

Modellbasierte Entwurfsmethoden für Sensorsysteme im Automotive-Bereich

Sven Reitz, Peter Schneider

Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen, Institutsteil

Entwurfsautomatisierung, Dresden, Germany

Sven.Reitz@eas.iis.fraunhofer.de

Andreas Schroth

Intelligente Sensorsysteme Dresden GmbH, Dresden, Germany

schroth@i2s-sensors.de

Zusammenfassung

Ziel der Untersuchungen war die Entwicklung eines neuartigen Prinzips für die Erfassung der Temperatur des Kältemittels in CO₂-Klimaanlagen. Der neuartige Lösungsansatz besteht darin, die Temperaturmessung in einem ebenfalls im System benötigten Drucksensor außerhalb des Kältemittelstroms an einer fertigungstechnisch günstigen Stelle zu positionieren und auf Basis von simulativen Untersuchungen verschiedener Einbaubedingungen Korrekturkennfelder zu ermitteln, welche eine Rückrechnung auf den tatsächlichen Temperaturwert des Mediums erlauben.

1 Motivation

Der Anteil der Sensorik für Überwachungs- und Steuerungsaufgaben in der Automobilindustrie, Automatisierungstechnik und Medizintechnik hat sich durch die fortschreitende technologische Entwicklung in den letzten Jahren stark vergrößert. Leistungsfähige Sensoren zur präzisen Erfassung von Prozessgrößen wie Druck, Temperatur und Durchfluss nehmen eine Schlüsselstellung bei der Umsetzung innovativer Systemlösungen ein.

Ziel der Untersuchungen war die Entwicklung eines neuartigen Prinzips für die Erfassung der Temperatur des Kältemittels in CO₂-Klimaanlagen [1]. Wesentliche Anforderungen bei der Temperaturmessung sind schnelles Ansprechverhalten des Sensors und eine möglichst geringe Beeinträchtigung des Durchflusses des Kältemittels. Beide Anforderungen widersprechen sich, da für das Erreichen geringer Ansprechzeiten das direkte Einbringen des Temperatursensors in den Kältemittelstrom sinnvoll ist. Das ist allerdings zwangsläufig mit einer Querschnittsverengung verbunden, wodurch der Durchfluss des Kältemittels behindert wird. Ein weiteres Problem besteht darin, dass über den Sensorträger eine Wärmeableitung

erfolgt und somit eine Verfälschung der Messwerte hervorgerufen wird. Lösungsansätze, die hinsichtlich der Wärmeableitung optimiert sind, verursachen relativ hohen Fertigungsaufwand und hohe Kosten. Darüber hinaus ist die Genauigkeit der Messung wesentlich von den konkreten Einbau- und Umgebungsbedingungen abhängig.

2 Methodik

Der neuartige Lösungsansatz besteht darin, die Temperaturmessung in einem ebenfalls im System benötigten Drucksensor außerhalb des Kältemittelstroms an einer fertigungstechnisch günstigen Stelle zu positionieren und auf Basis von simulativen Untersuchungen verschiedener Einbaubedingungen Korrekturkennfelder zu ermitteln [2]. Diese sollen, in der intelligenten Auswertelektronik hinterlegt, im Betrieb eine Rückrechnung auf den tatsächlichen Temperaturwert des Mediums erlauben. Die Korrekturen sind notwendig, da sich zum einen der Temperatursensor außerhalb des Kühlmittelflusses befindet, so dass die gemessene Temperatur von der des Mediums abweicht. Zum anderen ist das Drucksensorgehäuse thermischer Konvektion und Strahlung zu seiner Umgebung ausgesetzt, welche ebenso signifikante Unterschiede zwischen gemessener und Medientemperatur hervorrufen können (Abb. 1).

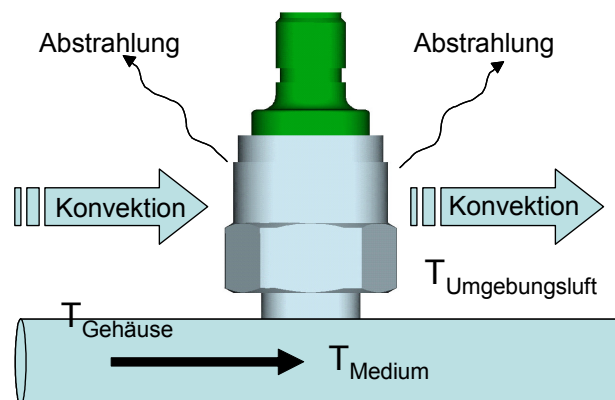


Abbildung 1: Zu bestimmende Messgröße Medientemperatur sowie Einflussparameter des untersuchten Sensorsystems

Die Idee ist, den realen Sensor durch ein Simulationsmodell zu ersetzen. Dieses Modell wird in Simulationsstudien zur Gewinnung von „Messwerten“ an möglichen Positionen für Temperatursensoren verwendet (Abb. 2 links) und ersetzt so sehr aufwändige oder technisch nicht durchführbare Messungen am realen Sensorsystem [3]. Diese Messwerte werden anschließend zum Entwurf der Signalanalysealgorithmen eingesetzt, welche die Extraktion der aktuellen Medientemperatur ermöglichen. Für die modellbasierte Erfassung der relevanten physikalischen Effekte und der wesentlichen Randbedingungen des Sensorsystems war es notwendig, Finite-Elemente-Modelle (FE-Modelle) des Drucksensors einschließlich dessen Anbindung an das zu messende Medium und die Umgebung in ANSYS [4] zu erstellen. Dabei wurden die Modelle derart erstellt, dass sie die Wärmeleitung und -kapazität der eingesetzten Materialien widerspiegeln sowie die Wärmekonvektion und -strahlung zur

Umgebung (Luft) berücksichtigen. Es konnte die Symmetrie der Anordnung ausgenutzt werden, um das zu untersuchende Problem auf ein Halbmodell zu reduzieren (Abb. 2 rechts).

Die detaillierten FE-Modelle können genutzt werden, um

- Geometrievariationen des Sensorsystems
- verschiedene Positionen der Temperatursensoren und
- den Einfluss von Einbau- und Umgebungsbedingungen zu untersuchen.

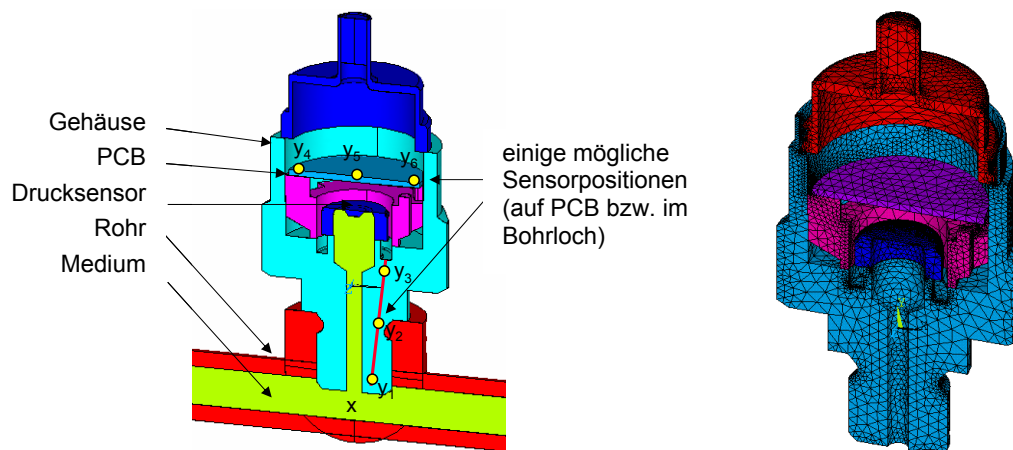


Abbildung 2: Links: Simulationsmodell des Sensorsystems – Punkt x kennzeichnet die Stelle, an der die Medientemperatur zu ermitteln ist, die Punkte $y_1 \dots y_6$ sind mögliche Sensorpositionen; rechts: vernetztes Finite-Elemente-Modell des Sensors

Eine weitere und wesentliche Erweiterung bestand in der Modellierung des Wärmetransports zwischen Messmedium und Sensorgehäuse als Wärmekonvektion. Im Gegensatz zur zuerst angenommenen idealen Anbindung des Mediums kann so auch der Wärmetransport über das strömende Medium besser nachgebildet werden. Die damit erzielten Simulationsergebnisse liegen deutlich näher an durch Messung ermittelten Werten.

Ergebnis der simulativen Untersuchungen sind Kennfelder, welche die Medien- und die Umgebungstemperatur sowie die Temperaturen an den Messpunkten $y_1 \dots y_6$ auf der Leiterplatte (PCB) sowie im Bohrloch enthalten (Abb. 2 links). Für die Kennfelder wurden im quasistatischen Fall die Medientemperatur von -40°C bis 165°C und die Umgebungstemperatur von -40°C bis 135°C in kleinen Schritten variiert und für jede Kombination die Temperaturen an den 6 Messpunkten in ANSYS berechnet. Weiterhin wurden die Filmkoeffizienten für die Wärmekonvektion zwischen Sensorsystem und Umgebung und für die Wärmekonvektion zwischen Medium und Sensorgehäuse variiert, um Einflüsse der Einbaubedingungen zu berücksichtigen.

Bei der Simulation des Zeitverhaltens wurde zum einen die Umgebungstemperatur des Sensors konstant gehalten und die Medientemperatur mit einer zeitlichen Änderung versehen, und im zweiten Fall wurde die Medientemperatur konstant gehalten und die Umgebungstemperatur verändert. Es ergaben sich hierbei Verläufe, die qualitativ und quantitativ mit den Messwerten gut vergleichbar sind.

3 Approximation der Medientemperatur

Gesucht ist eine Beziehung für die Medientemperatur als Funktion der Temperaturen an den möglichen Sensorpositionen:

$$T(x) = f(T(y_1), T(y_2), \dots). \quad (1)$$

Zu diesem Zweck wurde eine Vielzahl an Ansatzfunktionen unter Einbeziehung einer unterschiedlichen Anzahl an Messstellen, d.h. Temperatursensoren, untersucht (Abb. 3).

1	$b_0 + b_1 t_1 + b_2 t_2 + b_3 t_3 + b_4 t_4 + b_5 t_5$
2	$b_0 + b_1 t_1 + b_2 t_1 t_1 + b_3 t_2 + b_4 t_2 t_2 + b_5 t_3 + b_6 t_3 t_3 + b_7 t_4 + b_8 t_4 t_4 + b_9 t_5 + b_{10} t_5 t_5$
3	$b_0 + b_1 t_1 + b_2 t_5$
4	$b_0 + b_1 t_1 + b_2 t_3 + b_3 t_5$
5	$b_0 + b_1 t_1 + b_2 t_3$
6	$b_0 t_1 + b_1 t_2 + b_2 t_3 + b_3 t_4 + b_4 t_5$
7	$b_0 t_1 + b_1 t_5$
8	$b_0 t_1 + b_1 t_1 t_1 + b_2 t_5 + b_3 t_5 t_5$
9	$b_0 t_1 + b_1 t_1 t_1 + b_2 t_5 + b_3 t_5 t_5 + b_4 t_1 t_5$

Abbildung 3: Auswahl an Ansatzfunktionen zur Bestimmung der Medientemperatur; $t_1 \dots t_5$ – Temperatur an der Sensorposition $y_1 \dots y_5$ (y_4 entspricht y_6 wegen Symmetrie)

Basierend auf diesen ausgewählten Ansatzfunktionen wurden die Koeffizienten b_0 bis b_{10} aus den simulativ ermittelten Kennfeldern bestimmt. Ziel ist es weiterhin, die Anzahl der für eine sinnvolle Korrektur des Messwertes notwendigen Messstellen zu minimieren, um den zusätzlichen fertigungstechnischen Aufwand möglichst gering zu halten.

Aus der Vielzahl der Ansatzfunktionen wurde der Ansatz

$$T(x) = b_0 T(y_1) + b_1 T(y_1)^2 + b_2 T(y_5) + b_3 T(y_5)^2 + b_4 T(y_1) T(y_5) \quad (2)$$

favorisiert. Die Medientemperatur wird hierbei aus den Temperaturen am tiefsten Sensor im Bohrloch (y_1) und dem Sensor in der Mitte des PCB (y_5) berechnet. Diese beiden Sensoren wurden ausgewählt, da der Sensor unten in der Bohrung sehr nah zum Medium ist und der Sensor auf dem PCB relativ nah zur Umgebung ist.

Die aus der Simulation gewonnenen Ansatzfunktionen wurden nun auf reale Messwerte angewendet. Die Abweichung zwischen gemessener und rückgerechneter Medientemperatur ist, bis auf punktuelle Abweichungen, auch hier teilweise sehr gering. Dieses Ergebnis ist eine wesentliche Erkenntnis für die Anwendbarkeit des Korrekturansatzes in der Praxis.

4 Implementierung

In einem ersten Schritt wurden die Ansatzfunktionen mit deren angepassten Koeffizienten $b_1 \dots b_{10}$ (Abb. 3) in einem Verhaltensmodell in der Modellierungssprache Modelica beschrieben, welches in eine Testbench im Simulator Dymola [5] eingebunden wurde. Das Verhaltensmodell hat 5 Eingänge (Temperatursensoren t_1 bis t_5) und die rückgerechnete Medientemperatur als Ausgang.

Auf Grundlage der sehr guten Übereinstimmung von vorgegebener und rückgerechneter Medientemperatur mit Hilfe der Verhaltensmodellierung wurden die Approximationsroutinen im zweiten Schritt auf einem Demo-Board implementiert (Abb. 4). Dieses ist mit einem 8-bit AVR-Mikrocontroller ATmega128 für die Korrekturrechnung, analogen Eingängen zur Messung der Spannungen an den Temperatursensoren sowie einer seriellen Schnittstelle zur Ausgabe und Visualisierung der approximierten Medientemperatur an einen PC bestückt.

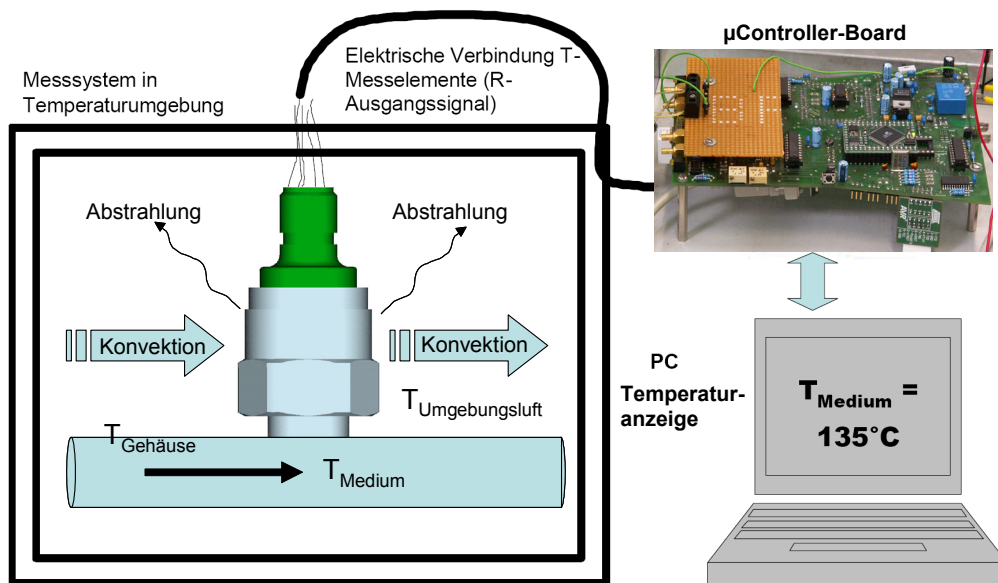


Abbildung 4: Testplattform mit AVR-Mikrocontroller zur Messdatenaufnahme und Implementierung der Approximationsfunktionen

Eine am Fraunhofer Institut entwickelte Blockbibliothek für Matlab/Simulink erlaubt hierbei die Konfiguration der benötigten Peripherie auf dem Controller sowie die automatische Generierung von C-Code und die Programmierung des Controllers. Aus diesem Grund wurde ein für diesen Anwendungsfall passendes Simulink-Modell erstellt, welches neben den eigentlichen Approximationsfunktionen auch die Konfiguration der analogen Eingänge und der seriellen Schnittstelle auf der Versuchsplattform sowie die Umrechnung der gemessenen Spannungen in die zugehörigen Temperaturen übernimmt. Dieses Modell konnte somit zunächst simulativ auf Korrektheit überprüft und anschließend automatisch auf die Versuchsplattform gebracht werden.

Für Messungen am realen Sensorsystem und zur Validierung der Simulationsmodelle sowie Approximationsfunktionen wurde ein Prüfstand aufgebaut, welcher das getrennte Einstellen von Medien- und Umgebungstemperatur sowie Fließgeschwindigkeit des Mediums ermöglicht (Abb. 5).

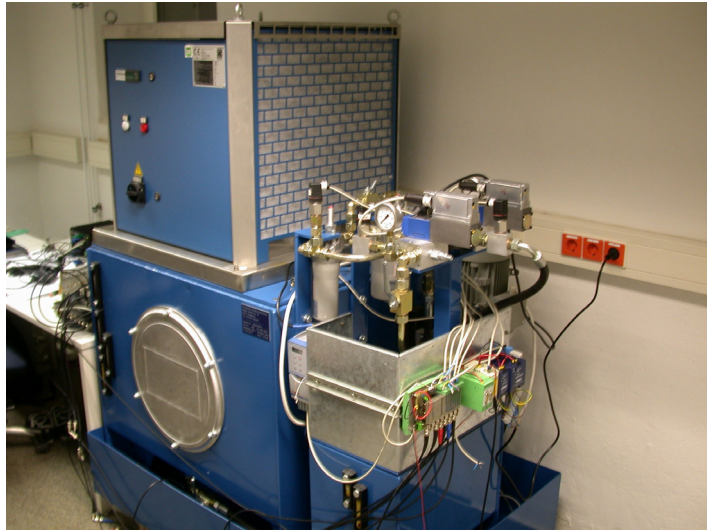


Abbildung 5: Prüfstand zur Modellvalidierung – getrennte Einstellmöglichkeiten für Medien- und Umgebungstemperatur sowie Fließgeschwindigkeit des Mediums

5 Zusammenfassung

Die Ergebnisse des hier vorgestellten Ansatzes zeigen, dass die Simulationsstudien des Sensorsystems zu einer Korrelation zwischen den Temperaturen an den möglichen Sensorpositionen und der Medientemperatur führen. Beim praktischen Messaufbau lagen die Unterschiede in der realen und über die Ansatzfunktionen berechneten Medientemperatur unter 1,8K. Die für den Entwurf notwendigen Variationen im Design des Sensorsystems, den Einbau- sowie den thermischen Randbedingungen sind simulativ bedeutend einfacher zu untersuchen als am realen System und ersetzen so sehr aufwändige oder technisch nicht durchführbare Messungen.

Die vorgestellten Arbeiten waren Teil des Projekts MOBASENS, welches durch die Sächsische Aufbaubank - Förderbank - unter dem Förderkennzeichen 11939/1925 gefördert wurde.

Literatur

- [1] Gennissen, P.T.J.; RuizZwollo, C.; Appelo, R.; Stoll, R.; Subramanyam, S.: On the integration of a combined Pressure and Temperature sensor in a CO2 air conditioning system. VDA-Meeting Saalfelden, 24. Februar 2005
- [2] Reitz, S.; Schroth, A.; Schneider, P.: Model Based Sensor System for Temperature Measurement in R744 Air Conditioning Systems. Symposium on Design, Test, Integration and Packaging, DTIP 2008, Nice, 9th/10th April 2008, pp. 171-173
- [3] Schneider, P.; Eichler, U.; Einwich, K.; Schwarz, P.: Simulation-based design of measurement systems. "Sensor und Test", Nürnberg, 10.-12. Mai 2005
- [4] Product information ANSYS, ANSYS Inc., <http://www.ansys.com>
- [5] Product information DYMOLA, Dynasim AB, <http://www.dynasim.se>