

Thermoelemente für den Einsatz in Abgassystemen von Verbrennungsmotoren

Augustin, Silke¹; Fröhlich, Thomas¹; Mammen, Helge¹; Ament, Christoph²; Güther, Thomas²

¹ TU Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, 98693 Ilmenau; Tel.-Nr. +49 3677/69 1487, E-Mail-Adresse: silke.augustin@tu-ilmenau.de

² TU Ilmenau, Fakultät für Informatik und Automatisierung, Fachgebiet Systemanalyse; Tel.-Nr. +49 3677/69 4104, E-Mail-Adresse: thomas.guether@tu-ilmenau.de

Einleitung

Beim Einsatz von Temperaturfühlern, insbesondere Berührungsthermometern, in technischen Verfahren müssen diese für den industriellen Einsatz an die Erfordernisse des jeweiligen Prozesses angepasst werden. Dies betrifft nicht nur die Anforderungen an die Präzision der Temperaturmessung, sondern auch die Einsatzbedingungen: Je nach Anwendung muss der Sensor extremen Temperaturen von -70°C bis $2\,500^{\circ}\text{C}$, chemischen Säuren oder hohen mechanischen Drücken stand halten. Er muss dabei wartungsfrei und stabil über Jahre hinweg einsetzbereit bleiben. Gleichzeitig besteht die Anforderung, die Genauigkeit der Temperaturmessung zu erhöhen und immer schnellere Fühler zu entwickeln. Das stellt an die Konstruktion der Fühler, die Auswahl der verwendeten Materialien, aber auch an die Auswerteelektronik und Messwertverarbeitungsstrategien immer höhere Anforderungen.

Thermoelemente, die in Abgassystemen von Verbrennungsmotoren eingesetzt werden, sind großen Temperaturgradienten und –sprüngen ($\Delta T > 900\text{ K}$), hohen Anströmgeschwindigkeiten und Drücken ausgesetzt. Bei der Herstellung dieser Thermoelemente muss ein Kompromiss zwischen den daraus resultierenden hohen Anforderungen an die mechanisch-thermische Stabilität und den andererseits durch die Automobilindustrie geforderten schnellen Ansprechzeiten gefunden werden. Die Thermoelemente müssen in der Lage sein, innerhalb weniger Sekunden die Temperatur im Verbrennungsraum genau zu bestimmen. Diese genaue Temperaturmessung dient dem Bauteilschutz, ist aber auch im Rahmen einer optimalen Motorregelung wichtig.

Um die oben genannte Zielstellung erfüllen zu können, werden in diesem Beitrag zwei Ansätze vorgestellt:

- Mit Hilfe numerischer Berechnungen und experimenteller Untersuchungen sollen der konstruktive Aufbau und die Materialauswahl hinsichtlich der oben genannten Anforderungen (kleiner statisch-thermischer Messfehler und schnelle Ansprechzeiten zur Erhöhung der Genauigkeit der Temperaturmessung, mechanisch-thermische Stabilität) optimiert werden
- Durch entsprechende Vorhersagemodelle und deren Implementierung in die Auswerteelektronik soll das dynamische Verhalten weiter verbessert werden.

Experimentelle Untersuchungen

Betrachtet werden hier zunächst die experimentellen Untersuchungen mit speziell für einen konkreten Einsatzfall entwickelten Thermoelementen in einem Turboladerprüfstand sowie Messungen zum Abgleich der Randbedingungen für die numerischen Berechnungen.

Experimentelle Untersuchungen am Turboladerprüfstand

Die entwickelten Thermoelemente wurden an einem Turboladerprüfstand eines Automobilherstellers messtechnisch untersucht. Die Zielstellung bestand darin, das dynamische Verhalten der einzelnen Thermometer zu ermitteln. Dazu wurden jeweils zwei baugleiche Thermoelemente (TE1 und TE2) mit einem Außendurchmesser von 3,2 mm und zwei Vergleichsthermoelemente mit einem Außendurchmesser von 2,0 mm (TE3 und TE4) untersucht. Mit den beiden letztgenannten Fühlern, die wegen der fehlenden mechanisch-thermischen Festigkeit nicht im Regelbetrieb in den Fahrzeugen eingebaut werden können, sollte eine schnelle

Messung der Mediumtemperatur erfolgen, um den realen Verlauf und die Größe der Mediumtemperatur genauer zu erfassen.

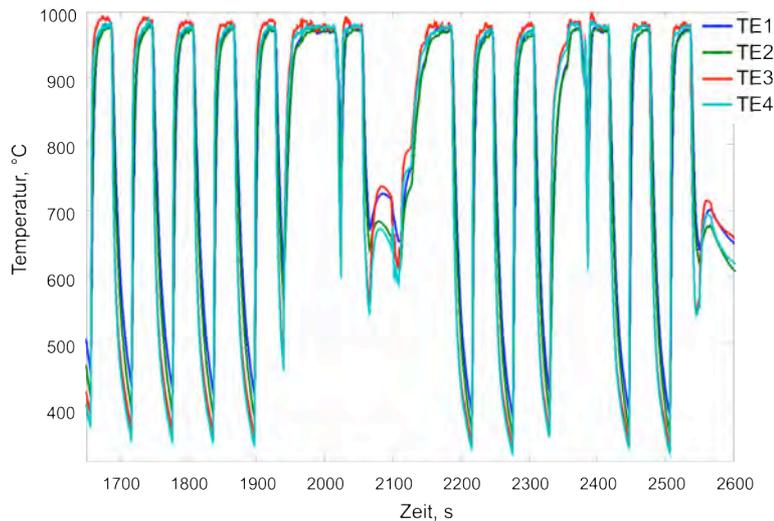


Abbildung 1: Ausschnitt einer Messreihe an einem Turboladerprüfstand

Die Abbildungen 1 und 2 zeigen typische Temperaturverläufe dieser Thermoelemente bei Variation der Drehzahlen. Die Thermoelemente TE1 und TE3 sowie TE2 und TE4 befinden sich jeweils an der gleichen Einbaustelle, deshalb lassen sich diese Temperaturverläufe am besten miteinander vergleichen.

Aus den gemessenen Sprungantworten bei der Erwärmung wurden die Zeitprozentkennwerte und die entsprechenden Zeitkonstanten bestimmt (beispielhaft in Tabelle 1) dargestellt. Aufgeführt wurde hier eine Verzögerungszeitkonstante T_1 , da weitere bestimmbare Zeitkonstanten als im Vergleich sehr klein identifiziert wurden.

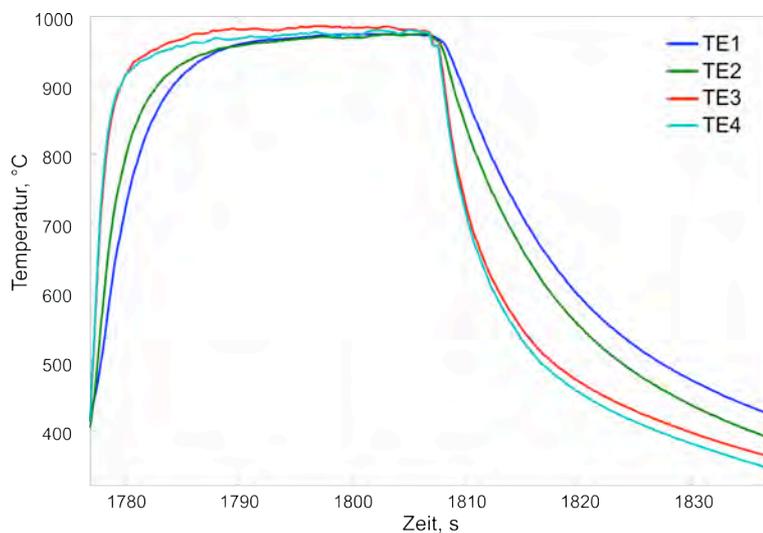


Abbildung 2: Vergrößerte Darstellung eines Ausschnitts aus Abbildung 1

Tabelle 1: Zeitprozentkennwerte und Zeitkonstante für die Beispielmessung aus Abbildung 2

	t_{50}, s	t_{63}, s	t_{90}, s	T_1, s
TE1	2,95	3,95	8,63	3,53
TE3	0,98	1,3	3,62	1,64

Die hier dargestellten Ergebnisse flossen in die Erstellung der später beschriebenen Vorhersagemodelle ein.

Experimentelle Untersuchungen zur Festlegung der Randbedingungen für die numerischen Berechnungen

Zur Lösung der Fourierschen Differentialgleichung (siehe Abschnitt numerische Berechnungen) ist neben der Eingabe der konstruktiven und Materialparameter die Angabe spezifischer Randbedingungen erforderlich. Das können je nach vorliegender Problemstellung feste Temperaturverteilungen, aufgeprägte Wärmestromdichten oder Wärmeübergänge durch Konvektion bzw. Strahlung sein. Die Beschreibung der Randbedingungen stellt sich oft als problematisch dar. Im hier vorliegenden Fall des Einsatzes der Thermoelemente in Abgassystemen (Abbildung 3) war zunächst eine Bestimmung der Wärmeübergangskoeffizienten und der Temperaturverteilung notwendig.

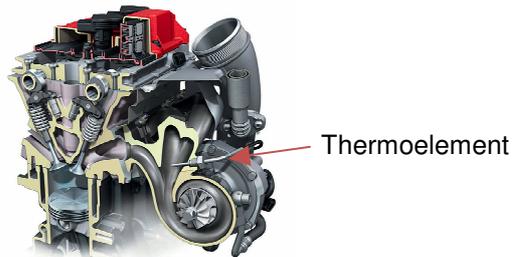


Abbildung 3: Einbau eines Thermoelements im Abgasstrang [2]

In der Literatur liegen zur Beschreibung der Randbedingungen im Motorraum [3,4] oder in Abgassträngen keine allgemein verwendbaren Informationen vor. Wie in [5] dargestellt, werden dazu numerische Strömungsfeldberechnungen durchgeführt, deren Ergebnisse jedoch noch nicht experimentell verifiziert werden konnten. Um erste experimentelle Daten zu erhalten, wurden mit einem speziell präparierten Thermoelement (Abbildung 4) Messungen an einem Motorprüfstand durchgeführt (Abbildung 5).



Abbildung 4: Mit aufgeschweißten Mantelthermoelementen präpariertes Thermoelement der Firma tmg



Abbildung 5: Einbau des Thermoelements in Motorprüfstand des FG Kraftfahrzeugtechnik, TU Ilmenau

In Abbildung 6 sind die gemessenen Temperaturen nach dem Start des Motors, bei verschiedenen Drehzahlen und nach Ausschalten des Motors beispielhaft dargestellt. Man erkennt, dass zum Zeitpunkt $t = 50$ s ein Gradient im Motorraum von ca. 100 K und zur Einbaustelle hin von ca. 580 K auftritt, der bei der Eingabe der Randbedingungen zu beachten ist.

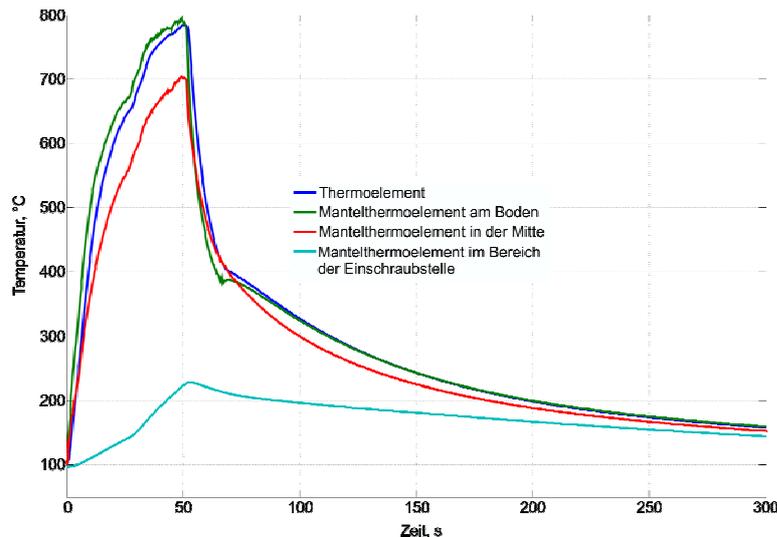


Abbildung 6: Mit speziell präpariertem Thermoelement gemessene Temperaturen im Motorraum

Für den Einbau in Abgaskanälen müssen solche Messungen noch durchgeführt werden.

Die im folgenden dargestellten Ergebnisse erster numerischer Berechnungen berücksichtigen die unterschiedliche Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilung sowie die daraus abgeleiteten unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten noch nicht. Grundlage der vorgestellten Berechnungen bilden die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten nach [6] und angenommener Strahlungswärmeaustausch. Zur Abschätzung der auftretenden statisch-thermischen Messfehler wurde dabei ein konstanter Wärmeübergangskoeffizient im Bereich 200...5.000 W/m²K variiert.

Numerische Berechnungen

Grundlagen

Zur Optimierung des statischen und dynamischen Verhaltens der Temperaturfühler wurden numerische Berechnungen mit Hilfe des Finite Elemente Programms ANSYS Workbench durchgeführt. Die Berechnungen beruhen auf der Lösung der Fourierschen Differentialgleichung der Wärmelehre [1]:

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q}_e$$

Im hier vorliegenden Einsatzfall treten sehr große Temperaturgradienten von 20...1.000 °C auf. Deshalb musste in den numerischen Berechnungen die Temperaturabhängigkeit der Materialdaten mit berücksichtigt werden. Im vorliegenden Modell wurden diese Materialdaten in [6, 7 und 8] ermittelt. In [9] wurde dargestellt, dass erste Berechnungen mit vereinfachten FE-Modellen ergaben, dass sich diese Temperaturabhängigkeit der Materialdaten auf das dynamische Verhalten der Temperaturfühler beim Aufheizen und Abkühlen unterschiedlich auswirken wird.

Erstellung des FE-Modells

Das Ausgangsmodell der numerischen Berechnungen ist in den Abbildungen 7-9 dargestellt. Es zeigt den Fühler selbst sowie den Einbau des Fühlers in einen Turbolader, der zum Teil mit modelliert wurde, um die Abhängigkeit der Parameter vom Einbauort zu bestimmen.

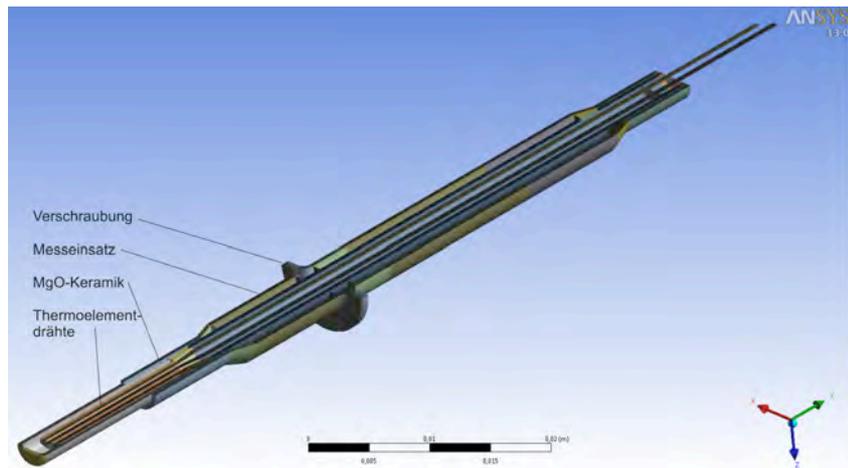


Abbildung 7: Baugruppen des verwendeten Fühlers

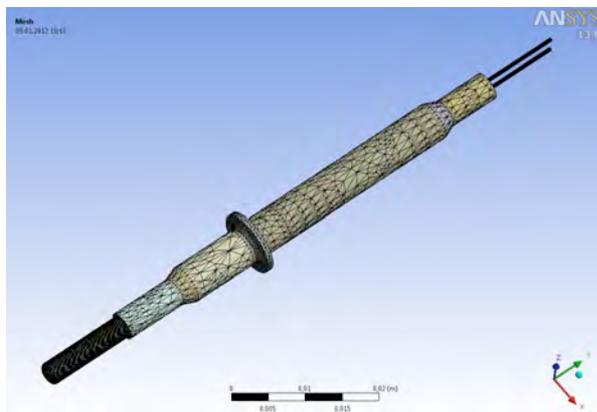


Abbildung 8: FE-Netz des Fühlers

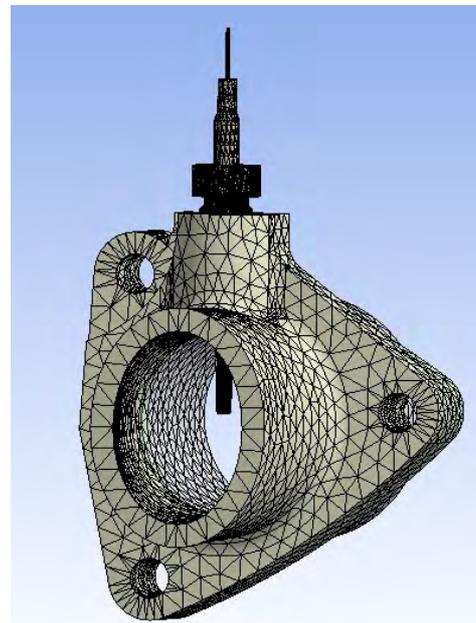


Abbildung 9: FE-Netz des Fühlers in eingebauten Turbolader

Ergebnisse der FE-Berechnungen

Im folgenden werden nur die Ergebnisse der stationären numerischen Berechnungen dargestellt. Die Abbildungen 10 und 11 zeigen die berechneten Temperaturfelder bei einem Wärmeübergangskoeffizienten von $1.000 \text{ W/m}^2\text{K}$ und einer Mediumtemperatur von 980 °C im Einbaubereich. Zusätzlich zum konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten wurde auch der Wärmeübergang durch Strahlung modelliert. Im Bereich der Umgebung wurde leicht bewegte Luft (Wärmeübergangskoeffizient $30 \text{ W/m}^2\text{K}$) mit einer Umgebungstemperatur von 25 °C angenommen. Für diesen Fall wurde eine Maximaltemperatur 979 °C (im Einbaubereich) und eine Minimaltemperatur von 129 °C (im Umgebungsbereich) berechnet. Die Temperatur an der Thermoelementspitze beträgt $977,5 \text{ °C}$ (siehe Abbildung 12), daraus leitet sich ein statisch-thermischer Messfehler von $2,5 \text{ K}$ ab.

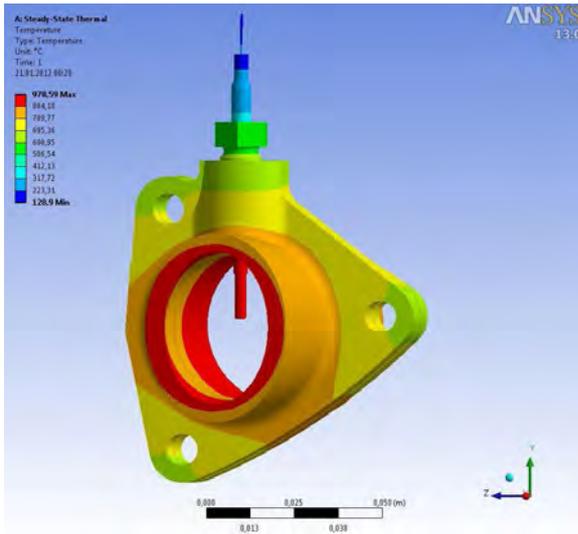


Abbildung 10: Berechnetes Temperaturfeld im Turbolader und Sensor

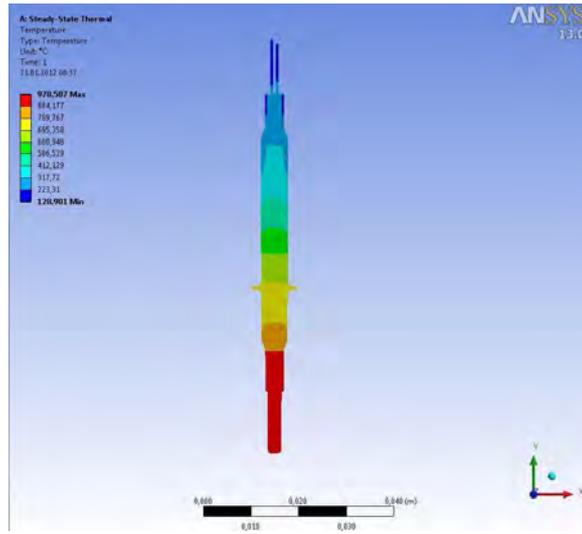


Abbildung 11: Berechnetes Temperaturfeld im Sensorbereich

Die Berechnungen wurden danach mit unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten bei konstant angenommener Mediumtemperatur von 980 °C durchgeführt, um die Abhängigkeit des statisch-thermischen Messfehlers (Einbaufehler) vom Wärmeübergangskoeffizienten zu berechnen. Anhand der Ergebnisse diese Abschätzung sollen dann auch die weiteren notwendigen Variationsrechnungen festgelegt werden. Ausgewertet wurde die Temperatur direkt an der Thermoelement-Messspitze, die im unteren Bereich der Abbildung 7 erkennbar ist. Die im folgenden Diagramm dargestellten Ergebnisse zeigen, dass sich der statisch-thermische Messfehler ab einem Wärmeübergangskoeffizienten von 2.000 W/m²K kaum noch ändert. Bei einem Wärmeübergangskoeffizienten von 200 W/m²K beträgt er 63,26 K, ab 2.000 W/m²K ist er kleiner als 0,2 K.

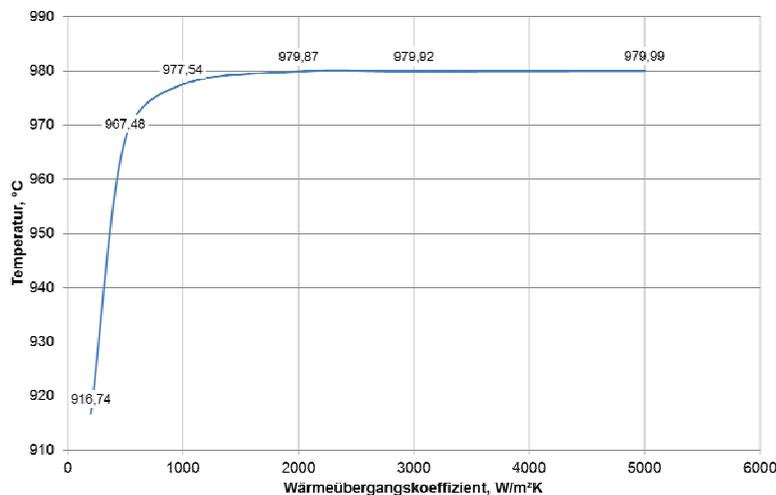


Abbildung 12: Abhängigkeit des statisch-thermischen Messfehlers vom Wärmeübergangskoeffizienten

Thermisches Ersatzmodell 1. Ordnung

In den durchgeführten Messungen zeigte sich, dass sich die verwendeten Temperatursensoren mit einem Verzögerungsglied 1. Ordnung (PT1-Übertragungsglied, [10]) als Ersatzmodell und somit einer einzigen Zeitkonstanten hinreichend gut beschreiben ließen. Die Zeitkonstante der Verzögerung des Übertragungsgliedes ist T_1 , im stationären Zustand besitzt es eine Verstärkung K .

$$T_1 \cdot \dot{y}(t) + y(t) = K \cdot u(t)$$

Darin ist $u(t)$ die thermische Anregung in °C und $y(t)$ ist die vom Thermoelement gemessene Temperatur ebenfalls in °C. Die Zeitkonstante T_1 wird durch die Materialeigenschaften und Geometrie des Sensors bestimmt und wie oben dargestellt experimentell (oder numerisch) identifiziert.

Dieses Modell wird in die Zustandsraumdarstellung überführt, da der Kalman-Filter auf dieser Darstellung beruht. Das Modell erster Ordnung wird im Zustandsraum durch die Matrizen

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_1} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_1} \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad C = [1] \quad \text{beschrieben [10].}$$

Die Zustandsdifferentialgleichung und die Ausgangsgleichung lauten:

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_1} \end{bmatrix} \cdot x(t) + \begin{bmatrix} \frac{1}{T_1} \end{bmatrix} \cdot u(t), \quad y(t) = [1] \cdot x(t)$$

Umwandlung des Eingangs in einen zu schätzenden Zustand

Es soll ein Filter realisiert werden, das die verzögernde Sensordynamik kompensiert. Dazu möchte man die unbekannte Wärmeanregung schätzen, die den Eingang $u(t)$ des obigen Systems bildet. Um ein für diese Aufgabe geeignetes Modell für den Beobachterentwurf zu gewinnen, wird der bisherige Eingang in den Zustandsvektor mit aufgenommen:

$$x_{neu}(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ u(t) \end{bmatrix}$$

In Folge erweitert sich die System- und Ausgangsmatrix und die Eingangsmatrix verschwindet, so dass das neue System autonom ist:

$$A_{neu} = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_{neu} = 0, \quad C_{neu} = [C \quad 0]$$

Für das thermische System gilt also:

$$A_{neu} = \begin{bmatrix} -1/T_1 & 1/T_1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_{neu} = 0, \quad C_{neu} = [1 \quad 0]$$

Voraussetzung für den erfolgreichen Filterentwurf ist die Beobachtbarkeit des neuen Systems. Nach dem Kriterium von Kalman muss dazu die Beobachtbarkeitsmatrix vollen Rang besitzen:

$$Q_B = \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/T_1 & 1/T_1 \end{bmatrix}, \quad \det Q_B = 1/T_1$$

Dies ist für $T_1 > 0$ erfüllt.

Zeitliche Diskretisierung des Modells

Mit Blick auf eine zukünftige eingebettete Realisierung des Filters ist eine zeitdiskrete Implementierung effizienter als eine zeitkontinuierliche. Dazu muss das kontinuierliche Modell in ein diskretes umgewandelt werden. Mit der Abtastzeit T lautet die diskrete Systemmatrix

$$F = e^{(A_{neu} \cdot T)}$$

während die Ausgangsmatrix unverändert bleibt. ($H = C_{neu}$)

Algorithmus des zeitdiskreten Kalman-Filter

Zur Vorhersage eines Schätzwertes zum Zeitpunkt ($k+1$) anhand der Messwerte eines Sensors bis zum Zeitpunkt (k) wird ein diskreter Kalman-Filter verwendet [11]. Hierfür wird im Prädiktionsschritt eine a priori-Schätzung des Messwertes für den Zeitpunkt ($k+1$) vorgenommen. Die Parameter dieser Schätzung werden im Korrekturschritt anhand des Messwertes der dann erfolgten Messung zum Zeitpunkt ($k+1$) angepasst.

Diese beiden Schritte, die zyklisch für jeden Zeitschritt wiederholt werden, bestehen aus fünf Gleichungen:

Diskreter Kalman-Filter: Zeitupdate-Gleichungen

$$\hat{x}_{\bar{k}} = F \cdot \hat{x}_{k-1} + B \cdot u_{k-1}$$

$$P_{\bar{k}} = F \cdot P_{k-1} \cdot F^T + Q$$

Diskreter Kalman-Filter: Messwertupdate-Gleichungen

$$K_k = P_{\bar{k}} \cdot H^T \cdot (H \cdot P_{\bar{k}} \cdot H^T + R)^{-1}$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{\bar{k}} + K_k \cdot (y_k - H \cdot \hat{x}_{\bar{k}})$$

$$P_k = (I - K_k \cdot H) \cdot P_{\bar{k}}$$

Darin ist \mathbf{Q} die Kovarianzmatrix des Prozessrauschens und \mathbf{R} die Kovarianzmatrix des Messrauschens. In den Rekursionsgleichung wird nicht nur der Zustand \mathbf{x} jeweils aktualisiert, sondern auch die Kovarianzmatrix des Schätzfehlers \mathbf{P} , sie kann somit als Maß für die Güte der Schätzung genutzt werden.

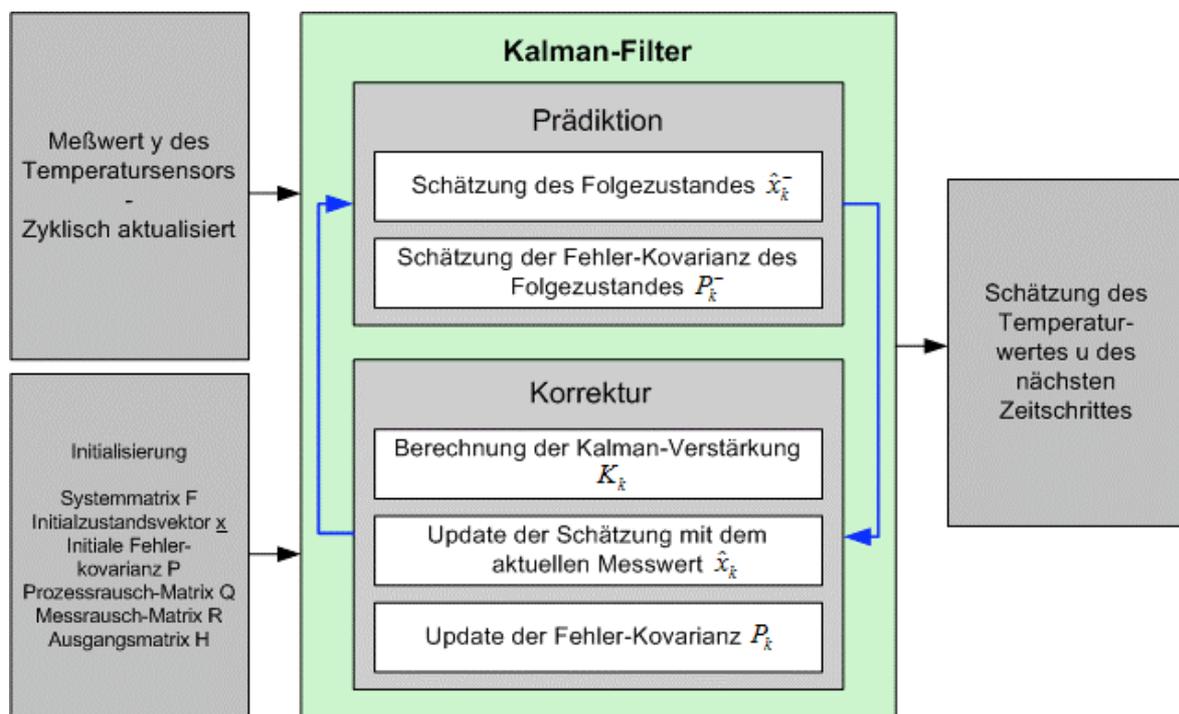


Abbildung 13: Struktur des Kalman-Filterers

Ergebnisse der Signalschätzung

Der Filteralgorithmus ermöglicht die gewünschte Schätzung des ursprünglichen Systemeingangswertes u_k (der Temperatur) anhand der Temperatursensormesswerte y_k .

Mit der Wahl $Q = \text{diag}[1 \quad 1000]$ und $R = [1]$ wurde auf Basis der Messung von Sensor TE1 die thermische Anregung geschätzt. Abbildung 12 zeigt den Vergleich der Schätzung mit dem Referenzsignal des Sensors TE3.

Das Ziel, aus den Eingangswerten des Sensors TE1 auf die thermische Anregung (Sensor signal TE3) zu schätzen, wurde mit dem hier verwendeten Prädiktionsmodell erreicht. Die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE) zum Sensor TE3 hat sich in der Vorhersage im Vergleich zum Sensor TE1 um den Faktor 1,3 verringert.

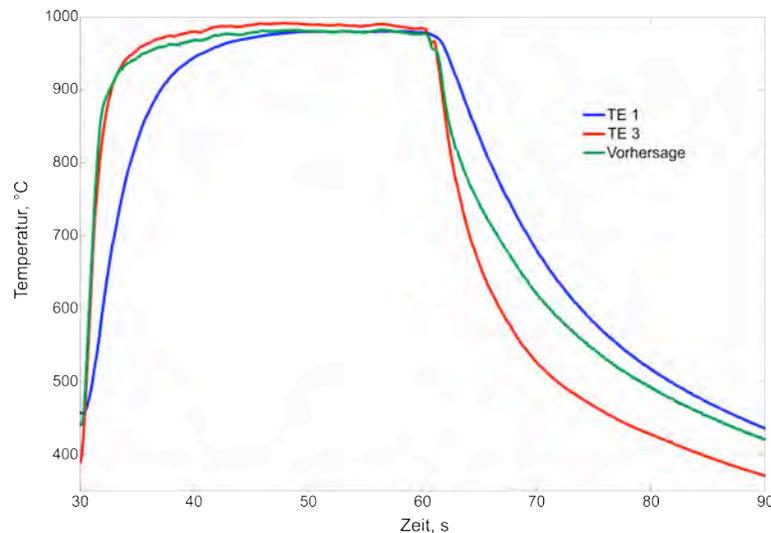


Abbildung14: Ergebnis des Vorhersagemodells für TE1

Ausblick

Die Ergebnisse der durchgeführten numerischen Berechnungen dienen als Grundlage zur weiteren konstruktiven Verbesserung des Temperaturfühlers. Durch die Verwendung alternativer Keramikpulver können z.B. sowohl die statischen als auch die dynamischen Eigenschaften verbessert werden. Mit Hilfe der erstellten Modelle sollen in der Zukunft transiente Berechnungen durchgeführt werden, um den Einfluss der Temperaturabhängigkeit der Materialdaten auf das dynamische Verhalten beim Erwärmen und Abkühlen weiter zu untersuchen.

Gleichzeitig ist es notwendig, weitere stationäre Temperaturfeldberechnungen zur Abschätzung des statisch-thermischen Messfehlers durchzuführen. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sollen in das Prädiktionsmodell einfließen, um auch eine online-Korrektur des statisch-thermischen Messfehlers zu ermöglichen.

Der Filteralgorithmus ist durch weitere Messungen bei unterschiedlichen Mediums- und Umgebungsbedingungen zu verifizieren. Erforderlichenfalls müssen nichtlineare Systemeigenschaften im Modell berücksichtigt werden. Anschließend soll der Algorithmus in die Auswertelektronik der Fühler implementiert werden.

Alle Maßnahmen tragen beim Einsatz in Abgasanlagen von Verbrennungsmotoren dazu bei, den Bauteilschutz zu erhöhen und eine effiziente, umweltverträgliche Regelung des Motorbetriebs zu ermöglichen.

Danksagung

Die vorliegenden Ergebnisse entstanden im Forschungsprojekt „High Speed Multisensorik“. Es wurde im Rahmen des Programms „Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand“ (ZIM) des Bundesministeriums für Wirtschaft unter dem Förderkennzeichen KF2007412JT0 gefördert. Die Autoren bedanken sich für diese finanzielle Förderung und bei der AiF-Geschäftsstelle für die organisatorische Unterstützung.

Im hier vorliegenden Beitrag wurden die Ergebnisse der Kooperation zwischen den Fachgebieten Prozessmesstechnik und Systemanalyse der TU Ilmenau und den Firmen Temperaturmesstechnik Geraberg GmbH Martinroda (TMG) und efm-systems GmbH Stuttgart im Rahmen des ZIM-Projektes vorgestellt.

Der Dank der Autoren gilt den Mitarbeitern und Studenten des Fachgebiets Kraftfahrzeugtechnik für die Unterstützung der experimentellen und numerischen Untersuchungen sowie die Möglichkeit der Nutzung des Motorprüfstandes. Den Mitarbeitern der Firma Temperaturmesstechnik Geraberg GmbH danken wir für die Bereitstellung der Thermoelemente.

Literatur

- [1] Bernhard, F. (Herausgeber): Technische Temperaturmessung; Springer-Verlag, 2004
- [2] Audi AG Ingolstadt, internes Material
- [3] Bargende, M.: „Ein Gleichungsansatz zur Berechnung der instationären Wandwärmeverluste im Hochdruckteil von Ottomotoren“; Dissertation, TH Darmstadt, 1991
- [4] Woschni, G., Kolesa, K., Spindler, W.: „Isolierung der Brennraumwände – Ein lohnendes Ziel bei Verbrennungsmotoren?“; in MTZ Motortechnische Zeitschrift 47, 1986
- [5] Schmidt, M.: „Entwicklung eines gekoppelten CFD-FEM-Simulationsmodells zur Untersuchung der thermischen und mechanischen Belastung von Hochtemperatursensoren im Abgasstrang“, TU Ilmenau, FG Kraftfahrzeugtechnik, Bachelorarbeit, 2011
- [6] Verein Deutscher Ingenieure; VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (Hrsg.): „VDI Wärmeatlas: Berechnungsblätter für den Wärmeübergang“. Berlin: Springer 2002
- [7] INCONEL 800, Herstellerangabe: Special Metals Deutschland Ltd., Postfach 20 04 09, 40102 Düsseldorf, www.specialmetals.com, November 2011
- [8] Slifka, A. J., Filla, B. J., Phelps, J. M.: „Thermal Conductivity of Magnesium Oxide From Absolute, Steady-State Measurements“; Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Volume 103, Number 4, 1998
- [9] Augustin, S.; Fröhlich, T.; Mammen, H.; Pufke, M.: „Determination of the dynamic behavior of high-speed temperature sensors“; SENSOR+TEST Conference 2011, 7.-9.6.2011, Nürnberg, Proceedings S. 726-731
- [10] Föllinger, O.; Dörrscheidt, F.; Klittich, M.: „Regelungstechnik, Einführung in die Methoden und ihre Anwendung“, 8. überarbeitete Auflage, Hüthig GmbH Heidelberg
- [11] Simon, D.: „Optimal state estimation“, John Wiley & Sons, 2006