

MESSGENAUIGKEIT BEI DER DATENERFASSUNG AM BEISPIEL RENNSPORT

Michael Bauermeister, Christian Götz, Harald Mandel

Kurzfassung: Die Messgenauigkeit in Bezug auf die Fahrzeuggeschwindigkeit hat beispielweise im Rennsport eine große Bedeutung. Anhand einer Messkette des Beispiels Motorkühltemperatur werden die einzelnen Schritte der Messung und die Ursachen für Messabweichungen erläutert. Darüber hinaus wird eine Vorgehensweise für die Durchführung von Messungen beschrieben und die Methode Systemkalibrierung zur Reduzierung von Messabweichungen am Beispiel des Fahrdynamik-Labor der DHBW Stuttgart vorgestellt.

Schlüsselwörter: Messgenauigkeit, Rennsport, Messkette, Systemkalibrierung

Abstract: the measurement accuracy in relation to the vehicle speed is of great importance especially in racing. Using a measurement chain from the engine cooling temperature example, the individual steps of the measurement and the causes of measurement deviations are explained. In addition, a procedure for carrying out measurements is described and the system calibration method for reducing measurement deviations is presented using the example of the vehicle dynamics laboratory at DHBW Stuttgart.

Keywords: measurement accuracy, racing, measurement chain, system calibration

1. MESSGENAUIGKEIT IM RENNSPORT

Bei der Analyse von Fahrdaten im Motorsport und deren Ungenauigkeit wird zwischen Messabweichungen bzw. Messunsicherheit und den tatsächlichen Messfehler unterschieden. Mittels Messtechnik und rechnergestützter Datenerfassung und –auswertung entwickelt sich seit Anfang der 80er Jahre das Verfahren von der erfahrungsbasierten zur wissenschaftlich fundierten Vorgehensweise im Rennsport [1].

Beispiel: Messgenauigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit

Über Radumfang und die Messung der Raddrehzahl wird eine Fahrzeuggeschwindigkeit errechnet, welche aufgrund vielfältiger technischer und physikalischer Gegebenheiten von der tatsächlichen Fahrzeuggeschwindigkeit in Bezug zur Fahrbahnoberfläche abweicht. Bei der Geschwindigkeitsmessung wird von einer Gesamtungenauigkeit von $\pm 1\%$ ausgegangen. Für eine Strecke der Länge $s = 500\text{ m}$ bedeutet das bei nachfolgender Annahme:

Tatsächliche Eingangsgeschwindigkeit am Anfang der Geraden: $v_0 = 100\text{ km/h}$.
Gemessene Endgeschwindigkeit am Ende der Geraden: $v_1 = 200\text{ km/h}$.

Aus der Annahme einer gleichmäßigen Fahrzeugbeschleunigung ($dv/dt = \text{const.}$) zwischen den beiden Messpunkten (Anfang und Ende der Geraden) ergibt sich eine Durchschnittsgeschwindigkeit: $v_a = \frac{1}{2}(v_0 + v_1) = 150\text{ km/h}$ und eine Fahrzeit für diese Gerade: $\Delta t = s / v_a = 12\text{ s}$.

Mit der angenommenen Messabweichung von $e_{rel} = \pm 1\%$ ergeben sich zwei Grenzen, in denen die tatsächliche Endgeschwindigkeit liegen wird. Die möglichen Grenzwerte sind:

$$v_{1-} = v_1 - e_{rel} \cdot v_1 = 198\text{ km/h} \quad \text{und} \quad v_{1+} = v_1 + e_{rel} \cdot v_1 = 202\text{ km/h}.$$

Entsprechend ergeben sich theoretisch zwei Grenzwerte für die Fahrzeiten der genannten Strecke:

$$\begin{aligned} v_{a+} &= \frac{1}{2}(v_0 + v_{1+}) = 151\text{ km/h} & \text{und} & & v_{a-} &= \frac{1}{2}(v_0 + v_{1-}) = 149\text{ km/h} \\ \Delta t_+ &= s / v_{a+} = 11,921\text{ s} & & & \Delta t_- &= s / v_{a-} = 12,081\text{ s}. \end{aligned}$$

Die angenommene Messungenauigkeit führt bereits auf diesem kurzen Streckenabschnitt zu einer Messunsicherheit von 0,16 s. Da im Motorsport schon die Hundertstelsekunden über Sieg oder Niederlage entscheiden, lässt sich mit dieser Unsicherheit im Motorsport kaum eine sinnvolle Setup-Entscheidung (z.B. aerodynamische Einstellung des Flügelwerks) treffen [2]. Auf Grund der sowohl praktisch als auch theoretisch konstruierten Annahmen kann beispielweise nicht von einer konstanten Beschleunigung und Eingangsgeschwindigkeit ausgegangen werden. Zudem ist die Betrachtung der Ursache der Messabweichungen völlig außer Acht gelassen worden. Genau diese Kenntnis und eine sinnvolle Abschätzung der tatsächlichen Fahrzeugendgeschwindigkeiten wird durch eine Bewertung der Messergebnisse ermöglicht. Nur dann kann eine fundierte Entscheidung, z.B. über ein Aerodynamik-Setup, getroffen werden. Ursache und Natur von Messabweichungen sollen im Folgenden diskutiert werden.

2. MESSSTRECKE UND EINFLUSSGRÖßEN DER MESSGENAUIGKEIT

Einführung der Grundbegriffe einer exemplarischen Messanordnung [3]: Das Ergebnis einer realen Messung sei der Messwert M , welcher aufgrund von Einflüssen und Messungenauigkeiten verschiedenster Ursachen vom tatsächlichen physikalischen Wert W der zu messenden Größe abweicht. Daraus ergibt sich die als absolute Messabweichung e bezeichnete Differenz:

$$e = M - W. \quad (2.1)$$

Die relative Messabweichung e_{rel} ist:

$$e_{rel} = \frac{e}{W} \quad (2.2)$$

und wird im Allgemeinen, wie im obigen Beispiel impliziert, in Prozent angegeben. Eine Messstrecke (Messkette) lässt sich über ein Zweitormodell abbilden. Der in der Informationstechnik benutzte Begriff „Zweitormodell“ ist im Wesentlichen äquivalent zum Begriff „Vierpol“ aus der elektrischen Schaltungstechnik und steht für eine physikalische oder technische Baugruppe mit genau einem Eingang und einem Signalausgang, wie im **Beispiel einer Messung der Motorkühlwassertemperatur** (Abb.1).

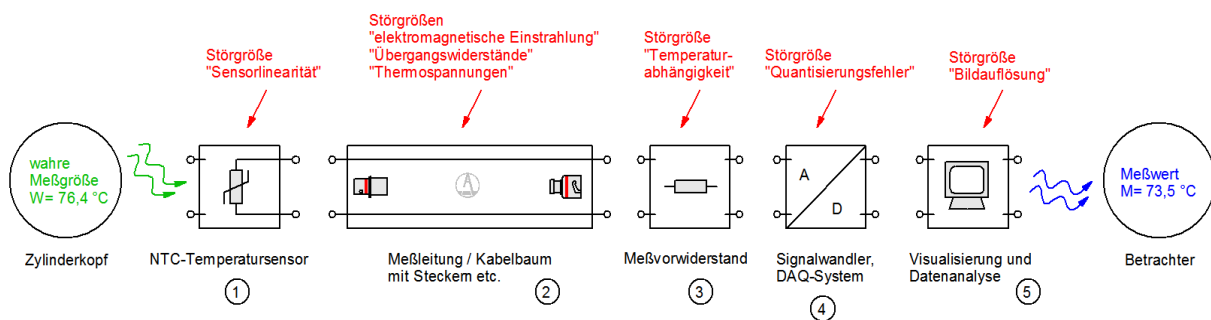


Abbildung 1: Messkette für die Messung der Motorkühlwassertemperatur

Die Übertragungsfunktion $h(t)$ zeigt den Zusammenhang zwischen der Messgröße W und dem Messwert M :

$$M(t) = h(t) \cdot W(t) \quad (2.3)$$

mit

$$h(t) = h_1(t) \cdot h_2(t) \cdot h_3(t) \cdot h_4(t) \cdot h_5(t), \quad (2.4)$$

wobei $h_1(t)$, $h_2(t)$, ... die Übertragungsfunktionen der in diesem Beispiel gezeigten Messkettenglieder (Temperatursensor, Messleitung, usw.) sind. Dies ergibt die absolute, zeitabhängige Messabweichung $e(t)$:

$$e(t) = W(t) \cdot [h(t) - 1]. \quad (2.5)$$

Im Folgendem wird mit $h_1(t)$ die Übertragungsfunktion eines realen NTC-Temperatursensors betrachtet. Die Übertragungsfunktion beschreibt die zeitliche Widerstandsänderung (in Ω) in Abhängigkeit von der Änderung der Kühlwassertemperatur (in $^{\circ}\text{C}$). Der NTC-Widerstand, kann in einem Messingkörper verbaut und im Zylinderkopf eingeschraubt sein, in dem das Kühlwasser mit der wahren Temperatur W zirkuliert. Angenommen die nominelle Sensorkennlinie durch folgende Gleichung zweiten Grades exakt beschreiben lässt:

$$R(T) = \alpha T^2 + \beta T + \gamma. \quad (2.6)$$

Dabei sind α , β , γ die in einem Herstellerdatenblatt genannten Sensorkoeffizienten. Mit Gl. (2.6) ist jedoch nur der ideale NTC-Widerstand beschrieben. Die tatsächlichen Koeffizienten unterliegen einer Exemplarstreuung, d.h. sie weichen je nach Qualität des Sensors mehr oder weniger stark von den Datenblattangaben ab. Der Hersteller gibt in seinen Datenblättern üblicherweise Toleranzwerte oder prozentuale Genauigkeiten an. Die Abweichungen verursachen den ersten Anteil an Messungenauigkeit. Ein realer Temperatursensor hat ein komplexeres Übertragungsverhalten. Der Wärmeübergang zwischen dem Kühlwasser und dem im Inneren des Messinggehäuses befindlichen NTC-Widerstands ist nicht unendlich groß. Dies führt zu einer zeitlichen Verzögerung, mit der die Widerstandsänderung der tatsächlichen Temperaturänderung folgt. Diese kann je nach Bauweise (Material etc.) und Baugröße (Masse) des Sensors Zehntelsekunden, aber auch Minuten betragen. Das ergibt:

$$T \rightarrow T_{NTC}(t) = h_T(t) \cdot W(t), \quad (2.7)$$

wobei T_{NTC} die am Messwiderstand momentan wirkende Temperatur und $h_T(t)$ die alle Effekte des Wärmeübergangs vom Fluid an den Messfühler zusammenfassende Übertragungsfunktion sind. Mit der Sensorkennlinie Gl. (2.6) folgt:

$$R(t, W) = \alpha [h_T(t)W(t)]^2 + \beta h_T(t)W(t) + \gamma. \quad (2.8)$$

Während die NTC-Widerstandskoeffizienten α , β und γ und deren Toleranzen üblicherweise bekannt sind, ist die Wärmeübergangsfunktion $h_T(t)$ mit ihren Koeffizienten im Allgemeinen selten in Sensordatenblättern zu finden. So entsteht am Anfang der Messkette (Abb. 1) eine nicht zu vernachlässigende Messabweichung. Sie darf nicht mit der in der Formel durch $e = M - W$ gegebenen Messabweichung verwechselt werden.

3. URSACHEN VON MESSABWEICHUNGEN

Wodurch Messabweichungen verursacht werden wird zweiten Teil der beschriebenen Messkette verdeutlicht: die Messleitung mit Steckern, Einzeladern, Schirmung und Mantelung. Eine ideale Messleitung überträgt ein elektrisches Eingangssignal (Signalspannung) mit einem definierten, zeitinvarianten und konstanten Übertragungsfaktor $h_2(t)$. Für diesen Fall sieht die Übertragungsfunktion wie folgt aus:

$$U_A(t) = h_2(t) U_E(t) \quad (3.1)$$

mit U_A als Ausgangsspannung und $U_E(t)$ als Eingangsspannung. Sei nun beispielsweise $h_2(t) = 0,96$, so ergibt sich eine leichte Dämpfung des Eingangssignals, welche zu einer folgender Messabweichung führt:

$$e = U_A - U_E = h_2 U_E - U_E = -0,04 U_E. \quad (3.2)$$

Bei Betrachtung einer relative Messabweichung $e_{rel} = (M - W) / W$, führt dies im gewählten Beispiel zur prozentualen Messabweichung von -4%:

$$e_{rel} = \frac{e}{U_E} = -0,04. \quad (3.3)$$

Diese Betrachtung scheint trivial: Der Messwert U_a ist immer (unabhängig vom Zeitpunkt und beliebigen äußeren Einflüssen) um 4 % kleiner als die wahre Messgröße U_E . Ist dies bekannt, so kann eine solche konstante Messabweichung sehr einfach rechnerisch korrigiert werden. Interessant wird es, wenn die Übertragungsfunktion im Zeitbereich nicht konstant ist. Betrachtet werden soll eine reale Messleitung, welche signaltheoretisch ein wie oben beschriebenes Zweitor bildet. Offenkundig sind Kenngrößen wie ohmscher Leitungswiderstand R_L , Leitungsinduktivitäten L und -kapazitäten C . Diese Einflussgrößen selbst sind im Allgemeinen über kurze Zeiträume zeitinvariant und deterministisch. Sie verursachen insgesamt aber eine Zeit- bzw. Frequenzabhängigkeit bei der Signalübertragung: Eine Messleitung zeigt für kleine Signalfrequenzen in erster Näherung ein Tiefpassverhalten. D.h., Signale hoher Frequenz werden gedämpft, Signale tiefer Frequenz passieren das Zweitor ohne relevante Abweichungen [5]. Ist nun die schnellste zeitliche Änderung der Eingangsgröße klein im Verhältnis zur Frequenzabhängigkeit der als Tiefpass wirkenden Messleitung, so kann hier eine konstante, vernachlässigbar geringe Messabweichung angenommen werden. Für Temperaturmessungen gilt dies sehr oft. Für Messungen z.B. des Kraftstoffdrucks (kurze Druckspitzen) gilt dies zumeist noch bedingt. Bei Messungen von Motor- oder Raddrehzahl kann sich der Messwert (z.B. bei der Flankendetektion eines schnell drehenden Triggerrads) sehr schnell ändern und die Frequenzabhängigkeit der Signalübertragung einer Messleitung zu signifikanten Messabweichungen führen. Darüber hinaus gilt in jedem Fall zu bedenken: Über die praktische Lebensdauer eines Kabelbaums können sich die genannten Größen R_L , L , C usw. unter anderem durch Materialalterung (z.B. Änderung der Dielektrika durch Feuchteaufnahme) und mechanischen Verschleiß (z.B. Abrieb in den Steckerkontakten) ändern und müssen damit als nicht-zeitinvariante Einflüsse auf die Übertragungsfunktion betrachtet werden. Weniger offensichtlich und mit deutlich kleinerer Zeitkonstante sind Eigenschaften wie die Temperaturabhängigkeit von Leitungswiderstand, Kapazitäten und Impedanzen, sowie Thermospannungen deterministisch behandeln, sind Störeinstrahlungen grundsätzlich nichtdeterministischer und höchst nichtlinearer Natur und damit in ihrem unmittelbaren Einfluss analytisch nur schwer quantifizierbar. Aus der am Anfang trivialen Übertragungsfunktion $h_2(t) = \text{const.}$ wird so eine Funktion mit zahlreichen Variablen und Parametern:

$$h_2 = h_2(t, T, E, H, \text{Materialkoeffizienten}, \text{Signalfrequenz}, \dots) \quad (3.4)$$

4. DAQ-SYSTEM UND QUANTISIERUNGSFEHLER

Als weiteres Teilsystem der Messkette wird das Datenaufnahmesystem (DAQ) diskutiert. Die aufgezeichneten Daten werden i.d.R. nach der Aufzeichnung mittels einer mathematischen Visualisierungs-Software analysiert. Ein Datenlogger besteht aus einem analogen Messverstärker, einem Analog-zu-Digital-Wandler (ADC) und einem digitalen Messwertspeicher mit Übertragungsschnittstelle zum PC / Laptop mittels USB oder Ethernet. Betrachtet werden soll nur der ADC. Ein übliches, allerdings vereinfacht dargestelltes Messprinzip ist, eine analoge Eingangsspannung (Messgröße) mit einer von einer konstanten internen Referenzspannung abgeleiteten, stufenweise erhöhten Vergleichsspannung zu vergleichen. Der ADC erhöht mit jedem Zeitschritt einen Zählwert, bis die Vergleichsspannung die Eingangsspannung überschreitet. Dieser Zählwert, reduziert um 1, d.h. der vorhergehende Zählerstand, wird dann weiterverarbeitet. Dieses Vorgehen wird technisch mit den Begriffen Diskretisierung (d.h. an einzelnen diskreten Zeitpunkten erfasst) und Quantisierung (d.h. in einzelne in ganzzahligem Verhältnis zueinanderstehende Zahlenwerte gefasst) beschrieben. In der digitalen Signalverarbeitung (Mikrocontroller, PCs usw.) können als quantisierte Werte nur die Werte '0' und '1' und deren positive, ganzzahlige Vielfache verarbeitet werden. Zwei Quellen für Messabweichungen sind offensichtlich: Zunächst kann die interne Referenzspannung und damit die davon abgeleitete Vergleichsspannung nicht beliebig genau sein. Diese Erkenntnis ist trivial. Zum anderen kann die Quantisierungsstufenhöhe (der Wert, um den sich die Vergleichsspannung pro Schritt erhöht) nicht beliebig klein sein. Bei ADC wird die Auflösung und damit das Maß für die Quantisierungsstufenhöhe in Bit angegeben. Übliche ADC haben eine Auflösung von 10 oder 12 bit. Das heißt, der gesamte Messbereich des ADC beträgt 2^{10} (=1024) bzw. 2^{12} (=4096) Quantisierungsstufen. Die interne Referenzspannung wird durch diese Anzahl an

Quantisierungsstufen geteilt und die Vergleichsspannung in jeweils Ein-Bit-Stufen (um genau die Quantisierungsstufenhöhe) erhöht, bis sie den Wert der Eingangsspannung überschreitet. Dazu ein **Beispiel**: Ein Mikrocontroller enthält einen 10-Bit-ADC, d.h. eine Auflösung von $Q = 2^{10}$. Die Referenzspannung betrage $U_{ref} = 5,0 V$. Somit ergibt sich die Quantisierungsstufenhöhe von $U_Q = \frac{U_{ref}}{Q} = \frac{5,0 V}{1024} = 4,8828125 mV$. In Abb. 2 soll für zwei Eingangsspannungen $U_{E1} = 242 mV$ bzw. $U_{E2} = 3508 mV$ der entstehende Quantisierungsfehler veranschaulicht werden. Die konstante Eingangsspannung wird bei jedem Schritt mit der Vergleichsspannung verglichen. An den jeweiligen Vergleichspunkten (Stützstellen/Sample-Points) geben die Zählwerte z wieder, wie oft die Vergleichsspannung um die Quantisierungsstufenhöhe U_Q erhöht wurde. Für die Eingangsspannung U_{E2} sind in diesem Beispiel die dazugehörigen Zählwerte $z = 717, 718, 719$.

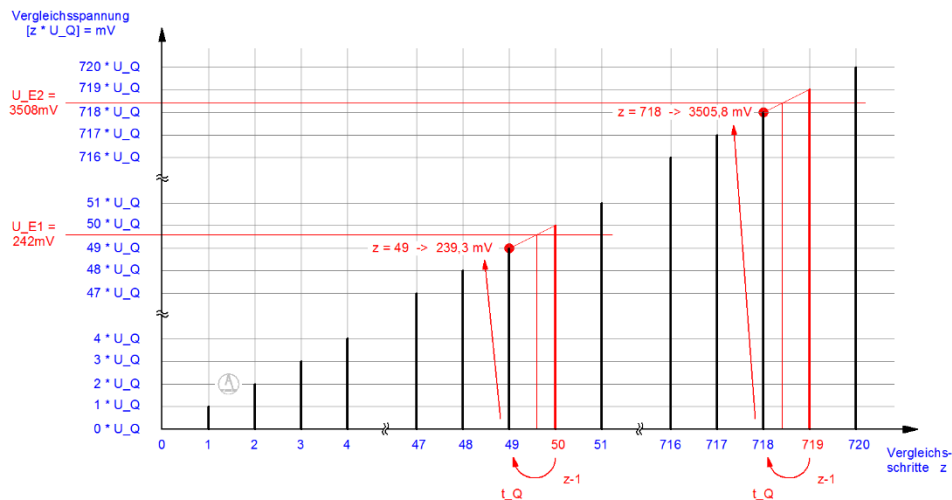


Abbildung 2: Veranschaulichung des AD-Wandlungsprozesses mit entstehendem Quantisierungsfehler

Im Zeitpunkt $t_Q(z = 719)$ überschreitet die Vergleichsspannung erstmalig die Eingangsspannung. Als digitaler Datenwert D_M ergibt sich damit: $D_M = z - 1 = 718$.

Rechnet man mit diesem ganzzahligen Datenwert auf die gemessene Spannung U_D zurück, so ist

$$U_M = 718 \cdot 4,8828125 mV = 3505,8 mV.$$

Damit ergibt sich aufgrund der Quantisierung eine Messabweichung von

$$e_{rel} = \frac{M-W}{W} = \frac{U_M - U_E}{U_E} = \frac{3505,8 mV - 3508,0 mV}{3508,0 mV} = -0,0627\%.$$

Das ist auch bei hohen Messansprüchen sehr wenig. Wird die Berechnungen aber für eine deutlich kleinere Eingangsspannung U_{E1} durchgeführt, ergeben sich folgende Werte: $D_M = 49$; $U_D = 239,3 mV$; $e_{rel} = -1,12\%$. Das Beispiel verdeutlicht zwei Aspekte: Zum einen wird die relative Messabweichung umso größer, je kleiner der Eingangswert des ADC ist. Zum anderen wird deutlich, dass bei dem gezeigten ADC Prinzip bedingt immer ein Messfehler vorliegt, der zwischen 0 und der Quantisierungsstufenhöhe U_Q liegen kann. Je näher der wahre Wert der Eingangsspannung (im Beispiel U_{E2}) an der zugehörigen Stützstelle liegt (hier $U_{E2} \rightarrow 718 U_Q$), desto kleiner wird die als Quantisierungsfehler e_Q bezeichnete Abweichung. Allgemein gilt:

$$0 < |e_Q| \leq |U_Q|.$$

Die Genauigkeit eines ADC wird in Bezug auf die Quantisierungsstufenhöhe im Allgemeinen in Vielfachen des Least Significant Bit (LSB) angegeben. Das LSB entspricht bei einem ADC genau der Quantisierungsstufenhöhe U_Q . Die mögliche Messabweichung durch den Quantisierungsfehler ist im gezeigten Beispiel -1 LSB. Mit dieser auf das LSB bezogenen Schreibweise wird die Qualität von ADC unterschiedlicher Auflösung und Referenzspannung vergleichbar. Für ein DAQ-System lassen sich neben dem Quantisierungsfehler des ADC eine Vielzahl weiterer Einflüsse auf die Messgenauigkeit nennen: Linearität, Frequenzgang und Temperaturverhalten bei analogen Eingangsstufen, interne Rechengenauigkeit bei der Messwertlinearisierung

und Interpolation in Kennfeldern usw. Universelle ADC haben, je nach Qualität und verwendetem Wandlungsverfahren, Gesamtfehler von etwa ± 2 LSB [5]. D.h. für kleine Eingangsspannungen $U_E < 100 U_Q$ kann sich der relative Fehler auf mehrere Prozent erhöhen. Für einen gesamten Datenlogger gilt Entsprechendes.

5. PRAKTISCHES VORGEHEN

Die Kunst des Messens ist es, störenden Einflüsse auf eine Messung im Verhältnis zur wahren Messgröße W ausreichend klein zu halten, bzw. sie während oder nach der Messung durch geeignete Maßnahmen und / oder Korrekturberechnungen so weit wie nötig zu eliminieren. Die Vermeidung/Verringerung von Störungen sollte immer die erste Wahl sein: Eine Störung, die nicht auftritt, muss auch nicht korrigiert werden. Unabhängig vom Aufwand, der zur Störungsvermeidung betrieben wird, bleibt immer ein Restanteil von nicht eliminierbaren Einflüssen. Eine Aufgabe des Messingenieurs ist, diese Einflüsse auf die Messung und deren quantitative Relevanz in Bezug auf das Messergebnis und den davon abzuleitenden Entscheidungen abzuschätzen. Eine Frage dazu kann lauten: Welche und warum werden gerade diese Größe gemessen? Die exemplarische Begründung für die Motortemperatur wäre: Die Temperatur des Motors beeinflussen die Motorleistung. Welche Konsequenz bzw. Handlungsempfehlung ergeben sich aus einem Messwert? Wenn der Motor zu heiß wird, müsste der Kühler größer dimensioniert werden. Was bedeutet „zu heiß“ und welche quantitativen Verhältnisse gelten? Kurzum, das Messen und die Beschäftigung mit Messsystemen und Messgenauigkeit ist in der Regel kein Selbstzweck.

Ein letztes Beispiel: Der Erwartungswert einer aus einer Temperaturmessung stammenden Signalspannung liegt bei etwa 5 bis 7 V für einen Temperaturbereich von 50 °C bis 95 °C. Um ein belastbares Messergebnis zu erhalten wird die Höhe einer möglichen Störeinstrahlung abgeschätzt. Nach Erfahrung dürfte diese im Bereich von ± 100 mV liegen. Somit beträgt die Messunsicherheit an der unteren Signalgrenze 5 V $\pm 2,0$ % und an der oberen Grenze 7 V $\pm 1,43$ %. Bezogen auf die Kühlwassertemperatur ergibt das an der unteren bzw. oberen Messgrenze eine absolute Abweichung von:

$$e_{uG} = \pm 0,02 \cdot 50 \text{ °C} = \pm 1,0 \text{ °C} \quad \text{und} \quad e_{oG} = \pm 0,0143 \cdot 95 \text{ °C} = \pm 1,36 \text{ °C}.$$

Für „normale“ Messansprüche und falls keine weiteren Messgenauigkeiten existieren sind das akzeptable Werte, die keine weitere Abschätzung der Auftretenswahrscheinlichkeit und auch keine Aufwände zur Eliminierung der Messabweichung erforderlich machen. Die zu Messabweichungen führenden Einflussgrößen können in zwei Klassen eingeteilt werden: systematische (deterministische) Einflüsse und quasi-zufällige (stochastische) Einflüsse. Zur zweiten Klasse gehören Störeinflüsse wie elektromagnetische Einstreuungen: Sie sind nicht vorherbestimmbar und müssen mit geeigneten mathematisch-statistischen Methoden abgeschätzt und korrigiert werden. Zur ersten Klasse gehören die weiter oben für einen NTC-Temperatursensor beschriebenen Exemplarstreuungen und die Wärmeübergangsfunktion. Beides lässt sich (für jeden Sensor einzeln) qualitativ beschreiben. Auch der Quantisierungsfehler von AD-Wandlern oder das Frequenzverhalten von Messverstärkern lässt sich weitgehend berechnen. Doch wenn diese Einzeleinflüsse der Natur nach deterministisch sind, sind sie in einer realen Messstrecke nicht unbedingt bekannt oder quantitativ nur schwer abschätzbar. Eine andere praktische Methode kann zum Ziel einer ausreichend genauen Messung führen.

6. SYSTEMKALIBRIERUNG

Die Methode Systemkalibrierung dient zur Reduzierung von Messabweichungen und wurde zur Aufnahme von Fahrdynamikdaten im Fahrdynamik-Labor der DHBW Stuttgart verwendet [6], [7]. Jede Einzelkomponente in einer Messkette weist eigene Toleranzen und systematische Einflüsse auf die Messgenauigkeit auf. Letztlich ist die Quantität jeder einzelnen Störgröße für sich allein für die absolute Messabweichung e nur bedingt aussagekräftig. Eine konstante Messabweichung von +1 % beim Sensor und eine von -1 % beim Messverstärker können sich im Idealfall sogar ausgleichen. Zur Erinnerung: Die absolute Messabweichung $e = M - W$ ist die Differenz zwischen dem wahren physikalischen Wert W am Eingang der Messkette und dem verarbeiteten Messwert M , auf dessen Basis eine Entscheidung z.B. bzgl. des aerodynamischen Setup

oder der Größe eines Wasserkühlers getroffen werden soll. Die Systemkalibrierung geht nun folgenden Weg: Durch eine gewisse Anzahl einzelner Messungen unter möglichst realen Messbedingungen wird eine fundierte Aussage über das Auftreten quasi-zufälliger Messabweichungen erreicht. Parallel zur zu kalibrierenden Messstrecke werden Vergleichsmessungen der wahren Messgröße W mit einem Messmittel vorgenommen, dessen anerkannte Genauigkeit deutlich über der zu erwartenden Genauigkeit der Messstrecke liegt. Im Falle der Temperaturmessung könnte dies ein für Kalibriermessungen zugelassenes Laborthermometer sein. Im Vergleich beider Messwertgruppen kann für das Gesamtsystem ein Messfehler e bestimmt werden. Dieser Messfehler wird innerhalb eines definierten Betrachtungszeitraums als konstant angesehen und kann somit als Korrekturwert für alle in diesem Betrachtungszeitraum stattfindenden Messungen verwendet werden. Auf diese Weise werden praktisch alle Langzeiteffekte) und, je nach Güte der Stichprobe, viele quasi-zufällige Einflüsse eliminiert. Das Verfahren einer Systemkalibrierung ist relativ aufwendig. Auch wenn es in voller Konsequenz nur im Spitzenmotorsport, in der Medizintechnik oder in der Luft- und Raumfahrt durchgeführt wird, ist das Grundprinzip in vereinfachter Form überall anwendbar. Im Zusammenspiel mit einer qualitativ hochwertigen Messstrecke können so Messergebnisse erreicht werden, deren statistische Genauigkeit über der Genauigkeit der einzelnen Komponenten liegt.

7. ZUSAMMENFASSUNG

Ursache, Natur und Auswirkungen von Messungenauigkeiten zu erkennen ist elementar, um anhand von Messergebnissen sinnvolle Folgeentscheidungen treffen zu können. Genauso wichtig ist es, Messungenauigkeiten von Messfehlern zu differenzieren: Messfehler sind aus technischer Sicht stets deterministisch und können methodisch vermieden werden. Messungenauigkeiten können deterministisch verursacht sein und damit vermieden oder korrigiert werden. Sie sind oft stochastischer Natur und damit für lineare Korrekturmethoden unzugänglich. Ein Messergebnis, welches als „absolut genau“ gilt, ist nur noch nicht mit beliebiger (höherer) Genauigkeit analysiert worden. Ziel einer jeden Messtechnik ist aber nicht, ein beliebig und absolut genaues Ergebnis zu liefern, sondern immer ein hinreichend genaues. Die beiden ersten Schritte zu einer hinreichenden Genauigkeit sind: Eine auf eine gegebene Anwendung bezogene Definition des Begriffs „hinreichend“. Bei den beiden in diesen Artikel vorgestellten Problemstellungen liegt die relative Messabweichung bei niedrigen 1 %. In einem Fall ohne Frage hinreichend, im zweiten inakzeptabel. Der zweite Schritt ist es, den Gegebenheiten sowohl in Bezug auf die definierten Erfordernisse als auch in Bezug auf technische und finanzielle Möglichkeiten entsprechende Maßnahmen zu ergreifen, um Messungenauigkeiten zu vermeiden (z.B. durch Verwendung hochwertigerer Baugruppen, Systemkalibrierung etc.) oder nachträglich mit mathematischen Algorithmen Messabweichungen herauszufiltern und zu korrigieren. Dadurch wird eine sinnvolle Anwendung der Messtechnik ermöglicht, trotz allgegenwärtiger Störeinflüsse und Ungenauigkeiten.

LITERATUR

- [1] Trzesniowski, M., Eder, P.: Datenanalyse, Abstimmung und Entwicklung. 1. Auflage, Springer Vieweg. 2017
- [2] Milliken, W.F., Milliken, D.L.: Race Car Vehicle Dynamics. Springer SAE Warrendale (PA). 1995
- [3] Richter, W.: Grundlagen der elektrischen Messtechnik. 2. Auflage, VEB Verlag Technik Berlin 1988
- [4] Hrsg: KA-Sensors Ltd. / Aamgard Motorsport Service 2018
- [5] Atmel Corporation: Atmel AVR ATmega8 Prozessorhandbuch. San José (Kalifornien) 2003
- [6] Krawinkel, Y., Siggemann, J.: Aufbau eines Fahrdynamiklabors des DHBW Triple eCars Studienarbeiten T3100 und T3200. DHBW Stuttgart 2016
- [7] Groth, C., Kexel, Y.: Implementierung weiterer Sensorik und Fahrdynamikanalyse des DHBW-Triple-e-Cars. Studienarbeiten T3100 und T3200. DHBW Stuttgart 2017