

# 1 Einleitung

Drucksensoren gibt es in vielen Varianten und in großer Anzahl. Sie sind Gegenstand unzähliger Untersuchungen und Abhandlungen. Fast alle gängigen Systeme verwenden dabei das Ausschlagverfahren. Es basiert auf der Auswertung der elastischen Veränderung eines Deformationskörpers unter Druckbeaufschlagung. Das Hauptziel und damit auch Hauptproblem stellt die Gestaltung des Deformationskörpers dar, der eine lineare Druck/Verformungs-Kennlinie haben sollte, um eine direkte Anzeige oder elektrische Auswertung der resultierenden Verformung zu erleichtern. Viele der Arbeiten haben daher diese Deformationskörper zum Thema. Treibende Kraft bei der Verbesserung der Druckmeßtechnik waren schon früh die Wissenschaftler der Luftfahrttechnik, die immer genauere Instrumente für ihre Strömungsuntersuchungen benötigten. Hier war es insbesondere *W. Wüst* der Mitte des 20. Jahrhunderts die Strukturen der verschiedenen federelastischen Druckmeßelemente systematisch untersuchte und beschrieb. Die dabei entstandenen Modelle finden auch heute noch Verwendung.

Durch die Belastung des Materials kommt es u.a. zu nichtelastischen Verformungseffekten, die sich in Form von Kriechen und Hysterese zeigen und auch bei heutigen Systemen ein Problem darstellen. Langzeitfolgen auf das Materialgefüge mit Veränderung der Empfindlichkeit und der Maximalbelastbarkeit bis hin zur Schädigung sind möglich. Bei industriellen Sensoren wird daher meist der Meßbereich weit unterhalb der Elastizitätsgrenze festgelegt, um die belastungsbedingte Alterung zu verringern. Dies erfordert aber einen erhöhten Aufwand bei der Meßelektronik, da die Empfindlichkeit höher sein muß. Während für die gestaltungsspezifischen Abweichungen der Kennlinie eine elektronische Korrektur vorgenommen werden kann, ist dies für die Folgen der Materialalterung nur sehr begrenzt machbar. Im Präzisionsbereich ist deswegen eine regelmäßige Kalibrierung durch Referenzmessung der Kennlinie der Sensoren unumgänglich, gleichzeitig aber sehr zeit- und damit kostenintensiv.

Eine Möglichkeit die Verformung als Fehlerquelle auszuschalten, besteht darin, ihr mit einem Aktorsystem entgegenzuwirken und sie damit zu unterbinden. Dieses als Kompensationsverfahren bekannte Prinzip hat seinen Ursprung in der Wägetechnik, wo es wegen der sehr guten Reproduzierbarkeit und Linearität weit verbreitet ist. Dies ist auf den konstanten Arbeitspunkt des Sensorsystems zurückzuführen.

Um einen entsprechenden Aufbau für ein Druckmeßsystem einfach zu halten, sollte sich der Deformationskörper nur eindimensional verformen. Die druckresultierende Deformation, die sich hier in Form einer Auslenkung darstellt, wird durch ein Wegmeßsystem aufgenommen und einem Regler zugeführt. Der Regler steuert dann das Aktorsystem, welches der Deformation entgegenwirkt. Ist die Auslenkung des

Deformationskörpers im statischen Zustand vollständig zurückgestellt, so ist das Aktorsignal ein Maß für den anliegenden Druck. Es werden hohe Ansprüche an den Aktor gestellt, da er die interne Referenz darstellt.

Die Integration eines Aktorteils zur Kraftkompensation hat neben der Verringerung bzw. Eliminierung der Belastung des Deformationskörpers einen weiteren Vorteil. Durch die Wirkungsverbindung von Wegmeßeinheit und Aktorteil besteht die Möglichkeit, den Sensor ohne externe Referenzsysteme in sich selbst zu testen. Das Wissen um die Funktionsfähigkeit eines Sensors ist insbesondere in sicherheitsrelevanten Gebieten, wie z.B. in der Luftfahrttechnik, von großer Bedeutung. Hier ist ein zuverlässiges Druckmeßsystem für die Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeit an den Tragflächen mit Hilfe der Staudruckmessung existentiell.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Betrachtungen zur Funktion und Auslegung eines solchen kraftkompensierenden Differenzdrucksensors gemacht sowie Untersuchungen an einem Prototypen vorgestellt. Zunächst werden die Grundprinzipien der Strömungsmeßtechnik im Flugzeug dargestellt, die Grundlage für den Einsatz des hier vorgestellten Sensors sind. Im Hauptteil der Arbeit werden die Anforderungen an jede der nötigen Teilkomponenten aufgezeigt, verschiedene dafür mögliche Wirkprinzipien diskutiert, die getroffene Auswahl erläutert und vertiefend behandelt. Es folgt jeweils die Beschreibung der konkreten praktischen Umsetzung.

Mit Hinblick auf die Zuverlässigkeit der Druckmessung im Flugzeug werden die Notwendigkeiten und Möglichkeiten der Selbstüberwachung aufgezeigt. Zusätzlich zum reinen Sensorselbsttest wird ein neuartiges Verfahren vorgestellt, mit dem auch die Druckzuleitungen und Druckentnahmebohrungen bei der Staudruckmessung auf ihren einwandfreien Zustand geprüft werden können. Abschließend werden die Meßergebnisse an dem experimentell realisierten Differenzdrucksensor mit Selbstdiagnose vorgestellt und dessen Einsatzpotential bewertet.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Grundlagen

Wird eine Fläche  $A$  dem Druck  $p$  ausgesetzt, so wirkt eine Kraft  $F$ . Entsprechend ist der Druck definiert als

$$p \mid \frac{F}{A}. \quad (2.1)$$

Die abgeleitete SI-Einheit des Druckes ist *Pascal*

$$[p] \mid 1Pa \mid 1\frac{N}{m^2}.$$

Ist die Fläche bekannt und kraft- und reibungsfrei aufgehängt, so läßt sich durch Bestimmung der Kraft auf den anliegenden Druck schließen. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Fläche von beiden Seiten einem Druck ausgesetzt werden kann und die wirksame Kraft aus der Differenz von Meß- und Referenzdruck entsteht. Je nach Art des Referenzdruckes werden unterschiedliche Bezeichnungen verwendet.

Bezieht sich der Meßdruck auf das absolute Vakuum, so wird von Absolutdruck gesprochen. Beim Differenzdruck werden zwei Absolutdrücke miteinander verglichen; die Differenz beider stellt den Meßdruck dar. Ist die Referenz z.B. der Umgebungsdruck, wird der Meßdruck oft als Über- bzw. Unterdruck bezeichnet (Bild 2.1). Die Drucksensoren werden entsprechend dieser Einteilung unterschieden.

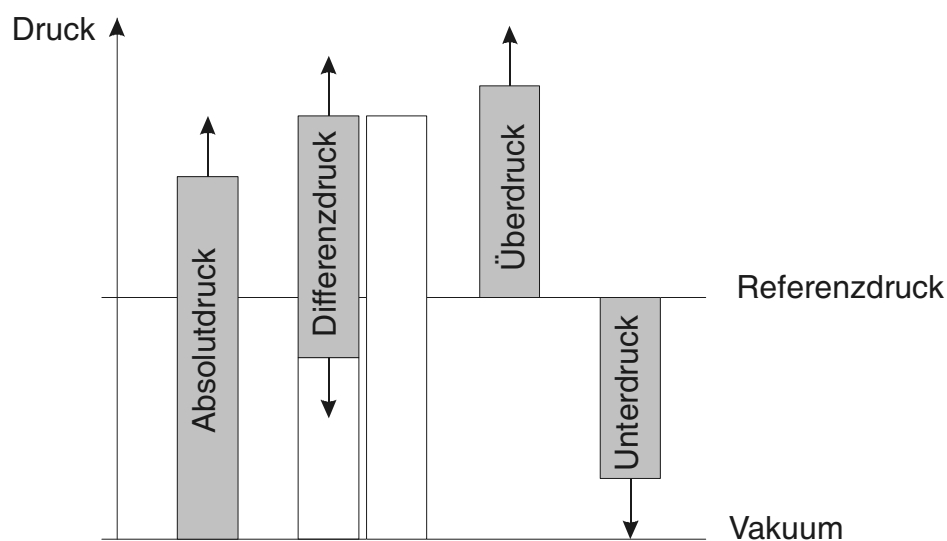


Bild 2.1: Druckdefinitionen

## 2.2 Druckmeßverfahren nach dem Ausschlagprinzip

Es existiert in der Meßtechnik eine sehr große Vielfalt an Drucksensoren und Abhandlungen darüber [Goe72, Gos93, Luo86, Wik95, Wil32, Wir91]. Die maximalen Meßdrücke beginnen bei einigen Pascal im Niederdruckbereich und gehen bis in den Bereich von mehreren MPa bei Höchstdrucksensoren, wie sie z.B. in der chemischen Industrie eingesetzt werden. Weitere Unterscheidungskriterien sind:

- a) Primäre Sensoreigenschaften
  - ⊘ Art des Referenzdruckes
  - ⊘ Meßgenauigkeit: Statische Abweichung, Nichtlinearität, Hysterese, Reproduzierbarkeit, Temperaturdrift
  - ⊘ Empfindlichkeit
  - ⊘ Grenzfrequenz
  - ⊘ Überdruckfestigkeit
- b) Elektrische Eigenschaften
  - ⊘ Versorgungsspannung
  - ⊘ Leistungsaufnahme
  - ⊘ Art des Ausgangssignals (Strom, Spannung, analog, digital)
  - ⊘ Möglichkeit der Fernsteuerung (Feldbus)
- c) Zulässige Umgebungsbedingungen
  - ⊘ Meßmedium (z.B. Säuren, korrosive Gase, Lösungsmittel etc.)
  - ⊘ Temperatur
  - ⊘ Beschleunigung, Vibration
  - ⊘ Feuchtigkeit
  - ⊘ EMV-Festigkeit
  - ⊘ Explosionsschutz
- d) Mechanische Eigenschaften
  - ⊘ Anschluß, Bauform, Werkstoff
  - ⊘ Masse

Fast alle heutzutage eingesetzten Druckmeßaufnehmer arbeiten dabei nach dem Ausschlagprinzip. Dieses Prinzip soll nachfolgend kurz beschrieben und seine Nachteile verdeutlicht werden.

### 2.2.1 Grundsätzliche Wirkungsweise

Kennzeichnend für ein Ausschlagverfahren ist eine gerichtete Wirkungskette oder Steuerung, bei der die Meßgröße in mehreren Stufen in die Ausgangsgröße umgeformt werden kann. Jede Stufe beinhaltet dabei eine Maßverkörperung, die die Umsetzung der jeweiligen Eingangsgröße in die Ausgangsgröße definiert [Kro79].

Der Druck  $p$  läßt sich direkt nur schlecht messen, daher wird seine Kraftwirkung auf eine Fläche nach Gl. (2.1) ausgenutzt. Ist diese Fläche federelastisch und reibungsfrei gelagert, so läßt sich anhand der Auslenkung  $x$  ein Rückschluß auf den wirksamen Druck ziehen, dem sie ausgesetzt ist. Die Auslenkung kann dann mit einem bekannten elektrischen Wegmeßverfahren aufgenommen werden. Dessen Signal  $X$ , das z.B. in Form eines Widerstands oder einer Kapazität vorliegen kann, wird nachfolgend mit einer entsprechenden Elektronik ausgewertet und in ein Ausgangssignal  $Y$  umgeformt, das dann zur Anzeige gebracht werden kann (Bild 2.2).

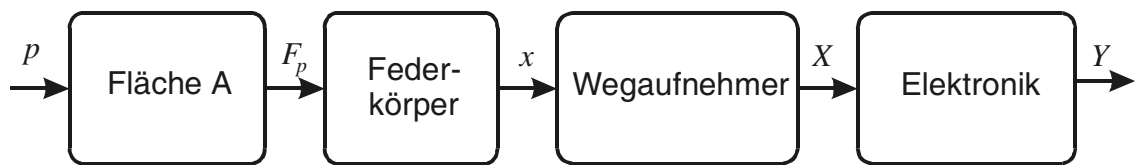


Bild 2.2: Funktionsprinzip Ausschlagverfahren

Zur Erzielung eines statischen Zustands muß ein Kräftegleichgewicht hergestellt werden. Die zur Druckkraft  $F_p$  nötige Gegenkraft wird beim Ausschlagverfahren ausschließlich durch den Federkörper aufgebracht. Für das Kräftegleichgewicht gilt:

$$F_p \mid F_F . \quad (2.2)$$

Im Idealfall ist die Federkraft  $F_F$  linear zur Auslenkung  $x$ :

$$F_F \mid k_F \cdot x . \quad (2.3)$$

Hierbei ist  $k_F$  die sog. Federkonstante. Durch Einsetzen ergibt sich:

$$x \mid \frac{A}{k_F} \cdot p . \quad (2.4)$$

Dies bedeutet, daß sich ein statisches Gleichgewicht aufbaut, bei dem die Auslenkung proportional zum Druck ist. Bei einer linearen Auswertung der Auslenkung  $x$  durch Wegaufnehmer und Elektronik folgt die Anzeige  $Y$  dem Druck proportional:

$$Y \sim X \sim p . \quad (2.5)$$

Fast alle Drucksensoren nach dem Ausschlagverfahren arbeiten nach diesem Prinzip. Die elektrische Auswertung der Auslenkung ist die logische Erweiterung der alten mechanisch anzeigenden Druckmeßgeräte, bei denen die Auslenkung typischerweise mit Übersetzungsmechanismen und Zeigern zur Anzeige gebracht wurde [Wik95]. Neben der reinen Auslenkung werden auch andere mechanische Größen, wie z.B. die Oberflächendehnung verwendet. Sie kann gut mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen (DMS) ausgewertet werden. Im Bereich der Mikromechanik sind in Silizium strukturierte DMS und Dünnschicht-DMS sowie die kapazitive Auslenkungsmessung etabliert [Hei95]. Einen Spezialfall stellen piezoelektrische Sensoren dar. Aufgrund der besonderen Materialeigenschaften wird hier durch die Druckbelastung direkt eine