

KAPITEL 6

Zusammenfassung und Ausblick

Die Anbieter von Meßwertumformern aller Art müssen bei der derzeitigen und auch zukünftigen Situation des Sensormarktes die auftretenden Kosten im gesamten Produktionsablauf niedrig halten um konkurrenzfähig zu bleiben. Trotz sinkender Kosten muß aber die Qualität der Produkte steigen, die sich beispielsweise durch eine erhöhte Meßgenauigkeit und Selektivität gegenüber unerwünschten Stör- und Einflußgrößen auszeichnet. Da die Meßwertumformer zudem Material- und Exemplarstreuungen unterliegen, ist ein Abgleich der Sensorparameter einfach unerlässlich. Hauptsächlicher Gegenstand der hier vorliegenden Dissertation war die Minimierung der dabei anfallenden Kosten. Hierzu wurde ein neuartiges, kennlinienbasiertes Sensorsystem entwickelt, das für die Reduzierung der nichtidealen Sensoreigenschaften geeignet ist. Aber erst in Kombination mit einer voll automatisierten und diskret aufgebauten Abgleichhardware sowie den erforderlichen Strategien zum nichtiterativen Abgleich der notwendigen Sensorparameter können die anfallenden Kosten der Meßwertumformer auf ein akzeptables Maß reduziert werden.

In einem ersten Schritt wurde ein allgemeines Fehlermodell für die Beschreibung nichtidealer Eigenschaften von Sensoren vorgestellt. Aufgrund der Vielfalt an Sensoren wurden die auftretenden, nichtidealen Eigenschaften sowie der Aufbau und die Funktionsweise derzeit üblicher Silizium-Drucksensoren näher untersucht. Die Gruppe der Drucksensoren wurde bevorzugt ausgewählt, da diesen Sensoren das größte, weltweite Umsatzvolumen auf dem Sensormarkt bis weit über das Jahr 2002 hinaus prognostiziert wird.

Ergebnis dieser Untersuchungen war, daß zur Reduzierung der nichtidealen Eigenschaften teilweise nichtlineare Kennlinien benötigt werden. Die gedankliche Ausweitung dieser Untersuchungen auf andere Bereiche der Sensorik bestätigte immer wieder die Notwendigkeit von nichtlinearen Kennlinien. Da die zur Korrektur benötigte Kennlinie im vorhinein nicht bekannt ist, muß der Verlauf flexibel einstellbar sein. Ebenso mußte aus Kostengründen der dafür benötigte Speicherbedarf und Kalibrationsaufwand gering sein, so daß der Verlauf der zur Korrektur notwendigen Kennlinie über einige wenige Punkte festgelegt werden muß. Für die Berechnung von Zwischenwerten baten sich Interpolations- oder Regressionsverfahren aus der numerischen Approximationstheorie an. Neben den klassischen Interpolationsverfahren nach Lagrange oder Newton kamen aber für die hardwaremäßige Realisierung die moderneren Interpolationsverfahren wie beispielsweise die stückweise Polynom- oder Spline-Interpolation in Betracht.

Zu den herkömmlichen Hardware-Konzepten für die Implementierung nichtlinearer Approximationsverfahren wurde ein einfaches Tabellenverfahren und ein rechnergestütztes Verfahren vorgestellt. Ausgehend von den Vor- und Nachteilen, die einfache Tabellenverfahren und rechnergestützte Verfahren besitzen, wurde ein modifiziertes Tabellenverfahren auf der Basis von überabgetasteten $\Sigma\Delta$ -Modulatoren entwickelt. Untersuchungen zum Interpolationsverhalten des modifizierten Tabellenverfahrens ergaben, daß sich identische Basisfunktionen ausbilden, die jeweils um den Stützstellenabstand Δx gegeneinander verschoben sind. Die Form der Basisfunktionen kann über die Ordnung und die Koeffizienten des im $\Sigma\Delta$ -Modulator verwendeten Schleifenfilters modifiziert werden. Mit $\Sigma\Delta$ -Modulatoren erster bis dritter Ordnung ergeben sich Basisfunktionen, mit denen das Spektrum der stückweisen, linearen, quadratischen und kubischen Interpolation abdeckt werden konnte. Eine besondere Stellung nimmt dabei der $\Sigma\Delta$ -Modulator dritter Ordnung ein, da er aufgrund der stückweise, kubischen Interpolationseigenschaft die besondere Minimaleigenschaft besitzt, die wenigen zur Verfügung stehenden Stützwerte der zu approximierenden Kennlinie mit einer minimalen Gesamtkrümmung untereinander zu verbinden.

Basierend auf diesem Interpolationskonzept wurde in einem weiteren Kapitel ein kennlinienbasiertes Sensorsystem zur Reduzierung von Querempfindlichkeiten vorgestellt, in dem zusätzlich die dafür benötigten Systemkomponenten beschrieben wurden. Das Sensorsystem besitzt digitale Abgleichelemente, mit denen sich unabhängig voneinander der Nullpunkt, die Empfindlichkeit sowie die notwendige Kennlinien-Charakteristik zur Reduzierung der unerwünschten Querempfindlichkeit einstellen läßt. Für die Verifizierung des kennlinienbasierten Konzepts sind Silizium-Drucksensoren auf piezoresistiver Basis verwendet worden, da diese eine starke, jedoch unerwünschte Querempfindlichkeit bzgl. der Temperatur aufweisen. Messungen an einem monolithisch integrierten und hybrid aufgebauten Drucksensor bestätigen die Funktionsweise der Temperaturkompensation. Beim hybrid aufgebauten Drucksensor konnte die Einstellung des Nullpunkts und der Empfindlichkeit bei 20°C auf $\pm 0,5\%$ genau abgeglichen werden. Die Temperaturdrift des Nullpunkts und der Empfindlichkeit kann bereits mit 4 Kennlinien-Einträgen über einem Temperaturbereich von 0-100°C auf unter 0,01%/K ($\cong 100\text{ppm/K}$) reduziert werden. Ähnliche Ergebnisse wurden bei dem monolithisch integrierten Drucksensor erzielt. Hier konnte die temperaturabhängige Drift des Nullpunkts und der Empfindlichkeit über einem Temperaturbereich von -40 bis +120°C mit 16 Kennlinien-Einträgen von 1350ppm/K auf unter 86ppm/K reduziert werden. Abschließend wurde das vorliegende Konzept durch geringfügige Modifikationen auf eine Linearisierung der Meßgröße erweitert. Diese Erweiterungsfähigkeit demonstriert die überaus hohe Flexibilität des vorliegenden Sensor-Konzepts.

Bei der Ermittlung der Sensorparameter sind für jeden Sensor exemplarbedingte Einstellungen notwendig, die sich an den Herstellungsprozeß anschließen. Da diese Einstellmaßnahmen bekanntlich sehr personal- und somit auch sehr kostenintensiv sind, konnte die Einstellung der notwendigen Sensorparameter nicht mehr manuell erfolgen.

An dieser Stelle war eine Rationalisierung der Einstellmaßnahmen unumgänglich. Aus diesem Grund wurde eine voll automatisierte Kalibrationshardware entwickelt, die es zudem erlaubt, mehrere Sensoren gleichzeitig abzugleichen, um zusätzlich den Durchsatz zu erhöhen. Neben der Kalibrationshardware sind effiziente Abgleichalgorithmen für die Optimierung der notwendigen Einstellungen entwickelt worden.

Mit der vorliegenden Hardware und den entwickelten Abgleichalgorithmen zur automatisierten Kalibration, liegt die Vision eines selbstkalibrierenden Sensorsystems gemäß **Bild 6.1** sehr nahe, da das Übertragungsverhalten des Sensorsystems jederzeit über die variable Kennlinien-Charakteristik verändert werden kann. Ein selbstkalibrierender Drucksensor würde beispielsweise während des Betriebs die vorhandene Temperaturabhängigkeit selbständig ohne die Vorgabe von verschiedenen Temperaturen reduzieren. Lediglich ein Abgleich des Nullpunktes und des Endwertes mit geeichten Meßgrößen p_0 und p_N bei einer typischen Betriebstemperatur T_0 ist notwendig und wird auch in Zukunft immer erforderlich bleiben.

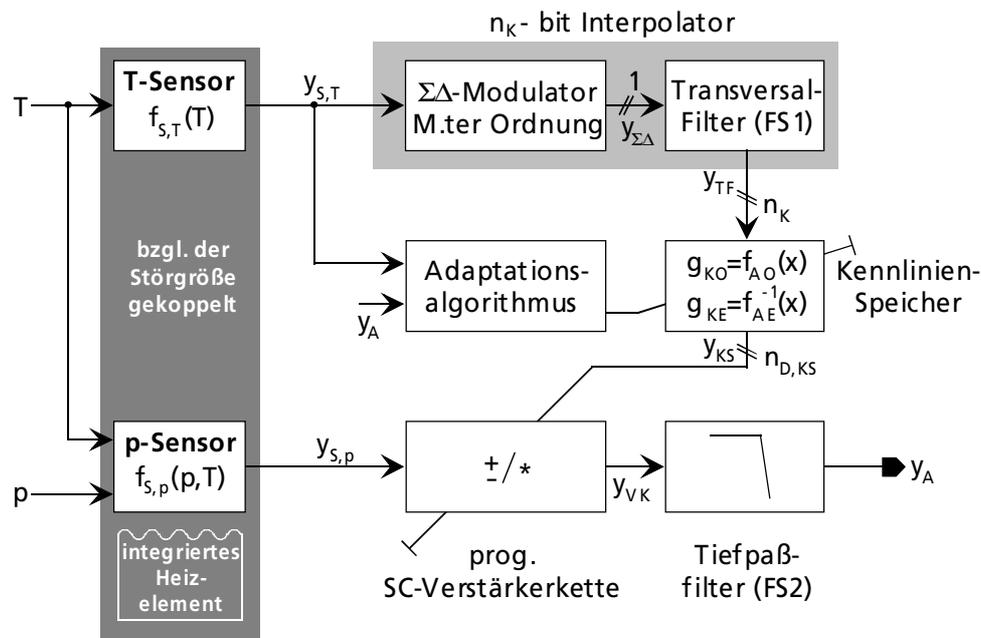


Bild 6.1 Konzept eines selbstkalibrierenden Drucksensorsystems

Die selbständige Adaption der Kennlinien-Charakteristik erfolgt durch die Auswertung und Minimierung der Korrelation zwischen dem Ausgangssignal $y_{S,T}$ des Temperatursensors und dem Signal am Ausgang y_A des Drucksensorsystems. Die bestehende Korrelation kann entweder über eine statistische Langzeitauswertung oder über eine überlagerte Temperaturschwankung untersucht werden. Die überlagerten Temperaturschwankungen können durch ein auf dem Drucksensor integriertes Heizelement hervorgerufen werden. Besteht eine Korrelation zwischen dem Ausgangssignal y_A und dem Temperatursignal $y_{S,T}$, so wird die Kennlinien-Charakteristik solange verändert, bis das Ausgangssignal des Drucksensors nahezu unabhängig von der Temperatur ist.

Die Genauigkeit bei einer Betriebstemperatur hängt von der jeweiligen Zeitdauer ab, in der sich das Sensorsystem während der gesamten Betriebsdauer befunden hat. Die angelerten Parameter der Kennlinie können über EEPROM-Speicherzellen auch bei abgeschalteter Versorgungsspannung erhalten bleiben. Zum Entwurf des selbstkalibrierenden Drucksensorsystems gehören zudem ausführliche Konvergenzuntersuchungen unterschiedlicher Lernverfahren zur Bestimmung der notwendigen Kennlinien-Informationen.

Ein weiteres in der Zukunft zu lösendes Problem ist die sog. Eigensicherheit von Sensorsystemen [93], die vor allem in lebenserhaltenden Sensorsystemen von sehr großer Bedeutung ist. Wie schon bei der Kalibration von Sensorsystemen muß ebenfalls aus Kostengründen die konventionelle Auffassung, unter allen Umständen die komplette Leistungsfähigkeit des Systems zu erhalten, in Frage gestellt werden. Man steht also vor der Entscheidung, ob eine reduzierte Systemleistung toleriert werden kann, solange die Sicherheit, d.h. die Nichtgefährdung von Menschen und der Umwelt garantiert bleibt.