsschwingung bei Coriolis-Durchflusssensoren.

Es können dabei nur die im Messsignal vorhandenen, also vom Sensor erfassten Informationen zur Überwachung herangezogen werden, weshalb dieses Verfahren mit *Analyse des Messsignals* und nicht der *Messgröße* benannt ist (Abb. 3.17). MESCH [Mesch01] zählt dieses Verfahren zur Methode der Nutzung von *Vor- und Erfahrungswissen*. In dieser Arbeit wird es dem autarken Sensor zugeordnet, da das Wissen über signifikante Anteile des Messsignals nicht nur aus dem Prozess stammen muss, sondern auch aus den spezifizierten Einsatzbedingungen hervorgehen kann, für die ein Sensor ausgelegt ist. Der Übergang zu Prozesswissen ist an dieser Stelle aber fließend.

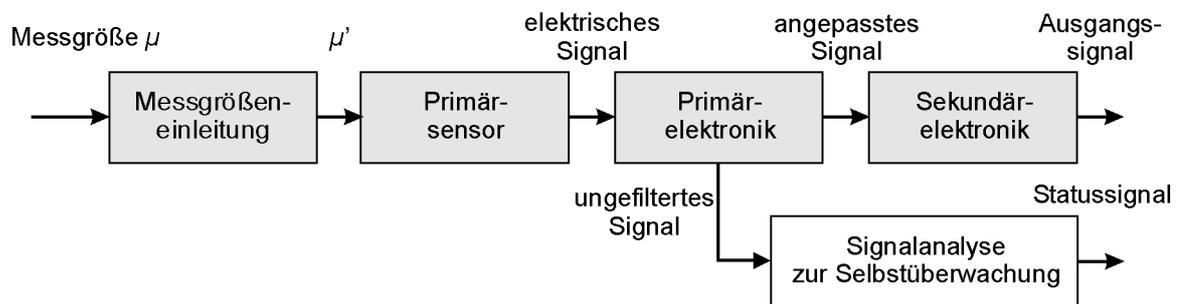


Abbildung 3.17: Analyse des Messsignals zur Erkennung von Störungen der Sensor-Signalverarbeitungskette.

3.5.4 Analyse des Einflusses einer Störgröße

Neben der Erfassung der Messgröße weist jeder Sensor eine unerwünschte Abhängigkeit von Störgrößen - Querempfindlichkeiten - auf. Störgrößen wirken auf verschiedene Stellen der Messkette (Abb. 3.1) und beeinflussen so die Aufnahme der Messgröße, da sie in das Übertragungsverhalten der Messkette eingehen und dieses verfälschen. LENK [Lenk89] hat das Übertragungsverhalten von Messgröße und Störgrößen eines Sensors in einem Modell mit verschiedenen Übertragungskanälen vereinfacht dargestellt. Ein solches Modell kann die Charakterisierung des Störgrößenübertragungsverhaltens eines Sensors deutlich vereinfachen. Solange der Sensor den Spezifikationen nach betrieben wird, sind die Einflüsse auf das Übertragungsverhalten Messabweichungen (z.B. Arbeitstemperaturbereich). Diese sind in den Datenblättern erwähnt und beschränken die Messunsicherheit des Sensors. Die systematischen Einflüsse der jeweils relevanten Störgrößen sind im allgemeinen sehr gut bekannt und werden durch einen optimierten Sensoraufbau reduziert oder in

der Sensorelektronik korrigiert, so dass die Messunsicherheit so klein wie möglich wird.

In Bezug auf die Implementierung von Selbstüberwachung in Sensoren kann der unerwünschte Effekt der Störgrößenempfindlichkeit genutzt werden, um eine Aussage über den Zustand der Messkette treffen zu können. Das Wissen über die genauen Einflüsse kann genutzt werden, indem man die Störgröße in einem separaten Messkanal erfasst und mit dem störgrößenbelasteten Übertragungsverhalten des Messkanals der Messgröße vergleicht (Abb. 3.18). Eine anschließende Korrektur des systematischen Störgrößeneinflusses auf das Messsignal kann sich nach der Vergleichsstelle anschließen.

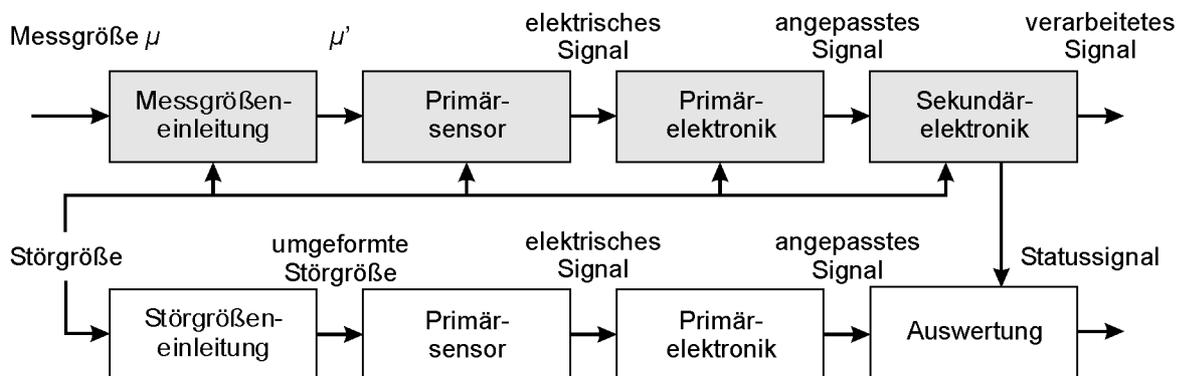


Abbildung 3.18: Aufnahme einer Störgröße durch einen eigenen Messkanal und Vergleich mit dem bekannten Störgrößeneinfluss auf die Messkette durch Querempfindlichkeiten. *die Messkette der Messgröße ist grau hinterlegt, die Messkette der Störgröße weiß*

3.5.5 Analyse von Zusatzsignalen und Zusatzgrößen

Eine direkte Art der Bestimmung des Ist-Zustandes von Sensoren im Sinne einer Selbstüberwachung ist die Analyse von internen Zusatzsignalen oder Zusatzgrößen. Dabei handelt es sich um eine direkte Bestimmung von Signalen von Komponenten der Messkette oder Parametern von Bauteilen. Dabei wird in vielen Fällen nur das betrachtete Bauteil oder die betrachtete Komponente überwacht, der Rest der Messkette muss gegebenenfalls separat überwacht werden. Einsatz findet dieses Verfahren in den meisten mit einem Prozessor ausgestatteten Signalverarbeitungsketten in Form eines Selbsttests beim Hochfahren des Prozessors oder auch kontinuierlich während des Betriebs. Dabei finden allerdings auch fast ausschließlich die elektrischen Bauteile Beachtung, was an der Einfachheit der Überwachung

elektrischer Größen liegt. Es ist jedoch durchaus möglich, auch andere Teile der Messkette durch eine Analyse ausgewählter Größen zu überwachen (Abb. 3.19). Sind die besonders gefährdeten Bauteile bekannt und sind diese direkt zu überwachen, stellt dieses Verfahren eine sehr effektive und gezielte Selbstüberwachungsmöglichkeit dar.

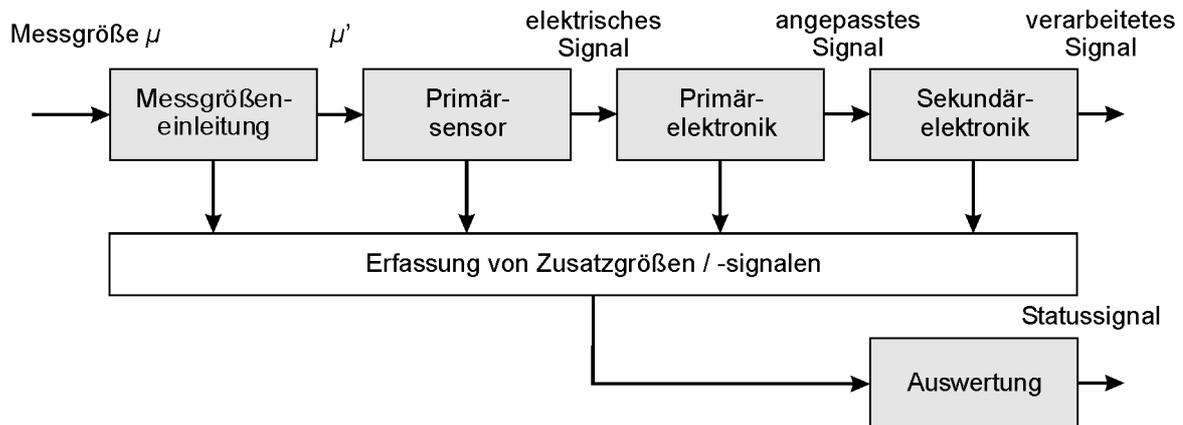


Abbildung 3.19: Erfassung von Zusatzgrößen bzw. Zusatzsignalen von Komponenten oder Bauteilen der Messkette zur Selbstüberwachung.

3.5.6 Gültigkeit dieser Einteilung

Im Rahmen dieses Kapitels sollte eine für Sensoren allgemein geltende Einteilung für Methoden und Verfahren der Selbstüberwachung aufgestellt werden. So weit wie möglich sind Einteilungen und Begriffe anderer Veröffentlichungen einbezogen bzw. beachtet, z.B. [Weiler01], [Koppen04], [Mesch01], [VDI/VDE 2650].

Von der in Kapitel 2 vorgestellten Recherche der am Markt befindlichen, bzw. in Fachbeiträgen veröffentlichten Sensoren, die mit Selbstüberwachung ausgestattet sind, wird diese Einteilung bestätigt [Noack04]. Alle analysierten Varianten lassen sich widerspruchlos einfügen. Zusätzlich sind auch Lösungen bekannt, die gleichzeitig mehrere Verfahren zur Selbstüberwachung nutzen. Dabei handelt es sich jedoch immer um die beschriebenen Grundverfahren. Daher kann von einer allgemeinen Gültigkeit dieser Einteilung ausgegangen werden. Die Einteilung soll ebenfalls als Strukturierungshilfe in der Entwicklung bei der Suche nach konkreten Wegen zur Selbstüberwachung von Sensoren dienen (siehe Kapitel 5).

4 Durchflussmessverfahren der Prozessmesstechnik

Der Durchfluss ist neben Temperatur und Druck die wichtigste Messgröße der Prozessmesstechnik. In den folgenden beiden Abschnitten wird auf die Grundlagen der Durchflussmessung und auf druckbasierte Durchflussmessverfahren im speziellen eingegangen. In Abschnitt 4.3 werden die spezifischen Störungsursachen von Wirkdrucksensoren dargestellt.

4.1 Übersicht industrieller Durchflussmessverfahren

Gemessen werden Volumen- oder Massendurchflüsse von Gasen, hoch- und niedrigviskosen Flüssigkeiten und teilweise auch von Schüttgut in voll- und teilgefüllten Rohren oder offenen Gerinnen. Aufgrund der unterschiedlichen Einsatzbedingungen und deren besonderen Herausforderungen existiert eine Vielzahl an Durchflussmessverfahren, die jeweils für bestimmte Messmedien und -bedingungen besonders angepasst sind. Messverfahren für Flüssigkeitsströme in geschlossenen Rohrleitungen können in volumetrische Verfahren und Durchflusssensoren unterteilt werden (Abb. 4.1). Die volumetrischen Verfahren lassen sich in mittelbare und unmittelbare Verfahren einordnen. Die Durchflusssensoren werden in Volumendurchflusssensoren, die das strömende Volumen pro Zeit $q_v = dV/dt$ erfassen, und Massendurchflusssensoren, welche die strömende Masse pro Zeit $q_m = dm/dt = \rho \cdot q_v$ erfassen, unterteilt. Eine weitere Gruppe bilden die so genannten Mischformen, die eine Abhängigkeit von der Dichte des Messmediums aufweisen. Zu dieser Gruppe gehören neben anderen auch die hier näher betrachteten differenzdruckbasierten Durchflussmessverfahren [Schäfe99]. Differenzdruckbasierte

Durchflussmessverfahren sind nach den volumetrischen Verfahren die ältesten Verfahren zur Durchflussmessung. Bereits seit 1900 werden Wirkdrucksensoren mit Blende oder Düse kommerziell eingesetzt [Vigo94].

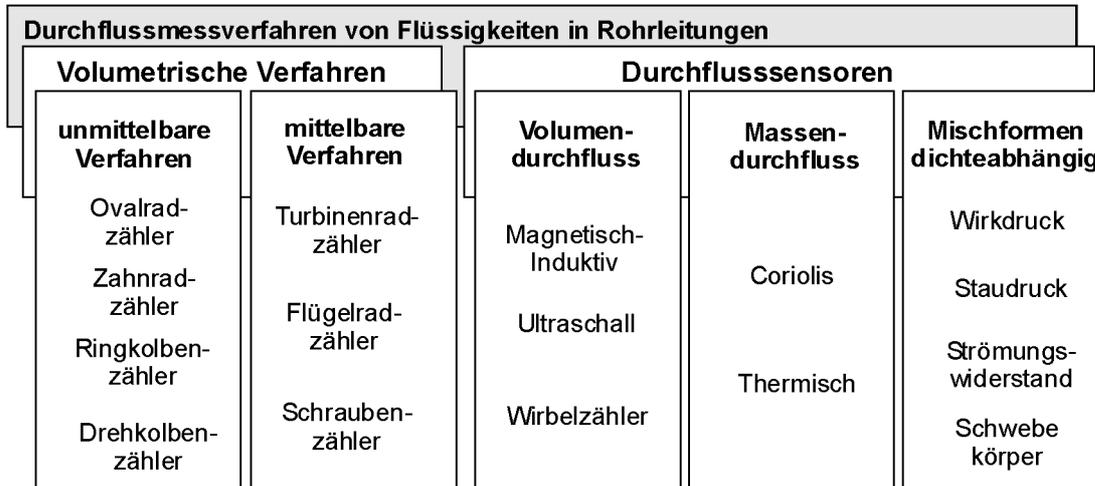


Abbildung 4.1: Einteilung der wichtigsten Durchflussmessverfahren für Flüssigkeiten in geschlossenen Rohren (nach [Schäfe99]).

Prinzipbedingt weisen differenzdruckbasierte Durchflussmessverfahren neben einer nichtlinearen Kennlinie weitere Nachteile, wie eine geringe Messspanne, eine hohe Empfindlichkeit gegen Abnutzung bzw. Ablagerung und einen hohen bleibenden Druckverlust. Trotzdem werden diese Messverfahren immer noch sehr häufig eingesetzt, da sie kostengünstig, zuverlässig, in Normen standardisiert und vor allem den Anwendern vertraut sind. Des Weiteren bietet das Verfahren bei der Messung von Dämpfen sehr gute Eigenschaften [Chemie01]. Nach FROST & SULLIVAN [Frost98] sind ca. 20 % des Umsatzes von Durchflusssensoren Wirkdrucksensoren. Der prozentuale Anteil von Wirkdrucksensoren geht zwar kontinuierlich zurück; nach FREUDENBERGER [Freude00] decken sie jedoch immer noch 50 % der Durchflussmessstellen in der chemischen Industrie ab.

4.2 Druckbasierte Durchflussmessung

4.2.1 Theoretische Grundlagen und Randbedingungen

In diesem Abschnitt sollen die notwendigen theoretischen Grundlagen zur Durchflussmessung eingeführt werden. Hierzu gehören allgemeine Grundlagen der Fluidik und den hier betrachteten Durchflussmessverfahren zugeordneten Grundlagen.

Bei der Beschreibung von Strömungsverhältnissen unterscheidet man grundsätzlich laminare und turbulente Strömungen. Welche Strömungsform vorliegt, kann anhand der dimensionslosen Reynoldszahl Re bestimmt werden.

$$Re = \frac{\bar{v} D \rho}{\eta} \quad (4.1.1)$$

Sind die Reynoldszahlen zweier Strömungen identisch, so kann man von einem ähnlichen Verhalten ausgehen. Folglich wird das Verhalten einer Strömung von der Dichte des Fluids ρ , der kinematischen Viskosität η , der mittleren Fließgeschwindigkeit \bar{v} und der charakteristischen Länge; bei Strömungen durch kreisrunde Rohre der Durchmesser D ; bestimmt. Bei einer Reynoldszahl von etwa 2300 kommt es zu einem nicht reproduzierbaren Wechsel von laminarer zu turbulenter Rohrströmung, wodurch entscheidende Änderung im Strömungsprofil hervorgerufen werden. Bei laminarer Strömung treten ausschließlich Geschwindigkeitskomponenten in der Hauptströmungsrichtung auf und die Geschwindigkeitsverteilung über dem Rohrquerschnitt ist parabelförmig (Abb. 4.2). Bei turbulenter Strömung ist der Verlauf der Geschwindigkeit in der Mitte abgeflacht und die mittlere Geschwindigkeit beträgt ca. 80 bis 90 % der maximalen Geschwindigkeit - bei laminarer Strömung sind es nur ca. 50 % der maximalen Geschwindigkeit.

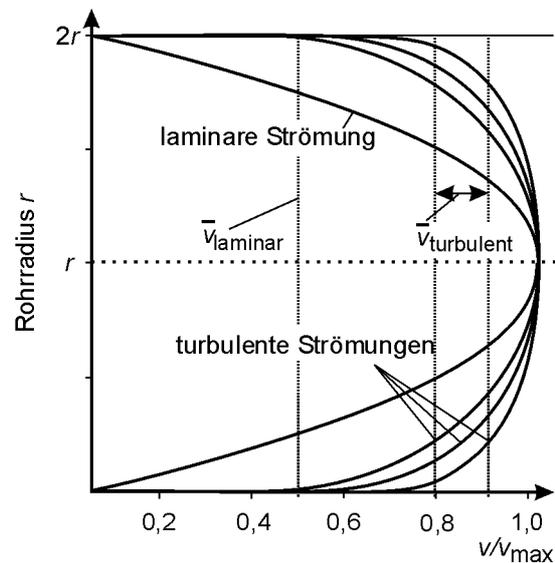


Abbildung 4.2: Geschwindigkeitsverteilung über dem Rohrdurchmesser laminarer und turbulenter Strömungen.

Bei einer Fluidströmung kommt es zu Druckverlusten durch Rohrreibung oder Strömungshindernisse. Bei laminaren Strömungsverhältnissen verhält sich der Druckverlust proportional zur mittleren Strömungsgeschwindigkeit, bei turbulenten Verhältnissen geht man von einem quadratischen Zusammenhang aus. Laminare Strömungsimpedanzen $\underline{Z} = p/q_v$ können dadurch mittels elektro-fluidischer Analogien in elektrische Netzwerke überführt werden und mit Schaltungssimulationsprogrammen simuliert werden, z.B. [Tafel69], [Lenk71]. Der Volumenstrom q_v ent-

spricht der Flussgröße (elektr.: Strom i) und Druckdifferenzen p der Differenzgröße (elektr.: Spannung u). Daher werden Strömungshindernisse durch Widerstände, beschleunigte Massen durch Induktivitäten und Kompressibilitäten durch Kapazitäten dargestellt. Dies ist mit turbulenten Strömungen durch die quadratische Abhängigkeit nicht mehr ohne weiteres möglich. Da die betrachteten Durchflussbereiche zum größten Teil im turbulenten liegen, werden folgende Betrachtungen auf die turbulenten Strömungen beschränkt.

Der Druckabfall einer turbulenten Strömung in einem kreisrunden Rohr kann aus

$$p_{\text{Verlust}} = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \bar{v}^2 \quad (4.1.2)$$

berechnet werden. Dabei ist λ die Rohrreibungszahl, die von der Reynoldszahl Re und der relativen Wandrauigkeit D/k (k = Rauigkeitswert) abhängt, L und D die Rohrlänge bzw. Rohrdurchmesser, ρ die Fluidichte [Bohl94] [Eck88].

Die allgemeine Formel zur Berechnung von bleibenden Druckverlusten an Strömungshindernissen unter turbulenten Bedingungen lautet nach [Bohl94]:

$$p_{\text{Verlust}} = \zeta \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \bar{v}^2 \quad (4.1.3)$$

Dabei ist ζ die Widerstandszahl, die im allgemeinen nicht mehr analytisch ermittelt werden kann und teilweise eine Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit aufweist. In Abbildung 4.3 ist als Beispiel die Widerstandszahl ζ eines Plattenschiebers dargestellt. Bei diesem Beispiel ist die Widerstandszahl im betrachteten Bereich der Strömungsgeschwindigkeit konstant.

Auch für Strömungen gilt das Gesetz der Erhaltung der Masse. Die in ein betrachtetes Volumen einfließende Masse muss gleich dem Massezuwachs im Volumen plus dem Ausfluss der Masse sein. Für inkompressible Medien und bei festen Begrenzungen des Volumens mit einem Ein- und einem Auslauf, kann die Masseerhaltung auf die Kontinuitätsgleichung

$$q_V = \int_A v \, dA \quad (4.1.4)$$

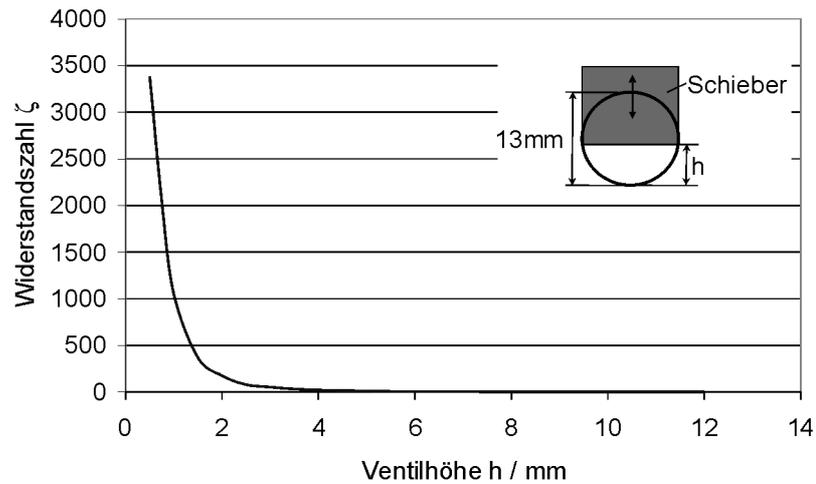


Abbildung 4.3: Widerstandszahl eines Plattenschiebers.
Nenn Durchmesser DN 13, gemessen mit Messstand aus Kapitel 6.1

reduziert werden. Bezogen auf die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten und Einlauf- und Auslaufquerschnitte (Abb. 4.4) lässt sich die Beziehung in

$$q_{v1} = q_{v2} \rightarrow A_1 \cdot \bar{v}_1 = A_2 \cdot \bar{v}_2 \quad (4.1.5)$$

umformen.

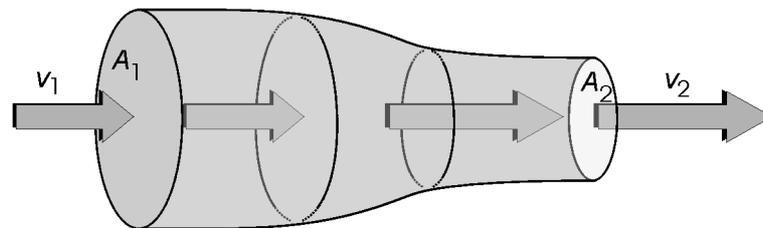


Abbildung 4.4: Kontinuitätsbeziehung an einem von Flüssigkeit durchströmten Rohr mit Eingangsquerschnitt A_1 und Ausgangsquerschnitt A_2 .

Aus der Kontinuitätsgleichung ergibt sich, dass das Fluid durch eine Variation des Strömungsquerschnitts A beschleunigt oder abgebremst werden kann. Dabei ändert sich ebenfalls die kinetische Energie des Fluids, die aus Lageenergie oder Druckenergie

$$\text{Lageenergie} \quad m \cdot g \cdot h \quad (4.1.6)$$

$$\text{Druckenergie} \quad m \cdot \frac{p}{\rho} \quad (4.1.7)$$

$$\text{kinetische Energie} \quad m \cdot \frac{\bar{v}^2}{2} \quad (4.1.8)$$

umgeformt wird.

Die Summe von Lage-, Druck- und kinetischer Energie ist für ideale Fluide konstant. Bildet man die Summe und multipliziert mit ρ/m , so erhält man die *BERNOULLI-Gleichung* Gl. (4.1.9). Hierbei sind die Energieterme zu Drücken umgeformt (potentieller Druck, statischer Druck und dynamischer Druck)

$$\rho \cdot g \cdot h + p + \frac{\rho}{2} \cdot \bar{v}^2 = \text{const} \quad . \quad (4.1.9)$$

Die *BERNOULLI-Gleichung* stellt unter dem Sonderfall der inkompressiblen, stationären, reibungsfreien und eindimensionalen Strömung eine Lösung der NAVIER-STOKES-Bewegungsgleichung dar, auf die hier nicht weiter eingegangen werden soll [Töpfer88]. Für Strömungen, die diese Eigenschaften besitzen, können demnach die Übergänge zwischen den einzelnen Energien berechnet werden. Für reale Fluide können Korrekturterme zur Berücksichtigung der Reibung eingefügt werden.

4.2.2 Druckbasierte Verfahren

Nach den allgemeinen Grundbeziehungen für inkompressible Flüssigkeitsströmungen, wird nun kurz auf die Grundlagen der druckbasierten Durchflussmessung eingegangen. Dabei wird auf die klassische Wirkdruckmessung, die Staudruckmessung, die Druckverlustmessung und das Wirbelzählverfahren eingegangen. Das Wirbelzählverfahren beruht auf der Wirbelablösung an einem Staukörper, die durch Druck- bzw. Kraftimpulse oder Dichteänderung detektiert werden. Da die Erfassung der Wirbel anhand einer Druckmessung erfolgen kann, wird dieses Verfahren hier ebenfalls behandelt.

Wirkdruckmessung

In Abschnitt 4.1 wurde die *BERNOULLI-Gleichung* Gl. (4.1.9) eingeführt. Sie besagt, dass bei Erhöhung der Fließgeschwindigkeit des Fluids Druckenergie in kinematische Energie übergeht. Dabei kann die Lageenergie vernachlässigt werden, wenn

man von einer horizontalen Strömung ausgeht. Um das Fluid zu beschleunigen, kann man gemäß der Kontinuitätsgleichung Gl. (4.1.5) die Querschnittsfläche reduzieren. Als Drosseln können Messblenden, diverse Düsen oder Venturirohre zum Einsatz kommen. Abbildung 4.5 zeigt beispielhaft den Druckverlauf über einer Messblende. Der Differenzdruck $\Delta p = p_1 - p_2$ kann mit einem Differenzdrucksensor erfasst werden.

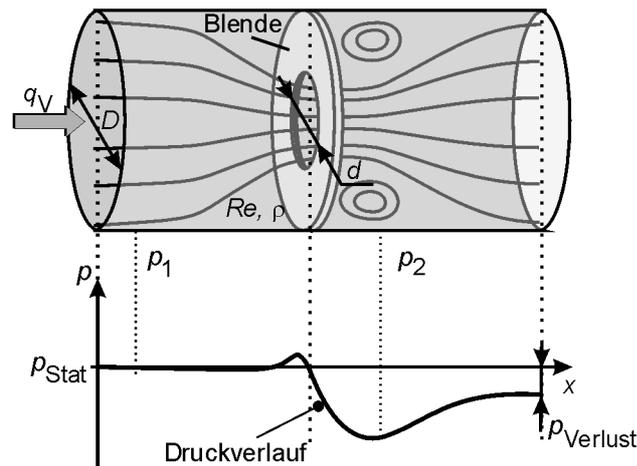


Abbildung 4.5: Strömungs- und Druckverlauf einer Blende zur Wirkdruckmessung.

Setzt man die nach der Geschwindigkeit aufgelöste Kontinuitätsgleichung in die BERNOULLI-Gleichung ein, erhält man:

$$p_1 - p_2 = \Delta p = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{A_1^2 - A_2^2}{A_2^2} \cdot \bar{v}_1^2 \quad (4.2.1)$$

Wird die Druckdifferenz gemessen, kann der Volumenfluss nach

$$q_V = C(Re) \cdot \frac{A_1 \cdot A_2}{\sqrt{A_1^2 - A_2^2}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p} \quad (4.2.2)$$

berechnet werden. Dabei wird der Durchflusskoeffizient $C(Re)$ zur Berücksichtigung von realen Bedingungen, wie z.B. Reibung im Fluid, eingeführt. C ist abhängig von der Reynoldszahl Re und kann nicht analytisch berechnet werden. In verschiedenen Normen sind die Geometrien vorgegeben und die zugehörigen Durchflusskoeffizienten tabelliert [DIN 19205] [DIN EN ISO 5167]. Durch die Normung ist es möglich, Drosselgeräte zu fertigen, die keine Kalibrierung erfordern. Auch für große Nennweiten sind so kostengünstige Messstellen realisierbar.

Nachteilig wirkt sich bei der Wirkdruckmessung aus, dass der Differenzdruck quadratisch vom Durchfluss abhängt, wodurch sich die Messspanne des Durchflusssensors reduziert. Für einen Durchflussmessbereich von 1:10 muss der Drucksensor einen Druckmessbereich von 1:100 aufweisen. Wirkdrucksensoren weisen weiterhin eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Störungen im Geschwindigkeitsprofil auf, was relativ große Einlauf- und Auslaufängen erfordert. Bei realen, reibungsbehafteten Fluiden kommt es durch die Engstelle zu einer Erhöhung von Verlusten und so zu einem hohen bleibenden Druckverlust. Hierbei sind die verschiedenen gängigen Drosselemente bzgl. ihres Druckverlusts zu unterscheiden. In Ab-

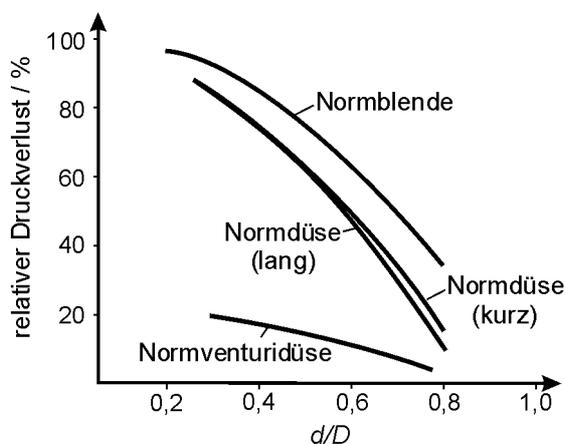


Abbildung 4.6: Relativer Druckverlust von Drosseleinrichtungen [Fiedle92].

bildung 4.6 sind die relativen Druckverluste (Druckverlust zu Wirkdruck) gängiger Drosselemente über dem Durchmesser Verhältnis $\beta = d/D$ aufgetragen. Normblenden weisen im Vergleich zu Düsen und Venturirohren die höchsten relativen Verluste auf.

Die Messunsicherheit hängt bei Wirkdruckdurchflusssensoren stark von der korrekten Geometrie des Drosselements ab. Folglich wirken sich Änderungen durch Ablagerungen oder Abrasionen sehr stark aus.

Staudruckmessung

Die Staudruckmessung beruht ebenfalls auf der Gleichung von BERNOULLI. Hierbei wird allerdings nicht der Strömungsquerschnitt verändert, um die Strömungsgeschwindigkeit zu beeinflussen, sondern man bremst das Fluid an der Staudrucksonde bis zum Stillstand ab und vergleicht den bei Stillstand herrschenden Gesamtdruck mit dem statischen Druck. Auch hier geht man von einem konstanten Höhenniveau aus, so dass der Term der Lageenergie bzw. potentiellen Drucks in

$$p_{\text{Gesamt}} = p_{\text{statisch}} + \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \tag{4.2.3}$$

vernachlässigt werden kann.

Die Differenz des gesamten und des statischen Drucks ist der dynamische Druck. Dieser ist vom Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit und von der Dichte abhängig:

$$p_{\text{Gesamt}} - p_{\text{statisch}} = p_{\text{dynamisch}} = \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \quad . \quad (4.2.4)$$

Die Druckdifferenz kann mit einer Sonde gemessen werden, die zwei Öffnungen zur Druckmessung aufweist. Die erste Öffnung ist der Strömung zugewandt und erfasst den Gesamtdruck. An der zweiten Öffnung an der Sondenseite wirkt der statische Druck. Bei einer solchen Sonde handelt es sich um eine Ein-Punkt-Messung, welche häufig zur Geschwindigkeitsbestimmung genutzt wird (Abb. 4.7, links). Bei der Durchflussmessung besteht daher das Problem, dass der Ort der mittleren Strömungsgeschwindigkeit als Messort gewählt werden muss. Bei voll ausgebildetem rotationssymmetrischen Rohrströmungsprofil ist dies unter laminaren Verhältnissen bei $0,71 \cdot r$ ($r = \text{Rohrradius}$) der Fall, unter turbulenten Verhältnissen bei $0,77 \cdot r$ [Fiedle92]. Damit sich ein solches Strömungsprofil ausbildet, sind allerdings sehr lange Einlauf- und Auslaufstrecken zur Strömungsberuhigung notwendig.

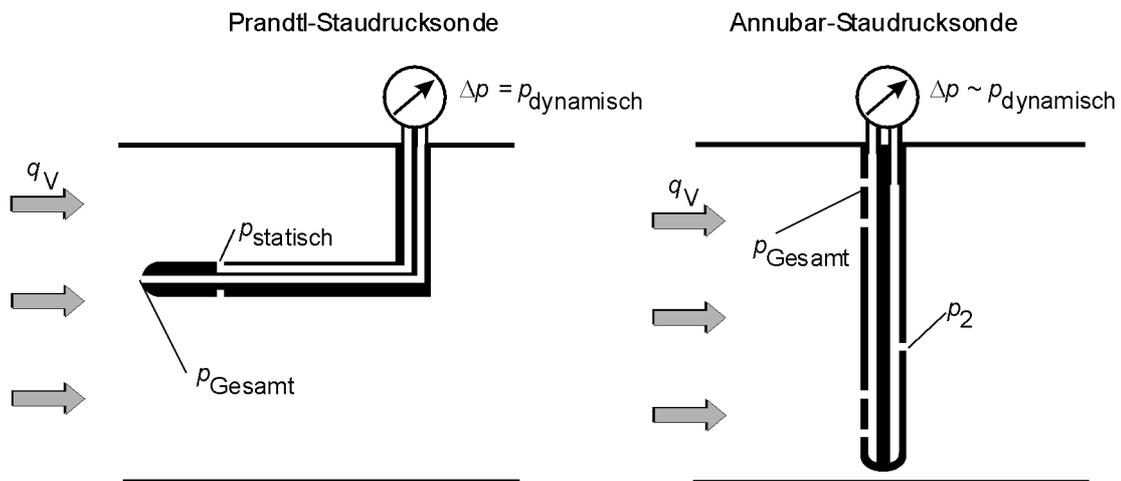


Abbildung 4.7: Staudruckmessung mit Hilfe einer Ein-Punkt-Sonde (Prandtl-Staudrucksonde) und einer Netzmessung (Annubar-Staudrucksonde).

Bei einer Netzmessung mittels einer Mehr-Punkt-Sonde können diese Nachteile abgeschwächt werden. Dabei handelt es sich um Stabsonden, die verteilt über den Durchmesser mehrere Messpunkte aufweisen, zwischen denen es zu einer Mittelung des Druckes kommt. So kann ebenfalls mit nur einer Differenzdruckmessung

eine Korrektur bei nicht voll ausgebildetem Strömungsprofil vorgenommen werden (Abb. 4.7 (rechts)). Vor allem bei großen Durchmessern, wie z.B. in Windkanälen, ist der Einsatz solcher Stabsonden aufgrund des relativ einfachen Einbaus vorteilhaft

Druckverlustmessung

Durch Messung des Druckverlusts lässt sich ebenfalls der Volumendurchfluss berechnen. Dabei muss zwischen laminarer und turbulenter Strömung unterschieden werden, da der Druckverlust unter laminaren linear und unter turbulenten Bedingungen quadratisch von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig ist.

In der Gasdurchflussmessung stellt die Druckverlustmessung sogar eine Referenz dar. Die als *Laminarflusssensoren* bezeichneten Durchflusssensoren nutzen meist Kapillaren oder dünne Spalte, um sicher zu stellen, dass laminare Bedingungen vorliegen.

Für turbulente Strömungsverhältnisse ist die Anwendung dieses Messverfahrens gering, da der bleibende Druckverlust um bis zu 10mal über dem eines Wirkdruck-sensors liegt (Abb. 4.6). In jedem Durchflussprozess existieren jedoch Strömungshindernisse, wie z.B. Ventile, die zur Druckverlustmessung genutzt werden können. Die Gleichungen zur Berechnung des Druckverlusts sind unter Gl. (4.1.3) bzw. für Rohre Gl. (4.1.2) angegeben. Analog zur Wirkdruckmessung kann ein Druckverlustkoeffizient C_v , vgl. Durchflusskoeffizient $C(Re)$ aus Gleichung Gl. (4.2.2), eingeführt werden [Schäfe99]. So kann der Durchfluss aus

$$q_v = C_v(Re) \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p_v} \quad \text{mit} \quad C_v = \frac{1}{\sqrt{\zeta}} \quad (4.2.5)$$

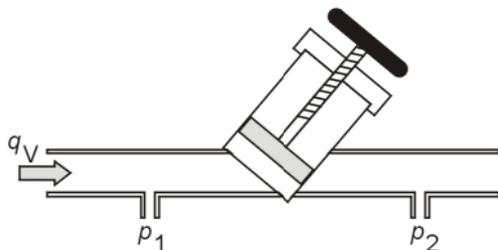


Abbildung 4.8: Druckverlustmessung an einem Ventil.

berechnet werden. Da der Druckverlust von der Widerstandszahl ζ abhängig ist, muss diese zur Berechnung bekannt sein. Nutzt man den Druckverlust über einem Ventil (Abb.), ist die Widerstandszahl nicht konstant. Daher muss die Ventilöffnung mit in die Berechnung einfließen. Dieser Ansatz ei-

nes gekoppelten Sensor-Aktor-Systems kann für ein Regelventil genutzt werden [Schäfe99].

Wirbelzähler – Vortex-Sensoren

Wirbelzähler, auch Vortex-Sensoren genannt, sind im eigentlichen Sinne keine druckbasierten Durchflussmessverfahren. Bei diesem Verfahren werden Wirbel pro Zeiteinheit gezählt, die sich an einem Staukörper ablösen. Eine mögliche Art der Erfassung der Wirbel ist die Aufnahme der von ihnen verursachten kleinen Drucksprünge mit einem Drucksensor. Daher wird das Wirbelzählverfahren hier den druckbasierten Verfahren zugeordnet.

Das Verfahren beruht darauf, dass sich an einem umströmten Körper in einem weiten Reynoldszahlbereich periodisch Wirbel ablösen. Die Wirbelablösung wird durch die Beschleunigung des Fluids verbunden mit einer Druckabsenkung bei Vorbeifließen am Staukörper hervorgerufen. Hinter dem Körper verlangsamt sich das Fluid wieder und kann im Lee sogar zum Stillstand oder zur Rückströmung kommen. Dadurch kann sich die Grenzschicht ablösen, eindrehen und so einen Wirbel bilden. Dieser fließt im Fluid mit, wobei die Geschwindigkeit des Wirbels v_w geringer ist als die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids [Kuiper89]. Die Ablösung von Wirbeln erfolgt bei symmetrisch umströmten Körpern wechselseitig mit gleicher Frequenz. Dadurch bildet sich im Nachlauf des Staukörpers eine Wirbelstraße - KÁRMÁNSCHE Wirbelstraße - aus, bei der die Frequenz f der vorbeilaufenden Wirbel idealerweise proportional zur Strömungsgeschwindigkeit v ist (Abb. 4.9).

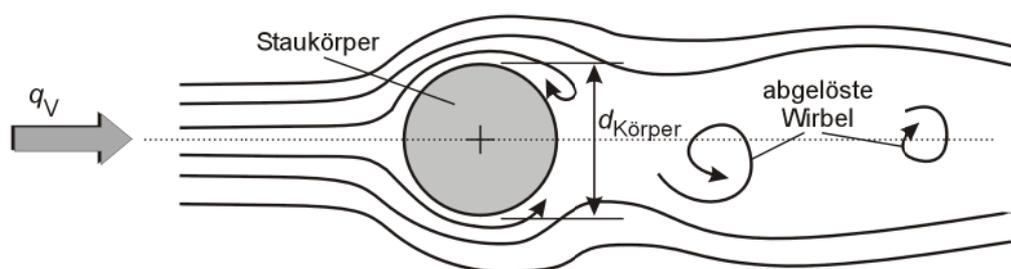


Abbildung 4.9: Umströmter zylindrischer Körper mit Wirbelablösung.
Wirbelablösefrequenz $f \sim q_v$

Beschränkt ist die Aufnahme von Wirbelfrequenzen auf Strömungen mit ausreichend hoher Reynoldszahl. Als untere Grenze werden in der Literatur meist Werte um $Re \approx 10^4$ genannt. Bei niedrigeren Reynoldszahlen lösen sich entweder noch keine Wirbel ab oder die Aufnahme ist nicht zuverlässig möglich, da die erzeugten

Druckspitzen zu gering ausfallen. Die Proportionalität der Wirbelablösung zur Fluidgeschwindigkeit ist für einige Staukörperformen nur für noch höhere Reynoldszahlen gewährleistet. Entscheidend für das lineare Verhalten ist die Strouhalzahl $Sr(Re)$, die nicht analytisch berechnet werden kann und abhängig von der Geometrie des Staukörpers und der Reynoldszahl ist. Die Frequenz ergibt sich nach Gl. (4.2.6) mit

$$f = \frac{Sr(Re) \cdot \bar{v}}{d_{\text{Körper}}} \quad (4.2.6)$$

Die Frequenz ist reziprok proportional zum Durchmesser des Staukörpers $d_{\text{Körper}}$ und proportional zu Strouhalzahl $Sr(Re)$ und Fließgeschwindigkeit \bar{v} . Durch Umformen kann der Volumendurchfluss q_v aus der Wirbelfrequenz nach

$$q_v = \frac{d_{\text{Körper}} \cdot A}{Sr(Re)} \cdot f \quad (4.2.7)$$

bestimmt werden.

Aufgenommen wird die Wirbelfrequenz meist mit Drucksensoren [Bailey95], welche die kleinen Druckimpulse der vorbeifließenden Wirbel erfassen. Dabei können

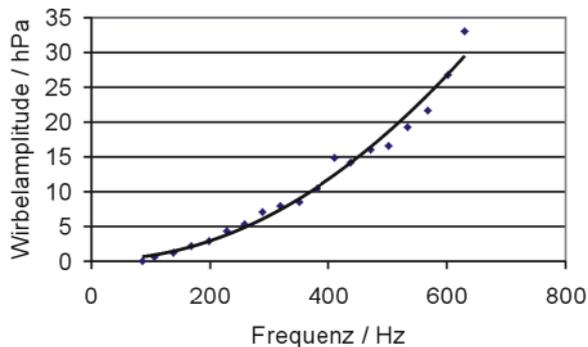


Abbildung 4.10: Gemessene Amplituden der Druckimpulse durch die Wirbelablösung.

die Amplituden der zu erfassenden Wirbeldruckimpulse stark variieren. Bei einem selbst aufgebauten Wirbelzähler (DN 8, $d_{\text{Körper}} = 2,3 \text{ mm}$) liegt der Druck im Bereich $10^0 - 3 \cdot 10^3 \text{ Pa}$ und verhält sich nahezu quadratisch mit der Frequenz (Abb. 4.10). Als alternative Verfahren sind auch Thermistoren [Bonfig87], Dehnmessstreifen am Staukörper [Fiedle92], piezoelektrische Kraftaufnehmer im Staukörper [Hüchte03] oder Ultraschallsensoren [Hans02] zu nennen.

Von der Art der Erfassung ist auch die Wahl der Staukörperform abhängig. Meist werden einfache geometrische Formen gewählt, häufig ein Dreieck- oder Delta-Körper (Abb. 4.11a,b). Entscheidend ist eine definierte Abrisskante am Staukörper, da

die Frequenz-Proportionalität der Wirbelablösung über die Reynoldszahl dadurch positiv beeinflusst wird. Bei Zylinderformen z.B. ändert sich der Ort der Wirbelablösung an der Zylinderseite abhängig von der Reynoldszahl, weshalb die Strouhalzahl variiert [Bonfig87]. Bei zwei Staukörpern, die hintereinander angeordnet sind, oder zwei Abrisskanten kann es zu einer Vergleichmäßigung der Wirbelstärke wie auch zu einer besseren Wirbelstabilität kommen (Abb. 4.11f).

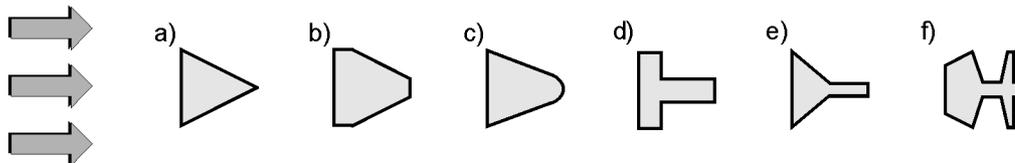


Abbildung 4.11: Verschiedene gebräuchliche Staukörperformen des Wirbelverfahrens [Bonfig87].

4.3 Störungsursachen von Wirkdrucksensoren

Die Ursachen von Störungen und Ausfällen bei Sensoren können von internen oder externen Einflüssen hervorgerufen werden. Nach [VDI/VDE 2650] können die Ursachen für Störungen bei Feldgeräten allgemein

- der Elektronik,
- dem Messelement- oder Aktorelement,
- dem Einbau,
- der Inbetriebnahme,
- dem Nichteinhalten der spezifizierten Betriebsbedingungen,
- dem Prozessanschluss oder
- der Hilfsenergieversorgung

zugeordnet werden. Die ersten zwei Punkte sind interne Ursachen, die restlichen unterliegen externen Einflüssen. Demnach spielen Einflüsse aus der Umwelt des Messsystems eine nicht zu vernachlässigende Rolle. SCHNEIDER [Schnei01] beobachtete in seiner Umfrage unter Anwendern und Herstellern von Prozesssensoren (Durchfluss- und Drucksensoren) eine zunehmende Verschiebung von technischen (internen) zu anwendungsbezogenen Anwender-/Nutzer-Ursachen für aufgetretene Störungen bei komplexeren Geräten (siehe Kapitel 2). Als Beispiel kann das Umfra-

geergebnis bzgl. MID gelten. Hier liegen die Ursachen zu 29 % an internen und zu 64 % an externen Einflüssen. Die restlichen 7 % sind von Seiten der Herstellung verursacht.

In [VDI/VDE 2650] und dem Ergebnisbericht des GMA-Fachausschusses 6.14 „Überwachung und Diagnose von Feldgeräten“ [GMA-FA 6.21] werden für einige Durchflussmessverfahren (MID, Coriolis-, Ultraschall-, Thermisches- und Vortexmessverfahren) spezifische Störungsarten angegeben. Zur Benennung der möglichen und relevanten Störungen und Ausfälle des Wirkdruckverfahrens sowie deren Ursachen ist es sinnvoll eine Betrachtung in Form einer *Ausfalleffektanalyse* kurz *FMEA* (von engl.: *Failure Mode and Effect Analysis*) [DIN 25448] oder einer ähnlichen Methode (*Failure Tree Analysis* FTA [DIN 25424], *Event Tree Analysis* ETA [DIN 25419], etc.) durchzuführen.

4.3.1 Die Ausfalleffektanalyse (FMEA)

Die FMEA wurde Anfang der 60er Jahre in den USA von der NASA für das Apollo-Projekt entwickelt und eingesetzt. Die Methode fand danach Anwendung in der Luft- und Raumfahrttechnik, Kerntechnik, Automobilindustrie usw. Das Ziel der Methode ist es, möglichst vollständig die Ausfälle von Systemen und deren Ursachen zu benennen. Am günstigsten wird die Methode frühzeitig im Entwicklungsprozess eingesetzt, um vorbeugend den Eintritt von Ausfällen und Störungen zu verhindern. Man kann zwischen System-, Konstruktions- und Prozess-FMEA unterscheiden, die zu verschiedenen Zeiten im Entwicklungsprozess und auf verschiedenen Abstraktionsniveaus durchgeführt werden. Während bei der System-FMEA das Gesamtsystem analysiert wird, um das Zusammenwirken der Systemkomponenten zu beurteilen, konzentriert sich die Konstruktions-FMEA auf die Bauteilkomponenten. Dabei wird jedes Bauteil und dessen Funktionen beschrieben und hinsichtlich seiner Ausfallmöglichkeiten und Folgen auf die auszuführende Funktion analysiert. Die Auswirkungen auf andere Bauteile und höhere Komponentenebenen wird erörtert und gegebenenfalls Lösungen zur Vermeidung aufgezeigt. Bei der Prozess-FMEA werden die einzelnen Schritte bei der Herstellung eines Produkts untersucht, um eine korrekte Fertigung des entwickelten Systems zu gewährleisten.

Hier soll die Konstruktions-FMEA, auch Entwicklungs-FMEA genannt, angewendet werden. Das gesamte System wird in Bauteile oder Komponenten unterteilt, die getrennt untersucht werden können. Nach dem Benennen der Funktionen der Kom-

ponenten werden alle Ausfallmöglichkeiten und Störungen zusammengetragen und hinsichtlich ihrer *Schwere*, ihrer *Auftrittswahrscheinlichkeit* und ihrer *Entdeckungswahrscheinlichkeit*, jeweils auf einer Skala von 1 (unkritisch, selten, leicht entdeckbar) bis 10 (schwerwiegend, häufig, nicht aufdeckbar), bewertet. Das Produkt der Bewertungen ergibt die *Risikoprioritätszahl* (RPZ) auf einer Skala von 1 bis 1000. Da die Einzelwahrscheinlichkeiten meist subjektive Bewertungen darstellen, kann keine Grenze angegeben werden, ab dem eine Ausfallmöglichkeit näher betrachtet werden muss bzw. vernachlässigt werden kann.

Für sämtliche Ausfälle werden die Folgen für andere Komponenten bzw. für übergeordnete Komponentenebenen erörtert und zusammengetragen, die dort weitere Störungen und Ausfälle hervorrufen können (*Bottom-Up-Methode*). Auf diese Weise sollten alle Möglichkeiten für Ausfälle und Störungen erfasst und durch die Bewertung mit einer RPZ in eine Reihenfolge bzgl. ihrer Relevanz gebracht werden. Selbstverständlich können auch bei einer systematisch durchgeführten FMEA einzelne Ausfallmöglichkeiten unberücksichtigt bleiben, wenn spezielle Umstände, wie Umgebungseinflüsse, von den Bearbeitern der Analyse nicht beachtet werden [Börcsö04], [Grams01], [Tietje03].

4.3.2 Mögliche Störungen eines Wirkdruckdurchflusssensors

Im Folgenden sollen alle relevanten Störungen und Ausfälle eines Wirkdruckdurchflusssensors für Flüssigkeiten mit Blende und $(D - D/2)$ - Druckentnahme dargestellt werden, bei dem die Messung des Drucks mit Hilfe eines piezoresistiven Differenzdrucksensors erfolgt. Bei der Störungsbetrachtung werden Ergebnisse zu möglichen Störungen der Druckmessung von [Nuber03], [GMA-FA 6.21] und [Schnei01] beachtet. Die Messkette für einen Wirkdrucksensor variiert von der Darstellung in Abbildung 3.1, da die Messgröße Durchfluss zunächst in eine Druckdifferenz gewandelt wird. Hierzu ist vor dem Differenzdrucksensor noch eine Drosselstelle als Messgrößenwandler positioniert. Die detaillierte Messkette für Wirkdruck-Durchflusssensoren ist in Abbildung 4.12 gezeigt.

Der Durchfluss erzeugt durch die höhere Fließgeschwindigkeit an der Drosselstelle eine Druckdifferenz, die über die Druckzuleitungen an das Gehäuse des Drucksensors geleitet wird. Die Rückwirkung an den Prozess ist hauptsächlich durch die Engstelle und den damit verbundenen bleibenden Druckverlust, repräsentiert durch die Widerstandszahl ζ (siehe auch Seite 58), gegeben. Der Wirkdruck

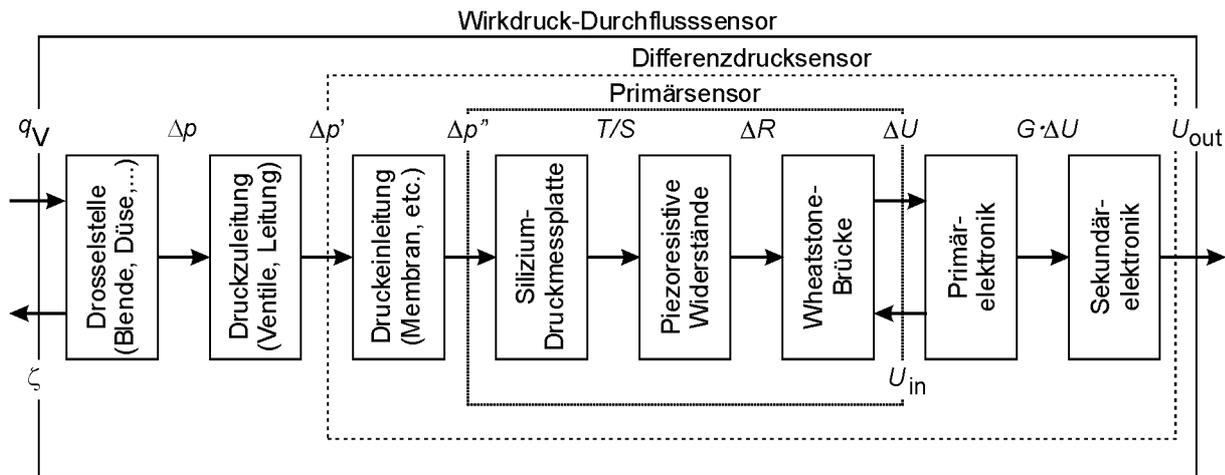


Abbildung 4.12: Messkette eines Wirkdruck-Durchflusssensors mit zusätzlichem Messgrößenwandler zur Wandlung von Volumendurchfluss zu Differenzdruck (Drosselstelle)
 Die Rückwirkung des Strömungswiderstands wird repräsentiert durch die Widerstandszahl ζ

wird durch die Druckzuleitung, Ventilbatterie und Druckeinleitung (Druckabfall über Trennmembranen, akustischer Tiefpass durch Kapillaren im Gehäuse, etc.) umgeformt und an die Platte des Silizium-Messelements (Primärsensor) geleitet. Dort verursacht die mechanische Spannung bzw. Dehnung in der Silizium-Platte eine Leitfähigkeitsänderung der eindotierten Widerstände, wodurch eine Spannung in der aus vier piezoresistiven Widerständen zusammengesetzten Messbrücke hervorgerufen wird (siehe z.B. [Pfeife89]). Die Brückenspannung wird von der Primärelektronik abgegriffen und verstärkt, welche die Messbrücke ebenfalls mit einer Gleichspannung bzw. einem Gleichstrom versorgt. Die anschließende Sekundärelektronik digitalisiert die verstärkte Spannung, errechnet den Volumendurchfluss oder korrigiert systematische Messabweichungen, z.B. Temperaturfehler oder Linearitätsfehler.

Die betrachtete Messeinrichtung entspricht dem in Abbildung 4.13 dargestellten Wirkdruckdurchflusssensor. Dieser prinzipielle Aufbau liegt der Arbeit als Beispiel zur Anwendung, Erprobung und Bewertung der Selbstüberwachungskonzepten zugrunde.

Sollte eine FMEA für eine andere Durchflussmeseinrichtung mit variierender Drosseleinrichtung, z.B. Venturirohr, durchgeführt werden, verändert sich meist nur die Bewertungen der RPZ. Bei anderen Messprinzipien zur Druckmessung, z.B. kapazitive Differenzdrucksensoren, sind auch differierende spezifische Ausfälle zu beachten, die in dieser Analyse nicht mit abgedeckt sind.

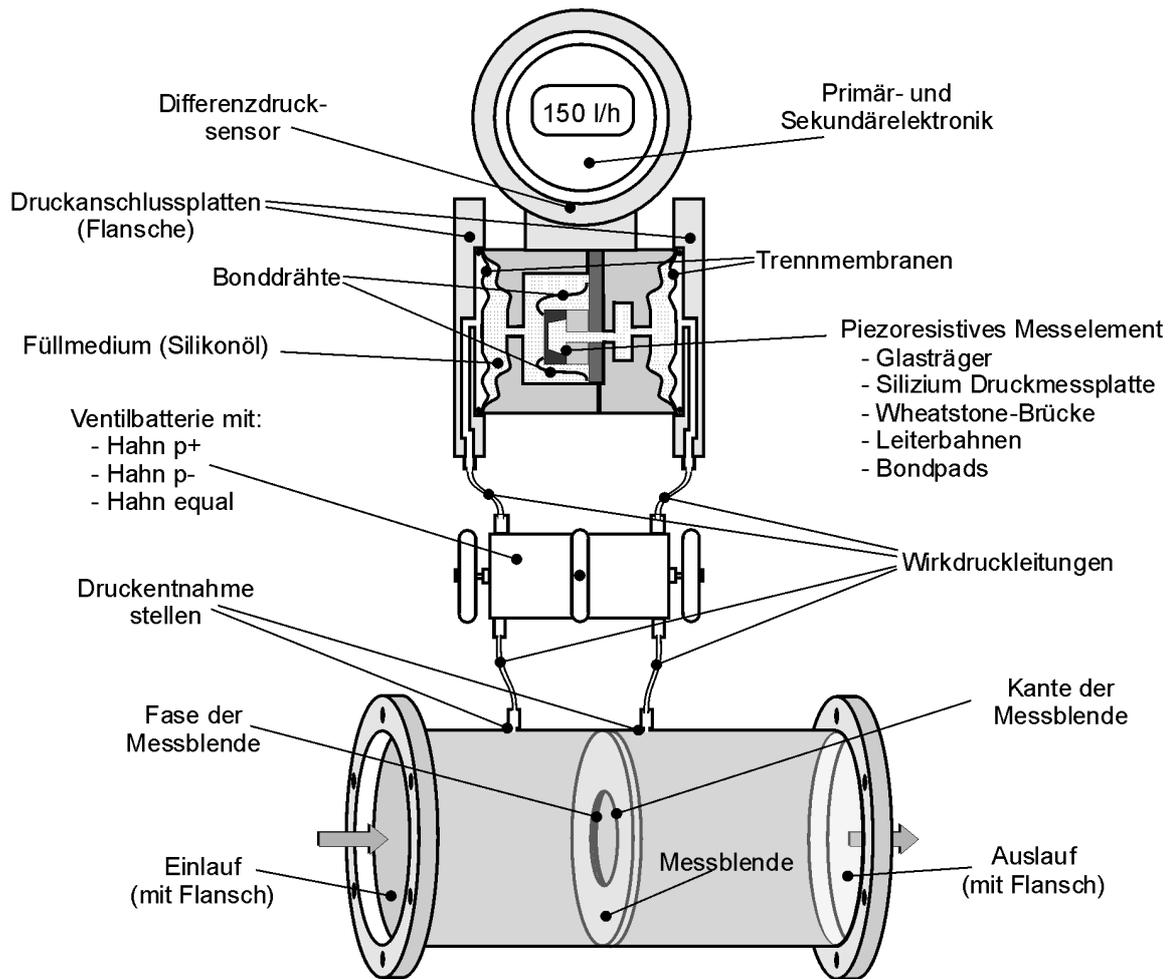


Abbildung 4.13: Der durchgeführten FMEA zugrunde liegender Wirkdrucksensor mit Blende und piezoresistivem Differenzdrucksensor.

Zur Erleichterung der Durchführung einer FMEA steht mittlerweile eine Vielzahl von Programmen zur Verfügung. Diese Analyse wird mit der FMEA-Software *IQ-RM Professional 5* der Firma APIS durchgeführt.

Bei Wirkdruck-Durchflusssensoren stehen Störungen in der Messstrecke im Vordergrund, da hierauf die Einflüsse des Prozesses direkt wirken. Die Analyse zeigt eine Abweichung durch eine abgerundete Kante der Messblende bzw. Vergrößerung der Blendenöffnung durch Abrasion oder Korrosion als relevanteste Störungsursache. Besonders bei den hier betrachteten geringen Nennweiten von DN 13-15 führen Abrasionen zu nennenswerten Abweichungen. Schon Vergrößerungen der Blendenöffnung von wenigen hundertstel Millimeter verursachen Messabweichungen

im Prozentbereich. Die Störungen treten nicht sprungförmig auf, so dass eine langsame Drift zu beobachten ist, bis der Durchflusssensor die Spezifikationen verlässt.

Auch Ablagerungen an der Messblende und im Bereich der Druckentnahmen sind zu beachten und können auch bei scheinbar unkritischen Fluiden zum Problem werden. An der Drosseleinrichtung, z.B. einer Messblende, wirken sich Ablagerungen hauptsächlich in einer Formänderung und eventuell einer zusätzlichen Einengung aus. Werden die Wirkdruckleitungen zugesetzt, so kommt es anfänglich zu einer Änderung der Übertragungseigenschaften, in Form einer Verringerung der dynamischen Eigenschaften, und schließlich zum kompletten Verschluss der Druckzuleitung. Aufgrund des möglichst geringen Durchmessers ($\varnothing < 0,13 \cdot D$ nach [DIN EN ISO 5167]) der Druckentnahmebohrungen und der nicht vorhandenen Strömungsgeschwindigkeit im Innern der Bohrung kann es schnell zur Verlegung durch Partikel oder Verschluss durch Ablagerungen kommen. Dabei ist der gemessene Differenzdruck von Null verschieden, da nicht beide Wirkdruckleitungen verschlossen sein müssen und der resultierende Druck somit vor allem von Änderungen des statischen Systemdrucks beeinflusst wird.

Eine Veränderung der Dynamik der Wirkdruckleitungen kann auch durch Gas einschüsse hervorgerufen werden. Dabei kommt es ebenfalls durch eine Veränderung des hydrostatischen Drucks in den Leitungen zu einem Offset, der sich in den unteren Durchflussbereichen besonders bemerkbar macht. Normalerweise sollten sich bei korrektem Einbau des Drucksensors unterhalb der Messstrecke (für Flüssigkeiten) keine Gasblasen festsetzen, denkbar ist jedoch auch unter diesen Voraussetzungen beispielsweise ein Ausgasen durch Druck- oder Temperaturschwankungen.

Ablagerungen können sich nicht nur in der Messstrecke selbst, sondern auch an den Membranen des mediengetrennten Differenzdrucksensors abscheiden. Dies verringert die Nachgiebigkeit der Membranen und reduziert somit die Empfindlichkeit des Drucksensors. Dadurch besteht nicht nur ein negativer Einfluss auf die Druckübertragung der Membran, sondern auch auf die Kompensation von unterschiedlichen Temperatúrausdehnungskoeffizienten von Füllmedium des Drucksensors (meist Silikonöl) und Sensorgehäuse. Dadurch kann es zu einer Erhöhung des Temperaturfehlers kommen. Die Membranen können ebenfalls aufgrund mechanischer Beschädigung oder Korrosion in ihren Eigenschaften verändert werden. Dies kann deren Nachgiebigkeit, also die Druckübertragung, beeinträchtigen oder bis zur Undichtigkeit und folglich Medieneintritt in die Messzelle bzw. Austritt von Füllmedium führen.

Ablagerungen können genau wie das Unterschreiten der notwendigen Einlauf-längen zusätzliche Messunsicherheiten durch nicht beruhigte Fluidströmungen bewirken. Das kann im Extremfall zu Messabweichung außerhalb der Spezifikationen führen. Besonders Drallströmungen werden im Fluid nur langsam abgebaut und können nennenswerte Abweichung hervorrufen [Bonfig87].

Gasblasen oder Partikel im Fluid führen zu einer Erhöhung des Rauschens auf dem Messsignal. Dieser Effekt ist vor allem bei niedrigen Durchflussraten und folglich niedrigen Differenzdrücken von Bedeutung, da die Druckimpulse der vorbeifließenden Blasen oder Partikel zu deutlichen Abweichungen des Wirkdrucks führen.

Zudem ist es möglich, dass Korrosion oder mechanische Beschädigungen an den Wirkdruckzuleitungen oder der Ventilbatterie zu Leckagen mit Medienaustritt und Messabweichungen führen.

Im Drucksensor können eine Reihe von Störungen auftreten. Durch Alterungsvorgänge kann es zu einer Drift und zu Empfindlichkeitsänderungen des piezoresistiven Silizium-Messelements (Abb. 4.14) kommen [Risch97]. Bei einem Bruch der Druckmessplatte des Messelements oder Lösen der Klebeverbindung zum Sockel wird kein Differenzdruck mehr detektiert. Schwankungen der Versorgungsspannung haben einen linearen Einfluss auf die Brückendifferenzspannung. Sämtliche Kontaktstellen können korrodieren und hochohmig werden bzw. im Extremfall, z.B. durch Bruch der Bonddrähte, zerstört werden.

Durch Alterung kann es zu Änderungen der Übertragungseigenschaften der Primär- und Sekundärelektronik kommen, wobei zwischen einer Störung, bei der noch eine verwertbare Abhängigkeit zwischen Messgröße und Ausgangssignal besteht, und einem Ausfall, bei dem das Ausgangssignal nicht mehr mit der Messgröße korreliert, zu unterscheiden ist.

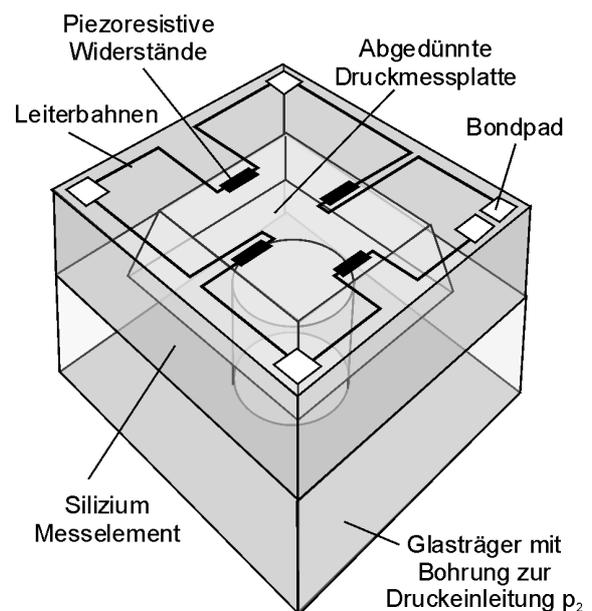


Abbildung 4.14: Piezoresistives Silizium-Druckmesselement.

4 Durchflussmessverfahren der Prozessmesstechnik

Da eine Überwachung von Störungen und Ausfällen der Primär- und Sekundärelektronik mittlerweile nahezu Standard ist (Kapitel 2), soll das Hauptaugenmerk auf den Störungen und Ausfällen im fluidischen und mechanischen System liegen. Diese sind nach obiger Betrachtung auch die problematischeren Ausfälle, da sie häufiger auftreten und schlechter zu detektieren sind. Eine Baum-Darstellung des Systems *Wirkdrucksensor* befindet sich im Anhang C auf Seite 177. Sämtliche Störungen und Ausfälle sind nochmals in den Tabellen 4.1, 4.2 und 4.3 aufgelistet.

Tabelle 4.1: Störungsursachen eines Wirkdrucksensors mit Blende und piezoresistivem Differenzdrucksensor.

Störung/Ausfall	Ursache	Erklärung
Durchflusswerte liegen außerhalb der Spezifikation (der Messwert korreliert mit der Messgröße - Störung)	⇒ Scharfe Kante der Messblende abgerundet	Korrosion, Abrasion oder Ablagerungen
	⇒ Blendenöffnung vergrößert/verkleinert, bzw. Formänderung	Korrosion, Abrasion oder Ablagerungen
	⇒ Verjüngung der Druckentnahmen/Wirkdruckleitungen	Ablagerungen (auch Vereisung) oder Partikel (Verringerung der Dynamik)
	⇒ Veränderung der Nachgiebigkeit der Drucksensormembranen bzw. Undichtigkeiten	Ablagerungen oder mechanische Beschädigung, bzw. Undichtigkeiten durch Risse oder Korrosion
	⇒ Betriebsbedingungen außerhalb der Spezifikationen	Durchfluss zu hoch/niedrig, Temperaturbereich überschritten, Einbaubedingungen nicht beachtet, etc.
	⇒ Gasblasen bzw. Partikel im Fluid	Temperaturüberschreitung, Sedimentablösung, etc.
	⇒ Gaseinschlüsse in den Wirkdruckzuleitungen	Fehlerhafter Einbau oder Gasbildung (Ausgasen, Kochen)
	⇒ Strömung gestört	Zu geringe Ein- und Auslauf-längen bzw. Ablagerungen oder Verschmutzungen
	⇒ Versorgungsspannung der Brücke außerhalb der Toleranz	Störung der Primärelektronik
	⇒ Anschlüsse der Wheatstonebrücke hochohmig	Korrosion oder mechanische Beschädigung
	⇒ Undichtigkeit in den Wirkdruckleitungen (evtl. mit Medienaustritt)	Korrosion oder mechanische Beschädigungen
⇒ Änderung der Übertragungseigenschaften der Primär- bzw. Sekundärelektronik	Alterung, Drift, Verlust von Kalibrierdaten, etc.	

Tabelle 4.2: Ursachen für den Fall, dass der Messwert unabhängig von der Messgröße ist.

Störung/Ausfall	Ursache	Erklärung
Messwert unabhängig von der Messgröße (Ausfall)	⇒ Verschluss der Druckentnahmen/Wirkdruckleitungen	Ablagerungen (auch Vereisung) oder Partikel (Verringerung der Dynamik)
	⇒ Zuleitung zum Messelement hochohmig bzw. kurzgeschlossen	Bonddraht gebrochen etc. oder leitfähige Verbindung der Zuleitungen
	⇒ Leiterbahnen auf Messelement bzw. Messwiderstände defekt	Korrosion der Leiterbahnen oder Alterung
	⇒ Messelement beschädigt bzw. gelöst	Bruch des Elements oder gelöste Klebeverbindung
	⇒ Elektronikstörung in Primär- oder Sekundärelektronik	Alterung etc.

Tabelle 4.3: Ursachen für den Fall, dass der Ausgang ein Nullsignal ist.

Störung/Ausfall	Ursache	Erklärung
Nullsignal (Ausfall)	⇒ Elektronikstörung in Primär- oder Sekundärelektronik	Alterung etc.
	⇒ Verschluss beider Wirkdruckleitungen	Ablagerungen, Partikeleinschluss
	⇒ Verstopfung der Messstrecke	Verlegung der Messblende

5 Möglichkeiten der Selbstüberwachung bei Wirkdrucksensoren

Basierend auf den spezifischen Störungsursachen für Wirkdrucksensoren werden im Folgenden konkrete Lösungsmöglichkeiten zur Selbstüberwachung von Wirkdrucksensoren abgeleitet.

5.1 Anforderungen an die Sensor-Selbstüberwachung

Wie in Abschnitt 3.3 gezeigt, besteht das Ziel der Selbstüberwachung von Sensoren in der Erhöhung der Verlässlichkeit. Der Sensor soll seinen Ist-Zustand analysieren, um das Auftreten von Störungen und Ausfällen erkennen und deren Ursachen benennen zu können. Dabei sollen so viele Störungsursachen wie möglich berücksichtigt werden. Ein Maß dafür kann der *Diagnosedeckungsgrad* DC (engl. *diagnostic coverage*) sein, der in [DIN EN 61508] Teil 4 als der Quotient der Wahrscheinlichkeit von erkannten gefahrbringenden Ausfällen λ_{DD} zur Wahrscheinlichkeit aller gefahrbringenden Ausfälle λ_{Dtotal}

$$DC = \frac{\sum \lambda_{DD}}{\sum \lambda_{Dtotal}} \quad (5.1.1)$$

definiert ist.

Der Diagnosedeckungsgrad bezieht nur die Erkennung einer Störung bzw. eines Ausfalls ein. Die Benennung steht daher in Widerspruch zu der Definition der (Selbst-)Diagnose aus Abschnitt 3.2 dieser Arbeit. Des Weiteren ist die Berechnung des Diagnosedeckungsgrads in [DIN EN 61508] detailliert beschrieben und anhand

von Beispielrechnungen dargestellt. Die dort zugrunde gelegten detaillierten Informationen in Form von Ausfallraten einzelner Bauteile (z.B. Widerstände, Speicherbausteine) können zu den in dieser Arbeit vorgestellten Experimentalaufbauten bzw. Konzepten nicht bereitgestellt werden. Generell ist die Angabe eines Diagnosedeckungsgrads unter Berücksichtigung der mechanischen Komponenten eine Herausforderung und bedarf großer Erfahrung mit den entsprechenden Produkten unter realen Betriebsbedingungen. Daher wird hier ein *Erkennungsgrad EG* eingeführt, der die Anzahl der erkennbaren Störungen und Ausfälle $n_{\text{erkennbar}}$ zu der Anzahl aller betrachteten Störungen oder Ausfällen n_{Gesamt} ins Verhältnis setzt:

$$EG = \frac{n(\text{Störungen} + \text{Ausfälle})_{\text{erkennbar}}}{n(\text{Störungen} + \text{Ausfälle})_{\text{Gesamt}}} \quad (5.1.2)$$

Im Gegensatz zum Diagnosedeckungsgrad werden hier die Auftrittswahrscheinlichkeiten der Störungen nicht betrachtet, da diese in hohem Maße von den Einsatzbedingungen abhängen. Des Weiteren wird die Entscheidung, ob es sich um einen gefährlichen oder einen ungefährlichen Ausfall handelt, umgangen. Nach [DIN EN 61508] liegt ein gefahrbringender Ausfall vor, wenn eine Funktion des Systems ausgefallen ist und die Sicherheitsintegrität des Gesamtsystems oder des Prozesses betroffen ist.

Wie für den Diagnosedeckungsgrad steht auch für die Meldung der eingetretenen Störungen und Ausfälle die Erkennung im Vordergrund. Hier sind in [VDI/VDE 2650] nur vier Statussignale vorgeschlagen, die noch weiterhin ergänzt werden können (Tab. 5.1).

Tabelle 5.1: Statussignale gemäß [VDI/VDE 2650] mit Beispielen aus [Diedri04].

Statussignale	Beispiele	
Ausfall	Feldgerät ist nicht mehr funktionsfähig	Messwert ist ungültig
Wartungsbedarf	Feldgerät noch funktionsfähig, Abnutzungsvorrat bald aufgebraucht	Messwert ist gültig
Funktionskontrolle	Am Feldgerät wird derzeit gearbeitet / wird überprüft	Messwert ist (vorübergehend) ungültig
Unsicher	Gerät arbeitet nicht im definierten Arbeitsbereich	Messwert ist unsicher

Diese Statussignale dienen dazu, die übermittelten Meldungen übersichtlich zu halten. Sie sollen weitgehend einheitlich, leicht interpretierbar und geeignet „sortiert“ sein [Diedri04].

Es werden also Möglichkeiten zur Selbstüberwachung gesucht, mit deren Hilfe ein hoher Erkennungsgrad realisiert werden kann und die eine Differenzierung des Sensorzustands nach *Intakt*, *Unsicher*, *Wartungsbedarf*, und *Ausfall* ermöglichen. Die Anzeige „Funktionskontrolle“ ist als Statussignal zu melden, wenn die Überwachung eine Unterbrechung der Messung erfordert oder eine Rekalibrierung vom Feldgerät durchgeführt wird.

Bezüglich der Meldungen an den Anwender bzw. das Prozessleitsystem ist also kein hoher Detaillierungsgrad der Störungsursache erforderlich, sondern vielmehr eine pauschale Information über die Einsatzfähigkeit des Gerätes [Stiele01]. Ein weiterer Grund liegt darin, den Anwender nicht mit zu viel Informationen zu überfrachten. Dabei können detailliertere Informationen, die auf Anfrage abgerufen werden können, für weitergehende Untersuchungen durchaus von Nutzen sein.

5.2 Lösungsansätze zur Selbstüberwachung von Wirkdrucksensoren

Zur Erreichung eines hohen Erkennungsgrades ist es notwendig, möglichst große Teile der Messkette bei der Überwachung einzuschließen. Dies gilt insbesondere für Durchflusssensoren, die durch das Messmedium teils rauen Umgebungsbedingungen ausgesetzt sind. Die Messkette eines Wirkdrucksensors mit piezoresistivem Differenzdrucksensor ist bereits in Abschnitt 4.3, Abbildung 4.12 dargestellt. Für eine Überwachung eines solchen Sensors sollen im Folgenden geeignete Möglichkeiten vorgestellt werden. Zur systematischen Lösungssuche bietet sich die Einteilung aus Abschnitt 3.5 mit den Verfahren *Redundanz*, *Referenz*, *Analyse des Messsignals*, *Analyse einer Störgröße* und *Zusatzsignale* an. Eine übersichtliche Darstellung der Lösungsmöglichkeiten findet sich in Abschnitt 5.3 in Abbildung 5.1.

5.2.1 Redundanz

Das erste Verfahren, für das konkrete Methoden gesucht werden, ist das Verfahren der Redundanz. Um möglichst alle Störungen detektieren zu können, liegt es nahe, den kompletten Durchflusssensor redundant auszuführen. Einer Zweifach-Anord-

nung des kompletten Wirkdrucksensors stehen die hohen Kosten, der hohe bleibende Druckverlust und die Nachteile einer homogenen Redundanz (Abschnitt 3.5.1) entgegen.

Betrachtet man nur die Funktionalität *Selbstüberwachung*, kann ein kombinierter redundanter Sensor eine günstige Lösung darstellen. Dabei können bestimmte Komponenten von mehreren Sensoren genutzt werden, so dass nicht alle Baugruppen mehrfach vorhanden sein müssen. Auf diese Weise ist ein kompakter integrierter und kostengünstiger, sich selbstüberwachender Sensor realisierbar. Weiterhin empfiehlt sich die Nutzung diversitärer, also verschiedenartiger Redundanz. Für die Wirkdruckmessung bietet sich eine Kombination mit dem Wirbelfrequenzverfahren an [Schäfe99]. An einem Staukörper zur Wirbelablösung wird die Fluidströmung durch den geringeren Strömungsquerschnitt beschleunigt, wodurch ein Wirkdruck über dem Staukörper messbar ist. Der Wirkdruck muss mit einem Differenzdrucksensor erfasst werden, der ebenfalls die kleinen Druckimpulse der sich ablösenden Wirbel aufnehmen kann. Die zusätzlichen Komponenten im Vergleich zu einem herkömmlichen Wirkdrucksensor reduzieren sich im wesentlichen auf elektronische Bauteile zur Detektion der Wirbelablösung und zum Vergleich der unabhängigen Messsignale. Es können auf diese Weise zwei unabhängige Messverfahren genutzt werden, obwohl man nur einen Drucksensor einsetzt.

Für die Wirkdruckmessung bietet sich ebenfalls der Einsatz eines redundanten Differenzdrucksensors an. Die Sensoren können dabei diversitär also nach verschiedenen Messprinzipien, z.B. piezoresistiv und kapazitiv, ausgeführt sein. Allerdings können bei einem solchen Aufbau Schäden an den mechanischen Bauteilen, wie eine durch Abrasion abgerundete Messblende, nicht erkannt werden. Da der Differenzdrucksensor den größten Kostenpunkt eines Wirkdrucksensors dargestellt, stehen einer solchen Lösung die relativ hohen zusätzlichen Kosten entgegen.

Kostengünstiger könnte Redundanz auf Chip-Ebene ausfallen. Dabei können statt eines elektromechanischen Wandlers im Primärsensor ein Array an Wandlern aufgebaut werden. Ein zusätzlicher Vorteil ist denkbar, wenn man die Wandler nicht nach dem gleichen Messprinzip ausführt und eventuell für verschiedene Messbereiche auslegt. Verfügen die Sensoren für die niedrigen Messbereiche über eine ausreichende Überlastfestigkeit, kann der Messbereich des Wirkdrucksensors deutlich erhöht werden. Die Druckbereiche müssen sich zur Selbstüberwachung allerdings in ausreichendem Maße überlappen. Eine Möglichkeit, verschiedene Empfindlichkeiten in einem Messelement zu nutzen, wird von der Firma *Aktiv-Sensor* zur An-

wendung in Kfz-Hydrauliksystemen vorgestellt [Tomasi02]. Dabei handelt es sich um einen piezoresistiven Differenzdrucksensor, dessen verdickte Plattenmitte ab einem Grenzdruck auf einem Widerlager aufsitzt und eine Durchbiegung bei weiterer Druckerhöhung nur noch in den Randbereichen der Platte stattfindet. Dadurch entsteht ein scharfer Übergang zwischen hoher Empfindlichkeit bei kleinen Drücken und niedriger Empfindlichkeit bei hohen Drücken. Der „Knick“ im quasi-statischen Übertragungsverhalten ermöglicht neben einer Messbereichserweiterung eine Rekalibrierung des Drucksensors, da der anliegende Druck an der Übergangsstelle bekannt ist. Eine Neukonstruktion des Differenzdrucksensors wäre, egal welches Messprinzip oder welcher Entwurf des Messelements gewählt wird, bei einem redundanten Aufbau des Messelements als Array notwendig. Diese Möglichkeit scheint in erster Linie für die Druckmesstechnik interessant. In dem hier vorliegenden Fall der Durchflussmessung bleiben die mechanischen Bauteile, die sich in der Messkette vor dem Messelement befinden, unberücksichtigt.

Prinzipiell könnte Redundanz bei allen Komponenten der Messkette Anwendung finden, soll jedoch in dieser Arbeit nur auf die hier genannten Beispiele beschränkt werden.

5.2.2 Referenz

Eine Referenzgröße kann, wie in Abschnitt 3.5.2 erwähnt, an jeder beliebigen Stelle der Messkette aufgeschaltet oder umgeschaltet werden. Dabei ist zu beachten, dass die Überwachung nur die Teile der Messkette mit einschließt, die sich hinter dem Punkt befinden, an dem die Referenzgröße aufgeschaltet bzw. auf diese umgeschaltet wird. Je später die Referenz in die Messkette eingebracht wird, um so weniger Komponenten werden überwacht. Des Weiteren kommt es auf die Anwendung an, ob auf die Referenzgröße umgeschaltet werden kann oder diese während des normalen Messvorgangs aufgeschaltet werden muss. Wird auf die Referenz umgeschaltet, misst man nur noch diesen genau bekannten Wert, d.h. die eigentliche Messgröße wird nicht zur Referenz hinzu addiert. Dadurch ist eine höhere Genauigkeit bei der Referenzmessung möglich, da keine „unbekannte“ Messgröße mit gemessen wird und es könnte eine Rekalibrierung zur Korrektur veränderter Geräteparameter durchgeführt werden. Der Nachteil besteht in der Unterbrechung der Messung. Der geforderte Arbeitsfrequenzbereich des Sensors entscheidet, ob eine Messunterbrechung akzeptabel ist, bzw. welche Zeitspanne eine Unterbrechung in Anspruch nehmen darf.

Da die Referenzgröße an einem möglichst eingangsnahen Punkt in die Messkette eingefügt werden soll, empfiehlt sich bei der Durchflussmessung eine Variation des Durchflusses. Bei einer Variation der Messgröße muss darauf geachtet werden, dass die Rückwirkung auf den Prozess klein bleibt. D.h. dass ein Durchfluss einlaufseitig hinzu gefügt oder abgezweigt wird und am Auslauf genau umgekehrt wieder subtrahiert oder addiert wird. Dabei sollten dem Prozess auch keine zu großen Pulsationen aufgezwungen werden. Es besteht die Möglichkeit, mit einer Pumpe einen Durchfluss zu erzeugen, der dann in gewissen Grenzen variiert werden kann. Auf eine hohe Genauigkeit des gepumpten Volumens ist zu achten, wodurch zum Beispiel einfache Kolben oder Membrane interessant sind, die im Grunde Pulsationen mit geringer Frequenz und großer Amplitude im Durchflusssensor erzeugen.

Eine passive Lösung stellt ein Bypass dar, der nur durch Ventile geöffnet und geschlossen werden kann. Dadurch kann vom Durchfluss ein prozentualer Anteil abgezweigt werden. Eine solche Lösung würde also keinen konstanten Referenzwert dem Durchfluss aufaddieren, sondern nur um einen prozentualen Anteil variieren. Der konstruktive Aufwand fällt bei einer solchen Lösung mit Bypass im Vergleich zu der Variante mit Pumpe gering aus.

Ebenfalls eine Möglichkeit eine Referenz an einer vorderen Stelle in die Messkette einzufügen ist die Variation der Drosselstelle. Dabei wird Einfluss auf die Wandlung der Durchflussgeschwindigkeit in den Wirkdruck genommen. Für Blenden wäre zum Beispiel eine Irisblende vorstellbar, die ihren Innenradius variieren kann. Neben der Überwachungsfunktion kann auch eine deutliche Erhöhung der Messspanne bzw. auch eine Verringerung des bleibenden Druckverlusts erfolgen. Den Nachteil des anfälligen mechanischen Aufbaus einer Irisblende kann man mit einer verschiebbaren Segmentblende begegnen, wie sie bei Anwendungen mit Partikeln oder Gasblasen im Fluid empfohlen wird (z.B. [Miller89], [VDI/VDE 2041]).

Eine sehr einfache Möglichkeit der Erzeugung einer Art Referenz ist die automatisierte Öffnung des Equal-Hahns der Ventilbatterie (siehe Abb. 4.13). Hierdurch kommt es zum Kurzschließen der Wirkdruckleitungen und somit zum Gleichschalten der Hoch- und Niederdruckseite des Drucksensors. Dabei kann neben der Überwachungsfunktion auch ein Nullabgleich des Drucksensors stattfinden. Hierbei handelt es sich aber um ein Umschalten, da eine kontinuierliche Messung unter Kurzschluß der Wirkdruckleitungen nicht möglich ist.

Ebenfalls druckseitig, aber erst innerhalb des Drucksensorgehäuses, kann wie im Kapitel 2 vorgestellt eine Referenz des Drucks mit einem kleinen Aktor erzeugt wer-

den. Erfolg versprechender wäre eine Anordnung, bei der der Aktor zwischen Hoch- und Niederdruckseite sitzt, um den Effekt zu verstärken. Es ist jedoch nur eine frequente Anregung denkbar, da ansonsten stets ein Druckausgleich durch die Trennmembranen stattfinden dürfte.

Eine weitere Möglichkeit ist die Einkopplung einer Kraft auf die Druckmessplatte, wodurch diese ausgelenkt werden kann. Die Kraft hat also die gleiche Wirkung wie der anliegende Druck und überlagert diesen. Die Erzeugung der Kraft ist bei einem Differenzdrucksensor elektrostatisch denkbar. Dafür müssten auf dem Silizium-Messelement ausreichend große Flächen metallisiert und kontaktiert und eine Gegenelektrode vorgesehen werden [Cozma97]. Hier ist auch eine quasistatische Anregung denkbar, wobei die Krafterzeugung nur in eine Richtung möglich ist und sich zu dem Abstand der Elektroden quadratisch verhält.

Eine sehr einfache Möglichkeit, auf ein elektrisches Signal der Messkette Einfluss zu nehmen, kann eine Variation der Versorgungsspannung bzw. des Versorgungsstroms der Wheatstone-Brücke sein. Die Versorgungsspannung bzw. der Strom geht linear in die Brückendifferenzspannung mit ein und kann somit zur Einbringung einer relativen Referenz genutzt werden. Auch hier schließt die Überwachung die Messkette erst ab den eindotierten piezoresistiven Widerständen ein.

5.2.3 Analyse des Messsignals

Zur Analyse des Messsignals sind häufig nur Anpassungen auf Seiten der Signalverarbeitung notwendig. Daher bietet sich dieses Verfahren aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten zur Selbstüberwachung an.

Bei dem Wirkdruckverfahren wird der Differenzdruck, erzeugt durch eine Geschwindigkeitsdifferenz im Fluid, aufgenommen. Dabei führt Strömungsrauschen zu im Normalfall unerwünschten höherfrequenten Anteilen im Differenzdruck. Diese Anteile werden zum Beispiel von Pumpenpulsationen, Wirbelbildung an Rohreinbauten oder durch Anlagenschwingungen hervorgerufen und können zusätzliche Messabweichungen bei der Bestimmung des Durchflusses verursachen. Durch akustische und elektrische Tiefpässe können diese Einflüsse unterdrückt werden. Verzichtet man auf die Tiefpassfilterung und wertet die höherfrequenten Anteile aus, so kann man daraus leicht erkennen, ob es zum Beispiel zu einer Blockade der Wirkdruckleitungen oder zu Änderungen im Prozess gekommen ist [Amadi94-1] [Amadi94-2] [Zhu94-2]. Des Weiteren kann eine Erhöhung des

Rauschpegels ein Hinweis auf Gasblasen oder Partikel im Fluid sein. Auf diese Weise ist auch eine Überwachung des Prozesses möglich.

Auch die Überwachung von Grenzwerten und Trends gehört zu dieser Rubrik. Diese können prinzipiell an jeder Stelle der Messkette überwacht werden. Am sinnvollsten und am leichtesten lässt sich eine solche Überwachung in der Sekundärelektronik durchführen. Dabei können die Alarmschwellen auch vom Anwender individuell eingestellt werden. Eine Unterscheidung zwischen Überschreitung des Messbereichs und zu hoher Messabweichung aufgrund einer Störung ist dabei allerdings nur unter Voraussetzung näheren Prozesswissens möglich.

5.2.4 Analyse einer Störgröße

Das Verfahren der Analyse einer Störgröße findet, wie in Kapitel 2 zum Stand der Technik schon angemerkt, selten Anwendung. Auch für das Wirkdruckverfahren unter Verwendung eines piezoresistiven Drucksensors sind nur wenige Erfolg versprechende Ansätze denkbar. In Frage kommende Störgrößen sind die Temperatur und Vibrationen der Anlage. Beide sind abhängig von den Umgebungsbedingungen. Befindet sich der Sensor an einem vibrationsgedämpften oder klimatisierten Ort, ist diese Art der Überwachung nicht ohne weiteres möglich. Es besteht in diesem Fall jedoch die Möglichkeit eine Störgröße aktiv einzuleiten, z.B. durch einen Heizwiderstand, der die Temperatur des Füllmediums variiert.

Es kann mittels einer Erfassung des Gesamtwiderstandes der Messbrücke auf dem Silizium-Druckmeselement die Temperatur berechnet werden und mit einer separaten Messung eines Temperatursensors verglichen werden. Neben der Überwachung des korrekten Temperaturverhaltens der eindotierten, piezoresistiven Widerstände wird dabei ebenfalls die Kontaktierung des Messelements kontrolliert.

Ebenfalls zur Überwachung herangezogen werden kann der indirekte Einfluss der Temperatur auf die Viskosität und die Dichte des Fluids. Die Viskositätsänderung dürfte nur für sehr niedrige Reynoldszahlen interessant sein. Rechnerisch hat die Viskosität einen Einfluss auf den Durchflusskoeffizienten $C(Re)$, der allerdings hauptsächlich im laminaren Störungsbereich wirksam wird [Schäfe99]. Die Dichte geht direkt in die Berechnungsformel des Durchflusses mit ein. Für den hier vorliegenden Einsatzfall für Wasser ist dieser Einfluss jedoch relativ gering, da die Dichteabhängigkeit von der Temperatur nur etwa $0,05 \% K^{-1}$ beträgt. Nachteilig ist auch

die sehr geringe Änderungsgeschwindigkeit der Temperatur im Vergleich zum Durchfluss.

Beschleunigungen werden aufgrund der Massenträgheit des Füllmediums wie eine Druckdifferenz gemessen. Im Normalfall sollten die Vibrationen soweit gedämpft werden, dass sie keinen Einfluss auf die niederfrequente Durchflussmessung haben. Treten Vibrationen in Frequenzbereichen auf, die für die Durchflussmessung uninteressant sind, können diese zur Selbstüberwachung genutzt werden. Mittels eines zusätzlichen Beschleunigungssensors können die Vibrationen aufgenommen werden und ein adaptives Filter den betreffenden Frequenzbereich aus dem Differenzdrucksignal herausfiltern. Die Amplitude sollte in einem direkten Verhältnis zur Amplitude der Vibrationen, gemessen durch den Beschleunigungssensor, und dem Übertragungsverhalten des Differenzdrucksensors stehen.

5.2.5 Analyse von Zusatzsignalen oder Zusatzgrößen

Durch das Aufnehmen bzw. die Analyse bestimmter Zusatzgrößen, die zur Messsignalerfassung nicht benötigt werden, kann das Auftreten spezieller Störungen und Ausfälle einzelner Komponenten überwacht werden.

Eine gängige Methode aus der Überwachung elektronischer Bauteile ist die Kontrolle des Versorgungsstroms [Weiler01] [Damm98]. Dies lässt sich auch bei der Wheatstone-Brücke des Silizium-Messelements einsetzen. Kommt es auf der Wheatstone-Brücke zu einer Unterbrechung oder einem Kurzschluss, wird sich der Versorgungsstrom, im Falle einer konstanten Versorgungsspannung, verändern.

Noch umfassender, aber auch deutlich aufwändiger, ist eine komplette Überwachung der piezoresistiven Brückenwiderstände. Die Brücke ist über vier bzw. im Falle einer offenen Brücke über fünf Kontakte zugänglich. Über diese Kontakte können die Widerstände und Zuleitungen überwacht werden. Tritt eine Störung auf, wie zum Beispiel der Bruch einer Bondverbindung, bietet sich die Möglichkeit, die Vollbrücke zur Halbbrücke zu schalten und mit nicht druckempfindlichen „Ersatzwiderständen“ zu ergänzen. Durch die dadurch realisierbare Rekonfiguration ist eine Druckmessung weiterhin möglich, wenn auch nur mit halber Empfindlichkeit. Allerdings wird mit dieser Wheatstone-Brücken-Überwachung nur eine Überwachung des Silizium-Messelements innerhalb der Messkette realisiert.

Zusatzsignale können auch mit Hilfe zusätzlicher Sensoren aufgenommen werden, um spezielle Störungen im Wirkdrucksensor zu überwachen. Denkbar wäre

eine elektrisch isolierte Blende in einem leitfähigen Fluid in Verbindung mit einer Elektrode im Messrohr. Kommt es zwischen Elektrode und Blende zu einer leitfähigen Verbindung, liegt eine mechanische Beschädigung der Messblende vor, z.B. durch Abrasion.

5.3 Auswahl der zu untersuchenden Selbstüberwachungsmöglichkeiten

Alle hier angesprochenen Möglichkeiten zur Selbstüberwachung sind nochmals in Abbildung 5.1 zusammengestellt. Eine Auswahl wurde aufgrund der gleich gewichteten Kriterien

- Erfolgsaussichten,
- hoher zu erwartender Erkennungsgrad,
- schon vorhandenem Wissen am Institut,
- notwendiger Fertigungstechnologien und
- Potenzial zur Rekonfiguration

getroffen. Dabei fiel die Wahl auf die drei Möglichkeiten

- Vereinigung von Wirbelzählverfahren mit der Wirkdruckmessung,
- Referenzerzeugung eines Durchflusses mittels Bypass und
- Überwachung der Brückenwiderstände.

Dabei handelt es sich um Möglichkeiten, welche die Verfahren *Redundanz*, *Referenz* und *Analyse von Zusatzgrößen /-signalen* nutzen. Die Verfahren *Analyse des Messsignals* und *Analyse einer Störgröße* werden hier nicht berücksichtigt. Im Falle von Querempfindlichkeiten - Störgrößenanalyse - wurde in Abschnitt 5.2 bereits dargestellt, dass die Realisierungschancen im Falle der Wirkdruckmessung zu gering sind. Die Analyse des Messsignals verspricht im Falle der Erfassung der höherfrequenten Anteile im Differenzdrucksignal durchaus Erfolg. Diese Möglichkeit wurde allerdings in Forschungsarbeiten bereits umfassend behandelt [Amadi94-2], wobei bezüglich des Durchflusssensors hier nur eine Verstopfung der Wirkdruckzuleitungen erfasst wurde. Die Erkennung dieser Störungsursache sollte beispielsweise mit der ausgewählten Zusammenführung des Wirbelzählverfahrens und der Wirk-

5.3 Auswahl der zu untersuchenden Selbstüberwachungsmöglichkeiten

druckmessung ebenso leicht erfassbar sein, da hier ebenfalls die höher frequenten Anteile im Wirkdrucksignal ausgewertet werden.

Inwieweit die drei ausgewählten Möglichkeiten tatsächlich realisierbar sind, soll in Kapitel 7 erörtert werden.

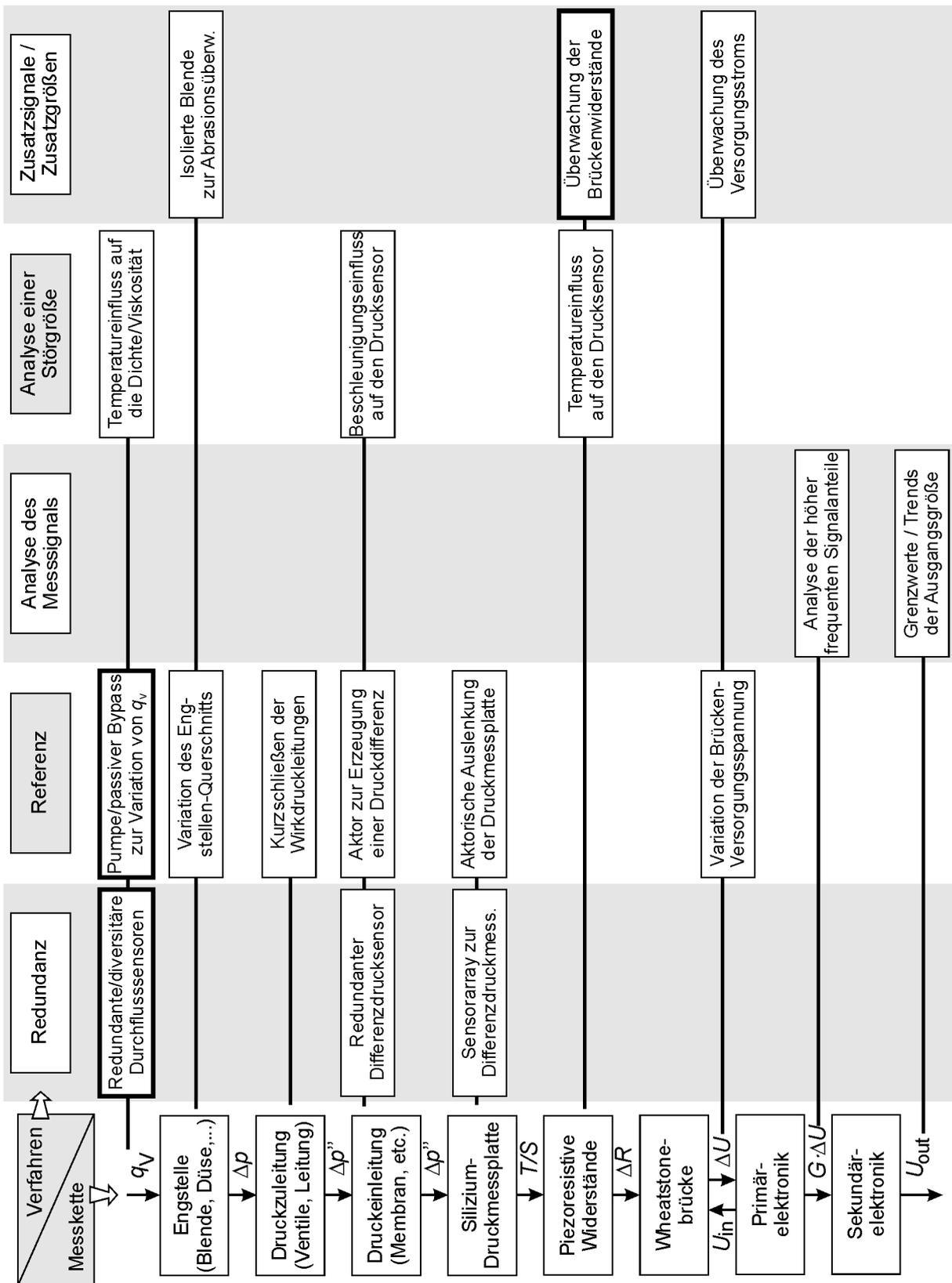


Abbildung 5.1: Möglichkeiten zur Selbstüberwachung von Wirkdruckensoren mit piezoresistivem Differenzdrucksensor (Ausgewählte Möglichkeiten fett umrandet).

6 Durchflussmessplatz und Simulation der Störungen

Die experimentellen Untersuchungen werden an einem am Institut vorhandenen Durchflussmessstand, der an die Besonderheiten der vorgesehenen Messprogramme angepasst werden musste, durchgeführt. In Abschnitt 6.1 soll dieser an die Erfordernisse angepasste Durchflussmessstand vorgestellt werden. Anschließend werden die Messabweichungen des Messstands hergeleitet (Abschnitt 6.2).

Wie in Abschnitt 4.3 erörtert, liegen die Ursachen der wichtigsten Störungen von Wirkdruck-Durchflusssensoren im fluidischen Teil des Sensors. Zur Durchführung von realitätsnahen Messungen unter diesen Bedingungen müssen die Störungsursachen künstlich erzeugt werden. Die hierzu erforderlichen Überlegungen und Untersuchungen werden in Abschnitt 6.3 dargestellt.

6.1 Messplatz zur Durchflussmessung

Der am Institut für Elektromechanische Konstruktionen vorhandene mobile Messplatz zur Durchflussmessung von Flüssigkeiten wurde von SCHÄFER [Schäfe99] im Rahmen seiner Dissertation aufgebaut. Als Anforderungen wurden neben dem Messmedium Wasser (deionisiert)

- ein Durchflussbereich von 10 - 1000 l/h,
- eine Messabweichung von kleiner 0,2 % v.M.,
- die Nennweite DN 15,
- automatisierte Messabläufe (Durchflussregelung, Messwertaufnahme) und
- eine Regelbarkeit der Temperatur im Bereich von 20 - 80 °C

festgehalten.

Der Messplatz verfügt über verschiedene Kalibriermöglichkeiten für Durchflusssensoren. Als hochgenaue Variante ist das *gravimetrische Verfahren* als Primärnormal realisiert. Dabei wird jeweils ein konstanter Durchfluss eingestellt. Eine hydraulische Umschalteinheit - *Diverter* - leitet den Volumenfluss für ein genau gemessenes Zeitintervall in einen Behälter, dessen Gewicht von einer Waage erfasst wird (Zeitintervall für 200 l/h < 9 min). Zur Verringerung der Messunsicherheit wird dabei eine statische Messung des Gewichts nach Abklingen von Wellenbewegungen durchgeführt. Aus der gemessenen Masse und den Schaltzeiten des *Diverter*s kann unter Berücksichtigung der temperaturabhängigen Dichte des Mediums der Volumenfluss berechnet werden. Nach Bestimmung der Masse muss der Behälter der Waage wieder abgepumpt werden, weshalb diese Messmethode nicht automatisiert abläuft.

Da das gravimetrische Verfahren einen hohen Zeitaufwand erfordert, umfasst der Messstand ebenfalls ein *Sekundärnormal* - einen Magnetisch-Induktiven-Durchflusssensor (BAILEY, FISCHER & PORTER COPA-XM) als Referenzsensor. Dabei wird eine ausreichende Leitfähigkeit ($> 5 \mu\text{S/cm}$) des Messmediums vorausgesetzt. Dies ist gewöhnlich auch der Fall, muss allerdings nach einer Neubefüllung des Messstands mit deionisiertem Wasser kontrolliert werden. Mit Messungen kann erst begonnen werden, wenn sich genügend Ionen aus den metallischen Rohren des Messstands gelöst haben. Alle unter Kapitel 7 präsentierten Messung beziehen sich auf diesen Sekundärstandard.

Auch zur Erzeugung des Durchflusses bestehen mit der Nutzung eines Hochbehälters und einer Kreiselpumpe zwei Möglichkeiten. Aus dem Hochbehälter fließt aufgrund des hydrostatischen Drucks ein konstanter Durchfluss ab. Dabei sind Durchflussraten bis maximal 250 l/h realisierbar. Für höhere Durchflüsse bis 1000 l/h kann direkt mit der Pumpe auf die Messstrecke gefördert werden. Der Durchfluss kann dabei mit Hilfe des MID geregelt werden. Abbildung 6.1 zeigt die Struktur des Messstands ohne das gravimetrische Verfahren.

Durch Aufheizen über Heizwendeln lässt sich das Wasser temperieren, um Temperatur- und vor allem Dichteinflüsse des Messmediums auf die Messung erfassen zu können. Auch dynamische Einflüsse von Pulsationen lassen sich mit Hilfe einer Pulsationsquelle untersuchen. Dabei handelt es sich um einen elektrodynamischen Aktor, der über zwei Faltenbälge Pulsationen in die Messstrecke einleiten kann. Die

Amplitude der Pulsationen ist bis zu einer Frequenz von 50 Hz mit 50 l/h möglich. Für höher frequente Pulsationen nimmt die erzeugbare Amplitude proportional zu $1/f$ ab. Bei höheren Frequenzen treten zunehmend mechanische Resonanzen des Gesamtaufbaus auf, die beachtet werden müssen.

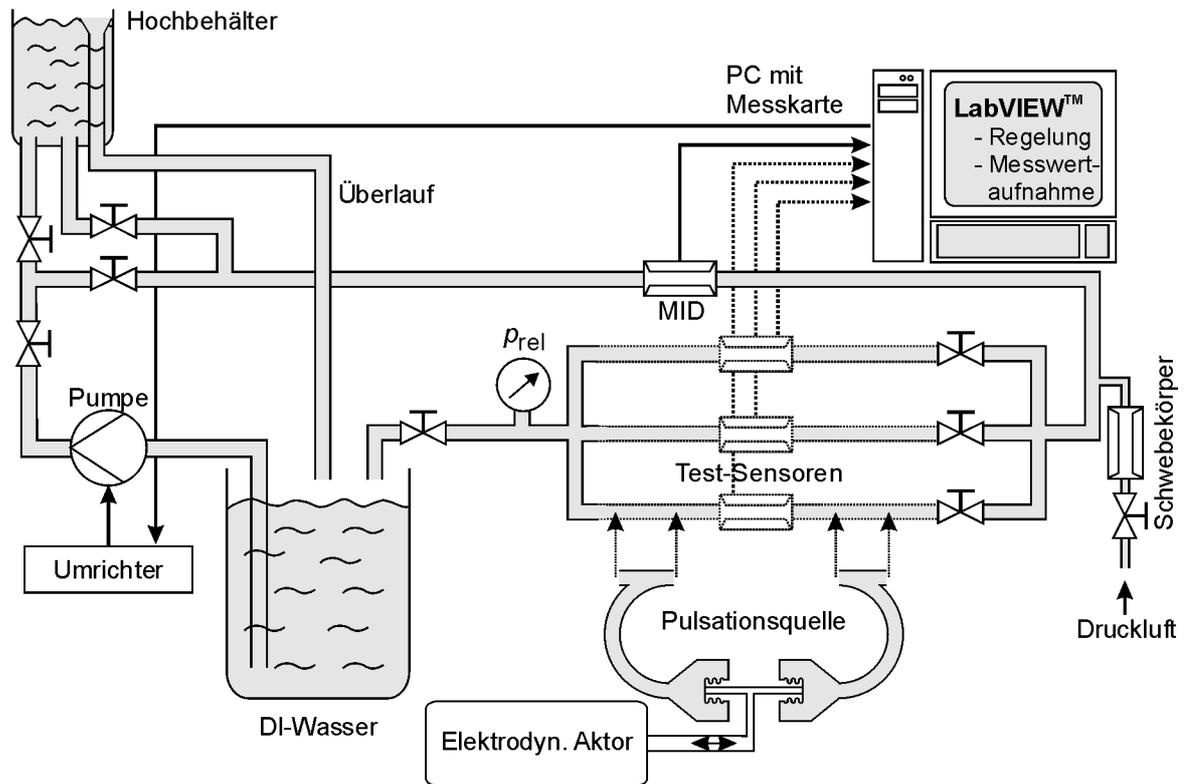


Abbildung 6.1: Struktur des Messplatzes zur Durchflussmessung.
Darstellung des Sekundärnormals mit MID

Zur Untersuchung von Gasblasen, die der Flüssigkeit zugesetzt werden, ist der Messplatz mit einem Schwebekörper-Durchflusssensor versehen, der das eingeleitete Druckluftvolumen erfasst. Die Einleitungsstelle der Druckluft befindet sich nach dem Referenzsensor. Ansonsten würde dieser mit stark verminderter Genauigkeit messen. Durch die Einleitung von Luft in den Fluidstrom kommt es bei den Messungen zu einer Abweichung zwischen Referenz- und Testsensoren, da zu dem Volumenstrom des MID noch das Gasvolumen hinzu kommt. Zu beachten ist ebenfalls, dass der statische Druck an der Einleitung nicht dem entspricht, der am Test-Sensor anliegt. Das Gasvolumen wird sich also von der Einleitung bis zum Ort des Test-Sensors ausdehnen. Das Gesetz von BOYLE-MARIOTTE (6.1.1)

$$p \cdot V = \text{const} \quad (6.1.1)$$

besagt, dass das Produkt von Druck und Volumen eines idealen Gases konstant ist. Die Abweichung bei der Gas-Volumenflussmessung ist jedoch erst bei hohen Durchflussraten zu beachten. Legt man einen statischen Druck an der Stelle der Gas-Einleitung von 200 hPa zugrunde, beträgt die Abweichung des Gasvolumens bei 450 l/h 1,5 % und liegt deutlich unter der Ablesegenauigkeit des Schwebekörpersensors. Bei 900 l/h steigt die Abweichung auf knapp 5 %.

Die Durchfluss-Regelung des Messplatzes ist zusammen mit der Messwerterfassung auf einem PC realisiert. Der PC ist mit einer Multifunktionskarte von INTELLIGENT INSTRUMENTATION PCI-20428W-1 ausgestattet. Diese Messkarte besitzt je 8 digitale Ein-/ Ausgänge, 16 analoge Ein- und 2 analoge Ausgänge mit 12-Bit Auflösung und sichert Messungen bis 100 kHz. Die Regelung des Messstands, Datenerfassung und Visualisierung ist in der Software NATIONAL INSTRUMENTS LABVIEW 6.1 programmiert. Dadurch sind Messabläufe sehr flexibel anpassbar. Ein typischer Verlauf einer Messung ist in Abbildung 6.2 zu sehen. Dabei sind die Anzahl der Messpunkte und die Anzahl der Umläufe frei wählbar. Die Regelung des Messablaufs ist im Messprogramm integriert und arbeitet mit wechselnder Abtastrate. Die Abtastrate ist abhängig von den Operationen, die zur Visualisierung oder Bearbeitung der Messwerte notwendig sind. Die Dynamik und die Regelabweichung sind dennoch ausreichend, zumal alle Messwerte stets zum Referenzwert des MID ins Verhältnis gesetzt werden.

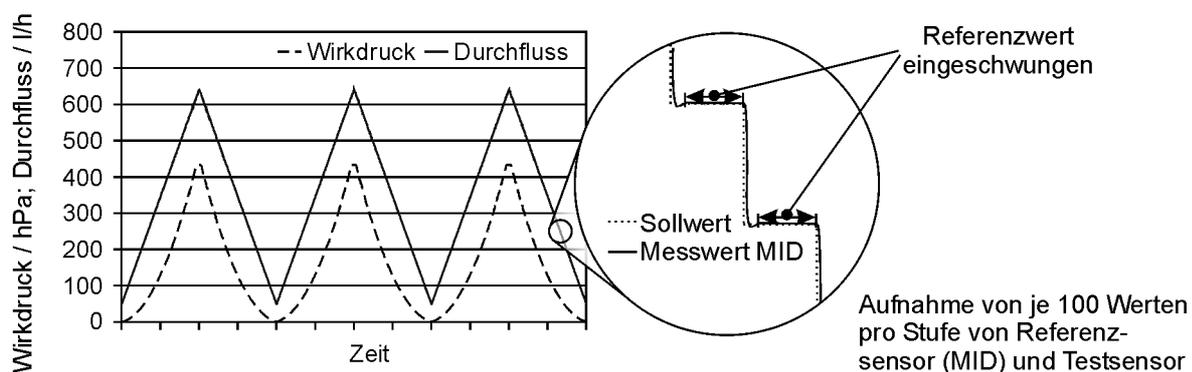


Abbildung 6.2: Typischer Messablauf.
Frei wählbare Anzahl der Stufen und Messumläufe

6.2 Messabweichungen des Durchflussmessplatzes

Die Genauigkeit des Durchflussmessplatzes ist von der Art der Messwerterfassung abhängig. Die Messabweichungen der gravimetrischen Methode sind in der Arbeit von SCHÄFER [SCHÄFE99] beschrieben. Nach seinen Berechnungen kommt es unter Anwendung der möglichen Korrekturen bei der gravimetrischen Messung zu folgenden maximalen Gesamtabweichungen:

systematisch:	< 0,08 % v.M.
zufällig	< 0,07 % v.M.

Die größten Einflüsse weisen dabei die Bestimmung der Temperatur, die entscheidend für die bei der gravimetrischen Methode notwendige Dichtebestimmung ist, und eine leichte Unsymmetrie bei der Umschaltung des Diverters auf.

Im normalen Messablauf wird die hochgenaue gravimetrische Methode zur Kalibrierung des Sekundärstandards (MID) genutzt. Die Versuche mit den zu vermessenden Testsensoren selbst werden dann mit dem Referenzsensor durchgeführt, da hier die Messabläufe deutlich schneller und vor allem vollautomatisiert durchgeführt werden können.

Die Messkette der Durchflussmessung nach dem Sekundärstandard mit dem MID-Referenzsensor ist in Abbildung 6.3 dargestellt. Der MID erfasst den Durchfluss. Die Ausgabe erfolgt über die analoge Schnittstelle (0-20 mA - Schnittstelle).

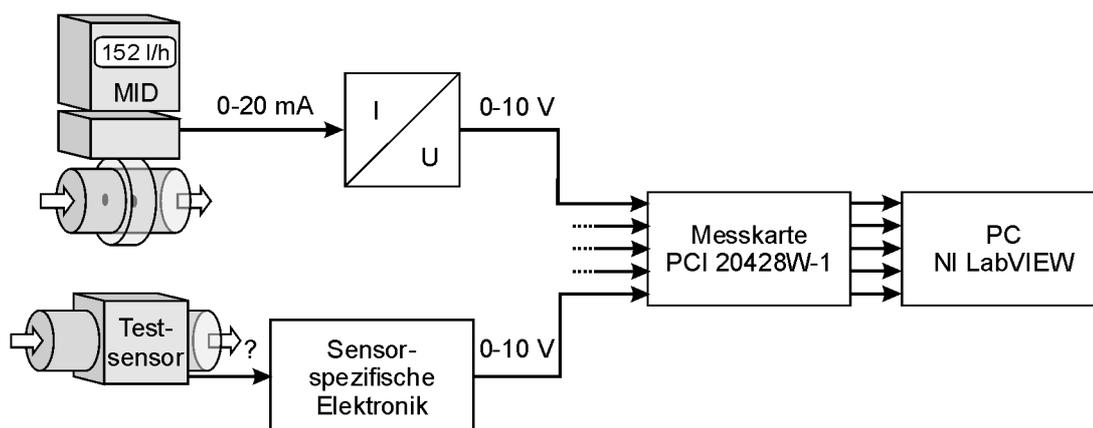


Abbildung 6.3: Signalverarbeitungsstruktur des Durchflussmessstands.
Die Elektronik des Testensors gehört, wie der Testsensor selbst, nicht zum Messplatz

Ein I/U-Wandler wandelt den Strom in eine Spannung, die über die Messkarte im PC digitalisiert und eingelesen wird. Die in Abbildung 6.3 ebenfalls dargestellte Elektronik des Testsensors gehört nicht zum Messplatz. Allerdings muss die Messabweichung der Messkarte für den MID und den Testsensor berücksichtigt werden.

Der MID besitzt eine maximale Messabweichung von 0,4 % v.M. Der Analogausgang des MID hat eine weitere Abweichung von $\pm 0,1$ % v.M. Die PCI-20425W-1 Messkarte hat eine von dem eingestellten Messbereich und der gewählten Verstärkung abhängige Abweichung. Der Verstärkungsfehler beträgt unter den hier gewählten Einstellungen maximal 0,02 %, der Linearitätsfehler $\pm 0,024$ % v.E. (entspricht ± 1 LSB). Das Rauschen liegt bei maximal $\frac{1}{2}$ LSB. Bei MID und Messkarte wird vorausgesetzt, dass die notwendigen Kalibrierungen durchgeführt wurden.

Bei dem Strom-Spannungswandler handelt es sich um einen Eigenbau. Bei Messungen wird für den Strom-Spannungswandler ein Linearitätsfehler von 0,2 % v.M. analysiert.

Die Messabweichung des Messstands lässt sich mit Hilfe der Beiträge der Komponenten zu

$$0,72 \text{ \% v.M.}$$

berechnen (siehe Anhang A2, Seite 166). Die Messabweichung des Messplatzes kann bei Nutzung des Impulsausgangs des MID auf 0,56 % v.M. reduziert werden, weshalb dies für zukünftige Projekte empfohlen wird.

6.3 Versuchsvorbereitung

Zur Überprüfung der Detektierbarkeit von Störungen und Ausfällen werden neben den in Abschnitt 4.3 aufgezeigten Störungsursachen bei Wirkdruckensoren auch spezielle Störungs- und Ausfallsursachen für Wirbelzähler aus dem Ergebnisbericht des GMA-Fachausschusses 6.21 [GMA-FA 6.21] herangezogen. Kriterien zur Auswahl sind neben Auftrittswahrscheinlichkeit und Auswirkung auch die Realisierbarkeit in Tests. So wird zum Beispiel auf Ablagerungen an den Drucksensormembranen aufgrund der Gefahr der Zerstörung des Drucksensors und der relativ einfachen Abschätzbarkeit der Auswirkungen verzichtet. Auch Elektronikstörungen oder Ausfälle des Messelements finden hier keine Beachtung. Die in Messungen simulierten Ursachen sind

- Abrasion der Messstrecke,
- Ablagerungen in der Messstrecke,
- Ablagerungen in den Druckzuleitungen (kompletter und teilweiser Verschluss),
- Gaseinschlüsse in den Druckzuleitungen,
- Gasblasen im Fluid und
- Pulsationen.

Wie diese Störungsursachen zu Versuchszwecken in die Messstrecken eingebracht werden, wird im Folgenden kurz erläutert.

Abrasion

Abrasion und Erosion werden meist durch im Fluid mitgetragene Feststoffpartikel hervorgerufen. Diese wirken beim Auftreffen auf die Rohrwand oder auf Einbauten oberflächenverändernd, z.B. furchend oder zerspanend. Einflussgrößen sind Partikelgröße, -form, Abrasivstoff, Auftreffwinkel und -geschwindigkeit. Durch Wirbelbildung kann sich die Geschwindigkeit deutlich erhöhen, so dass sich Verwirbelungen negativ auf das Verschleißverhalten auswirken. Partikel treten in der Regel auch in technisch reinen Flüssigkeiten auf. Es kann sich dabei um Sand oder Salze handeln, aber auch um aus dem Prozessaufbau selbst stammende Stoffe, die sich durch Korrosion oder Ablagerungen etc. in der Anlage ablösen. Ebenfalls kann Kavitation zum Materialabtrag führen. In Prozessen tritt Kavitation häufig an Pumpen auf, aber auch an Staukörpern kann es zur Bildung von Gas- bzw. Dampfbläschen kommen, die sogleich wieder implodieren. Auch Korrosion führt zu Erosionen im Material. Meist wird dieser Effekt durch die Strömung noch begünstigt, da Material freigelegt werden kann [Uetz86]. Hier soll die Abrasion durch mitgeführte Feststoffpartikel im Vordergrund stehen. Nach Versuchen mit direkt eingefügten mechanischen Veränderungen der Kante einer Messblende, in Wasser mitgetragenen Abrasivstoffen und Luftstrom mit Feststoffen (Sandstrahlen), zeigt sich das Sandstrahlen als am Besten geeignet. Da es in Flüssigkeits- wie Gasströmungen zu ähnlichen Effekten kommt, wird auf diese Weise eine realitätsnahe Abrasion nachgebildet.

Ablagerungen

Auch für Ablagerungen können verschiedene Ursachen verantwortlich sein [VDI-Wärme]. Durch Vereisung des Fluids, Korrosion, chemische Reaktionen oder Ablagerungen

gerung schwer löslicher Salze, z.B. Kalk (Calciumcarbonat CaCO_3), können sich Beläge bilden. In vielen Anwendungen kann es auch zu Ablagerung von Schlämmen oder biologischem Wachstum (z.B. Algen) kommen. Diese können auch an anderen Stellen des Prozesses gebildet und mit der Fluidströmung verteilt werden. Staub und Schmutz kann bei Gasanwendungen im Messmedium mitgetragen werden und sich im System absetzen. Für den hier vorliegenden Anwendungsfall soll die Ablagerung von Salzen als vorrangig angesehen werden. Generell werden sich Ablagerungen vorzugsweise in Gebieten geringer Strömungsgeschwindigkeiten bilden bzw. an Stellen an denen Wärme ins Fluid eingebracht wird [Schmid90].

Da die Messstrecke durch die Ablagerungen nicht zerstört werden soll, muss auch eine rückstandslose, zerstörungsfreie Entfernung gewährleistet sein. In Versuchen werden Messungen mit selbstklebender Folie, Wachs und Lack (Füller zur Kfz-Lackiervorbereitung) durchgeführt. Die Folie, die auf die Innenseite der Rohrwandung und gegebenenfalls auf den Staukörper aufgebracht wird, bildet eine Ablagerung konstanter Dicke mit sehr guter Reproduzierbarkeit. Wachs wird mittels eines heißen Luftstroms geschmolzen und durch die Messstrecke geblasen. Auch der Füller wird mittels eines zusätzlichen Luftstroms als Strömung in die Messstrecke geblasen.

Die Folie ist bei einer demontierbaren Messstrecke unkompliziert aufzubringen und bietet den Vorteil vorhersagbarer Ablagerungsdicken. Allerdings ist eine konstante Ablagerungsdicke nicht realitätsnah. Das eingebrachte Wachs zeigt in seinem Ablagerungsverhalten den Einfluss der Luftströmung. Allerdings gelangt aufgrund der geringen Fluidgeschwindigkeit in Randbereichen der Wachs nicht in die Ecken eines rechteckigen Querschnitts oder in Hinterschneidungen. Die besten Ergebnisse sind mit Füller erzielbar, da hier eine komplette Benetzung der Messstrecke erfolgt und gleichzeitig der Einfluss der Strömung sehr deutlich zu erkennen ist.

Verschluss der Druckzuleitungen

Die gleichen Ursachen wie bei Ablagerungen in der Messstrecke sind auch verantwortlich für Verschlüsse der Druckzuleitungen, da dort nur minimale Fluidbewegungen stattfinden. Für die Versuche werden die Durchmesser der Druckzuleitungen durch das Einschrauben von Schrauben bzw. das Anbringen von Klemmen an den PE-Zuleitungen eingeschränkt. So kann der Effekt des teilweisen und kompletten Verschlusses der Druckzuleitungen reproduzierbar simuliert werden.

Gaseinschlüsse in den Impulsleitungen

In den Zuleitungen zum Drucksensor können sich Gasblasen bilden. Ursachen können unzureichende Entlüftung der Zuleitungen, mitgetragene Gasblasen, die in die Druckzuleitungen gespült werden, oder Ausgasen gelöster Gase aus dem Fluid sein. Dadurch kommt es zu veränderten Übertragungseigenschaften und bei Montage des Drucksensors oberhalb der Messstrecke zu einer Änderung des hydrostatischen Drucks, der sich vor allem bei niedrigen Durchflussraten auswirkt. Das Volumen der Gasblasen ist dabei abhängig vom statischen Druck und der Strömungsgeschwindigkeit, was einer definierten, reproduzierbaren Simulation entgegen steht.

Gasblasen im Fluid

Gasblasen, die im Fluid mitgeführt werden, erzeugen Schwankungen im Differenzdrucksignal und können die Wirbelbildung stören. Auch die Dichte des Fluids ändert sich mit zunehmendem Gasanteil. Gründe können auch hier Ausgasen gelöster Gase oder Kavitation sein, aber auch im Prozess begründet liegen, so dass es zu Gasblasen im Fluid und eventuell teilgefüllten Rohren kommt. Für die Versuche wird Druckluft in die Messstrecke eingeleitet. Der Volumenanteil wird mit einem Schwebekörper-Durchflusssensor erfasst (siehe Abschnitt 6.1).

Pulsationen

Vor allem in Zusammenhang mit dem Wirbelzählverfahren werden Pulsationen, verursacht zum Beispiel von Pumpen, als kritisch angesehen. Am Messplatz können Pulsationen, wie in Abschnitt 6.1 erwähnt, mittels eines elektrodynamischen Aktors, der eine Pumpe mit Faltenbälgen mit definierter Frequenz und Amplitude antreiben kann, simuliert werden.

7 Konzeption, Entwurf und Test der ausgewählten Varianten

In diesem Kapitel werden die drei unter Abschnitt 5.3 ausgewählten Varianten zur Selbstüberwachung von Wirkdrucksensoren - Wirbel-Wirkdruck-Durchflussmessung, Bypass zur Referenzerzeugung und Wheatstone-Brücken-Überwachung - genauer analysiert. Anhand von Experimentalaufbauten - Demonstratoren - wird ihre Realisierbarkeit erörtert.

7.1 Redundanz - Wirbel-Wirkdruckmessung

Eine der drei ausgewählten Möglichkeiten zur Selbstüberwachung ist die Zusammenführung der beiden unabhängigen Durchflussmessverfahren Wirkdruckmessung und Wirbelzählverfahren. Eine Zusammenführung der beiden Verfahren bietet sich aufgrund der prinzipiellen Möglichkeit an, Wirkdruck wie Wirbelfrequenz mit nur einem Differenzdrucksensor aufnehmen zu können. KUIPERS [Kuiper89] zeigt eine erste Realisierung der Zusammenführung der beiden Verfahren auf. Dabei liegt der Fokus allerdings in der Bestimmung der Dichte des Mediums aus den beiden Signalen. Aufgrund der Dichteabhängigkeit des Wirkdruckverfahrens kann durch Gleichsetzen der Gleichungen zur Berechnung des Volumendurchflusses für Wirkdruck- (4.2.2) und Wirbelfrequenzverfahren (4.2.7) die Dichte nach

$$\rho = k \cdot \frac{\Delta p}{f^2} \quad (7.1.1)$$

mit
$$k = 2 \cdot \left(\frac{C(Re) \cdot Sr}{d_{Körper} \cdot \sqrt{(A_1^2/A_2^2) - 1}} \right)^2 \quad (7.1.2)$$

berechnet werden. SCHÄFER [Schäfe99], [Schäfe00] greift die Idee der Zusammenführung der zwei Verfahren in Verbindung mit der Idee einer Selbstüberwachung auf. Sein Ansatz bildet die Grundlage für die im Folgenden beschriebene weitere Betrachtung.

Durch die Zusammenführung der beiden Verfahren unter Verwendung nur eines Differenzdrucksensors und nur eines Staukörpers zur gleichzeitigen Erzeugung von Wirbeln und Wirkdruck ergibt sich eine Messkette (Abb. 7.1), die nur auf der Seite der Elektronik über zusätzliche Baugruppen im Vergleich zur Messkette des Wirkdrucksensors in Abbildung 4.12 verfügt. Dabei ist die benötigte Elektronik allerdings deutlich aufwändiger als bei einem normalen Wirkdrucksensor.

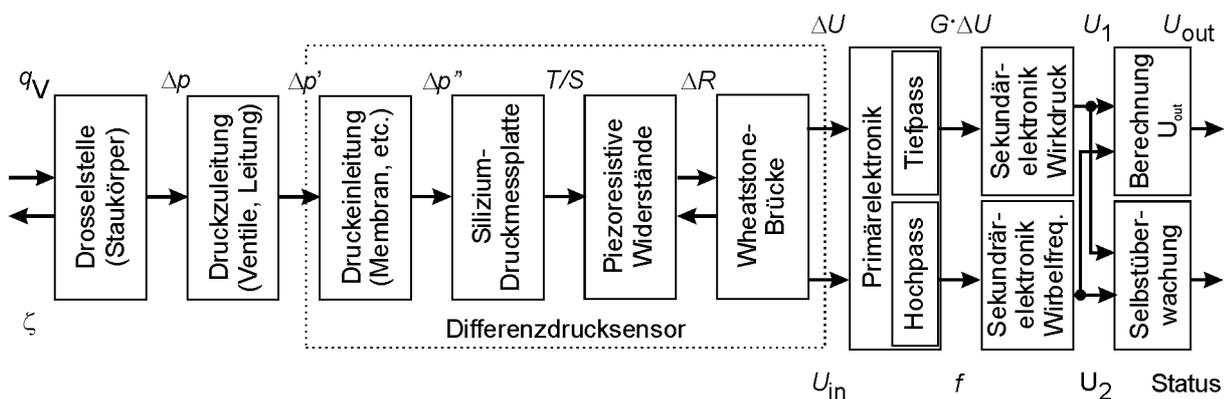


Abbildung 7.1: Messkette des Wirbel-Wirkdruck-Durchflusssensors (WWD) mit nur einem Differenzdrucksensor. Die Rückwirkung des Strömungswiderstands wird repräsentiert durch die Widerstandszahl ζ

7.1.1 Merkmale zur Störungserkennung

Für die Selbstüberwachung ist die Anzahl der erkennbaren Störungen maßgeblich. Daher wird zunächst eine Abschätzung durchgeführt, welche der relevanten Störungen durch die Zusammenführung von Wirbelfrequenz- und Wirkdruckverfahren detektiert werden können. Dabei liegen die bereits analysierten Störungen des Wirkdruckverfahrens aus Abschnitt 4.3 wie auch die Störungen des Wirbelzählverfahrens zugrunde. Tabelle 7.1 zeigt einen Auszug der meist externen Störungsursa-

chen und die theoretischen Auswirkungen auf die Messverfahren. In der letzten Spalte ist verzeichnet, ob die Störungen prinzipiell mittels der Zusammenführung von Wirkdruck- und Wirbelmessung erkennbar sind. Demnach sollten die meisten aufgezählten Störungsursachen unproblematisch erkennbar sein, sofern deren Auswirkungen signifikant sind.

Tabelle 7.1: Übersicht typischer Störungsursachen mit Auswirkungen und Erkennbarkeit durch Wirkdruck- und Wirbelzählverfahren (*Wirbelerfassung über p_2*)

Störungsursache	Auswirkung Wirkdruckverfahren	Auswirkung Wirbel-frequenzverfahren	Störung erkennbar
Ablagerungen im Messrohr	B_0 erhöht	B_0 verringert	✓
Ablagerungen in Niederdruckzuleitung p_2	Verschluss: keine Messung mehr möglich Verengung: Einfluss gering	Verringerung der Wirbel-Amplitude bis hin zur nicht mehr messbaren Frequenz	✓
Ablagerungen in Druckzuleitung p_1	siehe Ablagerungen in p_2	Kein Einfluss	✓
Ablagerungen an den Drucksensormembranen	B_0 verringert	Kein Einfluss	✓
Abrasion/Korrosion im Messrohr (Engstelle und Staukörper)	B_0 verringert	B_0 erhöht	✓
Pulsationen im Fluid	Erhöhter Rauschpegel	Wirbelbildung gestört	✓
Gasblasen in Druckzuleitung p_2	Abweichung (in kleinen Messbereichen durch hydrostatischen Druck)	Verringerte Amplitude bis hin zur nicht mehr messbaren Frequenz	✓
Gasblasen in Druckzuleitung p_1	Abweichung (in kleinen Messbereichen durch hydrostatischen Druck)	Kein Einfluss	✓
Gasblasen/Partikel im Fluid	Erhöhter Rauschpegel	Wirbelbildung gestört	✓
Drift des Drucksensors	Erhöhter Offset	Kein Einfluss	✓
Ausfall des Drucksensors	Kein Ausgangssignal	Kein Ausgangssignal	–
Ausfall der Elektronik (total oder teilweise)	Nicht generell vorherzusagen	Nicht generell vorherzusagen	?

Schwierig abzuschätzen ist dabei der Einfluss bei Abrasionen und Ablagerungen, da neben der Veränderung des Öffnungsverhältnisses und der Staukörperbreite auch die Formänderung Auswirkungen aufweist, die nicht eindeutig vorherzusagen sind. STROHRMANN [Strohr94] beschreibt eine Verringerung der Wirbelfrequenz durch das Abrunden der Abrisskanten eines Delta-Körpers. Beim Abrunden der Kanten kommt es zu einer Verringerung des Durchmessers des Staukörpers, weshalb nach Gl. (4.2.7) eine Erhöhung der Wirbelablösefrequenz eintreten sollte. Durch die Abrundung der Kanten ändert sich jedoch offensichtlich auch die Strouhalzahl - in diesem Fall führt dies zu einer Verringerung der Wirbelablösefrequenz und folglich des daraus berechneten Durchflusses. Abbildung 7.2 zeigt die reduzierte Messabweichung, die durch die Kantenunschärfe entstehen kann, in Abhängigkeit zur relativen Kantenschärfe $r/d_{\text{Körper}}$. Unter Abschnitt 7.1.3 wird hierauf weiter eingegangen und aufgezeigt, warum bei dem hier vorgestellten Sensor trotzdem von einer Erhöhung der Wirbelfrequenz ausgegangen werden kann.

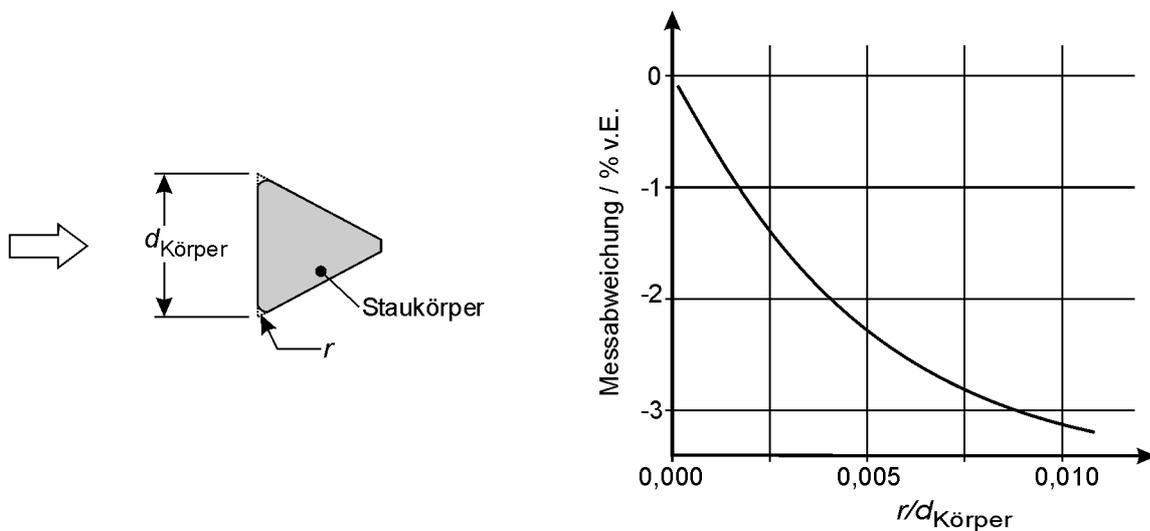


Abbildung 7.2: Abhängigkeit der Messabweichung von der Schärfe der Abrisskante [Strohr94].
Delta-Staukörper (Beispiel: ENDRESS & HAUSER SWINGWIRL, DN 100)

7.1.2 Aufbau des Wirbel-Wirkdruck-Sensors

Die Zweckmäßigkeit der Zusammenführung der beiden Messverfahren, mit dem Ziel einen sich selbst überwachenden Sensor aufzubauen, wurde im vorherigen Abschnitt bereits theoretisch begründet. Jetzt muss dieser Ansatz mit Hilfe eines

Experimentalaufbaus und Messungen belegt werden. Hierzu wird zunächst ein Aufbau entwickelt, der die fluidische Messstrecke mit Ankopplung eines Drucksensors, sowie Elektronik und Messdatenverarbeitung zur Merkmalsgenerierung umfasst.

Mechanischer Aufbau

Die Drosselemente für die Wirkdruckmessung sind nach [DIN 19205] bzw. [DIN EN ISO 5167] genormt. Für die Vortexmessung existieren Richtlinien [VDI/VDE 2643]. Mit der Optimierung von Drosselementen bzw. Staukörpern haben sich in der Vergangenheit eine Vielzahl von Arbeiten beschäftigt. Die Messung eines Wirkdrucks am Staukörper bzw. eine Wirbelzählung am Drosselement wird dabei üblicher Weise nicht betrachtet; diese Effekte sind vielmehr unerwünscht. KUIPERS [Kuiper89] stellt in seiner Arbeit eine Untersuchung verschiedener Staukörperformen zur Erzeugung eines Wirkdrucks und einer Wirbelstraße vor (herkömmliche Messblenden, Ringblenden, Deltakörper, T-Profile). Dabei stellen sich Staukörper in der Rohrmitte, wie Deltakörper oder T-Profil, als für diesen Einsatz am besten geeignet heraus.

Allerdings muss bei der Zusammenführung von Wirkdruck- und Wirbelzählverfahren nicht zwangsläufig ein Wirkdruck durch den Staukörper erzeugt werden. Setzt man einen klassischen Staukörper voraus, ergeben sich grundsätzlich zwei verschiedene Möglichkeiten des Aufbaus (Abb. 7.3). Durch die Differenzdruckmes-

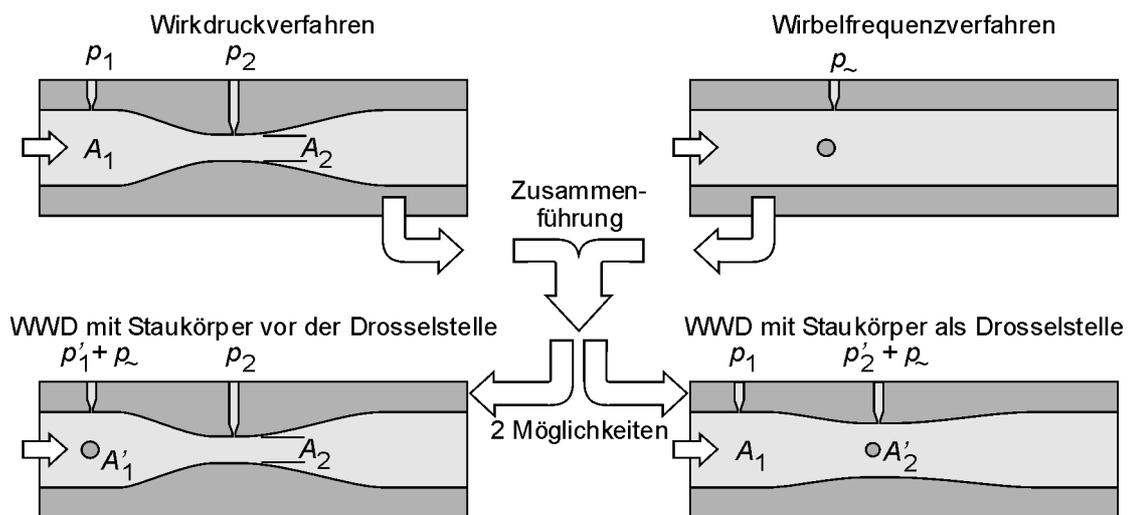


Abbildung 7.3: Zwei konstruktive Anordnungen der Zusammenführung von Wirkdruck- und Wirbelzählverfahren.

sung verfügt man über zwei Druckentnahmestellen, die sich zur Detektion der Wirbel eignen - die Hochdruck- und die Niederdruckseite. Im ersten Fall befindet sich der Staukörper vor der Drosselstelle und die vorbeifließenden Wirbel modulieren den Druck p_1 . Dadurch ist man in der Gestaltung der Engstelle und des Staukörpers unabhängig und kann beides hinsichtlich Signalqualität, Messbereich und bleibendem Druckverlust optimieren. Zu beachten ist, dass die Druckentnahme auf Höhe oder kurz hinter dem Staukörper platziert werden muss, wodurch eine Verengung des Strömungsquerschnitts vor der eigentlichen Engstelle bewirkt wird. Somit wird der Differenzdruck reduziert, da das Fluid beim Vorbeifließen am Staukörper beschleunigt wird. Außerdem hat ein solcher Durchflusssensor zwei hintereinander angeordnete Rohreinbauten, die einen bleibenden Druckverlust erzeugen. SCHÄFER hat allerdings bei einer Venturistrecke mit im Einlauf angeordnetem zylinderförmigem Staukörper eine Reduzierung des bleibenden Druckverlusts im Vergleich zur identischen Venturistrecke ohne Staukörper beobachtet. Die Turbulenzen, verursacht durch den Staukörper, reduzieren demnach in diesem Fall den Druckverlust im Venturirohr.

Der zweite Fall ist eine Positionierung des Staukörpers in Höhe der Niederdruckentnahme p_2 . Dadurch wird die Reduzierung des Strömungsquerschnitts durch den Staukörper direkt zur Erzeugung des Wirkdrucks genutzt. Ein weiterer Vorteil kann, vor allem bei niedrigen Volumenflüssen, die Erhöhung der Reynoldszahl durch eine leichte zusätzliche Drosselung im Messrohr sein.

Nach SCHÄFER und YAMASAKI [Yamasa93] bietet ein rechteckiger Strömungsquerschnitt statt eines runden Vorteile für die Stabilität der Wirbelstraße. Auch KUIPERS [Kuiper89] und OHKI [Ohki98] konnten bessere Ergebnisse erzielen, indem sie mit Plättchen den ursprünglich runden Querschnitt einschränkten, wodurch ein rechteckiger Querschnitt angenähert wird. Daher und aufgrund der flexibleren Konstruktionsmöglichkeiten wird sich hier auf rechteckige Strömungsquerschnitte beschränkt.

Zu beachten ist bei nicht-runden Strömungsquerschnitten allerdings der Einfluss auf die Berechnung der Reynoldszahl, da die charakteristische Länge nicht mehr dem Durchmesser (siehe Gl. (4.1.1)), sondern dem hydraulischen Durchmesser

$$D_h = \frac{4 \cdot A}{U} \quad (7.1.3)$$

entspricht [Bohl94], [DIN EN 24006].

Dabei entspricht A der durchströmten Fläche und U deren Umfang. Im Falle eines rechteckigen Querschnitts mit den Seitenlängen a und b ergibt sich die Reynoldszahl zu

$$Re = \frac{\rho \cdot \bar{v} \cdot D_h}{\eta} = 2 \cdot \frac{\rho \cdot \bar{v} \cdot a \cdot b}{\eta \cdot (a+b)} \quad (7.1.4)$$

Problematisch ist die Wirbelmessung mit einem Differenzdrucksensor. Es verschlechtert sich das Signal-Rausch-Verhältnis, da ein hoher Gleichanteil gemessen wird. Eine Unterdrückung von Strömungsrauschen durch eine Differenzbildung von linker zu rechter Seite des Staukörpers (siehe Wirbelzähler *Bopp und Reuther VTX 2*, Kapitel 2) ist nicht möglich und der Übertragungsfaktor des Differenzdrucksensors nimmt in diesen Frequenzbereichen durch fluidische Tiefpässe in den Druckzuleitungen und innerhalb des Drucksensorgehäuses ab.

Zur Festlegung der geometrischen Verhältnisse dient ein in dieser Arbeit aufgebauter variabler Durchflusssensor mit rechteckigem Strömungsquerschnitt. Bei dieser Messstrecke können verschiedene Seitenwände eingesetzt und verschoben werden und die in Deckel und Boden befindlichen Druckentnahmestellen sind ebenfalls frei beweglich [PEM IV 02] [PEM III 04] (Abb. 7.4). Mit dieser Messstrecke können verschiedene Staukörperformen untersucht werden, inwieweit sie sich zur Messung der Wirbelfrequenz mit einem Differenzdrucksensor eignen. Gute Ergebnisse hinsichtlich Wirbelstabilität und -erfassbarkeit sind mit einem Deltakörper er-

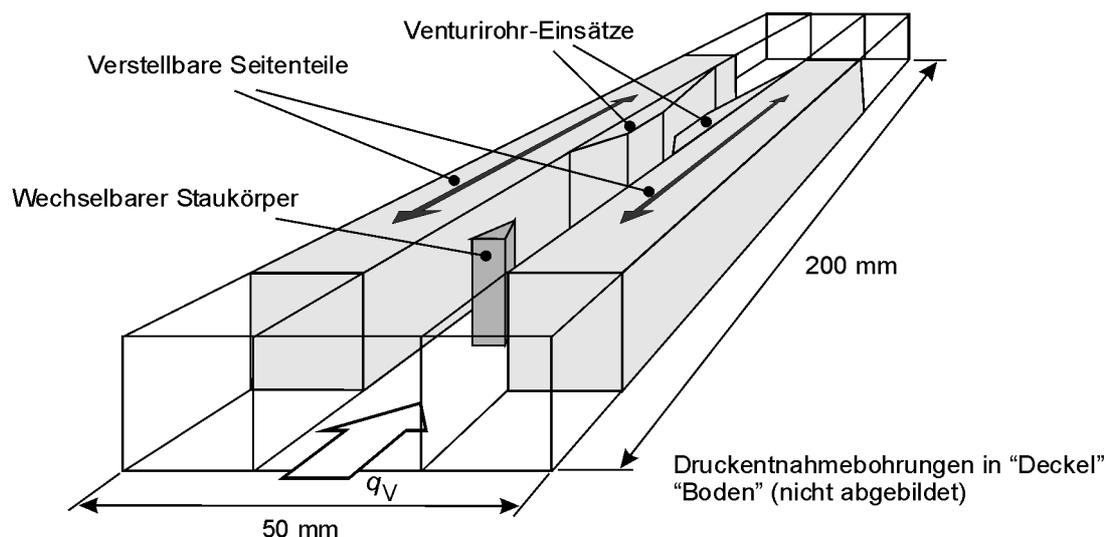


Abbildung 7.4: Variabler Wirbel-Wirkdruck-Durchflusssensor mit Staukörper vor der Engstelle als Experimentalaufbau.

zielbar. Als am besten geeignet erweist sich allerdings ein von BREIER und GATZMANGA [Breier95] für geringe Reynoldszahlen vorgeschlagener Staukörper, der für weitere Untersuchungen ausgewählt wird. Dabei können in der rechteckigen Messstrecke Wirbel nur bei recht großen Durchmessern des Staukörpers detektiert werden ($d_{\text{Körper}} = 4 \text{ mm}$ womit $d_{\text{Körper}}/D = 0,315$). Nach [Breier95] sollten das Durchmesser Verhältnis $d_{\text{Körper}}/D$ idealerweise bei 0,24 liegen, was umgerechnet auf den rechteckigen Querschnitt ($11 \times 15 \text{ mm}$, $D_h: 12,7 \text{ mm}$) einen Durchmesser von $d_{\text{Körper}} = 3 \text{ mm}$ ergeben würde.

Erste Messungen mit dem variablen Sensor unter Einfluss verschiedener Störungsursachen zeigen die grundsätzliche Eignung der Zusammenführung der zwei Messverfahren zur Selbstüberwachung. Allerdings steht die große Variabilität der Messstrecke der geforderten Reproduzierbarkeit und Messunsicherheit entgegen. Aus diesem Grund wird auf Basis dieser Voruntersuchungen eine verbesserte, nicht variable Messstrecke aufgebaut (Abb. 7.5).

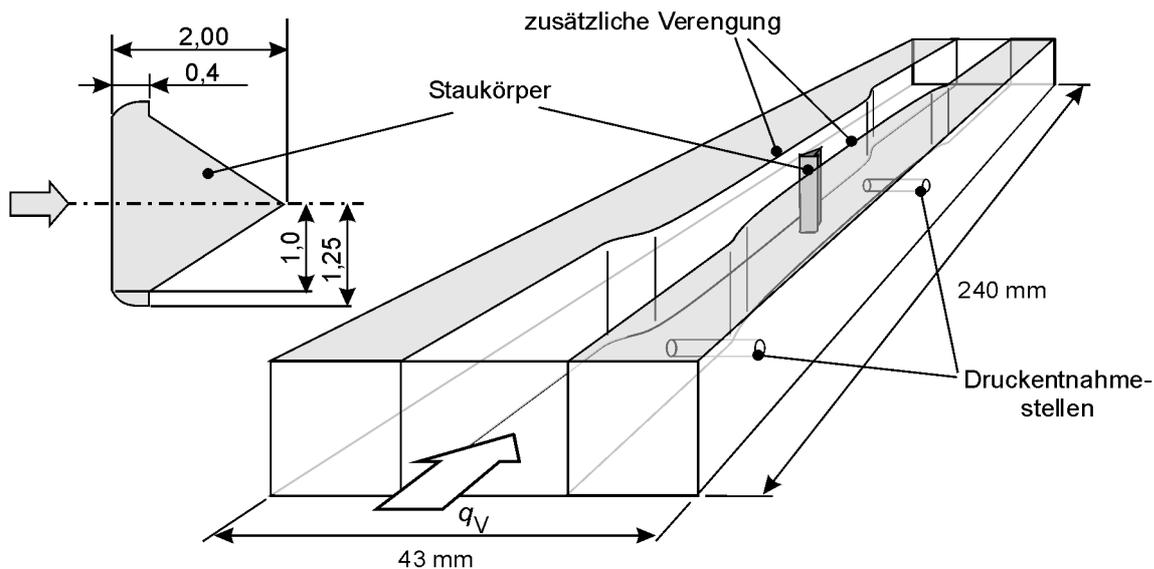


Abbildung 7.5: Staukörper (links) und Messstrecke mit Staukörper als Engstelle (rechts).

Das Durchmesser Verhältnis $d_{\text{Körper}}/D_h$ wird mit 0,3 gewählt. Für einen Nennmessbereich von 850 l/h unter Verwendung eines 100 mbar Differenzdrucksensors und einem Staukörperdurchmesser von $d_{\text{Körper}} = 2,5 \text{ mm}$ ergibt sich bei einem Einlaufquerschnitt von $10 \times 10 \text{ mm}^2$ eine zusätzliche Einengung A'_1 mit 1,4 mm pro Seite ($D_h = 8,37$). Die Einengung entspricht einem Venturikanal mit rechteckigem Strömungsquerschnitt und verlängertem Halsteil. Die zweite Druckentnahmestelle befindet sich in der Seitenwand 1 mm hinter der Vorderkante des Staukörpers.

Signalverarbeitung

In Wirbelzählern werden unterschiedliche Verfahren zur Detektion des Wirbel-Peaks im Spektrum des Ausgangssignals genutzt. Wählt man einen piezoelektrischen Drucksensor zur Aufnahme der Wirbel, so ist der einfachste Weg zur Erkennung der Wirbelfrequenz eine Bandpassfilterung nach dem Ladungsverstärker und anschließender Triggerung auf einen zuvor definierten Grenzwert. Das so generierte Rechtecksignal entspricht in seiner Frequenz dem Durchfluss und kann ausgegeben oder weiterverarbeitet werden (z.B. [Freude00], [VDI/VDE 2643]).

Aktuelle Vortexsensoren nutzen häufig digitale Auswerteverfahren zur Erkennung der Wirbelfrequenz aus dem Ausgangsspektrum des Drucksensors. So können zum Beispiel *Prädiktionsfilter* [Blisch89] oder *Phase-Locked-Loops* [Clarke02] eingesetzt werden, die automatisch in den anliegenden Wirbelfrequenzen „einrasten“. Zur Vorselektion des Bandbereichs der Wirbelfrequenz kann eine Filterung mittels vieler schmalbandiger Bandpässe mit angepasster Verstärkung und anschließendem Vergleich mit einer abgelegten Empfindlichkeitskurve realisiert werden [Hüchte03].

Der im Vergleich zur Triggerung hohe Aufwand verringert die Anfälligkeit gegenüber Störgrößen wie Vibrationen oder Pulsationen. Außerdem sind weder Amplitude noch Frequenz der Wirbelablösung tatsächlich konstant, sondern unterliegen stochastischen Schwankungen (z.B. [Amadi92]). Das Wirbelsignal des Drucksensors $u(t)$ setzt sich daher aus der zeitlich nicht konstanten Amplitude $a(t)$, der Kreisfrequenz der Wirbelablösung ω mit der Schwankung $\phi(t)$ und einem Störsignal $z(t)$ zu

$$u(t) = a(t) \cdot \sin(\omega t + \phi(t)) + z(t) \quad (7.1.5)$$

zusammen. Vor allem in niedrigen Durchflussbereichen nimmt die Amplitude des Vortexsignals deutlich ab und kann von den Störspektren nur noch schlecht unterschieden werden (vgl. Abb. 4.10).

Die Störsignale $z(t)$ können bei herkömmlichen Wirbelzählern durch eine Differenzdruckmessung zwischen linker und rechter Seite des Staukörpers eliminiert werden (z.B. [Yokoga04]). Dadurch erhöht sich die Signalqualität und damit die Detektierbarkeit deutlich. Bei dem hier präsentierten Wirbel-Wirkdruck-Durchflusssensor soll Wirkdruck und Wirbelfrequenz mit nur einem Differenzdrucksensor erfasst werden. Dadurch kann die eben beschriebene Variante zur Erhöhung der Signalqualität nicht genutzt werden, da der dominante Teil des „Störsignals“ - der

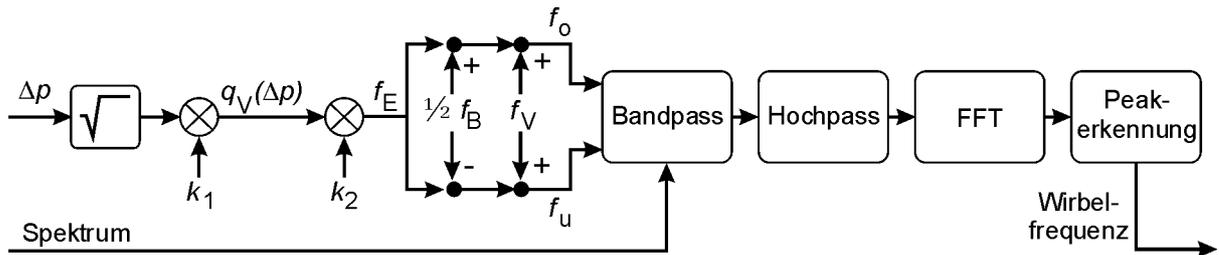
Gleichanteil des Wirkdrucks - ausgewertet werden muss. Somit kommt zu Gleichung (7.1.5) noch der Wirkdruckanteil $u_{\Delta p}(t)$ hinzu:

$$u(t) = u_{\Delta p}(t) + a(t) \cdot \sin(\omega t + \phi(t)) + z(t) \quad . \quad (7.1.6)$$

Durch die Aufnahme zweier unabhängiger Signale zur Bestimmung des Durchflusses, ergibt sich jedoch eine andere Möglichkeit die Detektion der Wirbelfrequenz zu vereinfachen. Aus dem Gleichanteil des Sensorsignals, der dem Wirkdruck entspricht, kann der Durchfluss berechnet werden. Durch den so bekannten Durchfluss kann der Bereich der Wirbelfrequenz des intakten Sensors bestimmt werden. Ein variabler Bandpass kann so abgestimmt werden, dass nur der Bereich, in dem sich die Wirbelfrequenz befindet, aus dem Spektrum herausgefiltert wird. Störspektren werden auf diese Weise erfolgreich gedämpft. Die Detektion der tatsächlichen Wirbelfrequenz ist aufgrund des stark verbesserten Signal-Rausch-Verhältnisses unkompliziert.

Durch Störungen ist es möglich, dass Wirkdruck und Wirbelfrequenz so weit voneinander abweichen, dass die Frequenz der Wirbel außerhalb des Durchlassbereiches des Bandpasses liegt. In einem solchen Fall muss sichergestellt werden, dass die Erkennung des Wirbel-Peaks keine Frequenz in der Nähe der errechneten Frequenz detektiert. Dabei kann es sich um Störsignale handeln, die Peaks im Spektrum des Ausgangssignal hervorrufen, die im Bereich der erwarteten Wirbelfrequenz liegen. Um die Detektion eines zufälligen Peaks zu verhindern, wird zum Einen die Mittenfrequenz des Bandpasses um die Frequenz f_v verschoben, so dass der erwartete Peak am Rand des Durchlassbereiches liegt. Zum Anderen wird durch einen zusätzlichen Hochpass auch der Bereich der erwarteten Wirbelfrequenz leicht gedämpft. Dadurch wird bei Ausbleiben der Wirbelfrequenz keinesfalls ein Einrasten im vorhergesagten Frequenzbereich stattfinden (Abb. 7.6).

Im vorliegenden Prototyp werden die Wirbelfrequenz und das Signal des Wirkdrucks mittels analoger Tief- bzw. Hochpässe getrennt (Tiefpass: $f_{\text{Tief}} = 15$ Hz, Hochpass: $f_{\text{Hoch}} = 80$ Hz). Die weitere Signalverarbeitung findet aufgrund der größeren Flexibilität im Messplatzrechner statt (siehe Abschnitt 6.1). Die analoge Vorfilterung ist notwendig, da die Messkarte des PC die durch die Wirbelfrequenz verursachte Amplitudenüberhöhung im Spektrum bei einem hohen Gleichanteil des Wirkdrucksignals nicht mehr auflösen kann. Andernfalls wäre es möglich, nur ein



$$k_1 = C(\text{Re}) \cdot \frac{A_1 \cdot A_2}{\sqrt{A_1^2 - A_2^2}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \quad (7.1.7)$$

$$k_2 = \frac{Sr}{d_{\text{Körper}} \cdot A'_1} \quad (7.1.8)$$

Abbildung 7.6: Blockdiagramm zur Signalverarbeitung mit Bandpassabstimmung zur Frequenzdetektion des Wirbelsignals.

f_E : erwartete Wirbelfreq., f_B : Bandbreite Bandpass, f_u : untere Grenzfrequ. Bandpass, f_o : obere Grenzfrequ. Bandpass, f_V : Verschiebung

Signal, welches das gesamte Spektrum umfasst, einzulesen und die Trennung der Anteile im PC vorzunehmen.

Vom PC wird das tiefpassgefilterte Signal und das hochpassgefilterte Signal eingelesen und alle notwendigen Werte berechnet. Zur Vereinfachung wird das bandbegrenzte Signal mittels einer FFT in den Frequenzbereich transformiert und dort die Ablösefrequenz der Wirbel detektiert. Aus der erkannten Frequenz kann nun der tatsächliche Durchfluss des Wirbelzählverfahrens bestimmt werden. Ein Vergleich ergibt die prozentuale Abweichung ε

$$\varepsilon = 100 \cdot \frac{q_V(\text{Vortex}) - q_V(\Delta p)}{q_V(\Delta p)} \quad \text{in \%}, \quad (7.1.9)$$

die als Maß für den Sensorstatus gelten kann. Der endgültig ausgegebene Durchfluss q_V

$$q_V = \frac{1}{2}(q_V(\Delta p) + q_V(\text{Vortex})) \quad \text{in l/h} \quad (7.1.10)$$

ist der Mittelwert der Messwerte der beiden Verfahren. Abbildung 7.7 zeigt die Struktur der Signalverarbeitung des Wirbel-Wirkdruck-Durchflusssensors.

Aus der Differenz ε kann nur eine gut/schlecht Entscheidung abgeleitet werden, je nachdem, ob die Differenz unter einem bestimmten Grenzwert liegt oder nicht.

Zur Diagnose, welcher Störungsfall vorliegt, müssen weitere Informationen ausgewertet werden. Die Merkmale hierfür werden aus den Messergebnissen abgeleitet.

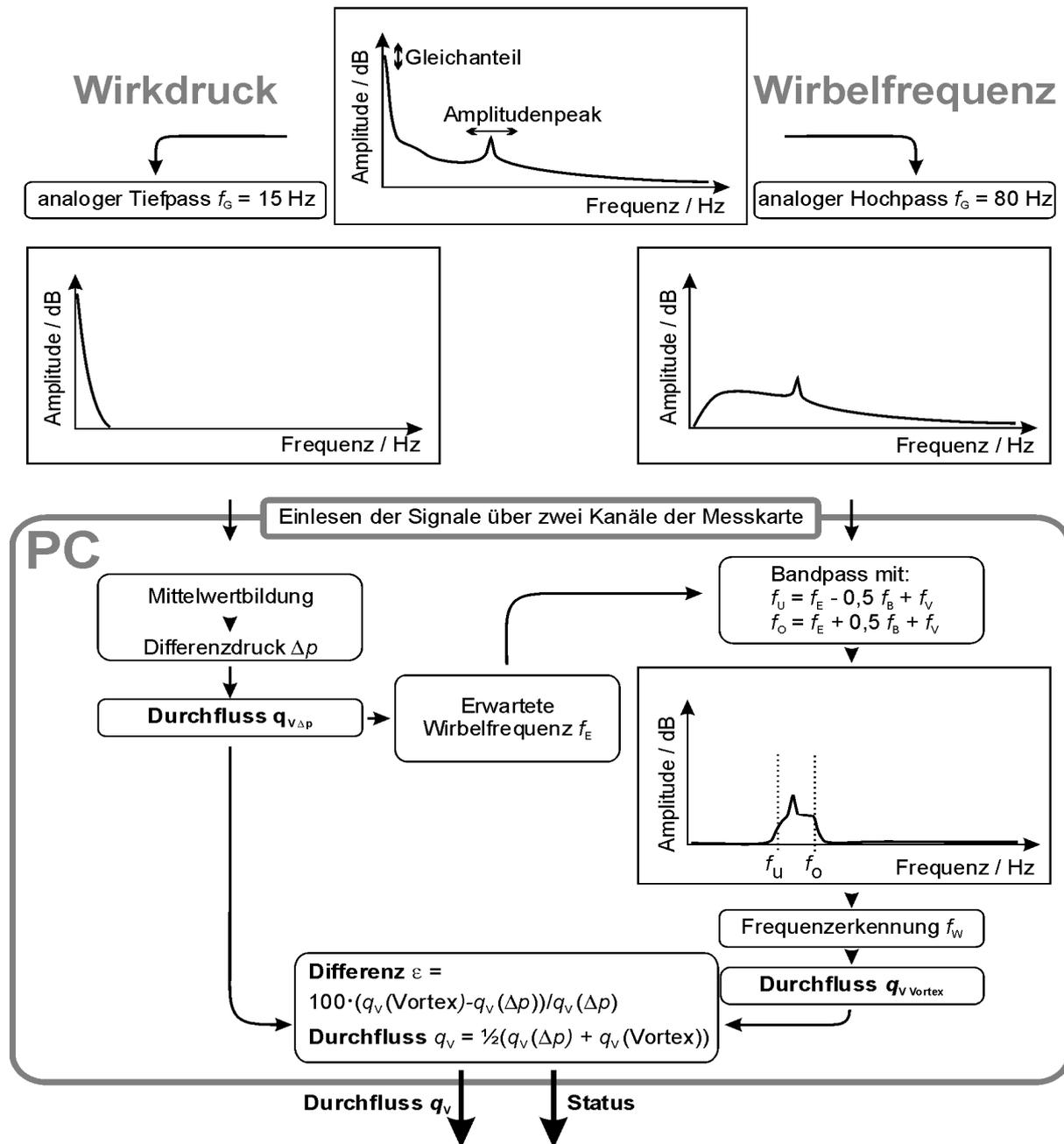


Abbildung 7.7: Struktur der Signalverarbeitung des Wirbel-Wirkdruck-Durchflusssensors.
 f_c : Grenzfrequ., f_E : erwartete Wirbelfrequ., f_B : Bandbreite Bandpass, f_U : untere Grenzfrequ. Bandpass, f_O : obere Grenzfrequ. Bandpass, f_V : Verschiebung, f_W : Wirbelfreq., ε : relative Abweichung der Volumenflüsse

7.1.3 Messergebnisse zur Wirbel-Wirkdruck-Durchflussmessung

Mit den zwei unter Abschnitt 7.1.2 beschriebenen Messstrecken werden im Folgenden Messungen unter Normbedingungen und unter direkten Störeinflüssen vorgestellt. Als Differenzdrucksensor dient ein mediengetrennter, piezoresistiver Sensor der Firma *ENDRESS & HAUSER* mit Primärelektronik für $p_N = 100$ mbar. Die hier präsentierten Messergebnisse beziehen sich auf die zweite Messstrecke mit Staukörper in der Engstelle aus Abbildung 7.5. Die gemessenen Verläufe des Durchflusskoeffizienten $C(Re)$ und der Strouhalzahl $Sr(Re)$ sind in Abbildung 7.8 angegeben.

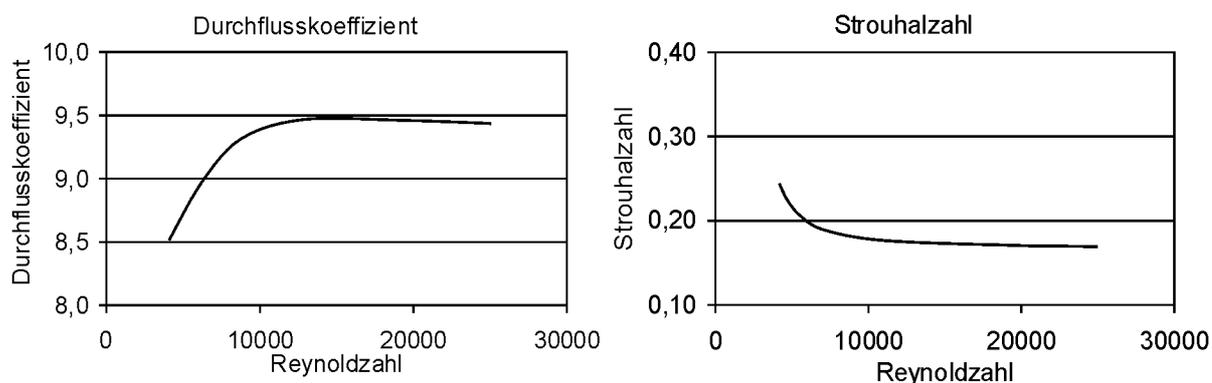


Abbildung 7.8: Durchflusskoeffizient C der Wirkdruckmessung und Strouhalzahl Sr der Wirbelfrequenzmessung des Wirbel-Wirkdruck-Durchflusssensors (gemessen).

Die Wirbel sind bei diesem Aufbau ab einer Reynoldszahl von 4200 (auf die Fläche vor der Verjüngung bezogen) detektierbar. Im Bereich bis etwa 6400 ist die Wirbelerfassung allerdings nicht zuverlässig und unterliegt großen Schwankungen. Ab einem Durchfluss von 250 l/h ($Re = 7000$) ist die Wirbeldetektion zuverlässig möglich und die Strouhalzahl ausreichend konstant ($\Delta Sr [Re = 7000 - 23600] = 0,02$). Zu beachten ist, dass die Strömungsgeschwindigkeit in der Engstelle vor dem Staukörper um den Faktor 1,389 und somit die Reynoldszahl um den Faktor 1,163 größer ist. Das Toleranzband der durchschnittlichen Abweichungen zwischen Wirkdruck- und Wirbelzählverfahren liegt bei ca. 0,5 % vom Messwert der Wirkdruckmessung.

Der Druckverlust der Messstrecke ist im Vergleich zu herkömmlichen Venturirohren durch die Montage des Staukörpers verhältnismäßig hoch (Abb. 7.9). Für das Öffnungsverhältnis $m = A_2/A_1 = 0,47$ liegt der relative Druckverlust von ca. 80 % vom Wirkdruck noch über dem Bereich einer Normblende gleichen Öffnungsverhältnisses (vgl. Abb. 4.6).

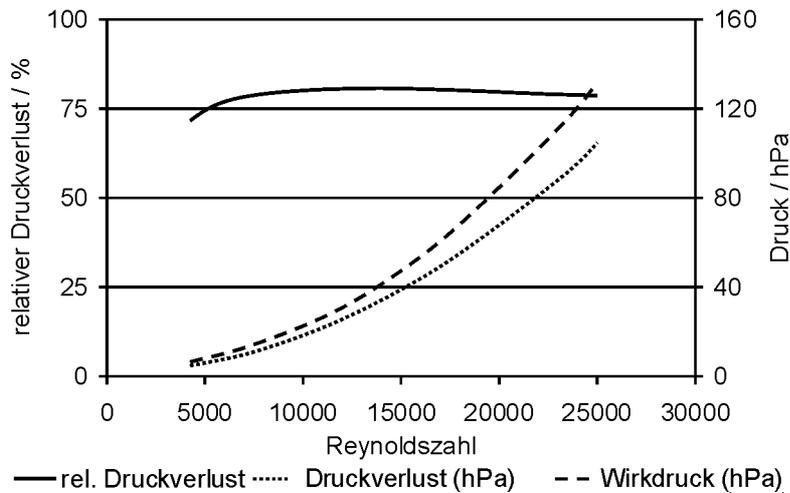


Abbildung 7.9: Relativer Druckverlust des WWD in Prozent vom Wirkdruck.
relativer Druckverlust als Verhältnis Druckverlust zu Wirkdruck in Prozent

Mit dieser Messstrecke werden im Folgenden die Ergebnisse unter Simulation verschiedener Störungen vorgestellt. Die Störungsursachen sind im einzelnen:

- Abrasion der Messstrecke,
- Ablagerungen in der Messstrecke,
- Ablagerungen in den Druckzuleitungen (kompletter und teilweiser Verschluss),
- Gaseinschlüsse in den Druckzuleitungen,
- Gasblasen im Fluid und
- Pulsationen.

Abrasion

Zur Beurteilung des Verhaltens der Messverfahren bei Abrasion wird die Messstrecke in drei Stufen abgetragen und jeweils vermessen. Dadurch ergibt sich pro Abrasionsvorgang ein durchschnittlicher Materialabtrag von $57 \mu\text{m}$ an den Wandflächen, wobei der Abtrag in Höhe des Staukörpers aufgrund der höchsten Strömungsgeschwindigkeit erwartungsgemäß am größten ist. Am Staukörper ist ein Abtrag von $17 \mu\text{m}$ frontal bzw. $4 \mu\text{m}$ pro Seite aufgetreten (Abb. 7.10). Die Messverfahren verhalten sich, wie in Tabelle 7.1 erwartet. Der Wirkdruck nimmt mit zunehmendem Abtrag ab, da der effektive Strömungsquerschnitt größer wird. Die Frequenz der Wirbelablösung nimmt zu, was ebenfalls eine Zunahme des angezeigten Durch-

flusses ergibt. In Abbildung 7.11 sind die aus Wirkdruck und Ablösefrequenz berechneten Durchflüsse über dem wahren Durchfluss nach Abrasion dargestellt. Die Abweichung der Signale beträgt im Mittel 3,5 % vom Messwert. Dabei wurde erwartet, dass der aus dem Wirkdruck berechnete Durchfluss noch deutlicher nach unten abweicht. Der gemessene Wert liegt durchschnittlich 7 % über dem für diesen Materialabtrag berechneten.

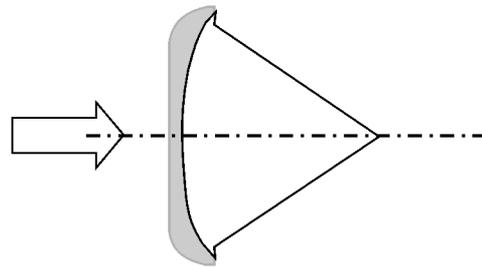


Abbildung 7.10: Abradierter Staukörper.
normale Form grau, überzeichnete Darstellung

Wie im Abschnitt 7.1.1 beschrieben, nimmt die Wirbelfrequenz mit zunehmender Abrundung der Abrisskanten ab. Dieser Effekt kann bei Abrasion eines Delta-Staukörpers auch bestätigt werden [Müller05A], obwohl der Durchmesser des Staukörpers kleiner wird. In Abbildung 7.11 steigt die Wirbelfrequenz bei Abrasion dennoch leicht an. Vermutlich ist dies ein Effekt, der auf die bei dieser Form des Staukörpers ohnehin schon an der Vorderseite abgerundeten Kante zurückzuführen ist. D.h. die Formänderung ist bei einem solchen Körper nicht entscheidend.

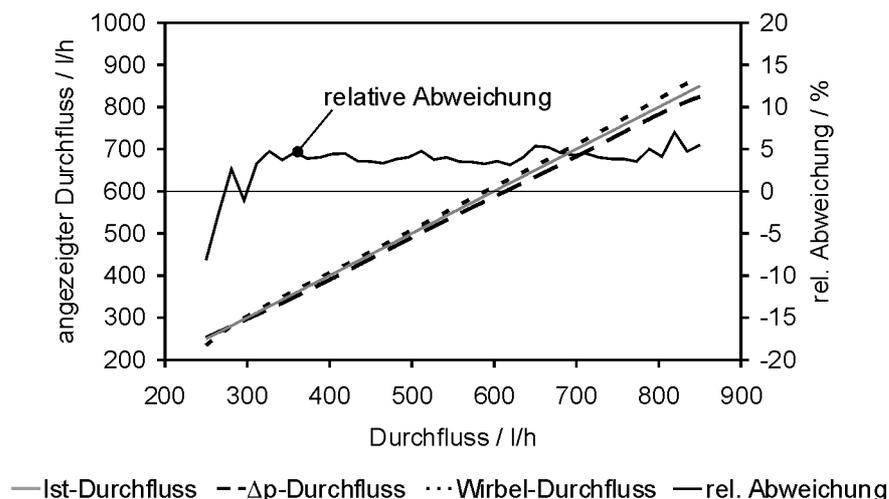


Abbildung 7.11: Einfluss der Abrasion auf die Messstrecke.
ca. 170 μm Abtrag an den Rohrwänden, 10 μm pro Seite und 50 μm frontal am Staukörper; Abweichung = $100 \cdot (q_V(\text{Vortex}) - q_V(\Delta p)) / q_V(\Delta p)$

Der Staukörper wird hauptsächlich an der Vorderseite abgetragen und verkürzt sich dadurch bis zu 5 %. Die Radien an der Vorderseite werden größer (Abb. 7.10). Der Punkt der Wirbelablösung bleibt jedoch bis auf die Reduktion der Staukörperbreite erhalten. Der Einfluss der Abrasion bzgl. der Formänderung des Staukörpers wird also durch die abgerundete Form verringert. Eine ähnliche Beobachtung macht NOVITSKI [Novits96] bzgl. der Erhöhung der Langzeitstabilität von Messblenden. Er empfiehlt eine Phase an der Vorderseite der Blendenöffnung statt einer scharfen Kante, wodurch der Einfluss von Materialabtrag deutlich reduziert werden kann.

Beachtet werden muss allerdings ebenfalls die Änderung der mittleren Fluidgeschwindigkeit bei Abrasion der Messstrecke. Die Änderung der Frequenz ist proportional zur Änderung des Produkts von Staukörper-Durchmesser und Strömungsquerschnitt

$$\frac{d_{\text{Körper}} \cdot A}{d'_{\text{Körper}} \cdot A'} = \frac{f'}{f} = \frac{q'_{\text{Vgemessen}}(\text{Vortex}')}{q_{\text{Vreal}}} \quad , \quad (7.1.11)$$

unter der Voraussetzung, dass die Strouhalzahl konstant bleibt. Folglich kann es bei deutlicher Erhöhung des Strömungsquerschnitts aufgrund der Verringerung der Fluidgeschwindigkeit zu einer Abnahme der Frequenz kommen. Ein solches Abtragsverhalten ist aufgrund der Position des Staukörpers in der Rohrmitte nicht zu erwarten. Trotzdem kann dieser Effekt in dem hier betrachteten Aufbau mehr Einfluss haben als bei einer Montage des Staukörpers vor der Engstelle, da dort die relative Querschnittsänderung geringer ausfallen wird.

Das Verhalten des Wirkdrucks bei Abrasion der Messstrecke ist einfacher vorherzusagen. Der Wirkdruck reduziert sich durch den Materialabtrag, vor allem, weil der Abtrag an der Engstelle am größten ist. Allerdings kann auch beim Wirkdruckverfahren der Durchflusskoeffizient $C(Re)$ durch die Geometrieänderung variieren. Vernachlässigt man dies im Falle des Venturirohrs, so gilt:

$$\frac{\sqrt{\frac{1}{A_2'^2} - \frac{1}{A_1'^2}}}{\sqrt{\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2}}} = \frac{\sqrt{\Delta p'}}{\sqrt{\Delta p}} = \frac{q'_{\text{Vgemessen}}(\Delta p')}{q_{\text{Vreal}}} \quad . \quad (7.1.12)$$

Wesentlich ist, dass die Ergebnisse von Wirkdruck- und Wirbelfrequenzmessung bei Abrasion der Messstrecke auseinander streben und somit diese Störung anhand einer Differenz erkennbar ist (Abb. 7.11).

Ablagerungen in der Messstrecke

Ablagerungen rufen grundsätzlich den gleichen Effekt wie Abrasion hervor, nur mit entgegengesetzten Vorzeichen. Aufgrund der hohen Fluidgeschwindigkeit ist die Schichtdicke in Höhe des Staukörpers am geringsten und vor der Einengung am größten (Abb. 7.12). Auffallend ist, dass sich an der strömungsabgewandten Seite des Staukörpers sehr viel Füller anhaftet. Der Staukörper „wächst“ dadurch nicht nur in Länge (300 bzw. 600 μm), sondern auch in Breite (50 bzw. 100 μm). Die Abrisskante setzt sich auch bei geringen Ablagerungen nahezu komplett zu. Trotzdem ist die Wirbelablösung noch gewährleistet.

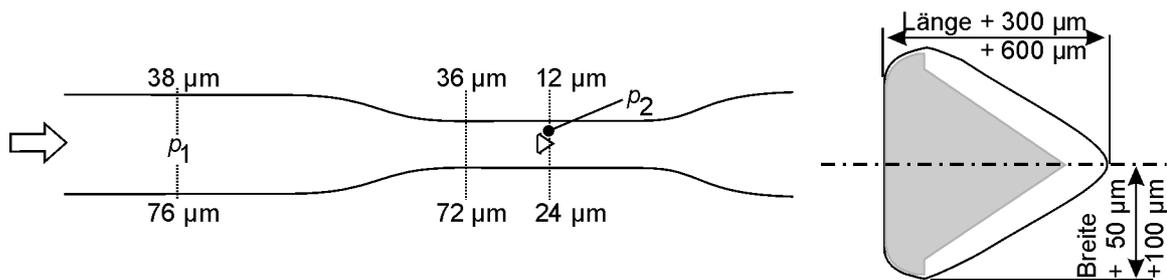


Abbildung 7.12: Verteilung der Ablagerungen bei den Messungen in Abb. 7.13.
obere Zahlen zu Abb. 7.13 a, untere 7.13 b

Die Ablagerungen am Staukörper verursachen, wie vermutet, eine Verringerung der Ablösefrequenz mit steigender Ablagerungsdicke (Abb. 7.13 a und b). Wie erwähnt sind die Ablagerungen an den Seitenwänden in Höhe des Staukörpers am geringsten, weshalb der Wirkdruck nicht in erwartetem Maße ansteigt. Dadurch ist die Erkennung der Störungsursachen *Ablagerung* und *Abrasion* bei dieser Messstrecke geringer als bei der Messstrecke mit dem Staukörper vor der Engstelle. Dies konnte mit der variablen Messstrecke belegt werden. Dennoch ist eine Detektion anhand der Differenz der Messverfahren sehr gut möglich.

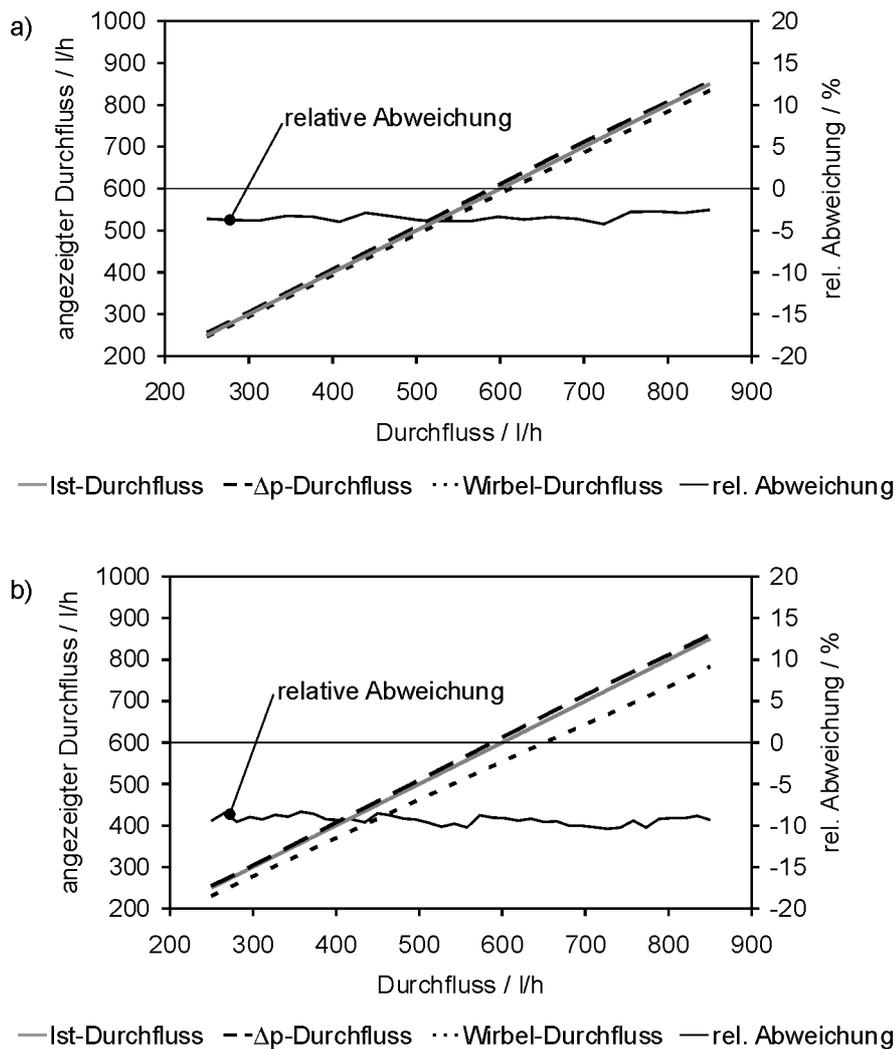


Abbildung 7.13: Von Wirbelfrequenz- bzw. Wirkdruckverfahren angezeigter Durchfluss bei Ablagerungen und relative Abweichungen.
von Teilbild a) zu b) zunehmende Dicke, siehe Abb. 7.12

Gasblasen im Fluid

Werden Gasblasen im Fluid mitgeführt, so kommt es zur Störung der Wirbelbildung bzw. der Wirbelerfassung. Abbildung 7.14 zeigt exemplarisch den Amplitudenverlauf des Differenzdrucksignals bei 450 l/h Durchfluss ohne Gasanteil (grau) und mit 4 % Gasanteil (schwarz). Deutlich sind die Überhöhungen bei 86 Hz bzw. bei 670 Hz zu sehen, die von den vorbei strömenden Gasblasen hervorgerufen werden. Außerdem kommt es zu einer Dämpfung des Wirbelpeaks. Aufgrund der Signalver-

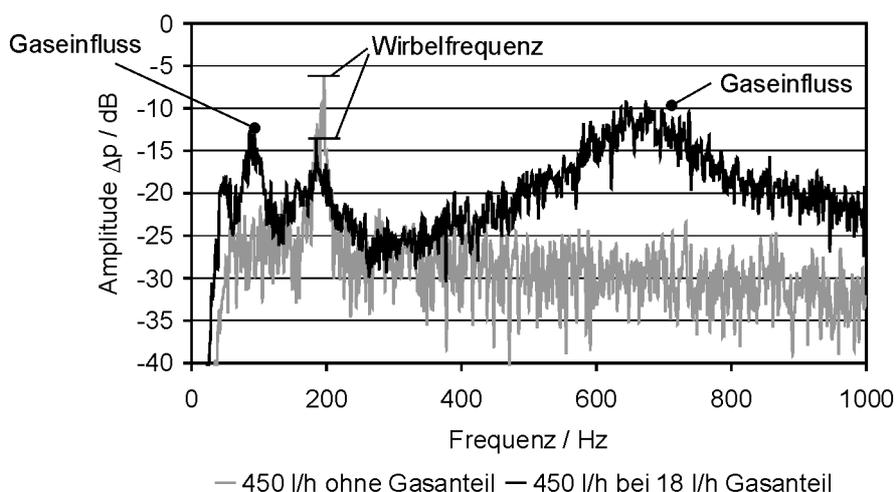


Abbildung 7.14: Amplitudenverlauf bei 450 l/h Durchfluss ohne und mit 18 l/h Gasanteil.
nach analoger HP-Filterung (Gasanteil entspr. 4 % des Volumenflusses)

arbeitung kann die Wirbelablösung noch erfasst werden. Allerdings kommt es, neben einer leichten Vergrößerung der Abweichung zwischen Wirkdruck- und Wirbelzählverfahren, zu einer größeren Streuung der Wirbelablösung. Die Streuung erhöht sich von 0,8 % ohne Störung zu 2,2 % bei konstant 6 l/h Gasanteil bei Durchfluss von 250 - 850 l/h.

Abbildung 7.15 zeigt die gemittelten Messkurven von Wirkdruck- und Wirbelfrequenzverfahren bei einem konstanten Gasdurchfluss von 6 l/h. Zu erkennen ist,

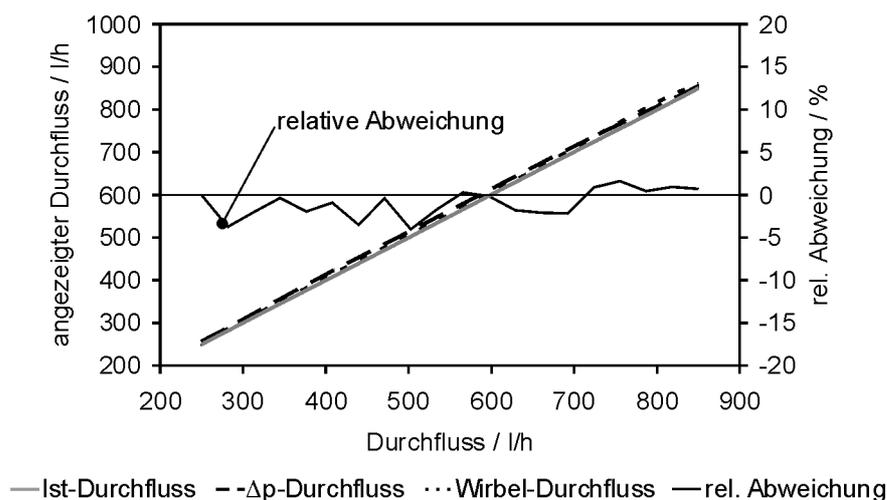


Abbildung 7.15: Angezeigter Durchfluss des Wirkdruck- und Wirbelzählverfahrens bei konstantem Gasdurchfluss von 6 l/h.
Erfassung des Ist-Durchfluss vor der Gaseinleitung

dass die Kurven über dem „Ist-Durchfluss“ liegen. Die Ursache liegt in der Erfassung des Referenzwertes vor der Gaseinleitung - stellt also keine Abweichung dar. Bei niedrigen Gasanteilen ist demnach eine Messung des Durchflusses nach beiden Verfahren möglich. Anhand der Erhöhung der Streuung ist der Umstand, dass Gasblasen im Fluid vorhanden sein können, erkennbar. Ebenfalls könnte die Höhe der Amplitudenüberhöhung und die Auswertung der absoluten Maxima weitere Informationen liefern, z.B. Unterscheidung des Auftretens von Pulsationen und Gasblasen).

Pulsationen im Fluid

Es zeigt sich, dass Pulsationen unter 20 Hz die Wirbelablösung extrem stören. Bei Pulsationsfrequenzen über 20 Hz lösen sich Wirbel ab, können allerdings nicht detektiert werden, sobald die Amplitude der Pulsationen über der der Wirbelablösung und im Frequenzbereich der Wirbelablösung liegt.

Ablagerungen und Gaseinschlüsse in den Wirkdruckleitungen

Ablagerungen und Gaseinschlüsse in den Druckzuleitungen verhalten sich wie erwartet. Die Ablagerungen in den Druckzuleitungen beeinflussen den Wirkdruck bei der quasistatischen Messung erst bei totalem Verschluss einer Zuleitung, dann verläuft der angezeigte Durchfluss nur noch in Abhängigkeit des statischen Drucks und weist keinen Zusammenhang mehr mit dem vorliegenden Durchfluss auf. Die Wirbelablösung kann im Falle der Niederdruckleitung bereits bei teilweisem Verschluss aufgrund der veränderten Dämpfungseigenschaften des fluidischen Systems nicht mehr zuverlässig erfasst werden. Eine Angabe eines Durchflusses ist nach dem Wirbelzählverfahren dann nicht mehr möglich. Auch bei Gaseinschlüssen in den Druckzuleitungen verändert sich die Dämpfung, wodurch die Wirbelerfassung deutlich beeinträchtigt wird. Im Falle des Wirkdruckverfahrens kommt es zu einem Einfluss aufgrund der Differenz des hydrostatischen Drucks zwischen Hoch- und Niederdruckseite, sofern der Drucksensor über der Messstrecke montiert ist. Der hydrostatische Druck führt vor allem in niedrigen Durchflussbereichen zu deutlichen Messabweichungen.

Folglich können der Verschluss der Zuleitungen und Gaseinschlüsse in den Druckzuleitungen über die Differenz der Signale detektiert werden, da die Wirkdruckmessung Abweichungen aufweist und die Wirbelablösung entweder unbeeinflusst bleibt oder im Extremfall nicht mehr aufnehmbar ist.

7.1.4 Fazit zum Wirbel-Wirkdruck-Durchflusssensor

In den vorangegangenen Abschnitten wurde eine theoretische und messtechnische Beschreibung und Untersuchung der Zusammenführung von Wirkdruck- und Wirbelfzählverfahren vorgestellt. Die Untersuchungen zeigen das Potenzial zur Implementierung einer Selbstüberwachung der gesamten Messstrecke. Für die experimentell untersuchten Störungen bzw. Störungsursachen kann nachgewiesen werden, dass die Auswirkungen auf die zwei Verfahren unterschiedlich sind, so dass eine Detektion anhand einer Differenz möglich ist. Der Erkennungsgrad ergibt sich unter Berücksichtigung relevanter Störungen und Zusammenfassung zu sinnvollen Gruppen zu ungefähr 70 %. Alle als relevant und schwer detektierbar eingestuften Störungen können durch den WWD erkannt werden. Nicht vorhersagbar und daher nicht detektierbar sind alle Störungen und Ausfälle, die Messelement und Elektronik betreffen. Daher sollten bekannte Überwachungsmethoden aus der Mikroelektronik zur Erkennung dieser Störungen angewendet werden. Dies ist in den meisten Sensoren bereits der Fall.

Bei einigen Störungen, wie zum Beispiel Ablagerungen in der Messstrecke, kann eine Reduzierung der Messabweichung durch eine Mittelwertbildung der zwei Ausgangswerte erreicht werden. Anhand der Differenz der Ausgangswerte kann jedoch keine Diagnose der Ursache erfolgen. Eine Einbeziehung weiterer Merkmale wie

- Amplitude der Wirbelablösung,
- Rauschpegel im Amplitudenverlauf,
- Streuung der Wirbelablösefrequenz,
- Streuung des Wirkdrucks,
- Änderungsgeschwindigkeit des Durchflusses und
- Erfassung weiterer Amplitudenüberhöhungen im Signal

können jedoch eine Diagnose ermöglichen. All diese Möglichkeiten stellen Varianten des Verfahrens *Analyse des Messsignals* dar. Wie bei einigen der gefundenen mit Selbstüberwachungsfunktionen ausgestatteten kommerziellen Sensoren ist auch bei dem Wirbel-Wirkdruck-Durchflusssensor eine gleichzeitige Nutzung mehrerer Verfahren zur Selbstüberwachung sinnvoll.

Zusätzlich sollte die Medientemperatur gemessen werden, da bei einer Dichteänderung des Fluids Wirkdruck- und Wirbelfrequenzverfahren ebenfalls auseinander streben. So kann bei Wasser im Extremfall ein Fehler von über 4 % des Wirkdrucks

auftreten (Vergleich von Temperaturen 4 °C und 100 °C, siehe Anhang Seite 165). Zur Erfassung der Medientemperatur muss nicht zwangsläufig ein zusätzlicher Sensor integriert werden. Beim vorliegenden Differenzdrucksensor wird die Temperatur zum Beispiel durch die Messung des Gesamtwiderstands der piezoresistiven Messbrücke berechnet und ausgegeben. Dabei handelt es sich allerdings nur zum Teil um eine Erweiterung der Selbstüberwachung. Zusätzlich wird durch eine Korrektur in der Sensorelektronik eine Verringerung der Messunsicherheit und eine Erweiterung des Funktionsumfangs erreicht, da die Größen Temperatur und Medientichte erfasst werden.

Bezüglich des Druckverlusts werden die Anforderungen nicht erfüllt. Die Vermutung, durch Verwendung des Staukörpers als Engstelle eine Verringerung des bleibenden Druckverlustes zu erreichen, werden mit dem Experimentalaufbau nicht bestätigt. Im gegebenen relativ niedrigen Durchflussbereich von unter 1000 l/h kann auf diese Weise jedoch die Reynoldszahl zugunsten einer besseren Wirbelablösung und Linearität erhöht werden. Sollte dies kein Problem darstellen, kann ein Einbau des Staukörpers vor der Engstelle Vorteile bringen. Die Dimensionierung des Staukörpers braucht nur hinsichtlich der Wirbelbildung optimiert zu werden und die Auswirkungen von Ablagerungen und Abrasion sollten noch deutlicher detektierbar sein.

7.2 Referenz - passiver Bypass

Das Verfahren der Referenz bietet neben der Integration einer Selbstüberwachung unter Umständen auch die Möglichkeit einer Rekonfiguration durch eine Rekalibrierung des Sensors anhand der bekannten Referenzgröße.

Eine Variation des Volumenflusses kann mittels einer Pumpe geschehen, die den Durchfluss durch den Sensor erhöht oder reduziert. Dabei ist auf eine geringe Rückwirkung auf den Prozess zu achten, d.h. der Druckverlust muss konstant bleiben und durch die Pumpe darf keinesfalls der Durchfluss der Prozessanlage beeinflusst werden. In der Studienarbeit [Söhn03] wird ein Vergleich verschiedener Konzepte vorgestellt, um im gegebenen Durchflussbereich einen selbstüberwachenden Wirkdrucksensor mit Referenzerzeugung mittels einer Pumpe zu realisieren. Das Hauptproblem liegt in den Genauigkeitsanforderungen an den Volumenstrom der Pumpe. Dadurch sind Pumpen, die Leckströme zulassen, von vornherein ausgeschlossen, da das geförderte Volumen dann vom Gegendruck abhängt. Auch Kol-

ben- oder Membranpumpen sind aufgrund der Genauigkeitsanforderungen bzw. der hohen Kosten nicht zu empfehlen.

Auch die kinematische Umkehr, also eine Variation der Fluidgeschwindigkeit durch eine Bewegung des Sensors relativ zum Fluid (siehe Abschnitt 2.2, Seite 21), wird aufgrund des hohen mechanischen Aufwands nicht weiter betrachtet.

Eine mechanisch weniger anspruchsvolle Möglichkeit ergibt sich durch das Umschalten eines Bypasses, der den relativ hohen Druckverlust eines Wirkdrucksensors nutzt. Beim Öffnen des Umleitungskreislaufs wird ein Teil des Fluidstroms am Durchflusssensor vorbeigeführt und auf diese Weise ein Sprung der Messgröße hervorgerufen. Diese Variante, die prinzipiell mit einem Ventil realisiert werden kann, soll nun näher untersucht werden.

7.2.1 Konzeption des Bypasses

Die Größe des Volumenstroms, der am Durchflusssensor vorbeigeleitet wird, ist nicht konstant, sondern abhängig vom gesamten Volumenstrom. Nach Gleichung (4.1.3) ergibt sich der Druckverlust p_v einer Strömungstrecke im turbulenten Reynoldszahlbereich aus dem Produkt der halben Fluidichte mit der Widerstandszahl ζ und dem Quadrat der mittleren Strömungsgeschwindigkeit. Da der Druckverlust über Bypass und Messstrecke identisch sein muss, können beide gleich gesetzt werden (vgl. Abb. 7.16):

$$p_v = \zeta_{\text{Mess}} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \bar{v}_{\text{Mess}}^2 = \zeta_{\text{By}} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \bar{v}_{\text{By}}^2 \quad (7.2.1)$$

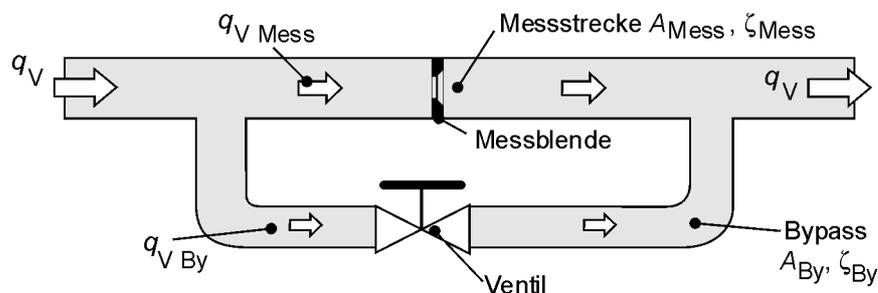


Abbildung 7.16: Prinzipskizze eines Bypasses zur Wirkdruckmessstrecke.

Nach Umstellen und Ersetzen der mittleren Geschwindigkeit durch den Quotient aus Volumenfluss und Strömungsquerschnitt ergibt sich für den Volumenfluss des Bypasses

$$q_{V \text{ By}} = \frac{A_{\text{By}}}{A_{\text{Mess}}} \sqrt{\frac{\zeta_{\text{Mess}}}{\zeta_{\text{By}}}} \cdot q_{V \text{ Mess}} \quad . \quad (7.2.2)$$

Die Summe der Durchflüsse von Messstrecke und Bypass ist der Gesamtdurchfluss

$$q_V = q_{V \text{ Mess}} + q_{V \text{ By}} \quad . \quad (7.2.3)$$

Nach dieser Knotengleichung und Gleichung (7.2.2) ergibt sich für den Volumenfluss durch die Messstrecke bei geöffnetem Bypass

$$q_{V \text{ Mess}} = x \cdot q_V \quad (7.2.4)$$

$$\text{mit } x = \frac{A_{\text{By}} \sqrt{\zeta_{\text{By}}}}{A_{\text{By}} \sqrt{\zeta_{\text{Mess}}} + A_{\text{Mess}} \sqrt{\zeta_{\text{By}}}} \quad . \quad (7.2.5)$$

Nach Gleichung (7.2.4) und (7.2.5) lässt sich ein konstantes Verhältnis zwischen Gesamtfluss und Durchfluss der Messstrecke einstellen. Das Verhältnis ist, soweit die Widerstandszahlen als konstant angesehen werden können, unabhängig vom Volumenfluss. Die Widerstandszahlen ζ_{Mess} bzw. ζ_{By} können nach [Bohl94] aus der Summe der Einzel-Widerstandszahlen der jeweiligen Einbauten berechnet werden.

Durch Öffnen des Bypasses verringert sich durch die geringere Strömungsgeschwindigkeit allerdings der Druckverlust der Messstrecke. Zur Vermeidung dieser Rückwirkung muss ein zusätzlicher Strömungswiderstand in die Messstrecke eingefügt werden, sobald der Bypass geöffnet wird. Zur Erfüllung dieser Anforderung muss ein zweites Ventil in der Messstrecke installiert werden.

Auch wenn sich turbulente Strömungen nicht mittels elektro-fluidischer Analogien durch elektrische Netzwerk-Berechnungsmethoden berechnen lassen, kann die Darstellung des fluidischen Systems durch ein Ersatzschaltbild für Abschätzungen nützlich sein. In Abbildung 7.17 ist das beschriebene System mit einem identischen Aufbau von Bypass und Messstrecke (beide mit Messblende) dargestellt.

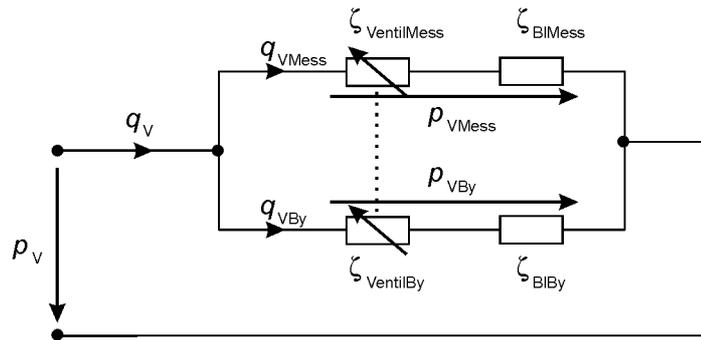


Abbildung 7.17: Fluidisches Ersatzschaltbild des Wirkdrucksensors mit Bypass.

$\zeta_{\text{VentilMess}}$ und ζ_{VentilBy} sind variable Strömungswiderstände zur Korrektur des Druckverlusts, ζ_{BlMess} und ζ_{BlBy} sind die Strömungswiderstände der Blenden

Dieses System ist als Experimentieraufbau realisiert und in Abbildung 7.18 zu sehen. Das Öffnen des Bypasses und die Drosselung der Messstrecke wird dabei durch eine zentral gelagerte drehbare Ventilscheibe realisiert. Die Ventilscheibe wird von außen durch einen Servomotor in eine beliebige definierte Position gedreht.

Der Bypass lässt den Durchfluss durch die Messstrecke prozentual sinken, d.h. der Übertragungsfaktor des Wirkdrucksensors wird verändert. Störungen, die nur auf den Übertragungsfaktor wirken, können demnach nicht erkannt werden. Störungen, die den Übertragungsfaktor variieren, sind zum Beispiel Verstärkungsänderungen der Elektronik, aber auch Abrasion oder Ablagerungen. In den beiden letzteren Fällen wird der Wirkdruck durch eine Abrundung der scharfen Kante der Messblende geringer. Die Überlegung, dass eine solche Störung auf die Messstrecke in deutlich anderem Maß wirkt als auf den Bypass, der nur kurzzeitig geöffnet wird, macht eine Erkennung der Störungen wiederum wahrscheinlich. Dies liegt darin begründet, dass sich der Druckverlust in etwa gleichem Maße ändert wie der Wirkdruck. Dadurch wird auch der prozentuale Volumensprung bei Öffnen des Bypasses verändert, wodurch ein Merkmal zur Störungserkennung generierbar sein sollte. Messungen mit dem Versuchsaufbau aus Abbildung 7.18 zeigen jedoch keine erkennbare Änderung.

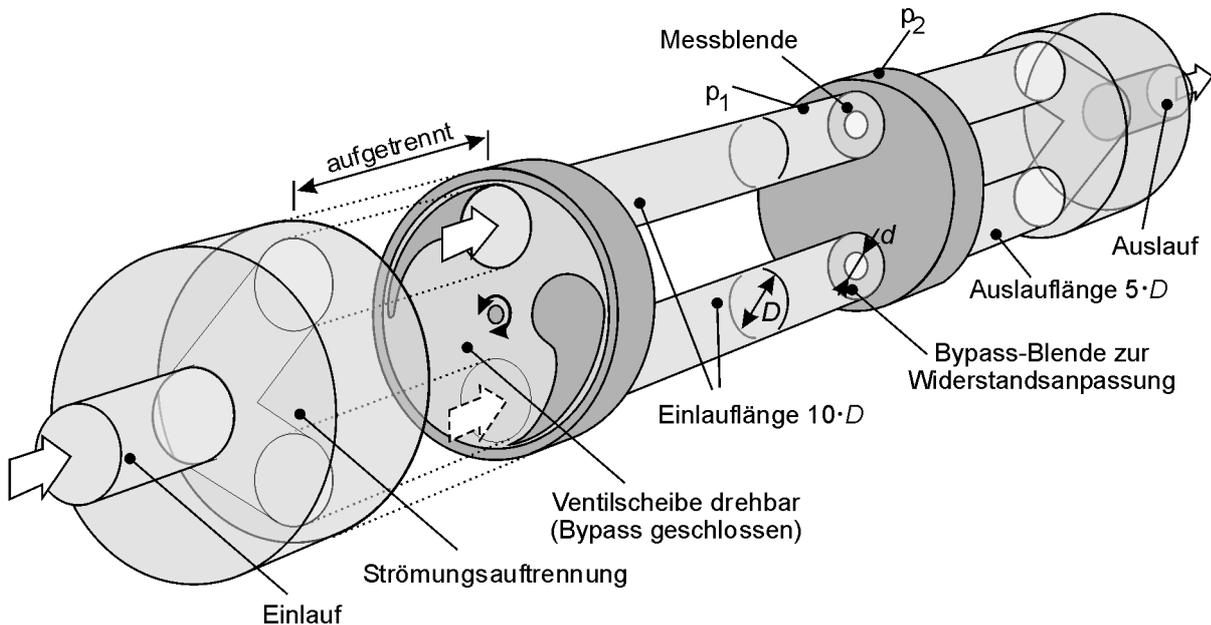


Abbildung 7.18 Aufbau des Wirkdrucksensors mit Blende und schaltbarem Bypass mittels drehbarer Ventilscheibe [PEM II 04A].
Bypass und Messstrecke sind bis auf die Ventilscheibe identisch aufgebaut
Messstrecke oben, Bypass unten

Dies liegt an den hohen Strömungswiderständen des Bypass- und Messstreckenventils. Durch Abrasion oder Ablagerungen wird hauptsächlich der Strömungswiderstand der Messblende verändert. Gibt man die Widerstandszahlen der Ventile über die Widerstandszahl der Blende ζ_{Bl} und dem Durchflussverhältnis x an, so ergeben sich für die Messstrecke

$$\zeta_{\text{VentilMess}} = \left(\frac{1}{x^2} - 1 \right) \cdot \zeta_{Bl} \quad (7.2.6)$$

und für das Bypassventil

$$\zeta_{\text{VentilBy}} = \left(\frac{1}{(1-x)^2} - 1 \right) \cdot \zeta_{Bl} \quad (7.2.7)$$

Für das Durchflussverhältnis q_{VMess} zu q_V bedeutet dies nach Umstellen, dass der Volumenfluss

$$q_{\text{VMess}} = \frac{\sqrt{\zeta_{\text{BI}}}}{\sqrt{(1-x)^2 \cdot \left(\zeta_{\text{BIMess}} + \left(\frac{1}{x^2} - 1 \right) \zeta_{\text{BI}} \right) + \sqrt{\zeta_{\text{BI}}}}} q_{\text{V}} \quad (7.2.8)$$

von der Änderung der Widerstandszahl ζ_{BIMess} nicht entscheidend verändert wird. Bei einer Reduzierung der Widerstandszahl der Messblende um 10 % bedeutet dies eine Änderung des Durchflusssprungs bei Öffnung des Bypasses von 0,54% (für ein Durchflusssprung auf $x = 75\%$).

Die geringe Änderung des Durchflusssprungs wird durch die verhältnismäßig hohen Widerstandszahlen der notwendigen Ventile hervorgerufen. Eine weitere Möglichkeit stellt daher die Messung des Wirkdrucks am Ventilschieber selbst dar. Dabei kann das Ventil in Form einer Segmentblende (Abb. 7.19) ausgeführt werden, wie sie z.B. zur Messung flüssiger Medien mit Gasblasen oder Partikeln vorgeschlagen wird (z.B. [Miller89], [VDI/VDE 2041]). Eine Korrektur des Druckverlusts zur Vermeidung von Rückwirkungen auf den Prozess reduziert allerdings den messbaren Effekt bei Öffnung des Bypasses. Zur Erhöhung der Widerstandszahl muss die Öffnung der Segmentblende verringert werden. Dadurch steigt der Wirkdruck an und gelangt somit wieder in den Bereich des Wirkdrucks bei vollem Durchfluss und ursprünglicher Blendenöffnung. Im Ergebnis reduziert sich der Wirkdruck um 4 % bei einem Durchflusssprung von 20 % - bei konstantem Öffnungsverhältnis würde der Wirkdruck um 36 % zurückgehen. Des Weiteren stehen die bei geringen Nennweiten geforderten Fertigungstoleranzen und folglich bei bewegter Segmentblende die hohe Positioniergenauigkeit einer solchen Lösung entgegen.

Aufgrund der genannten Nachteile wird die Referenzerzeugung mittels eines passiven Bypasses nicht weiter verfolgt. Der große Nachteil, dass entgegen anfänglicher Vermutungen weder Abrasion oder Ablagerungen in der Messstrecke erkennbar sind, spricht gegen eine solche Lösung. Ein weiterer Nachteil sind die hohen Toleranzanforderungen an die Ventilstel-

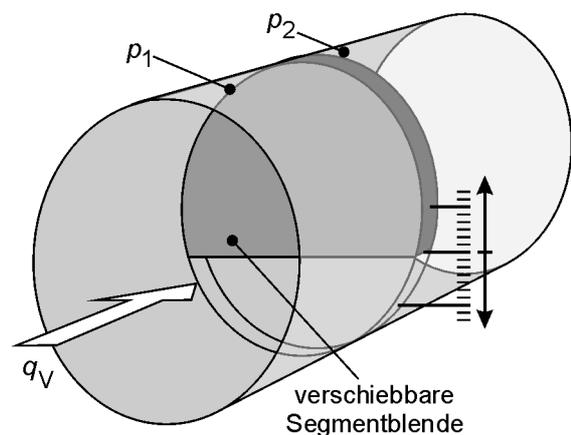


Abbildung 7.19: Verschiebbare Segmentblende zur Realisierung einer variablen Widerstandszahl.

lungen zur Einstellung des Durchflusssprungs. Wie in Abbildung 4.3 erkennbar, ist die Änderung der Widerstandszahl eines Schiebers bei kleinen Öffnungsverhältnissen sehr hoch (von $\zeta_1 = 368,3$ bei 1,5 mm auf $\zeta_2 = 2048,5$ bei 0,75 mm), was die Anforderungen an die Positioniergenauigkeit entsprechend vergrößert.

Eine Möglichkeit, wie man die genannten Nachteile umgehen kann, ist der komplette Verschluss der Messstrecke in Höhe der Blende. Dadurch fließt der gesamte Volumenfluss über den Bypass (Abb. 7.20). Da die Messstrecke auf Höhe der Messblende verschlossen wird, besteht keine direkte fluidische Verbindung zwischen positiver und negativer Druckentnahmestelle. Daher kann der Druckverlust über dem Bypass ermittelt werden. Auch hierbei wird ein vom Durchfluss abhängiger prozentualer Drucksprung erzeugt. Allerdings handelt es sich jetzt nicht um das Verfahren *Referenz*, sondern um *Redundanz*, da auf eine zweite Messstrecke zur Druckverlustmessung umgeschaltet wird. Der Druck wird bei einer Blendenmessung abhängig vom Durchmesser Verhältnis auf etwa 60-80 % des Wirkdrucks fallen (vgl. Abb. 4.6).

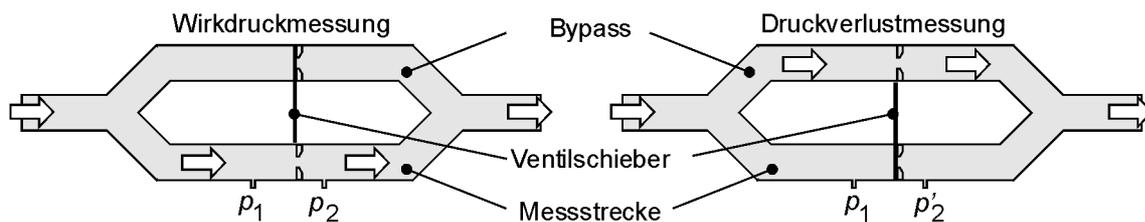


Abbildung 7.20: Prinzipskizze des Bypasses zur Druckverlustmessung.

Aufgrund der deutlich höheren Benutzung der Messstrecke wird diese von Effekten wie Abrasion deutlich höher belastet sein. Daher sollten diese Störungen anhand der Druckverlustmessung erkennbar sein.

Die folgende messtechnische Betrachtung soll klären, welches Potenzial dieses Konzept der Umschaltung auf die Druckverlustmessung zur Selbstüberwachung eines Wirkdrucksensors aufweist.

7.2.2 Messergebnisse zum passiven Bypass

Die Messungen sind an einer angepassten Modifikation des unter Abbildung 7.18 gezeigten Aufbaus durchgeführt. Der Nenndurchmesser beträgt 13 mm mit einem Durchmesser Verhältnis von $\beta = 46,92$ ($d = 6,1$ mm). Der für die Wirkdruckmessung

wichtige Durchflusskoeffizient $C(Re)$ ist in Abbildung 7.21 dargestellt. Das Konzept des Bypasses zur Druckverlustmessung sieht vor, im Betrieb zeitweise die Messstrecke zu verschließen und den Bypass zu öffnen. Dadurch sinkt der Differenzdruck am Drucksensor auf Durchschnittlich 79,3 % ($Re = 2700...9500$). Daher liegt der Druckverlust etwas über dem für Messblenden dieses Durchmesserverhältnisses.

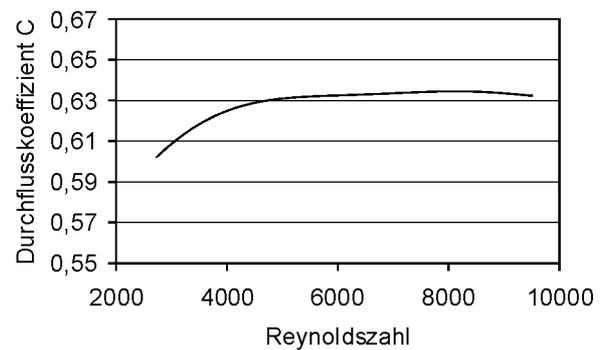


Abbildung 7.21: Verlauf des Durchflusskoeffizienten.

Der Grund liegt in der Anordnung der Druckentnahmen. Es wird der Druckverlust des gesamten Bypasses mit Blende und insgesamt vier Winkelrohren gemessen, der dementsprechend höher liegt. Abbildung 7.22 zeigt die absolute und prozentuale Abweichung des Differenzdrucks bei geöffnetem Bypass.

Es muss nun messtechnisch nachgewiesen werden, welche Störungen durch Ver-

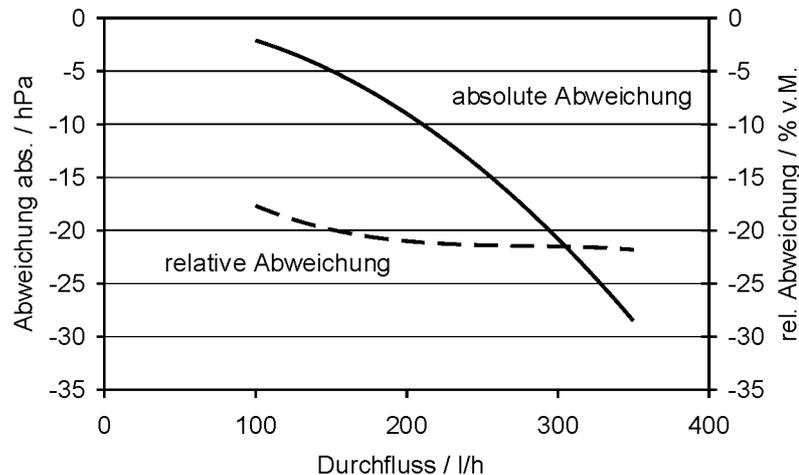


Abbildung 7.22: Abweichung des Differenzdrucks vom erwarteten Wirkdruck über dem Volumendurchfluss. $relative\ Abweichung = 100 \cdot (p_v - \Delta p) / \Delta p$

wendung des Bypasses erkannt werden können. Die überprüften Störungen sind:

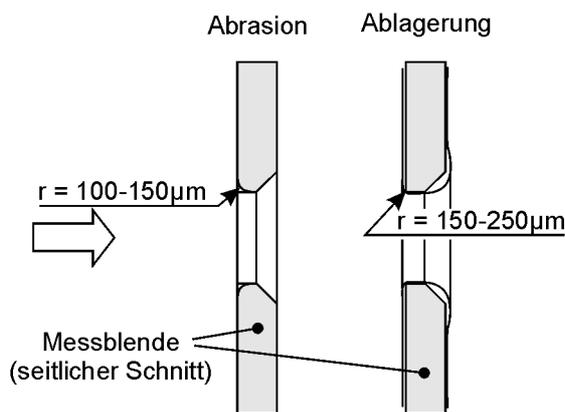
- Ablagerungen in der Messstrecke
- Abrasion der Messblende

- Verschluss der Druckzuleitungen
- Gaseinschluss in den Druckzuleitungen

Im Vergleich zu Abschnitt 6.3 werden hier Pulsationen und Gasblasen im Fluid nicht berücksichtigt. Gründe hierfür sind, dass bei der Wirkdruckmessung Pulsationen und Gasblasen keinen so entscheidenden Einfluss haben, wie bei dem Wirbelzählverfahren. Für die Versuche werden die Störungen, wie unter Abschnitt 6.3 beschrieben, eingebracht.

Abrasion und Ablagerung

Bei Abrasion liegt der Wirkdruck niedriger als bei intaktem Sensor, was den Erwartungen entspricht. Die Messblende zeigt keine messbare Vergrößerung der Blendenöffnung, die Einlaufkante zeigt eine



Abbrundung mit Radien im Bereich 100 bis 150 μm . Bei der neuwertigen Blende ist der Kantenradius etwa 10-20 μm (Abb. 7.23).

Im Falle von Ablagerungen liegt der gemessene Wirkdruck ebenfalls unter dem einer neuwertigen Blende. Auch hier steht die Abrundung der Kante im Bereich 150 bis 250 μm im Vordergrund. Dabei beträgt die Dicke der Ablagerung auf der Vorderseite der Messblende ca. 35 μm (Abb. 7.23).

Abbildung 7.23: Abradierte bzw. abgelagerte Blende.

Die prozentualen Abweichungen des Differenzdrucks im Falle von Abrasion und Ablagerung sind in Abbildung 7.24 dargestellt. Die Abzisse entspricht dem Wirkdruck, da bei einer Messung nur dieser als Vergleichswert herangezogen werden kann. Dabei ist ersichtlich, dass die Störungsursachen einen deutlichen Einfluss auf die Druckänderung haben. Obwohl die Abrundung bei Abrasion geringer ausfällt als bei Ablagerung, ist deren Einfluss auf den Wirkdruck größer. Dies wird damit begründet, dass sich Ablagerungen auch in der Blendenöffnung und vor allem an der auslaufseitigen Phase bilden, die der Verringerung des Wirkdrucks entgegen wirken.

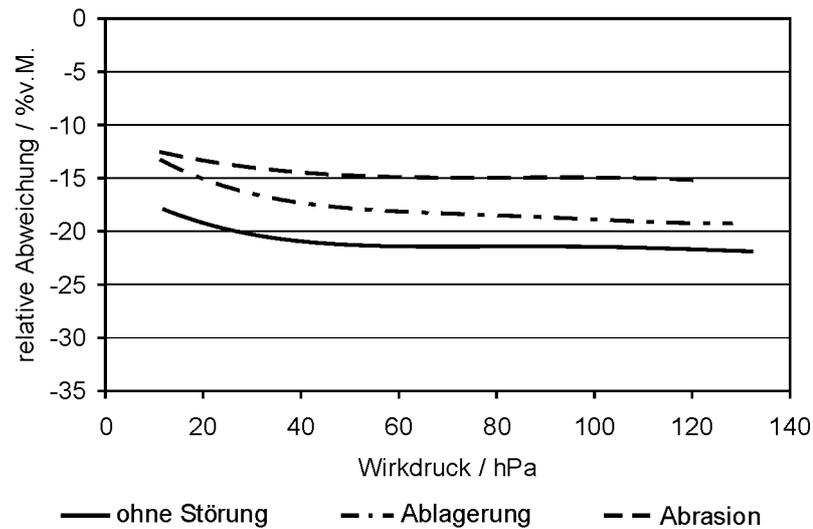


Abbildung 7.24: Vergleich der Abweichungen durch Ablagerungen und Abrasion bei geöffnetem Bypass. Abweichung vom Wirkdruck in % v.M. ohne Störung, nach Abrasion und nach Ablagerung über dem Wirkdruck aufgetragen

Wirkdruckleitungen mit Gaseinschlüssen oder Verstopfungen

Auch Verschlüsse der Druckzuleitungen können, wie auch Gaseinschlüsse in den Leitungen, durch das Umschalten auf die Druckverlustmessung erkannt werden. Für den Fall eingeschlossener Gasblasen in den Zuleitungen sind die resultierenden Abweichungen in Abbildung 7.25 dargestellt. Vor allem in niedrigen Druckberei-

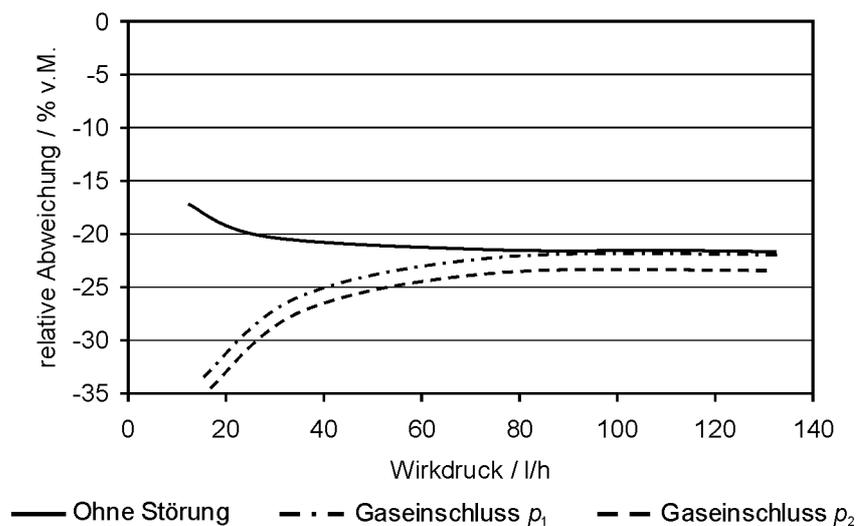


Abbildung 7.25: Abweichungen bei Gaseinschluss in den Druckzuleitungen p_1 bzw. p_2 .

chen ist der Einfluss deutlich erkennbar. Die absoluten Werte der Abweichung ist von dem Gasvolumen und der Montage des Drucksensors relativ zur Messstrecke abhängig.

7.2.3 Fazit zum passiven Bypass

Das Verfahren der *Referenzerzeugung* zur Realisierung einer Selbstüberwachung des Durchflusssensors ist in dieser Arbeit genau untersucht. Die Realisierungen mit Pumpen zur Erzeugung einer Referenz stellen einen zu hohen Aufwand dar, so dass solche Varianten ausgeschlossen werden können. Ein passiver Bypass ist vom mechanischen Aufwand vergleichsweise überschaubar. Die Vermutung, mittels eines solchen Bypasses Störungen wie Abrasion oder Ablagerungen aufgrund der veränderten Druckverluste erkennen zu können, kann allerdings nicht bestätigt werden. Dadurch reduzieren sich die erkennbaren Störungen auf Totalausfälle durch verstopfte Druckleitungen oder Drucksensorausfälle. Die Erkennung dieser eindeutigen Störungen rechtfertigt den Aufwand nicht, weshalb die Referenzerzeugung eines Durchflusses in dieser Arbeit nicht empfohlen werden kann. Aufgrund der Abhängigkeit des Durchflusssprungs vom vorliegenden Volumendurchfluss können keine exakten Kennwerte zur Rekalibrierung des Durchflusssensors erfasst werden. Daher ist auch dieser grundsätzliche Vorteil des Verfahrens *Referenzerzeugung* nicht nutzbar.

Die Variation des Bypasses zur Druckverlustmessung bietet größeres Potenzial. Dabei ist das Verfahren allerdings nicht mehr die *Referenzerzeugung* der Messgröße Durchfluss. Es handelt sich dabei um ein Umschalten auf eine in funktionsbeteiligter Redundanz betriebene zweite Durchflussmessstrecke. Folglich wird bei dieser Variation des Bypasses das Verfahren *Redundanz* genutzt.

Bei der Messung des Druckverlusts und des Wirkdrucks handelt es sich um zwei unterschiedliche Messverfahren, die allerdings ähnliche Effekte nutzen. Dadurch kann eine gleichartige Beeinflussung beider Messstrecken durch vorliegende Störungsursachen eintreten. Im Falle von Ablagerungen und Abrasion der Messstrecke bestehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten einer gleichartigen Beeinflussung vorzubeugen. Entweder kann durch unterschiedliche Nutzungsdauern sicher gestellt werden, dass beide Messstrecken verschieden stark beeinflusst werden. Dies ist bei den unter Abschnitt 7.2.2 präsentierten Messungen vorausgesetzt. Zum Anderen kann der Aufbau des Bypasses von dem der Messstrecke abweichen. Dadurch kann

aufgrund der veränderten Geometrien eine unterschiedliche Empfindlichkeit gegenüber Abrasionen und Ablagerungen realisiert werden. Dies bietet sich an, da in der Messstrecke primär die scharfe Kante der Messblende betroffen ist, die im Bypass nicht notwendig ist.

Wie gezeigt wurde, eignet sich diese Möglichkeit grundsätzlich zur Selbstüberwachung. Es ergibt sich ein Erkennungsgrad von etwa 45 % der betrachteten Störungs- und Ausfallursachen. Gewisse Nachteile dieser Art der Selbstüberwachung sind aufgrund der bewegten Bauteile hinsichtlich Kosten und Zuverlässigkeit gegeben. Damit steht bei dieser Lösung ein verhältnismäßig hoher konstruktiver Aufwand einem mittelmäßigen Erkennungsgrad gegenüber.

7.3 Analyse von Zusatzsignalen - Wheatstone-Brücken-Überwachung

Eine weitere Möglichkeit, die im Folgenden näher untersucht wird, nutzt die Kenntnis von Zusatzsignalen. Wie unter Abschnitt 3.5.5 schon ausgeführt, besteht bei der Analyse von Zusatzsignalen die Möglichkeit, spezielle Störungen zu erkennen. Eine Überwachung des gesamten Sensors ist damit meist nicht möglich und wird auch hier nicht angestrebt. Die Wheatstone-Brücke eines piezoresistiven Drucksensors stellt für die druckbasierte Durchflussmessung nur einen möglichen Ort zum Auftreten von Störungen dar. Trotzdem soll die Überwachung der Brücke hier vorgestellt werden, da auch die Möglichkeit einer Rekonfiguration besteht. Außerdem ist der Anwendungsbereich sehr groß, da eine solche Art der Überwachung bei jedem Sensor mit Messwiderständen in Wheatstone-Brücken-Schaltungen einsetzbar ist.

So ist zum Beispiel der Einsatz in der medizinischen, intrakorporalen Sensorik vorstellbar. Dabei ist die Signalverarbeitung häufig nicht direkt am Messelement integrierbar, weshalb relativ lange Zuleitungen notwendig sind. Besonders bei Druckmessungen im menschlichen Körper stellt die Gehäusung des Messelements eine Herausforderung dar, da neben der notwendigen Medientrennung zum Schutz des Messelements, auch enge Vorgaben bzgl. der Abmessungen und der Biokompatibilität bestehen. Daher bietet sich häufig ein Verguss mit biokompatiblen Silikonkautschuk zur Druckeinleitung und zum Schutz an (z.B. [Blechs02], [Müller03B]). Durch die einwirkenden Kräfte kann es jedoch häufig zu einem Bruch der Bondverbindung und Zuleitungen oder zum Kurzschluss der Zuleitungen kommen. Daher

bietet sich eine Überwachung und Rekonfiguration an, um eine Messung, wenn auch mit verminderter Genauigkeit, abschließen zu können.

7.3.1 Konzeption der Brückenüberwachung

Vorteile der Brückenschaltung sind die Kompensation des Widerstandsgrundwerts R_0 und die Möglichkeit der Kompensation gleich großer Änderungen der Grundwiderstände, verursacht z.B. durch Temperatureinflüsse. Anwendungsfelder von Messelementen mit Widerstands-Messbrücken sind z.B. Kraft-, Druck- oder Feuchtesensoren. Abbildung 7.26 zeigt schematisch eine offene Wheatstone-Vollbrücke.

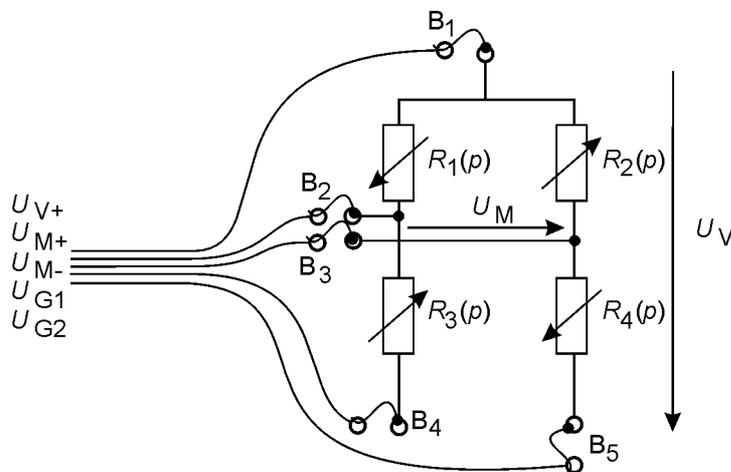


Abbildung 7.26: Offene Wheatstone-Vollbrücke zur Druckmessung.

$B_{1-5} :=$ Bondverbindungen; $R_{1-4}(p) :=$ druckabhängige Brückenwiderstände

Die vier Widerstände sind derart aufgebracht bzw. durch Dotierung in einen Verformungskörper eingebracht, dass jeweils die benachbarten Widerstände ihren Wert entgegengesetzt ändern. Die so entstandene Brücke wird an einer Diagonalen mit einer Spannung U_V oder einem Strom I_V versorgt und die Messspannung U_M über der zweiten Diagonalen abgegriffen. Neben der beschriebenen Art der Verschaltung zur Vollbrücke besteht ebenfalls die Möglichkeit aus zwei veränderlichen Widerständen eine Halbbrücke aufzubauen bzw. aus einem eine Viertelbrücke (Abb.7.27). Dabei reduziert sich die Brückenspannung U_M bei Halb- und Viertelbrücke im Vergleich zu einer Vollbrücke. Allgemein berechnet sich die Brückenspannung nach

$$u_M = \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{R_1 R_2 + R_1 R_4 + R_2 R_3 + R_3 R_4} \cdot U_V \quad (7.3.1)$$

7.3 Analyse von Zusatzsignalen - Wheatstone-Brücken-Überwachung

Im Falle eines piezoresistiven Drucksensors (siehe Abb. 4.14) sind die Widerstände in eine Silizium-Druckmessplatte eingebracht und daher abhängig vom anliegenden Druck p . Mit

$$R_x = R_0(1 + B_p \cdot p) \quad (7.3.2)$$

für R_2 und R_3 bzw.

$$R_x = R_0(1 - B_p \cdot p) \quad (7.3.3)$$

für R_1 und R_4 ergeben sich die Brücken-Übertragungsfaktoren (u_M/u_V) in Tabelle 7.2. Dabei unterscheiden sich die Übertragungsfaktoren für Halb- und Viertelbrücken danach, welche Widerstände herangezogen werden. Für Halbbrücken werden dabei nur benachbarte Widerstände verschaltet (vgl. Abb. 7.27).

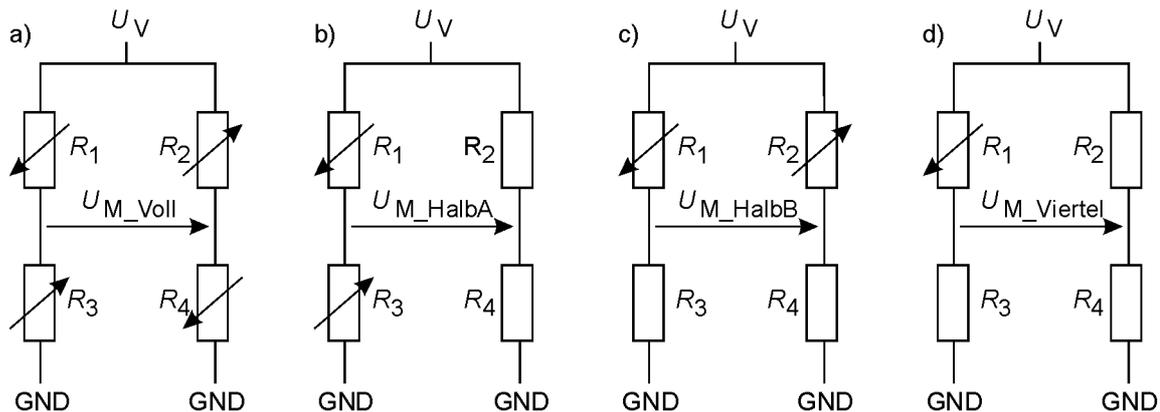


Abbildung 7.27: Schaltungsstrukturen von Voll-, Halb-, und Viertelbrücken.
Brückenübertragungsfaktoren siehe Tabelle

Tabelle 7.2: Brücken-Übertragungsfaktoren im Falle einer Voll-, Halb- oder Viertelbrücke (vgl. Abb. 7.27). Angegeben ist das Verhältnis u_M/u_V mit Werten nach (7.3.2) und (7.3.3)

Vollbrücke	Halbbrücke		Viertelbrücke	
$B_p p$	R_1, R_2	$\frac{2 B_p p}{4 - B_p^2 p^2}$	R_1	$\frac{B_p p}{4 - 2 B_p p}$
	R_3, R_4		R_4	
	R_1, R_3	$\frac{1}{2} B_p p$	R_2	$\frac{B_p p}{4 + 2 B_p p}$
	R_2, R_4		R_3	

Die Messbrücke wird über Bonddrähte und Zuleitungen mit der Primärelektronik verbunden, welche die Brücke mit einer Konstantspannung U_V oder einem Konstantstrom I_V versorgt und die Brückenspannung u_M hochohmig abgreift und verstärkt. Es kann im Betriebsfall zu Kurzschlüssen in den Zuleitungen, Abreißen der Bondverbindungen oder Korrosion der Leiterbahnen auf dem Messelement kommen. Zu hoher einwirkender Druck kann im Extremfall zum Bruch der Messplatte führen, auf der die piezoresistiven Widerstände eindotiert sind und damit die Messwiderstände oder Leiterbahnen unterbrechen.

Die zu detektierenden Störungsursachen sind wie erwähnt

- Widerstände inklusive der Leiterbahnen defekt,
- Bonddrähte gerissen (hochohmig),
- Messplatte gebrochen und
- niederohmige Verbindung zwischen Zuleitungen.

Störungserkennung und Diagnose

Anhand der verfügbaren fünf Kontaktierungen zur offenen Messbrücke können alle genannten Störungsursachen erkannt und auch diagnostiziert werden. Hierzu sind verschiedene Realisierungen denkbar. Eine Möglichkeit besteht, im Falle einer Spannungspeisung in der Überwachung des Versorgungsstroms I_V , der Ströme in den beiden Zweigen der offenen Brücke i_A , i_B und der Spannungen über zwei Brückenwiderständen (z.B. R_3 und R_4). Aus diesen fünf Größen lassen sich im Betrieb die Brückenwiderstände aus den Gleichungen

$$R_1 = \frac{U_V - u_{R3} - u_A - u_{IV}}{u_A} \cdot R_{\text{ShuntA}} \quad (7.3.4)$$

$$R_3 = \frac{u_{R3}}{u_A} \cdot R_{\text{ShuntA}} \quad (7.3.6)$$

$$R_2 = \frac{U_V - u_{R4} - u_B - u_{IV}}{u_B} \cdot R_{\text{ShuntB}} \quad (7.3.5)$$

$$R_4 = \frac{u_{R4}}{u_B} \cdot R_{\text{ShuntB}} \quad (7.3.7)$$

berechnen. Wobei die Strommessungen jeweils über Messshunts R_{Shunt} realisiert sind und durch die Spannungen u_{IV} , u_A und u_B repräsentiert werden (vgl. Abb. 7.28). Die Messshunts in den beiden Halbbrücken A und B müssen nicht gleich groß sein, sondern können direkt zum Abgleich der Wheatstone-Brücke dienen. Dies ist häufig notwendig, da die piezoresistiven Widerstände aufgrund des Ferti-

gungsprozesses gewissen Abweichungen ihres Grundwertes unterliegen. Eine Toleranz von etwa 1 % ist dabei üblich. Da die Abweichungen der Brückenwiderstände im allgemeinen unterschiedlich sind, ist die Brücke auch bei Nulldruck nicht abgeglichen. Daher wird die Brücke zum Nullabgleich von außen mit diskreten Wider-

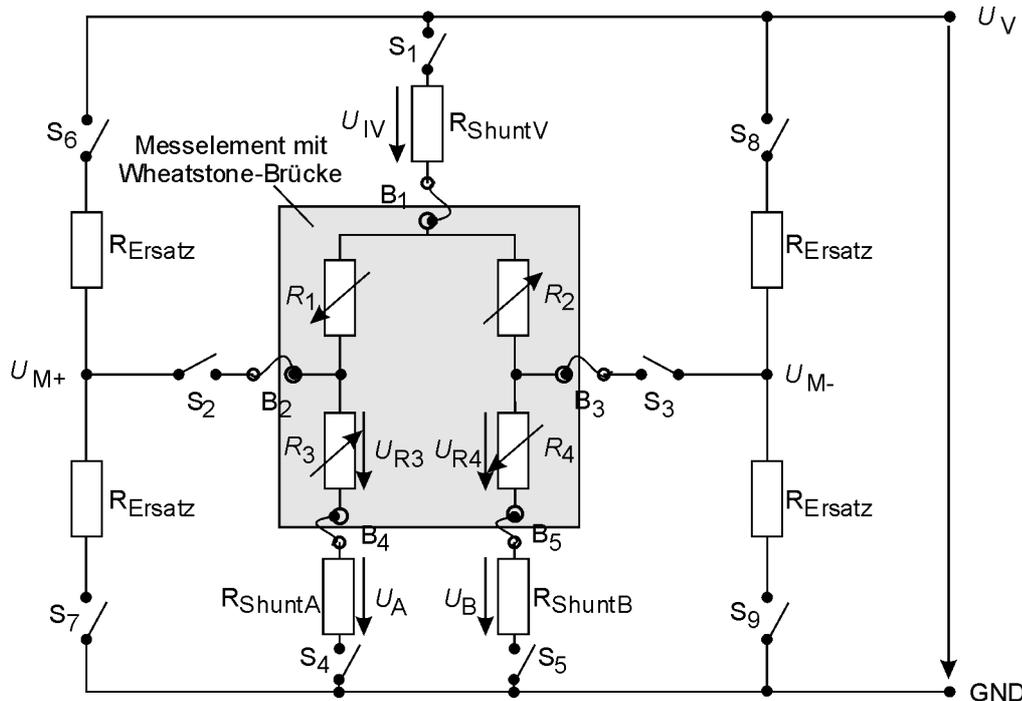


Abbildung 7.28: Wheatstone-Brücken-Überwachung mit unveränderlichen "Ersatzwiderständen" zur Rekonfiguration.

ständen bestückt. Hierzu können die Messshunts R_{ShuntA} und R_{ShuntB} direkt genutzt werden, indem die Widerstandswerte angepasst werden. Ein weiterer Widerstand sollte in diesem Fall parallel zu R_1 bzw. R_2 geschaltet werden [Bao04].

Mit den berechneten Widerstandswerten können Abweichungen, die außerhalb der Spezifikation liegen, erkannt werden. Ebenfalls lässt sich das Auftrennen der Bondverbindungen und der Bruch der Druckmessplatte, sofern die Widerstände oder Leiterbahnen betroffen sind, detektieren. Sollten Kurzschlüsse zwischen den Leiterbahnen auftreten, können anhand der drei Ströme und der zwei Spannungen in Verbindung mit der Brückendiagonalspannung u_M alle Kurzschlüsse bis auf einen detektiert werden: Der Fall des Kurzschlusses der offenen Brückenden (B_4 und B_5) verursacht im Allgemeinen keinen Unterschied in den verfügbaren Signalen. Bei einer symmetrischen Brücke sind die Ströme in beiden Halbbrücken (i_A , i_B) identisch und somit liegen beide Punkte auf gleichem Potenzial, sofern die Brücke

nicht, wie oben erwähnt, mittels der Messshunts abgeglichen wurde. Sollte ein solcher Kurzschluss auftreten, kann in der Folge ein Kurzschluss der Brückendiagonalen (B_2 und B_3) nicht mehr erkannt werden. Diese Verkettung von Kurzschlüssen ist zwar unwahrscheinlich, aber aufgrund der identischen Ursachen, z.B. Einklemmen der elektrischen Leitungen bei der Montage, nicht ausgeschlossen. Eine Tabelle der Änderungen der fünf erfassten Zusatzsignale bei Eintritt einer Störung ist in Anhang (Seite 167) dargestellt.

Der oben erwähnte Kurzschluss der offenen Brücke (B_4 und B_5) kann nur durch Öffnen des Schalters S_4 bzw. S_5 sicher detektiert werden. Dabei handelt es sich um einen Selbsttest mit Unterbrechung der Messung. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, die Vollbrücke zu einer Halbbrücke zu konfigurieren, indem man neben S_4 auch S_2 öffnet und S_6 und S_7 schließt. Im intakten Fall muss u_{IV} auf ca. 50 % fallen und u_B konstant bleiben. Auf diese Weise kann in regelmäßigen Abständen die Brücke auf Kurzschlüsse der Zuleitungen untersucht werden, was für diese Störungsart in den meisten Anwendungen als ausreichend angesehen werden kann.

Rekonfiguration der Messbrücke

Tritt eine Störung auf und wird diese erkannt und diagnostiziert, können noch intakte und korrekt kontaktierte Brückenwiderstände weiterhin zur Messung herangezogen werden. Dabei handelt es sich um eine Rekonfiguration durch Ausgliedern gestörter Schaltungsteile. Eine Verschaltung mit konstanten Widerständen zu einer Halb- bzw. Viertelbrücke bietet sich an. Die hierzu notwendigen „Ersatzwiderstände“ können sich entweder auf dem Messelement selbst befinden oder in der Primärelektronik integriert sein. Die erste Variante hat den Vorteil, dass die Kompensation der Temperatur nach wie vor gegeben ist. Nachteilig ist, dass hierzu das Messelement variiert werden muss und weitere Bondverbindungen und Zuleitungen notwendig sind. Daher wird die zweite Variante mit Ersatzwiderständen in der Primärelektronik bevorzugt. Auf diese Weise sind herkömmliche Messelemente verwendbar und unter Einschränkungen der Temperaturkompensation und der Auflösung rekonfigurierbar.

Zur Ausgliederung der defekten Brückenteile und Eingliederung der Ersatzwiderstände werden neun Schalter benötigt. Diese müssen sich durch einen geringen Widerstand im geschlossenen und hohen Widerstand im geöffneten Zustand auszeichnen, sowie hohe Schaltgeschwindigkeiten ermöglichen. Hierzu eignen sich elektromechanische Mini- oder Mikrorelais, Reed-Relais, Halbleiterrelais (SSR - solid state

relay) und CMOS-Schalter [Boyce96]. Dabei sprechen für elektromechanische Relais der sehr hohe Isolationswiderstand im geöffneten Zustand und der Widerstand R_{on} im $0,1 \Omega$ -Bereich in geschlossener Stellung. CMOS-Schalter und SSRs schalten nahezu energielos in einer Zeit von unter $0,2 \text{ ms}$ und bieten eine höhere Zuverlässigkeit [Relais98]. Daher muss die konkrete Auswahl auch anhand von Platzbedarf, Kostenanforderungen etc. getroffen werden.

In Abbildung 7.28 ist eine Möglichkeit der Schalter- und Ersatzwiderstandsanordnung dargestellt. Dabei kann jede mögliche Kombination zur Rekonfiguration verschaltet werden. Nicht möglich ist eine Verschaltung der Widerstände R_3 und R_4 zu einer Halbbrücke, sofern noch eine leitende Verbindung über R_1 und R_2 besteht, da darüber die Brückendiagonalspannung abgegriffen wird. Daher muss in diesem Fall auf eine Viertelbrücke zurückgegriffen werden.

Wie oben erwähnt, müssen bzgl. des Temperaturfehlers im Falle einer Rekonfiguration Abstriche hingenommen werden, da die Ersatzwiderstände sich nicht auf dem Messelement befinden. Daher wird im Allgemeinen weder die Temperatur noch die Temperaturempfindlichkeit der Ersatzwiderstände mit den Brückenwiderständen identisch sein. Besonders piezoresistive Widerstände besitzen eine hohe Temperaturabhängigkeit. Dabei wird nicht nur der Grundwert beeinflusst, sondern auch die Empfindlichkeit des piezoresistiven Widerstands. Für einen piezoresistiven Brückenwiderstand kann nach [Zahout03] die Gleichung

$$R_x = R_0(\vartheta) \cdot (1 + B_p(\vartheta) \cdot p) \quad (7.3.8)$$

bzw. aufgelöst
$$R_x = R_0 \cdot (1 + \alpha_R \Delta \vartheta) \cdot (1 + B_p \cdot (1 + \alpha_\pi \Delta \vartheta) \cdot p) \quad (7.3.9)$$

angenommen werden. Dabei wird der Temperatureinfluss α_π auf den Druckübertragungsfaktor B_p auch bei einer Vollbrücke nicht kompensiert. Dieser kann im Falle einer Stromspeisung unter der Voraussetzung einer angepassten Dotierung der Widerstände [Bomhol84] oder durch externe Kompensationsnetzwerke kompensiert werden [Pfeife89]. Eine solche Art der Kompensation stellt gegenwärtig den Stand der Technik kommerzieller piezoresistiver Drucksensoren dar [Gerlach05]. Da das Messelement nicht Gegenstand der Betrachtung ist, soll diese Möglichkeit nicht weiterverfolgt werden.

Die Kompensation des Temperatureinflusses auf den Grundwiderstand ist bei einer Halbbrücke unter Verwendung von R_1 und R_3 bzw. R_2 und R_4 noch gegeben (sie-

he Gleichung in Tab. 7.2). Für eine Halbbrücke unter Verwendung von R_1 und R_2 geht die Temperaturabhängigkeit des Grundwerts in den Brückenübertragungsfaktor

$$\frac{u_M}{U_V} = \frac{2 B_p(\vartheta) \cdot p}{\frac{(2 + \alpha_R \Delta \vartheta)^2}{1 + \alpha_R \Delta \vartheta} - B_p^2(\vartheta) \cdot p^2 \cdot (1 + \alpha_R \Delta \vartheta)} \quad (7.3.10)$$

ein. Im Falle einer Viertelbrücke erfolgt keine Kompensation mehr. Die Übertragungsfaktoren der Viertelbrücken unter Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit des Grundwiderstands ergeben sich mit

$$R_1, R_4: \quad \frac{u_M}{U_V} = -\frac{1}{2} + \frac{1}{(1 + \alpha_R \Delta \vartheta)(1 - B_p(\vartheta) \cdot p) + 1} \quad (7.3.11)$$

$$R_2, R_3: \quad \frac{u_M}{U_V} = \frac{1}{2} - \frac{1}{(1 + \alpha_R \Delta \vartheta)(1 + B_p(\vartheta) \cdot p) + 1} \quad (7.3.12)$$

Realistische Werte für α_R liegen im Bereich 1 bis $3 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$. Nimmt man $2 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ an, so ergibt sich bei 20 °C Temperaturänderung im Falle einer Halbbrücke mit R_1 und R_2 eine relative Abweichung des Brücken-Übertragungsfaktors (u_M/U_V) von 0,034 % und im Falle einer Viertelbrücke von etwa 60 %, bei einem angenommenen $B_p = 0,067 \text{ bar}^{-1}$ und $p_{\text{Nenn}} = 1 \text{ bar}$. Diese Beispielrechnung zeigt, dass aufgrund der hohen Temperaturabhängigkeit piezoresistiver Widerstände eine Messung des Drucks mittels einer Viertelbrücke nur in Anwendungen mit bekannter, also konstanter oder zusätzlich gemessener Temperatur sinnvoll ist (vgl. Abb. 7.29).

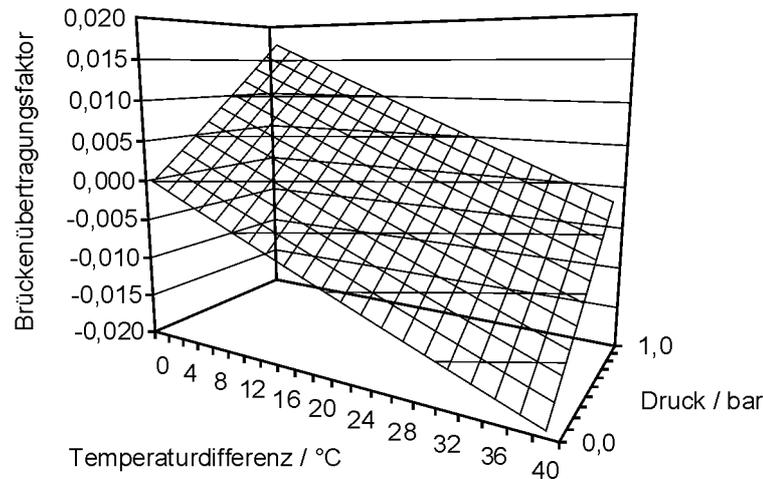


Abbildung 7.29: Berechnete Abweichung des Brücken-Übertragungsfaktors (u_M/U_V) einer Viertelbrücke (R_1) bei Temperaturänderung.
 $B_p = 0,067 \text{ bar}^{-1}$, $\alpha_R = 2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$

7.3.2 Aufbau des Prototypen

Ergebnis einer Projektarbeit [PEM II 04B] ist ein System zur Überwachung eines piezoresistiven Drucksensors mit Wheatstone-Brücke. Dabei werden, wie unter dem vorangegangenen Abschnitt beschrieben, die Ströme i_V , i_A und i_B sowie die Spannungen über den Brückenwiderständen R_3 und R_4 überwacht.

Der Funktionsumfang ist im Vergleich zu der oben dargestellten Überwachung nur auf unzulässige Änderungen der Widerstandswerte (mit Leiterbahnen) und daher auch auf Bruch der Bondverbindungen beschränkt. Kurzschlüsse der Zuleitungen werden hier nicht betrachtet.

Zur Erfassung der Spannungen kommen Instrumentationsverstärker zum Einsatz. Die Verarbeitung der aufgenommenen Signale und Interpretation des Sensorzustands mit eventuell anschließender Rekonfiguration der Brücke erfolgt in einem 8-Bit Mikrocontroller. Sollte es notwendig sein, die Rekonfiguration als Halb- bzw. Viertelbrücke vorzunehmen, wird das Ausgangssignal automatisch korrigiert. Dadurch ergeben sich, ausgenommen der nicht kompensierbaren Temperaturfehler, keine Abweichungen des Ausgangssignals. Bei den zur Rekonfiguration notwendigen Schaltelementen handelt es sich um PhotoMOS-Relais (MATSUSHITA AQV250).

Der prinzipielle Aufbau der Brückenüberwachung ist in Abbildung 7.30 dargestellt. Der Mikrocontroller erfasst und interpretiert die Brückensignale und entscheidet mittels einstellbarer Grenzwerte für den Widerstandsgrundwert, ob die Brücke intakt ist oder eine Rekonfiguration vorgenommen werden muss.

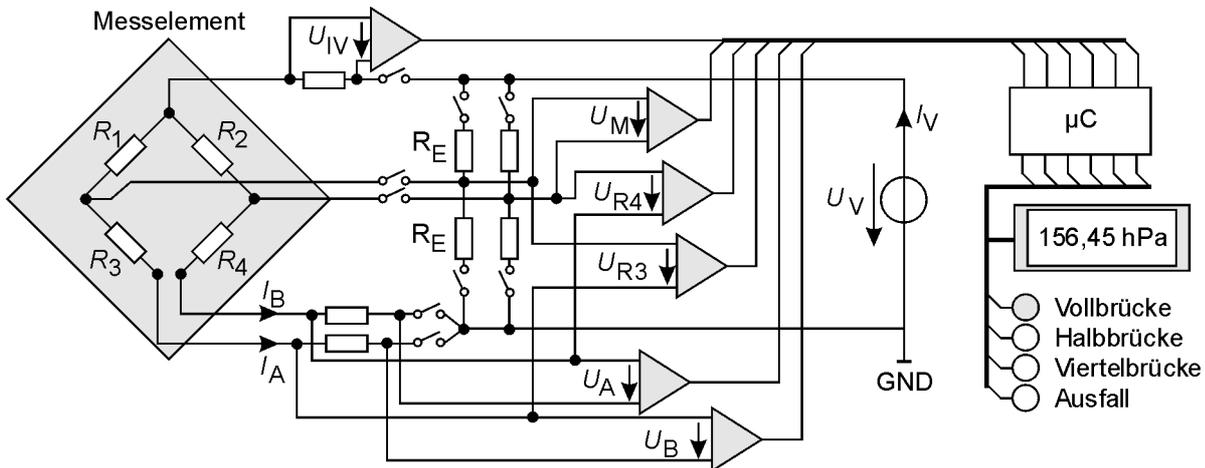


Abbildung 7.30: Verschaltung der Messbrücke mit dem Brückenüberwachungsnetzwerk.

Die gemessene und gegebenenfalls korrigierte Brückenspannung wird über die serielle RS232-Schnittstelle an einen PC übertragen. Mittels eines LabVIEW-Programms kann der aktuelle Druckwert angezeigt und auch Konfigurationseinstellungen des Mikrocontrollers vorgenommen werden. Die gegenwärtige Verschaltung der Wheatstone-Brücke wird ebenfalls an den Rechner übertragen und angezeigt.

Mit diesem Aufbau kann die Anwendbarkeit der Brückenüberwachung demonstriert werden. Die Rekonfigurationszeit liegt im Bereich von 0,5 s.

7.3.3 Fazit zur Brückenüberwachung

Die Überwachung einer Wheatstone-Brücke, wie sie in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt wird, liegt nahe. Durch einfaches Umschalten kann die Messung auch bei Eintritt einer Störung fortgesetzt werden, sofern noch mindestens ein Brückenwiderstand intakt und korrekt kontaktiert ist. Die Überwachung der Brücke im laufenden Betrieb bietet die Möglichkeit einer sehr schnellen Rekonfiguration, ohne dass die Messung unterbrochen werden muss. Allerdings wird hier vorausgesetzt, dass keine dynamischen Prozesse überwacht werden müssen. Die erreichbaren Re-

konfigurationszeiten sind dabei von der Taktrate des Controllers und der Schaltgeschwindigkeit der Schaltelemente abhängig.

Aufgrund der Einschränkungen hinsichtlich der Auflösung und im Falle einer Viertelbrücke auch deren großen Temperaturabhängigkeit ist die Rekonfiguration nur als Überbrückung bis zum Austausch des Messelements zu betrachten.

Eine ähnliche Überwachung inklusive Rekonfiguration eines Drucksensors mit piezoresistiver Wheatstone-Brücke wurde ebenfalls von SHARIF [Sharif98] beschrieben. Eine Rekonfiguration ist dabei nur zur Halbbrücke vorgesehen. Eine Überwachung der Zuleitungen wird in diesem Beispiel jedoch nicht berücksichtigt.

Wie zu Anfang dieses Abschnitts bereits erwähnt, stellt die Wheatstone-Brücke eines piezoresistiven Differenzdrucksensors nicht die relevanten Störungen eines Wirkdrucksensors dar. Trotzdem ergibt sich ein Erkennungsgrad von ungefähr 30 % der hier zugrunde gelegten Störungs- und Ausfallursachen. Die erkannten Störungen betreffen allerdings ausschließlich das Messelement oder die Elektronik.

Die Möglichkeit des Einsatzes der Brückenüberwachung für alle Anwendungen, in denen mittels Wheatstone-Messbrücken Messgrößen erfasst werden, zeigt die Flexibilität dieser Überwachungs- und Rekonfigurationsmöglichkeit.

7.4 Gegenüberstellung der Konzepte zur Selbstüberwachung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse aus den Untersuchungen der vorgestellten Konzepte kurz zusammen gefasst und miteinander verglichen.

Wirbel-Wirkdruck-Durchflusssensor

Das große Potenzial zur Selbstüberwachung durch Zusammenführung des Wirbelzählverfahrens und der Wirkdruckmessung (WWD-Sensor), aufgrund der gemeinsamen Nutzung eines Differenzdrucksensors, kann anhand der aufgebauten Messstrecken bestätigt werden. Durch die Möglichkeit der Montage des Wirbelkörpers vor der Drosselstelle und in der Drosselstelle kann eine Anpassung an die vorliegenden Reynoldszahlen vorgenommen werden.

Das in dieser Arbeit entwickelte Konzept zur Wirbeldetektion am WWD existiert als PC-Programm. Der realisierte adaptive Bandpass sichert eine hohe Toleranz ge-

genüber Störsignalen im Amplitudenspektrum. Auf diese Weise sind auch die im Vergleich zu einem piezoelektrischen Drucksensor sehr geringen Amplituden des Wirbelablösesignals im Spektrum zuverlässig zu detektieren. Noch nicht implementiert ist ein Algorithmus zur Erkennung einer Abweichung zwischen Wirbelablösefrequenz und Wirkdruck zur Störungserkennung.

Das Konzept der Wirbel-Wirkdruck-Durchflussmessung bietet mit einem Erkennungsgrad von etwa 70 % und aufgrund des geringen Mehraufwands ein vielversprechendes Verhältnis zwischen Kosten und Nutzen. Die Diagnose der einzelnen Störungsursachen ist dabei noch nicht betrachtet und allein aus der Differenz der Messsignale nicht möglich. Daher ist das Potenzial des Konzepts hinsichtlich einer Rekonfiguration zur Störungstoleranz eingeschränkt. Eine Lösung könnte die auf Seite 119 angesprochene zusätzliche Überwachung der in den Messsignalen vorhandenen Informationen bieten. Aufgrund der Aufnahme zweier voneinander unabhängiger Messgrößen besteht hier eine gute Möglichkeit zur Analyse der Messsignale.

Weiteres Optimierungspotenzial besteht vor allem hinsichtlich des bleibenden Druckverlusts, der Messspanne und bezüglich der Selbstdiagnose der Störungsursachen.

Bypass-Überwachung

Das ursprüngliche Konzept der Referenzerzeugung mit Hilfe eines passiven Bypasses zum Durchflusssensor wird verworfen, da die als relevant erachteten Störungen nicht sicher erkannt werden können. Die Variation durch Umschalten zwischen Wirkdruckmessung und Druckverlustmessung über dem Bypass bietet größeres Potenzial. Dabei wird jedoch das Selbstüberwachungsverfahren *Redundanz* genutzt. Die präsentierten Untersuchungen zeigen, dass Ablagerungen, Abrasion, Verstopfung oder Gaseinschlüsse in den Wirkdruckleitungen erkannt werden können. Voraussetzung ist, dass sich die externen Störungsursachen unterschiedlich auf die Messstrecke und den Bypass auswirken. Durch einen geeigneten Entwurf und/oder verschiedene Nutzungsdauern sollte diese Voraussetzung jedoch erfüllbar sein.

Die Erkennung der relevantesten Störungen ist mittels eines Bypasses möglich. Die Diagnose der Störungsursachen kann aufgrund der reinen gut/schlecht Information aus der Differenz beim Umschalten nicht realisiert werden. Anders als beim WWD bieten sich bei dem Bypass-Konzept nicht so vielseitige Möglichkeiten der zusätzlichen Merkmalsgenerierung aus der Messsignalanalyse an.

Der berechnete Erkennungsgrad beträgt 45 %. Trotz der Erkennbarkeit der relevantesten Störungen steht einer wirtschaftlichen und zuverlässigen Realisierung die Notwendigkeit bewegter Teile in Form eines Ventils entgegen.

Wheatstone-Brückenüberwachung

Die Wheatstone-Brückenüberwachung nutzt die Erfassung von Zusatzsignalen. Mit dem entwickelten Konzept ist eine Überwachung und eine Rekonfiguration ohne Messunterbrechung möglich. Wird ein Defekt der Versorgungs- bzw. Messleitungen oder Bondverbindungen bzw. ein Verlassen der spezifizierten Widerstandswerte festgestellt, kann die Wheatstone-Brücke rekonfiguriert werden. Dabei ist die Verschaltung zu einer Halbbrücke anzustreben, da die temperaturinduzierten Messabweichungen bei einer Viertelbrücke sehr groß sind.

Die hierfür notwendige Elektronik kann diskret aufgebaut oder in einem ASIC integriert werden. Dabei sind Stückzahl, Kosten- und Bauraumanforderungen entscheidend.

Der Erkennungsgrad von Störungen bzgl. eines Wirkdrucksensors liegt im Bereich von 30 %. Konzeptbedingt werden die in der differenzdruckbasierten Durchflussmessung relevantesten Störungen nicht erkannt. Aufgrund des großen Einsatzgebietes in allen Messanwendungen mit Widerstandsbrücken erscheint dieses Konzept zur Selbstüberwachung und Rekonfiguration trotzdem viel versprechend.

Vergleich der drei Konzepte

Die drei Konzepte lassen sich nur bedingt vergleichen. Die Angabe der Erkennungsgrade kann bereits einen Anhaltspunkt geben. Dabei zeigt der WWD mit ungefähr 70 % im Vergleich zum Bypass ($\approx 45\%$) und zur Brückenüberwachung ($\approx 30\%$) das größte Potenzial. Der Erkennungsgrad allein kann allerdings ein verzerrtes Bild wiedergeben, da er, wie auch der Diagnosedeckungsgrad, eine subjektive Komponente des Bearbeiters beinhaltet. So ist es möglich, dass nicht alle Störungen und Ausfälle beachtet bzw. zu Gruppen zusammengefasst werden.

Wenn man die in dieser Arbeit als am relevantesten erachteten Ursachen von Störungen und Ausfällen von Wirkdrucksensoren berücksichtigt wird eindeutig bestätigt, dass die Zusammenführung von Wirkdruckmessung und Wirbelzählverfahren die größten Erfolgsaussichten aufweist.

Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit anhand der beiden Messsignale weitere Informationen bzgl. des Zustands des Sensors extrahieren zu können. Dadurch kann eine Diagnose der Störungsursache realisiert werden, die eine gezielte Rekonfiguration durch Mittelwertbildung der beiden Verfahren oder Beschränkung auf nur eines der beiden Messverfahren ermöglicht.

Diese Vorteile bietet die Umschaltung auf die Druckverlustmessung mittels Bypass nicht. Dafür kann zur Rekonfiguration auf den Bypass umgeschaltet werden. Allerdings ist der dadurch zu erwartende Vorteil gering, da diese Rekonfiguration nur dann angewendet werden kann, wenn die Störung nur den fluidische Teil der Messstrecke betrifft und dies auch sicher erkannt wird.

Die Wheatstone-Brückenüberwachung lässt sich nicht direkt mit den ersten beiden Varianten vergleichen. Die Anwendbarkeit einer solchen Überwachung liegt nicht primär in der druckbasierten Durchflussmessung mittels mediengetrennter, gehäuster Drucksensoren, sondern vielmehr bei Einsätzen, wo Messelemente erhöhten mechanischen oder chemischen Belastungen ausgesetzt sind.

Für den Einsatz zur druckbasierten Durchflussmessung kann folglich nur die Zusammenführung von Wirkdruckmessung und Wirbelzählverfahren empfohlen werden.

8 Resümee und Ausblick

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht in der Entwicklung einer Konzeptbasis zur Unterstützung bei der Lösungsfindung und Umsetzung von Selbstüberwachungsfunktionen in Sensoren. Die Zweckmäßigkeit der Konzeptbasis soll am Beispiel ausgewählter druckbasierter Durchflussmessverfahren für Flüssigkeiten nachgewiesen werden. Ausgehend von einer Analyse des Marktes und recherchierten Veröffentlichungen einschließlich Patenten wird eine Einteilung und Strukturierung der Wege zur Selbstüberwachung von Sensoren erstellt. Die drei grundlegend unterschiedlichen Methoden *Prozesskopplung*, *Vor- und Erfahrungswissen* und *autarke Sensoren* werden von MESCH [Mesch01] übernommen. Der Fokus der Arbeit liegt auf der Sensor-Selbstüberwachung für *autarke Sensoren*, die zu fünf Verfahren zusammengefasst werden kann: *Redundanz*, *Referenz*, *Analyse des Messsignals*, *Analyse einer Störgröße* und *Analyse von Zusatzsignalen*.

Nach einer allgemein gültigen Beurteilung der fünf Selbstüberwachungsverfahren im folgenden Abschnitt schließt eine Bewertung der Ergebnisse und ein Ausblick auf zukünftige Tätigkeitsfelder diese Arbeit ab.

8.1 Gegenüberstellung der Verfahren zur Selbstüberwachung autarker Sensoren

Ausgehend von der Analyse des Standes der Technik im Kapitel 2 und der eigenen Untersuchungsergebnisse aus Kapitel 7 werden nun möglichst allgemein gültige Einschätzungen zu den Vor- und Nachteilen der fünf Selbstüberwachungsverfahren angegeben.

Redundanz

Das Verfahren der Redundanz findet zur Selbstüberwachung von Sensoren häufig Anwendung. Dabei kann ab zweifacher Redundanz (Anzahl der Sensoren ≥ 3) auch eine Rekonfiguration durch einen Mehrheitsentscheider verwirklicht werden. Einige Vor- und Nachteile sind nachfolgend aufgezählt:

- + Im Fall von diversitärer Redundanz, in Form verschiedener Messprinzipien bzw. Messverfahren, ist eine sehr gute Erkennbarkeit verschiedener Störungsursachen möglich.
- + Eine automatische Rekonfiguration kann ab mindestens drei in Redundanz betriebenen Sensoren realisiert werden.
- + Die Redundanz nur von bestimmten Teilen der Messkette kann sinnvoll sein, solange ausschließlich die Funktion der Selbstüberwachung betrachtet wird.
- + Bei Diversität bietet sich zusätzlich die Analyse der Messsignale an, da durch die Nutzung verschiedenartiger Redundanz deutlich mehr nutzbare Informationen vorhanden sind.
- + Ebenfalls bei diversitärer Redundanz können evtl. die messtechnischen Vorteile der verschiedenartigen Baugruppen/Prinzipien/Verfahren genutzt werden, z.B. zur Verbesserung der Messspanne oder des dynamischen Verhaltens des Sensors.

- In den meisten Fällen ist Redundanz mit relativ hohem Aufwand verbunden.
- Es muss sichergestellt werden, dass nicht die Nachteile der verschiedenartigen Baugruppen/Prinzipien/Verfahren zur Auswirkung gelangen und die Eigenschaften des Gesamtsensors verschlechtern.

Referenz

Die Realisierung einer internen Referenzgröße zur Überwachung eines Sensors bietet neben der direkten Überwachung auch die Möglichkeit der Rekonfiguration mittels einer Rekalibrierung. Entscheidend ist, dass sich die Referenzgröße mit einem vertretbaren Aufwand erzeugen lässt. Daher bieten sich wegen der einfachen Realisierbarkeit vor allem elektrische Einflussgrößen aktiver Sensoren an, wie beispiels-

weise eine Variation der Hilfsenergie für eine Messbrücke, der Heizstrom eines thermischen (kalorimetrischen) Durchflussmessers oder ein Offset auf der Regelgröße des Aktors eines Kompensationsverfahrens. Als signifikante Vor- und Nachteile sind zu nennen:

- + Bei ausreichender Genauigkeit der Referenz ist eine Rekonfiguration durch Rekalibrierung möglich.
- + Die Erzeugung einer Referenz einer Zwischengröße lässt sich häufig mit geringem Aufwand realisieren.
- + Die einzelnen Komponenten der Messkette werden direkt überwacht.

- Die Erzeugung einer Referenz der Messgröße ist bei vielen mechanischen, chemischen etc. Messgrößen mitunter sehr aufwändig.
- Es besteht die Gefahr der Beeinträchtigung der Messung.

Analyse des Messsignals

Algorithmen zur zusätzlichen Analyse des Messsignals sind meistens mit geringem Aufwand in einen Sensor implementierbar. Häufig sind nur Eingriffe in die Elektronik oder Software notwendig. Der stetig größer werdende Anteil digitaler Signalverarbeitung in Sensoren ermöglicht es, Informationen aus dem Messsignal leichter zu extrahieren und komplexere Algorithmen zur Verarbeitung der Informationen zu implementieren.

Obwohl hier der Fokus auf Informationen gelegt wird, die im Sensor bzw. durch den spezifikationskonformen Betrieb erzeugt werden, ist dennoch eine Abhängigkeit vom Prozess- oder von der Applikation vorhanden. Dadurch kann unter Umständen die Selbstüberwachung negativ beeinflusst werden oder muss mit Vorwissen aus dem Prozess versorgt werden. Als wesentliche Vor- und Nachteile sind hier zu nennen:

- + Der zur Implementierung notwendige Aufwand ist verhältnismäßig gering.
- + Es können Informationen genutzt werden, die ohnehin im Messsignal vorhanden sind.

- + Die Analyse des Messsignals stellt eine sehr gute Ergänzung zu anderen Selbstüberwachungsverfahren dar, da aufgrund dieser Verfahren zusätzliche Informationen im Messsignal vorliegen.
- Es besteht teilweise eine Abhängigkeit vom Prozess oder der Applikation, da eventuell spezifische Prozesseigenschaften genutzt werden.

Analyse einer Störgröße

Den Einfluss einer Störgröße auf die Messgrößenübertragung zu nutzen, ist grundsätzlich möglich. In Kapitel 2 zum Stand der Technik wird bereits dargelegt, dass dieses Verfahren selten Anwendung findet. Entscheidend ist, ob eine Störgröße möglichst unabhängig vom Prozess einen so großen reproduzierbaren Einfluss auf das Sensorübertragungsverhalten ausübt, dass dadurch eine Überwachung ermöglicht werden kann. Es besteht jedoch die Möglichkeit, den Effekt zu verstärken bzw. gezielt eine Störgröße zu erzeugen, wie z.B. die Erhöhung der Innentemperatur eines Drucksensors durch einen zusätzlichen Heizwiderstand. Dadurch kann eine Unabhängigkeit von der tatsächlich anliegenden Störgröße erreicht werden, Beeinträchtigungen der Messwertaufnahme sind jedoch auszuschließen.

Wird die Störgröße nicht aktiv eingefügt, sondern nur messtechnisch erfasst, können unerwünschte Einflüsse auf die Messwertaufnahme korrigiert werden (Korrektur systematischer Messabweichungen) und die Störgröße selbst als zusätzliche Messgröße ausgegeben werden.

Damit ergeben sich folgende Vorteile des Verfahrens:

- + Der Einfluss der Störgröße auf das Ausgangssignal des Sensors kann direkt korrigiert werden.
- + Die Ausgabe einer weiteren Prozessgröße (der Störgröße) ist möglich.
- + Die Störgröße kann zur Verstärkung des Effekts aktiv eingebracht werden.

Als Nachteile sind zu nennen:

- Eine zweite Messkette muss zur Störgrößenerfassung aufgebaut werden.
- In vielen Fällen ist für Sensoren keine Störgröße mit ausreichendem Einfluss vorhanden.

Analyse von Zusatzsignalen bzw. -größen

Zusatzsignale und -größen eignen sich sehr gut zur Selbstüberwachung bestimmter Komponenten unter der Voraussetzung, dass deren Störung oder Ausfall als relevant angesehen wird und die Erfassung unter vertretbarem Aufwand möglich ist. Die Erfassung ist bei elektrischen und elektronischen Bauelementen und Baugruppen meist ohne großen zusätzlichen Aufwand möglich. Die Überwachung kann in Form von sporadischen Selbsttests (beim Einschalten oder in regelmäßigen Abständen) oder als kontinuierliche Überwachung während des Betriebs durchgeführt werden. Im Falle nicht elektrischer Komponenten kann sich die direkte Überwachung deutlich aufwändiger gestalten. Dennoch kann die Analyse dieser Größen vorteilhaft sein, wenn hierdurch ein gefahrbringender Ausfall mit hoher Auftrittswahrscheinlichkeit sicher erkannt werden kann. Aus den Betrachtungen ergeben sich folgende Eigenschaften des Verfahrens:

- + Die Analyse von Zusatzsignalen ist sehr gezielt einsetzbar.
- + Im Falle elektrischer oder elektronischer Bauelemente ist der Aufwand zur Integration dieses Verfahrens verhältnismäßig gering.
- + Aufgrund des gezielten Einsatzes ist eine detaillierte Diagnose der Störungsursache bzw. der gestörten Baugruppe meist direkt möglich.

- Für nichtelektrische Baugruppen ist diese direkte Überwachung aufwändiger als für elektrische.
- Die Überwachung betrifft meist nur einen eingeschränkten Bereich der Messkette.

8.2 Schlussfolgerungen

Selbstüberwachung von Sensoren stellt gegenwärtig ein Thema mit großem Interesse von Seiten industrieller Nutzer dar. Von einfachen Ausführungen für Massenprodukte wie Kfz-Sensoren bis zu Prozesssensoren sollen die Messeinrichtungen die Möglichkeit der Generierung von Statussignalen bieten, die den Ist-Zustand beschreiben. Dieser Trend konnte während der Bearbeitung dieser Arbeit beobachtet werden und bestätigt das Ergebnis der bereits 2001/02 durchgeführten eigenen Befragung zu Anforderungen an Durchflusssensoren. Hiernach benennen Anwender

und Hersteller von Durchflusssensoren der Prozessmesstechnik die Möglichkeiten der Selbstüberwachung und Wartungsfreiheit an oberster Stelle der Erfolgsfaktoren, im Gegensatz zum sonst meist angeführten Kaufpreis.

Aufgrund des zunehmenden Interesses an sich selbstüberwachenden Sensoren, kann der präsentierte Stand der Technik nur als Momentaufnahme gelten. Allerdings wird die Vielfalt der zur Selbstüberwachung beschrittenen Wege deutlich.

Die ausgewählten Verfahren zur Selbstüberwachung autarker Sensoren und die daraus abgeleitete Struktur, soll einerseits die Thematik *Sensor-Selbstüberwachung* übersichtlicher gestalten. Andererseits soll die angegebene Struktur mit den Hinweisen und Merkmalen der fünf Verfahren bei der Suche nach konkreten Selbstüberwachungsmöglichkeiten für Sensoren behilflich sein. Dabei kann weder die eigene Kreativität noch die Detailkenntnis des Messprinzips, des Messverfahrens oder der jeweiligen Anwendung ersetzt werden. Das hier angewendete systematische Vorgehen hat bei der Suche nach konkreten Möglichkeiten der Selbstüberwachung bei Wirkdrucksensoren seinen Nutzen unter Beweis gestellt. Die gesamte Messkette des Sensors wird dabei für jedes Selbstüberwachungsverfahren von Messgrößeneinleitung bis zum Ausgangssignal dahingehend analysiert, an welcher Stelle eine Implementierung des jeweiligen Verfahrens sinnvoll ist. Eine dadurch erstellbare Matrix (siehe Abb 5.1) zeigt den gesamten Lösungsraum auf. Eine Bewertung mit anschließender Auswahl der zu realisierenden Lösung beschließt einen nachvollziehbaren und begründbaren Lösungsfindungs- und Entscheidungsprozess.

Zu konkreten Lösungsmöglichkeiten der Selbstüberwachung von Wirkdruck-Durchflusssensoren liefert die vorliegende Arbeit einen Beitrag, ohne den Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben. Aus den benannten 17 Varianten wurden drei ausgewählt und näher betrachtet. Dabei zeigt sich bei der Erzeugung eines Durchflusssprungs als Referenz mittels eines passiven Bypasses, dass eine weitere Bearbeitung dieses Konzepts nicht lohnenswert erscheint. Auch die Variation des Bypasses zeigt kein allzu großes Potenzial zur Selbstüberwachung, obwohl hier das Verfahren der *Redundanz* Anwendung findet.

Ebenfalls das Verfahren der *Redundanz*, allerdings mit deutlich größerem Erfolg, nutzt das Konzept der Zusammenführung des Wirbelzählverfahrens und der Wirkdruckmessung (WWD). Die Zusammenführung bietet vielfältige Möglichkeiten zur Selbstüberwachung bei überschaubarem Aufwand und folglich auch überschaubaren Mehrkosten. Dafür liegt der Grund hauptsächlich in der Nutzung eines Diffe-

renzdrucksensors für beide Messverfahren. Konkret kann neben dem Aufbau und Optimierung der fluidischen Messstrecke ein vielversprechendes Konzept zur Signalverarbeitung entwickelt werden. Das vorgestellte Konzept ermöglicht hierbei die Extraktion des Wirbelpeaks aus dem Differenzdrucksignal auch bei Störsignalen im Spektrum.

Auch die Überwachung einer Wheatstone-Brücke unter Anwendung des Verfahrens der *Analyse von Zusatzsignalen /-größen* bringt in ausgewählten Anwendungen großen Nutzen. Dabei ist vor allem der Vorteil einer direkten Rekonfigurationsmöglichkeit durch Ausgliedern der defekten Bauteile zu nennen. Anwendungen stellen sich für dieses Konzept zur Selbstüberwachung weniger in der Durchflussmessung als vielmehr in Applikationen, bei denen eine Widerstands-Messbrücke direkten mechanischen oder chemischen Einflüssen ausgesetzt ist. Die Überwachung, wie auch die Rekonfiguration, kann ohne Unterbrechung der Messung durchgeführt werden, sofern es sich nicht um hochdynamische Anwendungen handelt.

Insgesamt bietet die Arbeit einen Überblick zu möglichen Wegen der Selbstüberwachung von Sensoren. Es wird versucht, durch Definitionen bisher nicht einheitlich benutzter Begriffe eine größere Klarheit zu schaffen. Der spezifische Teil der Arbeit bezieht sich auf das Gebiet der Selbstüberwachung von Wirkdruck-Durchflusssensoren. Es konnten zwei vielversprechende Ansätze entwickelt und deren Anwendbarkeit nachgewiesen werden.

8.3 Ausblick

Die Entwicklung neuer Selbstüberwachungskonzepte für Sensoren konzentriert sich, aufgrund des zunehmenden Anteils digitaler Signalverarbeitung, häufig auf softwareimplementierte Überwachungsalgorithmen. Dabei handelt es sich meist um Konzepte, die das Verfahren der *Analyse des Messsignals* nutzen.

Die Möglichkeiten, die die komplexere Signalverarbeitung bietet, erleichtert jedoch auch die Realisierung aller fünf benannten Verfahren zur Selbstüberwachung von Sensoren. Unabhängig welches Verfahren genutzt wird, müssen stets die gewonnenen Informationen und Signale verarbeitet und interpretiert werden.

Aus den hier vorgestellten Konzepten, bietet vor allem der Wirbel-Wirkdruck-Durchflusssensor Potenzial zur Weiterentwicklung. Bei den bisher aufgebauten Sensoren handelt es sich um Experimentalmuster. Die Signalverarbeitung ist bis

auf analoge Schaltungsteile nur im PC realisiert. Daher wäre ein Aufbau als Prototyp mit integrierter Signalverarbeitung sinnvoll. Es sollte vor allem der relative Druckverlust reduziert werden und die zwei Messverfahren bzgl. ihrer Messbereiche besser aufeinander abgestimmt werden.

Die Signalverarbeitung sollte in einem digitalen Signalprozessor (DSP) implementiert werden. Die notwendigen Grenzwerte zur intakt/defekt - Entscheidung müssen an der fertigen Messstrecke ermittelt werden. Die weiterführende Auswertung der in den Messsignalen vorhandenen zusätzlichen Informationen, wie Amplitude der Wirbelablösung, Rauschpegel des Amplitudenverlaufs, Streuung von Wirkdruck und Wirbelablösefrequenz sowie der Detektion weiterer Amplitudenüberhöhungen im Signal, sind in weiteren Schritten denkbar.

Ein weiteres interessantes und lohnendes Arbeitsfeld kann sich durch den Ersatz des klassischen Differenzdrucksensors ergeben. Mittels einer direkten Messung der auf einen Staukörper wirkenden Kräfte sollten Staudruck und Wirbelfrequenz gleichzeitig erfasst werden können. Ein entsprechender Ansatz ist in dem Patentantrag [Nuber05] als Weiterführung der hier vorliegenden Arbeit formuliert.

Literatur

- [ABB04] N.N.: *Coriolis Masse-Durchflussmesser FCM2000, Datenblatt D184S068U01*. ABB Automation Products GmbH, Alzenau, 2004.
- [Amadi92] Amadi-Echendu, J.E.; Zhu, H.: *Signal Analysis Applied to Vortex Flowmeters*. Transactions on Instrumentation and Measurement, V Heft 6, IEEE, 1992. S. 1001-1004
- [Amadi94-1] Amadi-Echendu, J.E.; Zhu, H.: *Detecting Changes in the Condition of Process Instruments*. Transactions on Instrumentation and Measurement Vol. 43, Nr. 2, IEEE, 1994. S. 355-358
- [Amadi94-2] Amadi-Echendu, J.E.; Zhu, H.; Higham, E.H.: *Signal Analysis Applied to Detect Blockages in Pressure and Differential Pressure Measurement Systems*. IMTC, May 10-12, Hamamatsu (J), 1994. S. 741-744
- [Arndt04] Arndt, M.; Ding, E.L.; Massel, T.: *Fehlertolerante Überwachung des Wankratensensors*. Automatisierungstechnische Praxis atp (46) Heft 7, Oldenbourg Verlag, München, 2004. S. 46-53
- [Bailey95] Hofgreffe, W. et al.: *Guide to Flowmeasurements*. Bailey, Fischer & Porter, Göttingen, 1995.
- [Bao04] Bao, M.-H.: *Handbook of Sensors and Actuators - Vol. 8, Micro Mechanical Transducers*. Elsevier, Heidelberg, 2004.
- [Bettin90] Bettin, H.; Spieweck, F.: *Die Dichte des Wassers als Funktion des Temperatur nach Einführung des Internationalen Temperaturskala von 1990*. PTB-Mitteilungen, 100 Heft 3, PTB, Braunschweig/Berlin, 1990. S. 195-196
- [Biroli97] Birolini, A.: *Zuverlässigkeit von Geräten und Systemen*. Springer Verlag, München, 1997.

- [Blechs02] Blechschmidt-Trapp, R.; Hohlfeld, O.; Müller, R.; Werthschützky, R.: *Piezoresistive Sensoren für medizinische Anwendungen am Beispiel einer Sonde zur Druckmessung im Enddarm*. Biomedizinische Technik Band 47, Heft 3, Schiele & Schön, Berlin, 2002. S. 43 - 47
- [Blisch89] Blischke, F.; Meyr, H.: *Parametrische Frequenzschätzung zur Auswertung von Vortex-Sensorsignalen*. Technisches Messen 56 Heft 12, Oldenbourg Verlag, München, 1989.
- [Bohl94] Bohl, W: *Technische Strömungslehre, 9. Auflage*. Vogel Buchverlag, Würzburg, 1994.
- [Bomhol84] Bomholt, J.: *Elektrische Druckmessung auf piezoresistiver Basis*. www.keller-druck.ch, 1984. abgerufen Juli 2005
- [Bonfig87] Bonfig, K.W.: *Technische Durchflussmessung*. Vulkan Verlag, Essen, 1987.
- [Bopp04] N.N.: *Bedienungsanleitung Wirbelzähler VTX 2*. Bopp & Reuther Messtechnik GmbH, Speyer, 2004.
- [Boyce96] Boyce, J. et. al.: *Engineers' Relay Handbook*. Nat. Association of Relay Manuf., Milwaukee (USA), 1996.
- [Börcsök04] Börcsök, J.: *Minderung des Risikos bei sicherheitsgerichteten Systemen durch den Einsatz der FMEA*. Automatisierungstechnische Praxis ATP Heft 7, Oldenbourg Verlag, München, 2004. S. 54 - 62
- [Breier95] Breier, A.; Gatzmanga, H.: *Parameterabhängigkeit der Durchfluss-Frequenz-Kennlinie von Vortex-Zählern im Bereich kleiner Reynoldszahlen*. Technisches Messen 62 Heft 1, Oldenbourg Verlag, München, 1995. S. 22-26
- [Breiha00] Breithaupt, H.; Hees, M.: *Integraler Bestandteil - Messen und Abfüllen in einem Arbeitsschritt*. Pharma + Food Heft 5, Oldenbourg Verlag, München, 2000.
- [Breime96] Breimesser, F.: *Patentschrift DE 37 05 901 C 2*. Siemens AG, München, 1996.
- [Chemie01] N.N.: *Der Preis entscheidet*. Chemie Technik Heft 7, Hüthig Verlag, Heidelberg, 2001. S. 44-46
- [Clarke02] Clarke, D.W.; Ghaoud, T.: *Validation of vortex flowmeters*. Computing & Control Engineering Journal, Vol. 13 Heft 5, IEEE, 2002. S. 237-241

-
- [Colucc01] Colucci, M.; Hennemann, M.: *Predictive Maintenance - Vision oder Realität?* MessTec & Automation Heft 9, GIT-Verlag, Darmstadt, 2001. S. 18-19
- [Cozma97] Cozma, A.; Puers, R.: *Electrostatic actuation as a self-testing method for silicon pressure sensors*. Sensors and Actuators A (Physical) , Elsevier, Heidelberg, 1997. S. 32-36
- [Damm98] Damm, K.: *Selbsttest integrierter Sensoren in der Betriebsphase mit den Schwerpunkten Signalübertragung und Signalverarbeitung*. Dissertation, Universität Bremen, Shaker Verlag, Aachen, 1998.
- [Diedri04] Diedrich, Ch.; Jecht, U.; Oestreich, V.; Rachut, H.; Tepper, Ch.: *Mit Gerätediagnose zum Asset Management*. Automatisierungstechnische Praxis ATP Heft 4, Oldenbourg Verlag, München, 2004.
- [DIN 1319] DIN 1319: *Grundlagen der Messtechnik*. Beuth Verlag, Berlin, 1995.
- [DIN 19205] DIN 19205: *Durchflussmessung von Fluiden mit Drosselgeräten*. Beuth Verlag, Berlin, 2004.
- [DIN 25419] DIN 25419: *Ereignisablaufanalyse*. Beuth Verlag, Berlin, 1985.
- [DIN 25424] DIN 25424: *Fehlerbaumanalyse*. Beuth Verlag, Berlin, 1981.
- [DIN 25448] DIN 25448: *Ausfalleffektanalyse (Fehler-Möglichkeiten- und Einfluß-Analyse)*. Beuth Verlag, Berlin, 1990.
- [DIN 40041] DIN 40041: *Zuverlässigkeit - Begriffe*. Beuth Verlag, Berlin, 1990.
- [DIN EN 24006] DIN EN 24006: *Druchflussmessung von Fluiden in geschlossenen Leitungen, Begriffe und Formelzeichen*. Beuth Verlag, Berlin, 1993.
- [DIN EN 60300] DIN EN 60300: *Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 1: Zuverlässigkeitsmanagementsysteme*. Beuth-Verlag, Berlin, 2004.
- [DIN EN 61069] DIN EN 61069: *Ermittlung der Systemeigenschaften zum Zweck der Eignungsbeurteilung eines Systems*. Beuth Verlag, Berlin, 1993.
- [DIN EN 61164] DIN EN 61164: *Zuverlässigkeitswachstum - Statistische Prüf- und Schätzverfahren*. Beuth-Verlag, Berlin, 2004.
- [DIN EN 61508] DIN EN 61508: *SIL - Funktionale Sicherheit sicherheitsbezo-*

- gener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Schaltungen*. Beuth Verlag, Berlin, 2002. Teil 1, 4, 5, 6
- [DIN EN ISO 5167] DIN EN ISO 5167: *Durchflussmessung von Fluiden mit Drosselgeräten in voll durchströmten Leitungen*. Beuth Verlag, Berlin, 2004.
- [DIN ENV 13005] DIN ENV 13005: *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen (Vornorm), Guide to the expression of uncertainty in measurement*. Beuth Verlag, Berlin, 1999.
- [Ding04] Ding, E.L.; Fennel, H.; Ding, S.X.: *Model-based diagnosis of sensor faults für ESP systems*. Control Engineering Practice Heft 12, Elsevier, Heidelberg, 2004. S. 847-856
- [Eck88] Eck, B.; Ermshaus, R.: *Technische Strömungslehre, Band 1, Grundlagen, neunte Auflage*. Springer Verlag, Berlin, 1988.
- [Endres04] N.N.: *Deltabar S PMD 70/75, FMD 76/77/78 Differential pressure transmitter Technical Information*. Endress+Hauser GmbH+Co.KG, Weil am Rhein, 2004.
- [Fiedle92] Fiedler, O.: *Strömungs- und Durchflussmesstechnik*. Oldenbourg Verlag, München, 1992.
- [Freude00] Freudenberger, A.: *Prozessmesstechnik, 1. Auflage*. Vogel Verlage, Würzburg, 2000.
- [Frost98] N.N.: *European Flow Sensors Market*. Frost & Sullivan, 1998.
- [Gerlach05] Gerlach, G.; Werthschützky, R.: *50 Jahre Entdeckung des piezoresistiven Effekts - Geschichte und Entwicklungsstand piezoresistiver Sensoren*. Technisches Messen 72 Heft 2, Oldenbourg Verlag, München, 2005. S. 53 - 76
- [Gerst93] Gerst, P.: *Patentschrift EP 0 420 105 B 1*. Endress und Hauser GmbH, Maulburg, 1993.
- [GMA-FA 6.21] Prock, J.: *Living-Paper: GMA-Fachausschuss 6.21 Überwachung und Diagnose (von Feldgeräten)*. www.vdi.de, 2005. Stand: Februar 2005
- [Grams01] Grams, T.: *Grundlagen des Qualitäts- und Risikomanagements, 1. Auflage*. Vieweg-Verlag, Braunschweig, 2001.
- [Hans02] Hans, V.: *Cross Correlation Measurement and Vortex Shedding Flow-Meters*. Volume 1, 2002.
- [Hofman00] Hoffmann, F.: *Grundlagen der Ultraschall-Durchflussmessung*

-
- für den industriellen Einsatz*. Krohne Messtechnik, Duisburg, 2000.
- [Hofman04] Hoffmann, F.: *Diagnose in OPTIFLUX*. www.krohne.de, 2004. Stand: März 2005
- [Hohlfe01] Hohlfeld, O.: *Miniaturisierte korrosionsfeste Gehäusung für Silizium-Drucksensoren*. Dissertation, TU Darmstadt, Reihe 8, Nr. 878, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2001.
- [Hüchte03] Hüchtebrock, U.: *Erweiterte Diagnosemöglichkeiten bei Durchflussmessgeräten*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2003.
- [Iserma02] Isermann, R.: *Fehlertolerante Komponenten für Drive-by-Wire-Systeme*. ATZ Heft 4, Media Daten Verlag, Wiesbaden, 2002. S. 382-393
- [Iserma94] Isermann, R.: *Überwachung und Fehlerdiagnose*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994.
- [Iserma96] Isermann, R.: *Modellgestützte Überwachung und Fehlerdiagnose technischer Systeme, Teil1 und 2*. Automatisierungstechnische Praxis ATP Teil 1: Heft 5, Teil 2: Heft 6, Oldenbourg Verlag, München, 1996. Teil 1: S. 9-20, Teil 2: S. 48-57
- [Kehrer00] Kehrer, R.: *Trends und Erfolgsfaktoren beim Messen mechanischer Größen*. Sensor Report Heft 2, Coating Thomas & Co Verlag, St. Gallen (CH), 2000.
- [Kohlma02] Kohlmann, M.: *Selecting the Right Flowmeter for the Job*. Chemical Engineering , Chemical Week Associates, Frankfurt, 2002. S. 60-64
- [Kolahi01] Kolahi, K.: *Ein thermischer Strömungswächter mit modellgestützter Selbstdiagnose*. Technisches Messen 68 Heft 5, Oldenbourg Verlag, München, 2001. S. 220-225
- [Koppen04] Koppenhagen, K.: *Selbsttestkonzepte für mikromechanische Inertialsensoren*. Dissertation, TU Berlin, Berichte aus der Mikrosystemtechnik, Shaker-Verlag, Aachen, 2004.
- [Kuiper89] Kuipers, U.: *Wirbel-Wirkdruck-Durchflussmessung*. , Nr. 189, Fortschritt-Berichte, Reihe 8, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1989.
- [Lenk71] Lenk, A.: *Elektromechanische Systeme, Band 1: Systeme mit konzentrierten Parametern*. VEB Verlag Technik, Berlin, 1971.
- [Lenk89] Lenk, A.: *Heuristische Fehlermodelle für Meßgeräte, Studie Meßwerterfassung 3/89*. TU Dresden , Sektion Informations-

- technik, 1989.
- [Mesch01] Mesch, F.: *Strukturen zur Selbstüberwachung von Messsystemen*. Automatisierungstechnische Praxis atp Heft 8, Oldenbourg Verlag, München, 2001.
- [Miller89] Miller, R.W.: *Flow Measurement Engineering Handbook*. McGraw-Hill Publishing Company, New York (USA), 1989.
- [Mirahm81] Mirahmadi, A.; Wagner, F.E.: *Verfahren zur selbstständigen Kalibrierung eines Stauscheibendurchflußmessers, Offenlegungsschrift DE 29 41 192 A1*. Mirahmadi, Berlin, 1981.
- [Monten99] Montenegro, S.: *Sichere und fehlertolerante Steuerungen*. Carl Hanser Verlag, München, 1999.
- [Müller03A] Müller, R.; Nuber, M.; Werthschützky, R.: *Was macht Durchflusssensoren am Markt erfolgreich?* Automatisierungstechnische Praxis ATP Heft 5, Oldenbourg Verlag, München, 2003.
- [Müller03B] Müller, R. et al: *Telemetrisches Meßsystem zur Bestimmung des Druckes der Zunge gegen den Gaumen*. Biomedizinische Technik Band 48, Heft 9, Schiele & Schön, Berlin, 2003. S. 226 - 229
- [Müller05A] Müller, R.; Nuber, M.; Werthschützky, R.: *Selbstüberwachender Durchflusssensor mit diversitärer Redundanz*. Technisches Messen tm (72) Heft 4, Oldenbourg Verlag, München, 2005. S. 198 - 204
- [NAMUR05] Namur, GMA: *Abschlussbericht zur Technologie-Roadmap: Prozess-Sensoren 2005-2015*. VDI/VDE-GMA, Düsseldorf, 2005.
- [Noack04] Noack, J.: *Ermittlung des Standes der Selbstüberwachung bei elektromechanischen Sensoren*. Studienarbeit 1546, Institut für EMK, TU Darmstadt, 2004.
- [Novits96] Novitskii, P.V.: *Correcting the Error of a Flow Meter by Blunting the Edge of the Orifice Plate*. Measurement Techniques No. 11, Vol. 39, 1996. S.1115-1118
- [Nuber02] Nuber, M.: *Anforderungen an Durchflusssensoren*. Studienarbeit 1498, Institut für EMK, TU Darmstadt, 2002.
- [Nuber03] Nuber, M.: *Theoretische und praktische Analyse von Störungen bei gehäusten piezoresistiven Diff.-Drucksensoren und Entwicklung geeigneter Erkennungsmechanismen*. Diplomarbeit 1533, Institut für EMK, TU Darmstadt, 2003.

- [Nuber05] Nuber, M.; Müller, R.; Ballas, R.G.: *zum Patent angemeldet am 19.05.05, Anmeldenummer 102005023115.2-54*. Institut für EMK, TU Darmstadt, 2005.
- [Ohki98] Ohki, S.I.; Kishi, T.: *Investigation of Flow an Improvement of Characteristics of Vortex Flowmeter in Lower Reynolds Number Region*. Fowmeko, Lund (S), 1998. S. 191-196
- [Osajda99] Osajda, M.: *Freie Entfaltung - Halbleiter-Beschleunigungssensoren für Airbags*. Elektronik Industrie Heft 10, Hüthig-Verlag, Heidelberg, 1999. S. 46 - 50
- [PEM II 04A] Böll, M.; Knöck, J.; Krakert, C.; Schlensag, A.: *Selbstüberwachung durch Referenz mittels Bypass*. PEM 18.256.4.1, Institut für EMK, TU Darmstadt, 2004.
- [PEM II 04B] Bogdahn, M.; Flittner, K.; Sasaran, C.; Staab, M.: *I-Wheatstone*. PEM 18.256.4.2, Institut für EMK, TU Darmstadt, 2004.
- [PEM III 04] Handke, P.; Kartunov, K.; Schumacher, S.: *Wirbel-Wirkdruck-Sensor*. PEM 18.122.4.2, Institut für EMK, TU Darmstadt, 2003.
- [PEM IV 02] Jungeblodt, D.; Klages, S.; Kretschmar, F.: *Entwicklung eines Durchflusssensors*. PEM 18.282.4.2, Institut für EMK, TU Darmstadt, 2002.
- [Pfeife89] Pfeifer, G.; Werthschützky, R.: *Drucksensoren*. VEB Verlag Technik, Berlin, 1989.
- [Prock97] Prock, J.: *Einführung in die Prozeßmeßtechnik*. Teubner Verlag, Stuttgart, 1997.
- [Profos97] Profos, P.; Pfeifer, T.: *Grundlagen der Meßtechnik. 5. Auflage*. Oldenbourg Verlag, München, 1997.
- [Relais98] N.N.: *Relaistechnik - Grundlagen und neueste Entwicklungen, Die Bibliothek der Technik Band 163*. Moderne Industrie, Landberg/Lech, 1998.
- [Risch97] Risch, M.: *Langzeitstabilität von piezoresistiven Drucksensoren*. Elektronik Fachzeitschrift Heft 16, WEKA Verlag, Poing, 1997. S. 58-62
- [Rosemo04] N.N.: *Rosemount 8800C Vortex Flowmeter*. Emerson Process Management, 2004.
- [Schaud98] Schaudel, D.: *Was bestimmt künftig die Innovationsgeschwindigkeit bei den Prozeßsensoren? Automatisierungstechnische Praxis 40 Heft 6*, Oldenbourg Verlag, München, 1998. S. 19-28

- [Schäfe00] Schäfer, R.; Jungmann, M.; Werthschützky, R.: *Selbstdiagnose in der Durchflussmessung durch Kombination von Wirkdruck- und Vortex-Messung*. Technisches Messen 67 Heft 9, Oldenbourg Verlag, München, 2000.
- [Schäfe99] Schäfer, R.: *Durchflussmessung von Flüssigkeiten mit Differenzdruckverfahren bei kleinen Nennweiten*. Dissertation, TU Darmstadt, Fortschritt-Berichte, Reihe 8, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1999.
- [Schmid90] Schmidtke, H.: *Belagbildung und Wärmeübertragung in einem Zwangsumlaufverdampfer mit zirkulierenden Partikeln*. Dissertation, Universität Bremen, Fortschritt-Berichte, Reihe 3, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1990.
- [Schnei01] Schneider, H.-J.: *Selbstüberwachung und Diagnose von Feldgeräten, Teil 3: Die Umfrage der Namur*. Automatisierungstechnische Praxis atp Heft 11, Oldenbourg Verlag, München, 2001.
- [Schnel95] Schnell, G.: *Durchflußmessung kleinster Flüssigkeitsmengen*. Dissertation, TH Darmstadt, Eigenverlag, Darmstadt, 1995.
- [Schwan86] Schwanz, G.W.: *Sensoren - Fühler der Meßtechnik*. Hüthig Verlag, Heidelberg, 1986.
- [Sharif98] Sharif, E.; Dorey, T.; Richardson, A.: *An Integrated Diagnostic Reconfiguration (IDR) Technique for Fault Tolerant Mixed Signal Microsystems*. International Circuits & Systems, Lisbon (P), 1998. S. 1413-1416
- [Sindli04] Sindlinger, S.; Wohlgemuth, C.; Werthschützky, R.: *Einfluss der Gehäusung auf den Entwurf und die Realisierung umweltrobuster, miniaturisierter Drucksensoren*. Technisches Messen 71 Heft 4, Oldenbourg Verlag, München, 2004.
- [Söhn03] Söhn, M.: *Aufbau eines Wirkdrucksensors mit integrierter Referenzerzeugung*. Studienarbeit, Institut für EMK, TU Darmstadt, 2003.
- [Stiele01] Stieler, St.: *Selbstüberwachung und Diagnose von Feldgeräten, Teil 2: Begriffe und Statussignale*. Automatisierungstechnische Praxis atp Heft 11, Oldenbourg Verlag, München, 2001.
- [Storm02] Storm, R.; Kolahi, K.; Röck, H.: *Model-Based Correction of Coriolis Mass Flowmeters*. Transactions on Instrumentation and Measurement Vol. 51, No. 4, IEEE, 2002. S. 605-610
- [Strohr94] Strohrmann, G.: *atp-Marktanalyse Durchfluß- und Mengen-*

- meßtechnik*. Automatisierungstechnische Praxis atp 36 Teil 1 Heft 7, Teil 2 Heft 8, Oldenbourg Verlag, München, 1994. Teil 1 S. 9-29, Teil 2 S.38-55
- [Tafel69] Tafel, H.J.; Schaedel, H.: *Analogien zwischen elektrischen und fluidischen Bauelementen und Netzwerken*. Frequenz, 23 Heft 3, Schiele und Schön Verlag, Berlin, 1969. S. 68-73
- [Tietje03] Tietjen, Th.; Müller, H.: *FMEA-Paxis, 2. Auflage*. Carl Hanser Verlag, München, 2003.
- [Tomasi02] Tomasi, L.; Krötz, G.; Wieser, E.; Südkamp, W.; Thiele, P.; Obermeier, E.: *Design of a new concept pressure sensor for X-by-Wire automotive applications*. Springer Verlag, Berlin, 2002.
- [Tortor02] Tortora, G.: *Fault-tolerant control and intelligent instrumentation*. Computing & Control Engineering Journal, Vol. 13 Heft 5, IEEE, 2002. S. 259-262
- [Töpfer88] Töpfer, H. et al.: *Wissensspeicher - Fluidtechnik*. VEB Fachbuchverlag, Leipzig, 1988.
- [Trilli01] Trilling, U.; Stieler, St.: *Selbstüberwachung und Diagnose von Feldgeräten, Teil 1: Wirtschaftliche Bedeutung für den Anwender*. Automatisierungstechnische Praxis atp Heft 11, Oldenbourg Verlag, München, 2001.
- [Uetz86] Uetz, H.: *Abrasion und Erosion: Grundlagen, betriebliche Erfahrungen, Verminderungen*. Carl Hanser, München, 1986.
- [VDI-Wärme] N.N.: *VDI-Wärmeatlas: Berechnungsblätter für den Wärmeübergang*. Springer Verlag, Berlin, 1997.
- [VDI/VDE 2041] VDI/VDE 2041: *Durchflussmessung mit Drosselgeräten, Blenden und Düsen für besondere Anwendungen*. Beuth Verlag, Berlin, 1991.
- [VDI/VDE 2180] VDI/VDE 2180: *Sicherung von Anlagen der Verfahrenstechnik mit Mitteln der Prozessleittechnik*. Beuth Verlag, Berlin, 1998.
- [VDI/VDE 2643] VDI/VDE 2643: *Wirbelzähler zur Volumen- und Durchflußmessung*. Beuth Verlag, Berlin, 1993.
- [VDI/VDE 2650] VDI/VDE 2650: *Anforderungen an Selbstüberwachung und Diagnose in der Feldinstrumentierung*. Beuth Verlag, Berlin, 2004. Blatt 1-3
- [VDI/VDE 3542] VDI/VDE 3542: *Sicherheitstechnische Begriffe für Automatisierungssysteme*. Beuth Verlag, Berlin, 2000.

- [VDI/VDE 3698] VDI/VDE 3698: *Konzepte fehlertolerierender Automatisierungssysteme*. Beuth Verlag, Berlin, 1995.
- [Vigo94] Vigo, P.; Cascetta, F.: *Sensors for Measuring Flow*. in: Göpel, W. et. al. Hrsg.: *Sensors - A Comprehensive Survey, Volume 7 Mechanical Sensors*. VCH Verlag, Weinheim, 1994.
- [Wagner81] Wagner, F.E.: *Selbstkalibrierende Meßsysteme Teil1-3*. Messen+Püfen/Automatik Teil 1: Okt., 2: Nov., 3: Dez., Holzmann Verlag, Bad Wörishofen, 1981. Teil 1: S. 666-672, 2: 757-761, 3: 834-839
- [Weiler01] Weiler, D.: *Selbsttest und Fehlertoleranz mit zugelass. milder Degradation in integrierten CMOS-Sensorsystemen*. Dissertation, Fraunhofer Institut IMS, Gerhard-Mercator-Universität, Online-Veröffentlichung, Duisburg, 2001.
- [Werths05] Werthschützky, R.: *Mess- und Sensortechnik, Band 1: Elektrisches Messen mechanischer Größen*. Vorlesungsbegleitmaterial, TU Darmstadt, 2005.
- [Yamasa93] Yamasaki, H.: *Progress in hydrodynamic oscillator type flowmeters*. Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 4 No 4, Elsevier, Oxford (GBR), 1993. S. 241 ff
- [Yokoga04] Sugiyama, H. et al.: *Yokogawa Technical Report, No. 37*. Yokogawa Electric Corporation, Tokyo (Japan), 2004.
- [Yokoga05] N.N.: *Bedienungsanleitung - Metallischer Kurzhub-ROTA-METER Modell RAMC, 5. Ausgabe*. Yokogawa Deutschland GmbH, Ratingen, 2005.
- [Zahout03] Zahout, C.: *Angepasste Signalverarbeitung für piezoresistive Drucksensoren*. Dissertation, TU-Darmstadt, Online-Veröffentlichung, EMK, Darmstadt, 2003.
- [Zhu94-2] Zhu, H.; Higham, E.H.; Amadi-Echendu, J.E.: *Assessing Plant Condition from Analysis of Pressure and Differential Pressure Measurement Signals*. IMTC, May 10-12, Hamamatsu (J), 1994. S. 825-828

Eigene Veröffentlichungen

Blechsmidt, R.; Lörcher, U.; Hohlfeld, O.; Müller, R.; Werthschützky, R.: *Piezoresistive Sensors for Medical Applications*. Proceedings of the Tunesian-German Conference on Smart Systems and Devices, 27-30 März, Hammamet, Tunisia, 2001

Blechsmidt, R.; Hohlfeld, O.; Müller, R.; Werthschützky, R.: *Sensor Probe for Rectal Manometry*. Sensor 2001, 8-10 Mai, Nürnberg, 2001

Blechsmidt-Trapp R.; Hohlfeld O.; Müller R.; Werthschützky R.: *Piezoresistive Sensoren für medizinische Anwendungen am Beispiel einer Sonde zur Druckmessung im Enddarm*. Biomedizinische Technik, 47 Heft 3, 2002, S. 43-47

Müller, R.; Röse, A.; Hohlfeld, O.; Blechsmidt, R.; Schuster, G.; Werthschützky, R.: *Telemetric Pressure Measurement System for Orthodontic Applications*. Sensors and Systems, St. Petersburg, Russland, 2002

Müller, R.; Röse, A.; Hohlfeld, O.; Blechsmidt, R.; Schuster, G.; Werthschützky, R.: *Telemetrisches Messsystem zur Bestimmung des Druckes der Zunge gegen den Gaumen*. 47. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Technische Universität Ilmenau, 2002

Müller, R.; Röse, A.; Hohlfeld, O.; Blechsmidt-Trapp, R.A.; Schuster, G.; Werthschützky, R.: *Telemetrisches Messsystem zur Bestimmung des Druckes der Zunge gegen den Gaumen*. Biomedizinische Technik, 48 Heft 9, Schiele & Schön, Berlin, 2003, S. 226 - 229

Müller, R.; Nuber, M.; Werthschützky, R.: *Was macht Durchflusssensoren am Markt erfolgreich?* Automatisierungstechnische Praxis - ATP, Heft 5, Oldenbourg Verlag, München, 2003, S. 58-63

Müller, R.; Nuber, M.; Werthschützky, R.: *Selbstüberwachender Durchflusssensor mit diversitärer Redundanz*. XVIII Messtechnisches Symposium AHMT, 04.-06. Oktober, Freiburg, 2004, S. 153-162

Literatur

Müller, R.; Nuber, M.; Werthschützky, R.: *Selbstüberwachender Durchflusssensor mit diversitärer Redundanz.* Technisches Messen 72, Heft 4, Oldenbourg Verlag, München, 2005, S. 198-204

Müller, R.; Nuber, M.; Werthschützky, R.: *Self Monitoring of Sensors – the Instance of a Redundant Differential Pressure Vortex Flowmeter.* Sensor + Test 2005,. 10.-12. Mai, Nürnberg, 2005, S. 273-278

Nuber, M.; Müller, R.; Ballas, R.G.: *Selbstüberwachender Durchflusssensor.* zum Patent angemeldet am 19.05.05., Anmeldenummer 102005023115.2-54, 2005

Anhang

A Ergänzungen

A1 Dichte von Wasser

Abbildung A1 zeigt die Dichte von Wasser über der Temperatur aufgetragen.

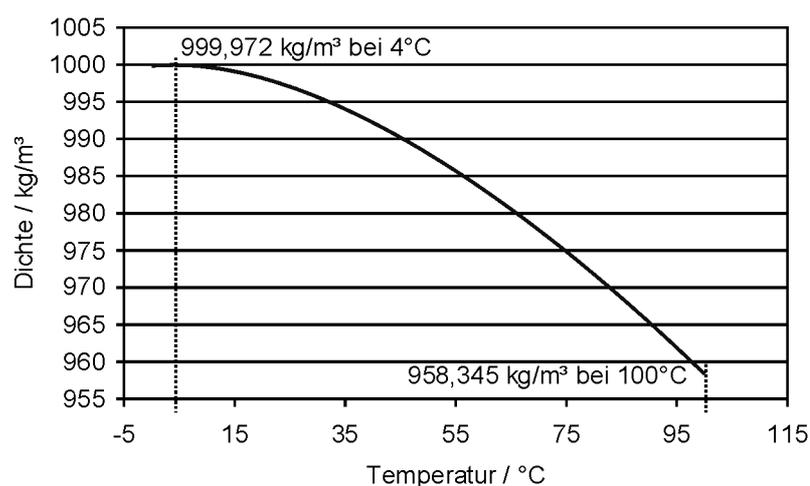


Abbildung A1: Dichte von Wasser über Temperatur nach PTB.

Die dem Graphen in Abbildung A1 zugrunde liegende Formel ist

$$\rho_{\text{Wasser}} = \frac{a_0 + a_1 \cdot \vartheta + a_2 \cdot \vartheta^2 + a_3 \cdot \vartheta^3 + a_4 \cdot \vartheta^4 + a_5 \cdot \vartheta^5}{1 + b \cdot \vartheta},$$

mit:

$$a_0 = 999,83952$$

$$a_1 = 16,952577$$

$$a_2 = -7,9905127 \cdot 10^{-3}$$

$$a_3 = -4,6241757 \cdot 10^{-5}$$

$$a_4 = 1,0584601 \cdot 10^{-7}$$

$$a_5 = -2,8103006 \cdot 10^{-10}$$

$$b = 0,016887236$$

(ϑ in °C).

Die Werte sind aus der PTB Mitteilung 100 3/90 [Bettin90] übernommen und gelten für den Bereich von 0 - 150 °C, luftfrei. Luftgesättigtes Wasser besitzt eine geringere Dichte.

A2 Betrachtung der Messabweichungen des Durchflussmessplatzes

Für die Messung mit Sekundärnormal (MID als Referenzsensor) ergeben sich im Detail die in Tabelle A1 genannten Abweichungen für die einzelnen Komponenten. Die Abweichungen sind aus den Datenblättern der Komponenten entnommen bzw. messtechnisch erfasst.

Die Messkarte geht bei der Berechnung der Messabweichung des Messplatzes zweimal ein, da sie bei Erfassung des Referenzwertes wie auch bei der Messung des Testsensors zum Tragen kommt.

Zur Berechnung der gesamten Messabweichung werden die Abweichungen der Einzelkomponenten als quadratische Addition berücksichtigt Gl. (A2.1). [Werths05]. Die Differenz der Abweichung unter Nutzung des I/U-Wandlers und der Abweichung bei Auslesen des MID mittels des Impulsausgangs resultieren aus den Abweichungen des I/U-Wandlers und dem doppelten Einfluss der Messkarte im ersten Fall. Daher wird die Benutzung des Impulsausgangs für zukünftige Projekte empfohlen.

Die Berechnung der Gesamtmessabweichung inklusive der zufälligen Abweichungen erfolgt nach:

$$F_G = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + \dots + F_i^2} \quad (\text{A2.1})$$

Tabelle A1: Abweichungen der Komponenten des Messplatzes unter Nutzung des Sekundärstandards MID und Messabweichung des gesamten Messplatzes.

Komponente		Systematische Abweichung	Zufällige Abweichung
Kalibrierung	Primärnormal	0,08 % v.M.	0,07 % v.M.
MID	Messung	0,4 % v.M.	
	Analogausgang	± 0,1 % v.M.	
Messkarte	Verstärkungsfehler	0,02 %	
	Linearität Bereich ab 150 l/h	± 0,024 % v.E. ± 0,27 % v.M.	
	Rauschen		0,012 % v.E. 0,27 % v.M.
I/U-Wandler	Linearität	0,2 % v.M.	
	Rauschen		nicht messbar
Gesamt-Messabweichung mit I/U-Wandler		0,72 % v.M.	
Gesamt-Messabweichung unter Nutzung des Impulsausgangs		0,56 % v.M.	

A3 Ergänzungen zur Wheatstone-Brücken-Überwachung

In diesem Kapitel sollen nur einige Ergänzungen zur Wheatstone-Brücken-Überwachung gegeben werden. Tabelle A2 zeigt den Einfluss von verschiedenen Störungen auf die fünf bzw. mit der Brückendiagonalspannung U_M sechs erfassten Spannungen.

Tabelle A2: Mögliche Störungen und deren Auswirkungen auf die fünf erfassten Spannungen und die Brückendifferenzspannung U_M .

	U_M	U_{IV}	U_{R3}	U_{R4}	U_A	U_B
$R_1 \uparrow (\downarrow) (\pm 1,6\%)$	$\uparrow (\downarrow) 25\%$	$\downarrow (\uparrow) 0,5\%$	$\downarrow (\uparrow) 1\%$	-	$\downarrow (\uparrow) 1\%$	-
$R_2 \uparrow (\downarrow) (\pm 1,6\%)$	$\downarrow (\uparrow) 25\%$	$\downarrow (\uparrow) 0,5\%$	-	$\downarrow (\uparrow) 1\%$	-	$\downarrow (\uparrow) 1\%$
$R_3 \uparrow (\downarrow) (\pm 1,6\%)$	$\downarrow (\uparrow) 25\%$	$\downarrow (\uparrow) 0,5\%$	$\uparrow (\downarrow) 1\%$	-	$\downarrow (\uparrow) 1\%$	-
$R_4 \uparrow (\downarrow) (\pm 1,6\%)$	$\uparrow (\downarrow) 25\%$	$\downarrow (\uparrow) 0,5\%$	-	$\uparrow (\downarrow) 1\%$	-	$\downarrow (\uparrow) 1\%$
B_1 gebrochen	0	0	0	0	0	0

	U_M	U_{IV}	U_{R3}	U_{R4}	U_A	U_B
B_2 gebrochen	0	-	0	-	-	-
B_3 gebrochen	0	-	-	0	-	-
B_4 gebrochen	↓↓	↓ 50%	↑↑	↑ 0,5%	0	-
B_5 gebrochen	↑↑	↓ 50%	↑ 0,5%	↑↑	-	0
Kurzschluss B_1 - B_2	↓↓	↑ 50%	↑↑	-	↑↑	-
Kurzschluss B_1 - B_3	↑↑	↑ 50%	-	↑↑	-	↑↑
Kurzschluss B_1 - B_4	↓↓	↑↑	↓↓	↓↓	↑↑	↓ 50%
Kurzschluss B_1 - B_5	↑↑	↑↑	↓↓	↓↓	↓ 50%	↑↑
Kurzschluss B_2 - B_3	0	-	↑ 1,5%	↓ 1,5%	↑ 1,5%	↓ 1,5%
Kurzschluss B_2 - B_4	↑↑	↑ 50%	0	-	↑↑	↓ 0,5%
Kurzschluss B_2 - B_5	↑↑	↑ 50%	↓↓	↓ 0,5%	↓↓	↑↑
Kurzschluss B_3 - B_4	↓↓	↑ 50%	↓ 0,5%	↓↓	↑↑	↓↓
Kurzschluss B_3 - B_5	↓↓	↑ 50%	-	0	↓ 0,5%	↑↑
Kurzschluss B_4 - B_5	-	-	-	-	-	-

Die Aufstellung ist unter Voraussetzung eines anliegenden Drucks am Sensor erstellt worden. Dabei ist ersichtlich, dass der Kurzschluss B_4 - B_5 keine Auswirkungen auf die 5 Zusatzsignale und die Messspannung hat. Daraus ergibt sich die Anforderung, dass diese Störung gezielt durch Öffnen eines Schalters in einem der beiden Halbbrücken untersucht werden muss.

B Zusätzliche Definitionen

B1 Verbale Beschreibungen einiger Begriffe

Zur Unterscheidung zwischen Sensor, Messzelle usw. sind keine Definitionen dargestellt. Diese Begriffe werden hier kurz beschrieben, wie sie im Rahmen der vorliegenden Arbeit verstanden werden.

Das *Messelement* bildet die kleinste Einheit. Es wandelt die anliegende Messgröße nach einem *Messprinzip* (s.u.) unter Nutzung eines physikalischen Ef-

fekts oder Phänomens in ein elektrisches Signal. Beispiele für ein Messelemente sind ein piezoresistives Silizium-Element mit abgedünnter Messplatte und eindiffundierten Widerständen zur Druckmessung oder ein Dehnmessstreifen auf einem Verformungskörper für die Kraftmessung. Ein *Primärsensor* umfasst für das Beispiel der Druckmessung neben dem Messelement noch einen Sockel zur Kontaktierung des Messelements. Mit einem Primärsensor kann die Messgröße prinzipiell schon aufgenommen werden. Versieht man den Primärsensor mit einem Gehäuse mit der für die jeweilige Anwendung notwendigen Medientrennung, wird in dieser Arbeit von *Messzelle* gesprochen.

Sensor kann eher als Überbegriff verstanden werden für alles, mit dem man eine Messgröße erfassen kann (früher: *Fühler*) [Schwan86]. Meistens wird dieser Begriff für die mit einer Primär- und evtl. Sekundärelektronik komplettierte Messzelle verwendet. Für die Wirkdruck-Durchflussmessung beinhaltet der Durchflusssensor die fluidische Messstrecke, Druckeinleitung und Differenzdrucksensor.

Gegenstand der Betrachtungen in der vorliegenden Arbeit ist die *Prozessmesstechnik*. War der Einsatz früher ausschließlich auf die Verfahrenstechnik beschränkt, werden prozessmesstechnische Sensoren zunehmend auch in Bereichen der Automatisierungstechnik, Fertigungstechnik usw. eingesetzt [Prock97]. Prozessmesstechnik unterscheidet sich in den Anforderungen von anderen Einsatzbereichen, wie Kfz-Messtechnik, Medizintechnik, etc. Die Aufstellung unter Tabelle B1 ist aus [Werths05] übernommen und liefert Richtwerte für die Anforderungen in den einzelnen Bereichen:

Tabelle B1: Übersicht ausgewählter Anwendungsforderungen für elektromechanische Sensoren [Werths05]

Einsatzgebiet	Anforderungen	Stückzahl ¹⁾	Listenpreis / €
Verfahrenstechnik (Chemie, Kraftwerke, Pharmazie, Metallurgie, Lebensmittelindustrie)	statischer Fehler ²⁾ : 0,1 bis 1 % Temperaturbereich: -40 bis +80 °C korrosionsfest EMV-Nachweis Ex-Schutz-Zertifikat standardisiertes Ausgangssignal (z.B. 4-20 mA, HART-Protokoll) Freiluftmontage IP65	10 ³ bis 10 ⁵	100,- bis 1.000,-

1) geschätzte mittlere jährliche Produktionszahlen für eine rentable Fertigung

2) statischer Fehler: Toleranzband der statischen Fehler im Referenzzustand ($\vartheta = 20\text{ °C}$)

Einsatzgebiet	Anforderungen	Stückzahl	Listenpreis / €
Fertigungstechnik (Maschinenbau, Schiffbau, Fahrzeugbau)	statischer Fehler: 0,3 bis 5 % Temperaturbereich: -40 bis +80 °C EMV-Nachweis standardisiertes Ausgangssignal: (4-20 mA)	10 ⁴ bis 10 ⁶	10,- bis 100,-
Kfz- und Consumer-technik (PKW, Haushaltgeräte, Videotechnik)	statischer Fehler: 1 bis 5 % Temperaturbereich: -40 bis +150 °C Masse < 50 g	10 ⁵ bis 10 ⁷	0,50 bis 10,-
Umwelttechnik (Luft-, Boden-, Gewässerüberwachung)	statischer Fehler: 0,1 bis 1 % Temperaturbereich: -40 bis +50 °C korrosionsfest	10 ² bis 10 ⁵	50,- bis 500,-
Medizintechnik (Diagnose, Therapie, Überwachung)	statischer Fehler: 0,5 bis 2 %	10 ² bis 10 ⁶	10,- bis nahezu unbegrenzt (bildgebende Verfahren)
Labormesstechnik (Forschung und Entwicklung, Lehre)	statischer Fehler: 0,01 bis 1 %	10 bis 10 ³	50,- bis 5.000,-

Anhand dieser Zusammenstellung werden die Unterschiede der Einsatz- und Anwendungsgebieten deutlich. Daher ist es notwendig die konkreten Betrachtungen dieser Arbeit auf ein Gebiet zu beziehen. Der allgemeine Teil der Arbeit zur Strukturierung der Selbstüberwachungsverfahren etc. bezieht jedoch alle Bereiche mit ein.

B2 Begriffsdefinitionen (DIN, VDI/VDE, etc.)

An dieser Stelle sind die für diese Arbeit interessanten Begriffe nochmals in alphabetischer Reihenfolge mit den dazu gehörigen Definitionen aufgeführt. Dabei sind auch Begriffe, die in Abschnitt 3.2 nicht behandelt wurden, erwähnt.

<i>Ausfall</i> <i>(failure)</i>	⇒ Beendigung der Fähigkeit einer Funktionseinheit, eine geforderte Funktion auszuführen (ein Ausfall stellt das Ereignis des Übergangs von korrekter Funktion zu Fehlfunktion dar)	[DIN EN 61508]
------------------------------------	---	----------------

<p><i>Diagnosedeckungsgrad</i> (<i>diagnostic coverage</i>)</p>	<p>⇒ Teilweise Verminderung der Wahrscheinlichkeit von gefahrbringenden Hardwareausfällen, aufgrund der Anwendung automatischer diagnostischer Prüfungen</p> <p>Anmerkung 1: Die Definition kann auch durch folgende Gleichung dargestellt werden, wobei <i>DC</i> der Diagnosedeckungsgrad ist, λ_{DD} die Wahrscheinlichkeit von erkannten gefahrbringenden Ausfällen und λ_{Dtotal} die Wahrscheinlichkeit aller gefahrbringenden Ausfälle ist:</p> $DC = \sum \lambda_{DD} / \sum \lambda_{Dtotal}$ <p>Anmerkung 2: Der <i>DC</i> kann für das gesamte System oder Teile eines sicherheitsbezogenen Systems gelten. Zum Beispiel kann der <i>DC</i> für Sensoren und/oder Logiksysteme und/oder Stellglieder existieren.</p> <p>Anmerkung 3: Die Benennung „sicherer DC“ oder „DC einschließlich ungefährlicher Ausfälle“ wird verwendet, um die teilweise Verminderung der Wahrscheinlichkeit ungefährlicher Hardwareausfälle oder sowohl ungefährlicher als auch gefahrbringender Hardwareausfälle zu beschreiben, die aus der Anwendung der automatischen diagnostischen Prüfungen resultiert.</p>	<p>[DIN EN 61508] Teil 4</p>
<p><i>Fehler- bzw. Ausfalltoleranz</i> (<i>fault tolerance</i>)</p>	<p>⇒ Eigenschaft, die das Aufrechterhalten der Funktion einer Betrachtungseinheit trotz des Auftretens von Fehlern bzw. Ausfällen in einem Teil der Betrachtungseinheit gestattet.</p> <p>Anmerkung: Ein System ist fehlertolerant bzw. ausfalltolerant vom Grade <i>k</i>, wenn <i>k</i> auftretende Fehler bzw. Ausfälle keine Auswirkung auf seine Funktion haben.</p>	<p>[VDI/VDE 3698]</p>
<p><i>Fehlfunktion</i> (<i>fault, dysfunction</i>)</p>	<p>⇒ Funktion, die nicht bestimmungsgemäß ausgeführt wird oder unterbleibt</p>	<p>[VDI/VDE 3542]</p>

<i>Funktion</i> (function)	⇒ Tätigkeit, Wirken einer Betrachtungseinheit	[VDI/VDE 3542]
<i>Messabweichung</i> (error of measurement)	⇒ Abweichung eines aus Messungen gewonnenen und der Messgröße zugeordneten Wertes vom wahren Wert (setzt sich additiv aus systematischer und zufälliger Messabweichung zusammen)	[DIN 1319] Teil 1
<i>Messgröße</i> (measurand)	⇒ Physikalische Größe, der die Messung gilt. ... Eine Messgröße hängt im allgemeinen von mehreren physikalischen Größen ab; insbesondere kann sie zeit- und ortsabhängig sein. ...	[DIN 1319] Teil 1
<i>Messkette</i> (measuring chain)	⇒ Folge von Elementen eines Messgerätes oder einer Messeinrichtung, die den Weg des Messsignals von der Aufnahme der Messgröße bis zur Bereitstellung der Ausgabe bildet.	[DIN 1319] Teil 1
<i>Messmethode</i> (method of measurement)	⇒ Spezielle, vom Messprinzip unabhängige Art des Vorgehens bei der Messung. Beispiele: Vergleichs-Messmethode, Kompensations-Messmethode	[DIN 1319] Teil 1
<i>Messprinzip</i> (principle of measurement)	⇒ Physikalische Grundlage der Messung Das Messprinzip erlaubt es, anstelle der Messgröße eine andere Größe zu messen, um aus ihrem Wert eindeutig den der Messgröße zu ermitteln. Es beruht auf einer immer wieder herstellbaren physikalischen Erscheinung (Phänomen, Effekt) mit bekannter Gesetzmäßigkeit zwischen der Messgröße und der anderen Größe.	[DIN 1319] Teil 1

<i>Messsignal</i> (<i>measurement signal</i>)	⇒ Größe in einem Messgerät oder einer Messeinrichtung, die der Messgröße eindeutig zugeordnet ist.	[DIN 1319] Teil 1
<i>Messung</i> (<i>measurement</i>)	⇒ Ausführen von geplanten Tätigkeiten zum quantitativen Vergleich der Messgröße mit einer Einheit	[DIN 1319] Teil 1
<i>Messunsicherheit</i> (<i>uncertainty of measurement</i>)	⇒ Dem Messergebnis zugeordneter Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgröße zugeordnet werden könnte	[DIN ENV 13005]
<i>Messverfahren</i> (<i>measurement procedure</i>)	⇒ Praktische Anwendung eines Messprinzips und einer Messmethode. Beispiel: Thermoelektrische Temperaturmessung mit Drehspulmessgerät nach der Ausschlag-Messmethode	[DIN 1319] Teil 1
<i>Messwert</i> (<i>measured value</i>)	⇒ Wert, der zur Messgröße gehört und der Ausgabe eines Messgerätes oder einer Messeinrichtung eindeutig zugeordnet ist. Anmerkung 1: Der Messwert setzt sich zusammen aus dem wahren Wert, der zufälligen Messabweichung und der systematischen Messabweichung. ... Der Messwert kann auch gleich der Ausgabe sein. ...	[DIN 1319] Teil 1

<i>Redundanz</i> (<i>redundancy</i>)	⇒ Vorhandensein von mehr funktionsfähigen Mitteln in einer Einheit, als für die Erfüllung der geforderten Funktion notwendig sind. ... Anmerkung 2: Die Aufrechterhaltung der Redundanz erfordert Instandhaltung, d. h. die Überwachung, die Erhaltung und bei Versagen die Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit aller Mittel.	[DIN 40041]
<i>Funktionsbeteiligte Redundanz</i> (<i>active redundancy</i>)	⇒ Redundanz, bei der alle Mittel gleichzeitig an der Erfüllung der geforderten Funktion beteiligt sind. Anmerkung: auch „aktive Redundanz“ oder „heiße Redundanz“ genannt.	[DIN 40041]
<i>Nicht funktionsbeteiligte Redundanz</i> (<i>standby redundancy</i>)	⇒ Redundanz, bei der zusätzliche Mittel erst bei Versagen von bis dahin funktionsbeteiligten Mitteln an der Erfüllung der geforderten Funktion beteiligt werden. Anmerkung: Auch „Standby-Redundanz“, „passive Redundanz“ oder „kalte Redundanz“ genannt.	[DIN 40041]
<i>Homogene Redundanz</i> (<i>homogeneous redundancy</i>)	⇒ Redundanz, bei der die Mittel gleichartig sind.	[DIN 40041]
<i>Diversitäre Redundanz</i> (<i>diversity</i>)	⇒ Redundanz, bei der die Mittel ungleichartig sind. Anmerkung 1: Die ungleichartigen Mittel können z.B. sein: Anwendung anderer phys. Prinzipien, andere Lösungswege für die gleiche Funktion oder andere Auslegung. Anmerkung 2: Verschiedentlich „Diversität“ genannt.	[DIN 40041]

<i>Strukturelle Redundanz</i> (-)	⇒ Strukturelle Redundanz liegt vor, wenn ein System um zusätzliche Subsysteme zum Zweck der Redundanz erweitert wird (z.B. zusätzliche Rechner in einem Mehrrechnersystem oder zusätzliche Betriebssystemfunktionen)	[VDI/VDE 3698]
<i>Funktionelle Redundanz</i>	⇒ Bei funktioneller Redundanz wird ein System um zusätzliche Funktionen zum Zweck der Redundanz erweitert (z.B. Verfahren zur Realisierung von Fehlertoleranz wie Erzeugung und Speicherung von Paritätsbits, Betriebssystemerweiterungen zur Verwaltung von Ersatzrechnern oder Ersatzprozessen u.ä.)	[VDI/VDE 3698]
<i>Rekonfiguration</i> (reconfiguration)	⇒ Fähigkeit eines Systems sich nach statt gefundener Störung selbst in dem Maße zu konfigurieren, dass die kritische Funktion weiterhin, wenn auch mit Einschränkungen, erfüllt wird	<i>Eigendefinition</i>
<i>Selbstdiagnose</i> (self diagnosis)	⇒ Fähigkeit den Ist-Zustand des Geräts bezüglich möglicher Zusammenhänge und Ursachen von Störungen und Ausfällen zu interpretieren und zu diagnostizieren.	<i>Eigendefinition</i>
<i>Selbstüberwachung</i> (self monitoring)	⇒ Funktion, die den Ist-Zustand des Systems „Sensor“ und somit alle Fehlfunktionen, unter Ausschluss bestimmter Fehlfunktionen, erkennt und diesen Ist-Zustand bezüglich möglicher Zusammenhänge und Ursachen interpretiert und diagnostiziert	<i>Eigendefinition</i>
<i>Sicherheit</i> (safety)	⇒ Der Grad mit dem das System seiner Umgebung nicht selbst mögliche gefährliche Bedingungen aufzwingt	[DIN EN 61069]

<p><i>Störung</i> (<i>malfunction, deficiency</i>)</p>	<p>⇒ Verlassen der zulässigen Abweichungen bei grundsätzlichem Erfüllen der geforderten Funktion (eine Störung stellt das Ereignis des Übergangs von korrekter Funktion zu Fehlfunktion dar)</p>	<p><i>Eigendefinition</i></p>
<p><i>Störungserkennung</i> (<i>detection</i>)</p>	<p>⇒ Fähigkeit den Ist-Zustand eines Gerätes und somit alle möglichen Störungen und Fehlfunktionen, unter Ausschluss bestimmter (benannter) Fehlfunktionen, zu erkennen</p>	<p><i>Eigendefinition</i></p>
<p><i>Störungstoleranz</i> (<i>deficiency tolerance</i>)</p>	<p>⇒ Eigenschaft, die das Aufrechterhalten der Funktion eines Sensors trotz stattgefundenener Störungen bzw. Ausfälle im Sensor gestattet.</p>	<p><i>Eigendefinition</i></p>
<p><i>Verfügbarkeit, momentane</i> (<i>instantaneous availability</i>)</p>	<p>⇒ Wahrscheinlichkeit, eine Einheit zu einem vorgegebenen Zeitpunkt der geforderten Anwendungsdauer in einem funktionsfähigen Zustand anzutreffen</p>	<p>[DIN 40041]</p>
<p><i>Verfügbarkeit, stationäre</i> (<i>steady state availability</i>)</p>	<p>⇒ Mittlere Betriebsdauer zwischen zwei Ausfällen dividiert durch die Summe aus mittlerer Betriebsdauer zwischen zwei Ausfällen und mittlerer Störungsdauer</p>	<p>[DIN 40041]</p>
<p><i>Verlässlichkeit</i> (<i>dependability</i>)</p>	<p>⇒ Verlässlichkeit ist das Ausmaß, in dem man sich darauf verlassen kann, dass das System seine vorgesehene Funktion unter gegebenen Betriebs- und Umgebungsbedingungen erfüllt.</p>	<p>[DIN EN 61069]</p>

<i>Zuverlässigkeit</i> (<i>reliability</i>)	⇒ Wahrscheinlichkeit, dass eine Betrachtungseinheit die geforderte Funktion unter vorgegebenen Arbeitsbedingungen während einer festgelegten Zeitdauer ausfallfrei ausführt	[Biroli97]
--	---	------------

C Störungen eines Wirkdrucksensors

Die Tabellen 4.1, 4.2 und 4.3 umfassen die in der FMEA gefundenen Störungs- und Ausfallursachen in geordneter Form. Dabei sind einige Störungen zu geeigneten Gruppen zusammen gefasst. Unter Abbildung C1 ist der der Ausfalleffektanalyse zugrunde liegende Strukturbaum eines Wirkdrucksensors mit Blende dargestellt. Dabei ist die fluidische Messstrecke deutlich detaillierter dargestellt und auch in der Analyse behandelt als Primär- oder Sekundärelektronik, da hierauf in der Arbeit der Fokus liegt.

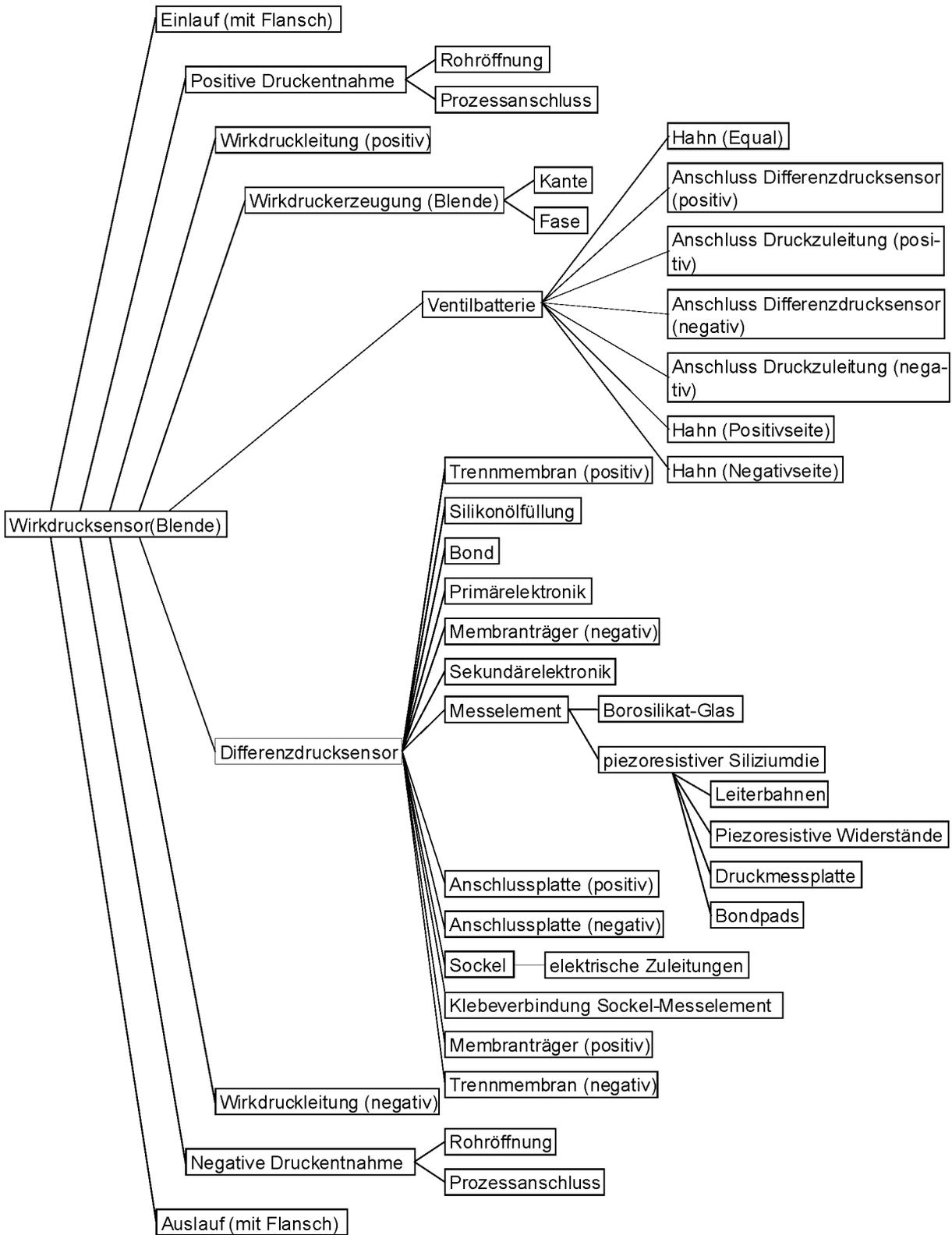


Abbildung C1: Struktur eines Wirkdrucksensors mit piezorestivem Differenzdrucksensor

Lebenslauf

Persönliche Daten

Ralf Müller
geboren am 25. September 1973
in Bad Homburg vor der Höhe
Familienstand: ledig

Schulische Laufbahn

1980 - 1984	Grundschule der Mittelpunktschule Waldems/Riedelbach
1984 - 1986	Förderstufe der Mittelpunktschule Waldems/Riedelbach
1986 - 1993	Gymnasium der Christian Wirth Schule Usingen

Zivildienst

1993 - 1994	Rettungssanitäter beim Malteser Hilfsdienst, Usingen
-------------	--

Studium

1994 - 1996	Grundstudium Elektrotechnik, TU Darmstadt
1996 - 2000	Hauptstudium Elektrotechnik, TU Darmstadt Vertiefung: Elektromechanische Konstruktionen EMK

Berufliche Tätigkeiten

2000 - 2005	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Elektromechanische Konstruktionen, TU Darmstadt
-------------	--

Darmstadt, 14. Sept. 2005