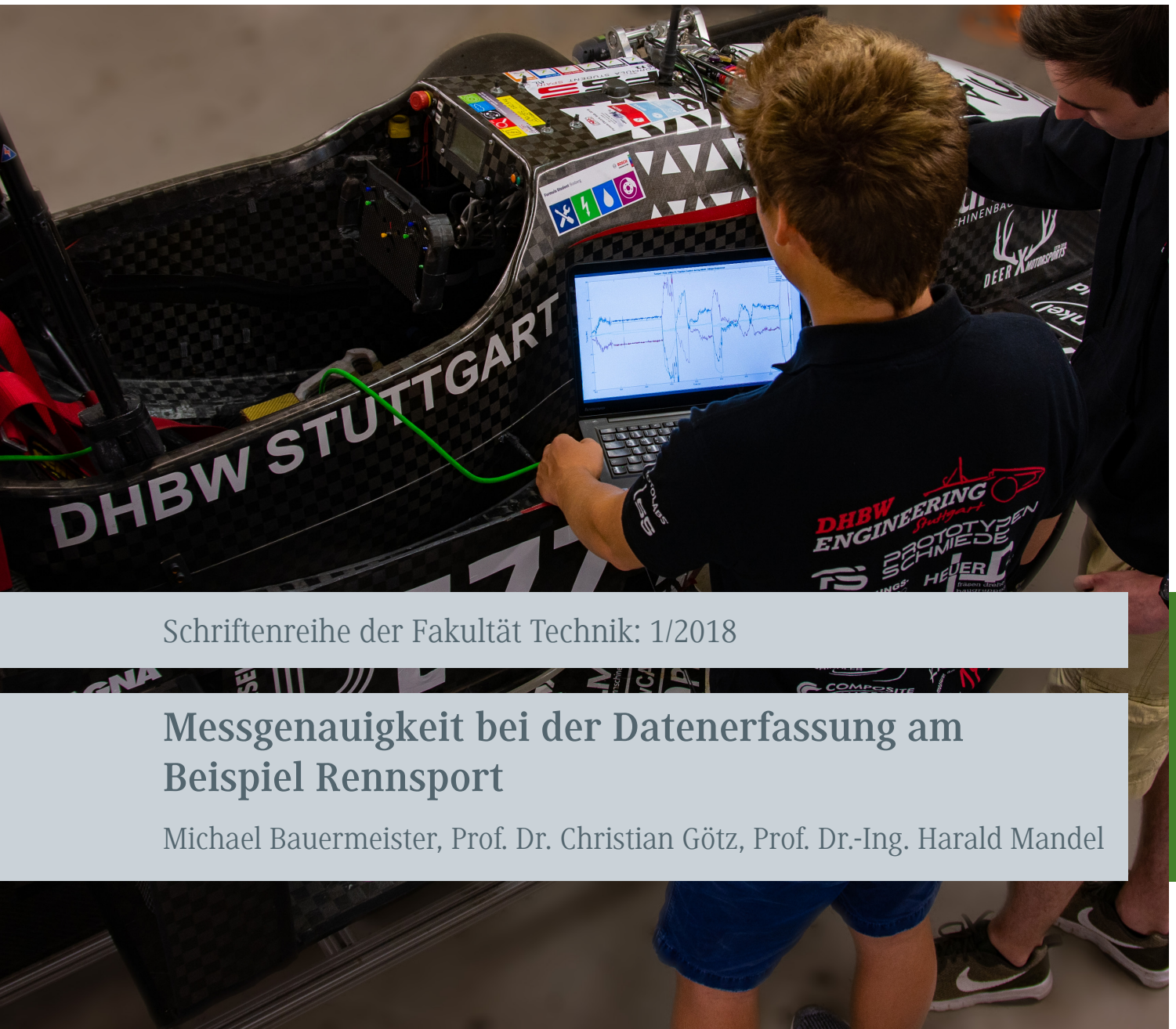


Engineering

INSIGHTS



Schriftenreihe der Fakultät Technik: 1/2018

Messgenauigkeit bei der Datenerfassung am Beispiel Rennsport

Michael Bauermeister, Prof. Dr. Christian Götz, Prof. Dr.-Ing. Harald Mandel



Dipl.-Ing. Michael Bauermeister ist Gründer der Firma Aamgard Engineering, einem Entwicklungs- und Vertriebsbüro für Messtechnik und elektrische Systeme. Davor war er als Entwicklungsingenieur am Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme in Duisburg und als Softwareentwickler für Formel-1-Fahrzeuge bei der Toyota Motorsport GmbH in Köln tätig.

E-Mail: Michael.Bauermeister@Aamgard.de



Prof. Dr. Christian Götz ist Professor im Studiengang Maschinenbau, Studienrichtung Fahrzeug-System-Engineering, an der DHBW Stuttgart. Davor arbeitete er in der Zentralen Forschung und Nutzfahrzeugentwicklung bei der Daimler AG.

E-Mail: christian.goetz@dhbw-stuttgart.de



Prof. Dr.-Ing. Harald Mandel ist Studiengangsleiter Maschinenbau, Studienrichtung Fahrzeug-System-Engineering, an der DHBW Stuttgart. Industrieerfahrungen sammelte er in der Produktsimulation bei EDAG und als Berechnungsingenieur bei der Daimler AG.

Duale Hochschule Baden-Württemberg Stuttgart
Fakultät Technik - Studiengang Maschinenbau
Jägerstraße 56
70174 Stuttgart

E-Mail: harald.mandel@dhbw-stuttgart.de

Der schlimmste aller Fehler ist, sich keines solchen bewusst zu sein.

Thomas Carlyle

Jede physikalische Messung ist mit Messungenauigkeiten behaftet. Allgemeinsprachlich werden diese Ungenauigkeiten oft fälschlicherweise als „Messfehler“ bezeichnet. Die Kenntnis dieser Ungenauigkeiten, fachlich korrekt mit den Begriffen **Messabweichungen** bzw. **Messunsicherheit** beschrieben, sowie deren Differenzierung von tatsächlichen Messfehlern (z.B. menschliche Fehler bei der praktischen Durchführung von Messungen) ist elementar für die Analyse von Fahrdaten und Prüfstandsergebnissen im Motorsport. Die Messtechnik und insbesondere die rechnergestützte Datenerfassung und -auswertung sorgten bereits seit Beginn der 80er Jahre für einen Übergang von einer Entwicklung, die durch Erfahrung bestimmt war, zu einer wissenschaftlich fundierten Vorgehensweise im Rennsport [1]. Echte Messfehler (z.B. Fehlmessungen) sollen hier nicht betrachtet werden.

Die Bedeutung der Messgenauigkeit wird an folgendem praktischen **Beispiel Messung der Fahrzeuggeschwindigkeit über Grund** gezeigt:

Die Fahrzeuggeschwindigkeit wird im Allgemeinen mittels induktiver Raddrehzahlsensoren bestimmt: 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. Geht man von einer Gesamtungenauigkeit der Geschwindigkeitsmessung von $\pm 1\%$ aus, so kann sich auf einer Strecke der Länge $s = 500\text{ m}$ folgendes Bild ergeben:

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:

$$v_{1-} = v_1 - e_{rel} \cdot v_1 = 198\text{ km/h}$$

und

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

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

$$v_{a+} = \frac{1}{2}(v_0 + v_{1+}) = 151\text{ km/h}$$

$$\Delta t_+ = s / v_{a+} = 11,921\text{ s}$$

und

$$v_{a-} = \frac{1}{2}(v_0 + v_{1-}) = 149\text{ km/h}$$

$$\Delta t_- = s / v_{a-} = 12,081\text{ s.}$$

Die angenommene Messungenauigkeit führt somit bereits auf diesem kurzen Streckenabschnitt zu einer Messunsicherheit von 0,16 s. Im Motorsport, bei dem Hundertstelsekunden über Sieg oder Niederlage entscheiden, kann dies eine Welt sein. Mit Kenntnis dieser Unsicherheit lässt sich im Motorsport kaum eine sinnvolle Setup-Entscheidung (z.B. aerodynamische Einstellung des Flügelwerks) treffen [2].

Die obigen Annahmen sind zugegebenermaßen sowohl praktisch als auch theoretisch konstruiert – so kann beispielweise nicht von einer konstanten Beschleunigung und Eingangsgeschwindigkeit ausgegangen werden. Zudem ist die Betrachtung der Ursache der Messabweichungen hier völlig außer Acht gelassen worden. Genau die Kenntnis hierüber ermöglicht eine Bewertung der Messergebnisse und somit eine sinnvolle Abschätzung der tatsächlichen Fahrzeugendgeschwindigkeit. Nur dann kann eine fundierte Entscheidung, z.B. über ein Aerodynamik-Setup, getroffen werden. Ursache und Natur von Messabweichungen sollen im Folgenden diskutiert werden.

1 Messstrecke und Einflussgrößen der Messgenauigkeit

Vor der Betrachtung einer exemplarischen Messanordnung sollen einige Grundbegriffe eingeführt werden [3]. Das Ergebnis einer realen Messung sei der Messwert M . Dieser gemessene Wert weicht aufgrund von Einflüssen und Messungenauigkeiten verschiedenster Ursachen vom tatsächlichen physikalischen Wert W der zu messenden Größe ab. Es ergibt sich hiermit die als absolute Messabweichung e bezeichnete Differenz:

$$e = M - W. \tag{1.1}$$

Die relative Messabweichung e_{rel} ist:

$$e_{rel} = \frac{e}{W} \tag{1.2}$$

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 „Zweitort“ ist im Wesentlichen äquivalent zum Begriff „Vierpol“ aus der elektrischen Schaltungstechnik und steht für eine physikalische oder technische Baugruppe mit genau einem Eingang (bildlich: Eingangstor) und einem Signalausgang (bildlich: Ausgangstor).

Als Beispiel soll hier eine Messung der Motorkühlwassertemperatur dienen (Abb.1).

Die Übertragungsfunktion¹ $h(t)$ liefert folgenden Zusammenhang zwischen dem wahren Wert der Messgröße W und dem Messwert M :

$$M(t) = h(t) \cdot W(t) \tag{1.3}$$

mit

$$h(t) = h_1(t) \cdot h_2(t) \cdot h_3(t) \cdot h_4(t) \cdot h_5(t), \tag{1.4}$$

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

$$e(t) = W(t) \cdot [h(t) - 1]. \tag{1.5}$$

Es soll im folgendem mit $h_1(t)$ die Übertragungsfunktion eines realen NTC-Temperatursensors betrachtet werden. Die Übertragungsfunktion beschreibt in diesem Fall die zeitliche Widerstandsänderung (in Ω) in Abhängigkeit von der Änderung der Kühlwassertemperatur (in $^{\circ}\text{C}$). Der NTC-Widerstand, siehe Abb. 2, kann z.B. in einem Messingkörper verbaut und im Zylinderkopf eingeschraubt sein, in dem das Kühlwasser mit der

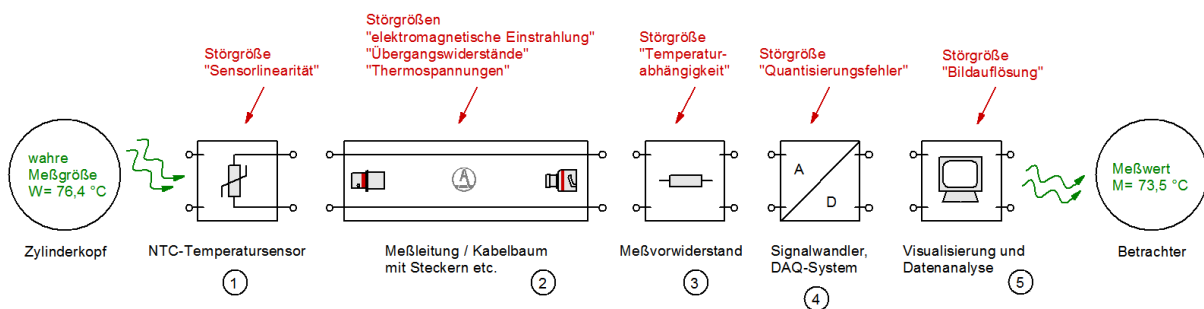


Abbildung 1: Messkette für die Messung der Motorkühlwassertemperatur

¹ Der Begriff Übertragungsfunktion wird hier auch im Zeitbereich und für die Signalwandler verwendet.

wahren Temperatur W zirkuliert. Es wird die Annahme getroffen, dass sich die nominelle Sensor-kennlinie durch folgende Gleichung zweiten Grades exakt beschreiben lässt:

$$R(T) = \alpha T^2 + \beta T + \gamma. \quad (1.6)$$

Dabei sind α , β , γ die in einem Herstellerdatenblatt genannten Sensorkoeffizienten.

Mit Gl. (1.6) ist jedoch nur der ideale NTC-Widerstand beschrieben. Die tatsächlichen Koeffizienten unterliegen u.a. einer Exemplarstreuung, d.h. sie weichen je nach Qualität des Sensors mehr oder weniger stark von den Datenblattangaben ab. Der Hersteller gibt hierzu in seinen Datenblättern üblicherweise Toleranzwerte oder prozentuale Genauigkeiten an. Diese Abweichungen verursachen bereits einen ersten Anteil an Messgenauigkeit.



Abbildung 2: NTC-Temperatursensor [4]

Ein realer Temperatursensor hat jedoch ein weit aus komplexeres Übertragungsverhalten. So ist z.B. der Wärmeübergang zwischen dem Kühlwasser und dem im Inneren des Messinggehäuses befindlichen NTC-Widerstands 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:

$$T \rightarrow T_{NTC}(t) = h_T(t) \cdot W(t), \quad (1.7)$$

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. (1.6) folgt:

$$R(t, W) = \alpha [h_T(t)W(t)]^2 + \beta h_T(t)W(t) + \gamma. \quad (1.8)$$

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 nur selten in Sensordatenblättern zu finden. So entsteht bereits ganz am Anfang der oben abgebildeten Messkette (Abb. 1) eine nicht zu vernachlässigende Messabweichung. In diesem Fall darf sie als Begriff nicht mit der formal durch $e = M - W$ gegebenen Messabweichung verwechselt werden.

2 Ursachen von Messabweichungen

Welcher Art und Ursache sind mögliche weitere Einflüsse, die Messabweichungen verursachen? Dies lässt sich gut am zweiten Teil der oben beschriebenen Messkette verdeutlichen: die Messleitung mit Steckern, Einzeladern, Schirmung und Mantelung. Eine ideale Messleitung überträgt ein elektrisches Eingangssignal (Signalspannung) mit einem definierten, zeitinvarianten und konstanten Übertragungsfaktor $h_2(t)$. In diesem Fall und mit obigem Beispiel könnte eine Übertragungsfunktion wie folgt aussehen:

$$U_A(t) = h_2(t) U_E(t) \quad (2.1)$$

mit U_A als Ausgangsspannung und $U_E(t)$ als Eingangsspannung.

Sei nun beispielsweise $h_2(t) = \text{const.} = h_2 = 0,96$, so ergibt sich eine leichte Dämpfung des Eingangssignals, welche zu einer Messabweichung von

$$e = U_A - U_E = h_2 U_E - U_E = -0,04 U_E \quad (2.2)$$

führt.

Betrachtet man nun eine relative Messabweichung $e_{rel} = (M - W) / W$, so führt dies im gewählten Beispiel zur prozentualen Messabweichung von

$$e_{rel} = \frac{e}{U_E} = -0,04 \quad (2.3)$$

entsprechend zu -4% .

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 (Änderungsgeschwindigkeit d/dt) 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 Thermospannun-

gen an Kontaktstellen (z.B. Kupferleiter zu verzinneten Crimpkontakten).

Ein weiterer Einfluss auf Messstrecken, insbesondere im Automotive- und Motorsportbereich, sind elektromagnetische Störeinstrahlungen, die z.B. durch Zündspulen oder Elektromotoren in Kraftstoffpumpen verursacht werden. Deren Zeitkonstanten liegen oft deutlich unter der Änderungsgeschwindigkeit des Messsignals. Lassen sich ohmsche Widerstände und 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 $h_2(t) = const.$ wird so eine Funktion² mit zahlreichen Variablen und Parametern:

$$h_2 = h_2(t, T, \text{Materialkoeffizienten}, \text{Signalfrequenz}, \dots) \quad (2.4)$$

3 DAQ-System und Quantisierungsfehler

Es soll noch ein weiteres Teilsystem der Messkette diskutiert werden: das Datenaufnahmesystem (DAQ). Im Rennsport wie bei der Fahrerproben im Automotivebereich kommen mobile Datenlogger zum Einsatz. Die aufgezeichneten Daten werden im Nachhinein mittels einer mathematischen Visualisierungs-Software analysiert. Ein Datenlogger besteht vereinfacht gesagt 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 hier nur der ADC (Abb. 3). 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 Zähler-

² Sow eit hier von einer Funktion im mathematischem Sinne gesprochen werden kann.

stand, 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.



Abbildung 3: AD-Signalwandler (ADC) [4]

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) Quantisierungsstufen³. 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

$$U_Q = \frac{U_{ref}}{Q} = \frac{5,0 V}{1024} = 4,8828125 mV.$$

Um Rundungsfehler zu minimieren, soll mit dem exakten Wert von U_Q gerechnet werden. In Abb. 4 soll für zwei Eingangsspannungen $U_{E1} = 242 mV$ bzw. $U_{E2} = 3508 mV$ der entstehende Quantisierungsfehler veranschaulicht werden. Die konstante Eingangsspannung⁴ wird bei jedem Schritt

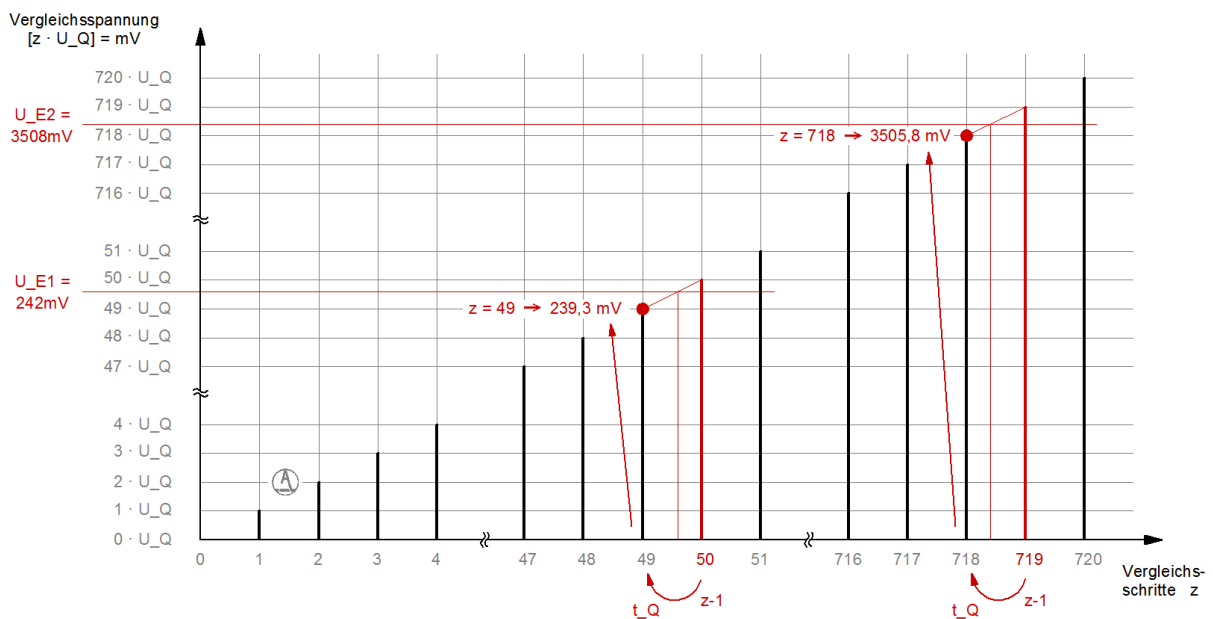


Abbildung 4: Veranschaulichung des AD-Wandlungsprozesses mit entstehendem Quantisierungsfehler

³ Exakt z.B. bei 10 bit: 2^{10} ohne den Wert Null, bzw. $2^{10} - 1$ mit dem Wert Null, d.h. der Wertebereich ist 0..1023.

⁴ In der Praxis verhindert eine Schaltung im ADC, dass sich die Eingangsspannung bei der Messung ändert (sog. Sample+Hold-Glied).

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_{Ez} sind in diesem Beispiel die dazugehörigen Zählwerte $z = 717, 718, 719$. 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

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

Damit ergibt sich aufgrund der Quantisierung eine Messabweichung von

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

Das ist auch bei hohen Messansprüchen sehr wenig. Führt man diese Berechnungen aber für eine deutlich kleinere Eingangsspannung U_{E1} durch, so ergeben sich folgende Werte:

$$D_M = 49 \quad U_D = 239,3 \text{ mV} \quad e_{rel} = -1,12 \%$$

Das obige 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 prinzipbedingt immer ein Messfehler vorliegt, der zwischen 0 und der Quantisierungsstufenhöhe U_Q liegen kann. Je näher der wahre Wert der Eingangsspannung (im Beispiel U_{Ez}) an der zugehörigen Stützstelle liegt (hier $U_{Ez} \rightarrow 718 U_Q$), 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 noch 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 [6]. 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.

4 Praktisches Vorgehen

Die Kunst des Messens ist es, die 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 (oder Abschätzungen) so weit wie nötig zu eliminieren.

Die Vermeidung oder 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. Hier ist es eine Aufgabe des Messingenieurs, diese Einflüsse auf die Messung und deren quantitative Relevanz in Bezug auf das Messergebnis und den davon abzuleitenden Entscheidungen abzuschätzen. Die Fragen könnten z.B. lauten: Welche und warum gerade diese Größe will man messen? Exemplarisch für die Motortemperatur könnte dies bedeuten: Man möchte diese wissen, da die Temperatur des Motors die Motorleistung beeinflusst. Welche Konsequenz bzw. Handlungsempfehlung ergibt sich aus einem (wie auch immer geartetem) 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 V 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 $5 \text{ V} \pm 2,0 \%$ und an der oberen Grenze $7 \text{ V} \pm 1,43 \%$. Bezogen auf die Kühlwassertemperatur ergibt das an der unteren bzw. oberen Messgrenze eine absolute Abweichung von:

$$e_{uG} = \pm 0,02 \cdot 50 \text{ }^\circ\text{C} = \pm 1,0 \text{ }^\circ\text{C}$$

und

$$e_{oG} = \pm 0,0143 \cdot 95 \text{ }^\circ\text{C} = \pm 1,36 \text{ }^\circ\text{C}.$$

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 (im quantitativen Sinne und nach ihrem zeitlichen Auftreten beliebig genau) und müssen mit geeigneten mathematisch-statisti-

schen Methoden abgeschätzt und korrigiert werden.

Zur ersten Klasse können die weiter oben für einen NTC-Tempersensoren beschriebenen Exemplarstreuungen und die Wärmeübergangsfunktion gezählt werden. Beides lässt sich (für jeden individuellen Sensor einzeln) qualitativ beschreiben. Auch der beschriebene Quantisierungsfehler von AD-Wandlern oder das Frequenzverhalten von Messverstärkern lässt sich weitgehend berechnen. Doch auch wenn diese Einzeleinflüsse der Natur nach deterministisch sind, so sind sie in einer realen Messstrecke nicht unbedingt bekannt oder quantitativ (d.h. hier: bzgl. Zahlenwert und Vorzeichen) nur schwer abschätzbar. Hier kann eine andere praktische Methode zum Ziel einer ausreichend genauen Messung führen.

5 Systemkalibrierung

Eine Methode zur Reduzierung von Messabweichungen ist die Systemkalibrierung (engl. In System Calibration). Diese Methode wurde zur Aufnahme von Fahrdynamikdaten einer Mercedes B-Klasse electric drive der DHBW Stuttgart benutzt, um damit ein Fahrdynamik-Labor aufzubauen [7], [8] (Abb. 5).

Jede Einzelkomponente in einer Messkette (ein Sensor, ein Messkabel, ein AD-Wandler usw.) weist eigene Toleranzen und systematische Einflüsse auf die Messgenauigkeit auf. Letztlich ist aber 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



Abbildung 5: Kalibrierung der Sensorik — Kabelbaum-Check — Verlegen des kalibrierten Gesamtsystems im Fahrzeug, [7] und [8]

-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 fertig 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 (statistisch hinreichende Stichprobe) 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 (z.B. eines Prüfstandlaufs oder eines Testtags) als konstant angesehen und kann somit als Korrekturwert für alle in diesem Betrachtungszeitraum stattfindenden Messungen verwendet werden. Auf diese Weise werden praktisch alle Langzeiteffekte (Alterung, Verschleiß usw.) 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 (Sensoren, Kabelbaum, DAQ-System) können so Messergebnisse erreicht werden, deren statistische Genauigkeit über der Genauigkeit der einzelnen Komponenten liegt.

6 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 den hier nicht erörterten Messfehlern zu differenzieren: Messfehler sind aus technischer Sicht stets deterministisch und können methodisch vermieden werden. Messungenauigkeiten können deterministisch verursacht sein und damit genauso vermieden oder korrigiert werden. Sie sind oft stochastischer Natur und damit für lineare Korrekturmethode unzugänglich.

Unter Medizinern gilt der humoristische Spruch: Ein Mensch, der nicht krank ist, ist nur noch nicht ausreichend genau untersucht worden. Diese Erkenntnis kann auf die Messtechnik übertragen werden: 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“ - siehe als Vergleich aus vorherigen Beispielen die Messung der Motortemperatur und die Messung der Fahrzeuggeschwindigkeit über Grund. Bei beiden Problemstellungen liegt die relative Messabweichung bei niedrigen 1 %. Im ersten Fall ohne Frage hinreichend, im zweiten genauso fraglos 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 auf mathematischem Wege (mit statistischen Algorithmen) Messabweichungen herauszufiltern und zu korrigieren. Die Kombination beider Schritte ermöglicht, trotz allgegenwärtiger Störeinflüsse und Ungenauigkeiten, sinnvoll Messtechnik zu betreiben.

Formelzeichen

Zeiten, Zeitintervalle

Δt	Zeitdifferenz, Zeitintervall
t	Zeitpunkt
t_0, t_t	Anfangszeitpunkt, Endzeitpunkt
t_Q	Quantisierungszeitpunkt

Wege, Strecken, Längen

s	Strecke, Weglänge
-----	-------------------

Geschwindigkeiten

dv/dt	Beschleunigung
v_a	Durchschnittsgeschwindigkeit
v_0, v_t	Anfangsgeschwindigkeit, Endgeschwindigkeit

Elektrische Größen

C	Kapazität (z.B. eines Kondensators)
L	Induktivität (z.B. einer Spule)
R	Ohmscher Widerstand allgemein
R_L	Ohmscher Widerstand der Messleitung
U_D	aus einem Datenwert berechnete Messspannung
U_E, U_A	Eingangsspannung Ausgangsspannung
U_Q	Quantisierungsstufenhöhe
U_{ref}	Referenzspannung

Sonstige

α, β, γ	allgemeine Koeffizienten
D_M	quantisierter Datenwert eines AD-Wandlers
e	absolute Messabweichung
e_Q	Quantisierungsfehler, z.B. in mV
e_{rel}	relative Messabweichung in %
e_{UG}, e_{OG}	Abweichung an einer unteren /oberen Messbereichsgrenze
$h(t)$	Übertragungsfunktion im Zeitbereich
n	Laufindex
N	Endindex
M	(fehlerbehafteter) Messwert einer physikalischen Größe
Q	Auflösung eines AD-Wandlers
T	absolute Temperatur in der Kelvin-Skala

W	tatsächlicher Wert einer physikalischen Größe
z	Zählwert, Schrittzähler

Glossar

ADC Analog to Digital Converter: Gerät oder Baugruppe, welches eine analoge elektrische Eingangsgröße (Spannung) in ein digitales elektrisches Signal (Bit-Muster oder Bit-Folge) umwandelt.

DAQ-System Data Acquisition System: Gerät oder Baugruppe, welche physikalische Größen (z.B. Temperatur, Druck) aufbereitet und in numerische (in einem Computer oder Steuergerät verarbeitbare) Datenwerte überträgt.

Datenlogger: Gerät zur Aufbereitung und Speicherung von Messdaten

Ethernet: serielle PC-Datenschnittstelle vorwiegend für Computernetzwerke

LSB Least Significant Bit: Am wenigsten maßgebendes Bit, also das Bit, welches den kleinsten Beitrag zu einem gesamten Zahlenwert leistet.

NTC Negative Temperature Coefficient Thermistor: temperaturabhängiger Widerstand, dessen Widerstandswert mit steigender Temperatur sinkt (Heißeleiter)

USB Universal Serial Bus: Universelle serielle PC-Schnittstelle

Zweitor, Vierpol: theoretisches Modell eines Übertragungsgliedes mit genau einem Signaleingang (Eingangstor) und einem Signalausgang (Ausgangstor)

Literatur

- [1] Trzesniowski, M., Eder, P. (2017): *Datenanalyse, Abstimmung und Entwicklung*. 1. Auflage, Springer Vieweg.
- [2] Milliken, W.F., Milliken, D.L. (1995): *Race Car Vehicle Dynamics*. Springer SAE Warrendale (PA).
- [3] Richter, W. (1988): *Grundlagen der elektrischen Messtechnik*. 2. Auflage, VEB Verlag Technik Berlin.
- [4] KA Sensors Ltd./ Aamgard Engineering (2018)
- [5] Tietze, U., Schenk, Ch., Gamm, E. (2016): *Halbleiter-Schaltungstechnik*. 15., überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer-Verlag.
- [6] Atmel Corporation (2003): *Atmel AVR ATmega8 Prozessorhandbuch*. San José (Kalifornien).
- [7] Krawinkel, Y., Siggemann, J. (2016): *Aufbau eines Fahrdynamiklabors des DHBW Triple e-Cars* Studienarbeiten T3100 und T3200 an der DHBW Stuttgart.
- [8] Groth, C., Kexel, J. (2017): *Implementierung weiterer Sensorik und Fahrdynamikanalyse des DHBW-Triple-e-Cars*. Studienarbeiten T3100 und T3200 an der DHBW Stuttgart.

IMPRESSUM

Schriftenreihe INSIGHTS
Themenreihe Engineering INSIGHTS

Herausgeberin:

Fakultät Technik der
Dualen Hochschule Baden-Württemberg Stuttgart
Postfach 10 05 63, 70004 Stuttgart

Prof. Dr. Katja Kuhn, Prorektorin und Dekanin der Fakultät Technik
Jägerstraße 53, 70174 Stuttgart

E-Mail: katja.kuhn@dhbw-stuttgart.de
Tel.: 0711/1849-610
Fax: 0711/1849-121

www.dhbw-stuttgart.de/technik/insights

Satz und Gestaltung: Inna Avrutina, Judit Klein-Wiele

Lektorat: Inna Avrutina, Andrea Pöss

Bildnachweis Titelseite: DHBW Engineering Stuttgart e.V.

ISSN 2193-9098

© Michael Bauermeister, Prof. Dr. Christian Götz, Prof. Dr.-Ing. Harald Mandel, 2018
Alle Rechte vorbehalten. Der Inhalt dieser Publikation unterliegt dem deutschen Urheberrecht.
Die Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und jede Art der Verwertung außerhalb der Grenzen
des Urheberrechtes bedürfen der schriftlichen Zustimmung der Autoren und der Herausgeberin.

Der Inhalt der Publikation wurde mit größter Sorgfalt erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und
Aktualität des Inhalts übernimmt die Herausgeberin keine Gewähr.

ISSN 2193-9098

www.dhbw-stuttgart.de/technik/insights