



Maurice Bildstein, Stefan Heusel

Digital statt analog

(Bild: iStockphoto, Wika)

Geht es in einer Applikation – etwa in Prüfständen für Antriebstechnik – um die Genauigkeit von Messwerten, spielen digitale Sensoren gegenüber analogen Geräten ihre Vorteile aus. Eine Analyse.

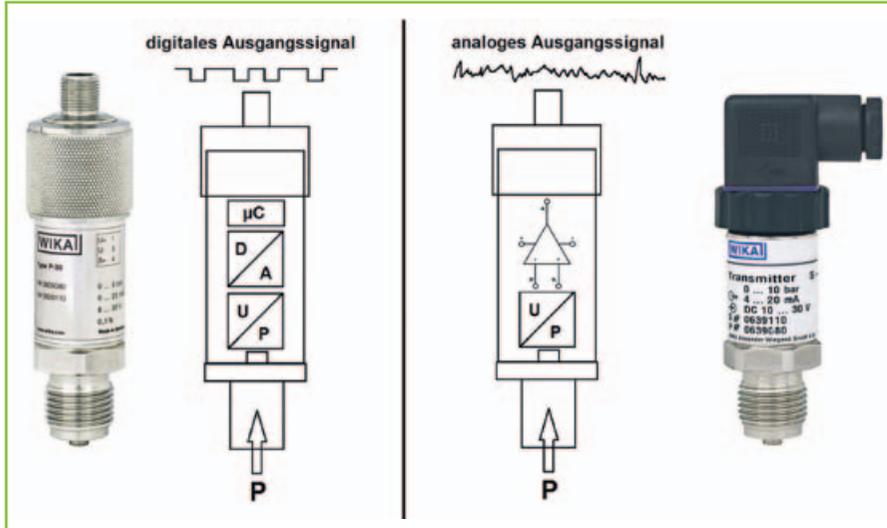
Mit einem ‚digitalen Sensor‘ ist ein Messfühler mit integrierter Analog-Digital-Wandlung gemeint, der zur Übermittlung des Messwertes eine digitale Schnittstelle wie zum Beispiel CANopen, Profibus oder USB nutzt und den Messwert als Zahlenwert überträgt. Ein analoger Sensor überträgt sein Signal als analoges Strom- oder Span-

nungssignal (beispielsweise 4 bis 20 mA oder 0 bis 10 V). Daher ist es ratsam, in Applikationen, in denen hohe Anforderungen an die Genauigkeit gestellt werden – zum Beispiel in Prüfständen für Antriebstechnik oder automobilen Prüfständen –, digitale Sensoren einzusetzen.

Dadurch werden Fehlerquellen vermieden, die neben der Signalkonditionierung im analogen Gerät zusätzlich durch die analoge Signalübertragung entstehen, wie das Beispiel eines typischen analogen Drucksensors verdeutlicht: Über die Verformung einer Membran unter Druckbelastung wird eine Widerstandsänderung der auf die Membran aufgebracht Widerstandsbrücke bewirkt. Diese Widerstandsänderung wird in ein elektrisches Signal gewan-

delt, verstärkt und in ein Standardsignal umgesetzt. Auch die Kompensation der sensorspezifischen Fehler (Nullpunktfehler, Spanne-Fehler, Nichtlinearität) findet über analoge Schaltungstechnik wie zum Beispiel Widerstandsnetzwerke statt.

Beim digitalen Sensor hingegen wird das elektrische Signal der Widerstandsbrücke direkt digital gewandelt, die anschließende Kompensation findet mathematisch in einem Mikroprozessor statt. Je nach geforderter Genauigkeit lassen sich nichtlineare Fehler beliebiger Ordnung kompensieren und mit geringem Kostenaufwand Toleranzen bis 0,05 % erreichen. Durch den Mikrocomputer kann zudem eine aktive Temperaturkompensation stattfinden, um alle Temperaturfehler innerhalb eines



Aufbau eines typischen analogen Drucksensors (rechts) im Vergleich zu einer digitalen Ausführung.

gewissen Temperaturbereichs zu eliminieren. Das kompensierte, digitale Signal steht dann im Druckmessumformer als Zahlenwert zur Verfügung und kann über ein beliebiges digitales Protokoll wie USB, CANopen oder Profibus ausgegeben werden. Während der weiteren Übertragung ist das digitale Drucksignal immun gegen Störeinflüsse, die eine Verschlechterung der Genauigkeit bewirken könnten.

Noch deutlicher wird der Vorteil digitaler Sensorik bei Betrachtung der vollständigen analogen Messkette mit ihrem digitalen Pendant, wenn es darum geht, zusätzliche Fehler durch externe Störungen zu lokalisieren: Umwelteinflüsse wie zum Beispiel Temperaturschwankungen oder EMV

beeinflussen das analoge Frontend beider Sensorprinzipien negativ. Aber: Beim digitalen Druckmessumformer wird das Drucksignal nach der AD-Wandlung nicht mehr durch äußere Effekte beeinflusst. Bei der analogen Signalkette hingegen unterliegt selbst die interne Kompensation durch passive Bauteile eventuellen Temperatureinflüssen. Der Ausgangstreiber, der das standardisierte Ausgangssignal generiert, ist ebenfalls von einer Vielzahl externer Einflüsse abhängig – beispielsweise Leitungslänge, Eingangsimpedanz der Signalauswertung, Temperatur oder EMV. Hinzu kommt das Problem des Signalrauschens – selbst im drucklosen Zustand steht das ausgewertete Signal nicht fest auf 4 mA,

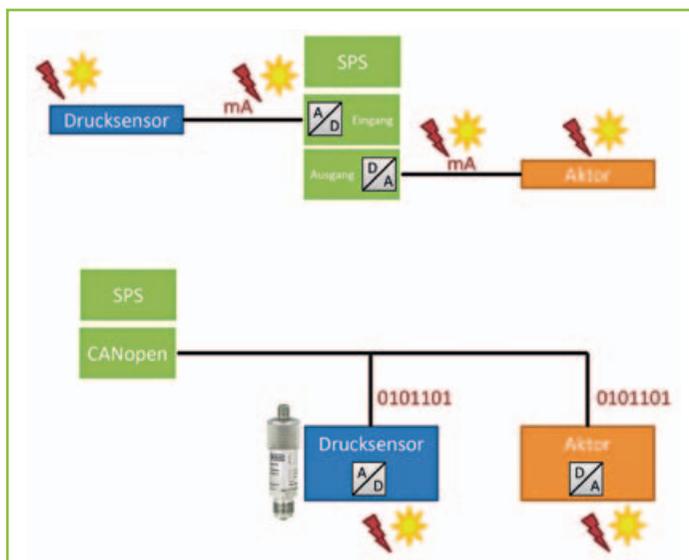
sondern „zappelt“ in einem gewissen Bereich, zum Beispiel 3,985 mA bis 4,007 mA. Dabei handelt es sich maßgeblich um Einflüsse der Umgebung, die das Signalkabel als „Antenne“ einfängt.

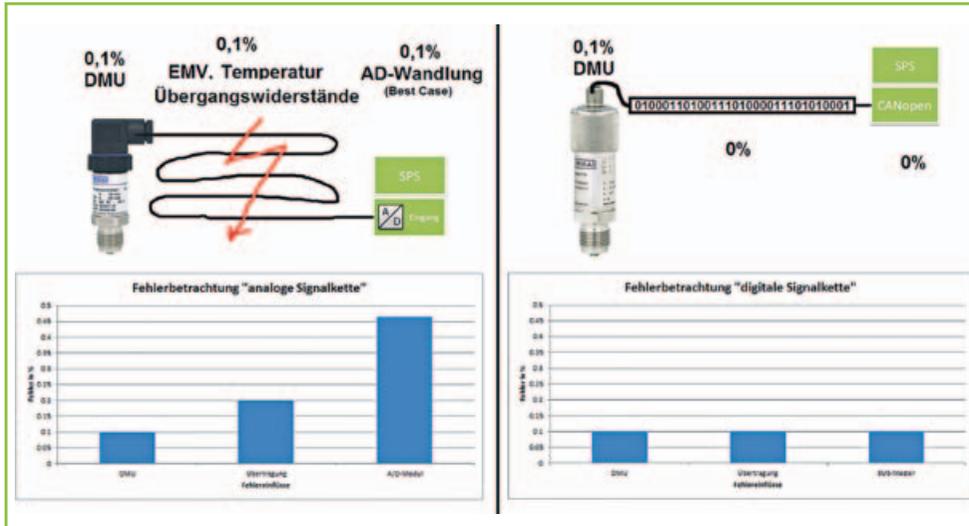
Zur weiteren Verarbeitung im Prozess muss der analoge Signalwert digitalisiert werden – sei es zur Visualisierung auf einem Display oder als Stellgröße für eine Regelung. Hier kommen zum Beispiel I/O-Kanäle von speicherprogrammierbaren Steuerungen oder externe A/D-Module zum Einsatz. Und auch diese Komponenten unterliegen ihrerseits Umwelteinflüssen, die negative Auswirkungen auf die Genauigkeit der Messwerterfassung haben. So enthalten auch die A/D-Auswertemodule eine Genauigkeitsangabe, mit der sie das analoge Signal bestenfalls bestimmen können. Ergo addiert sich hier zur Ungenauigkeit des Sensors noch eine Genauigkeitsverschlechterung durch das A/D-Modul hinzu. Dieser Fehler durch die A/D-Wandlung wiederum ist ebenfalls temperaturabhängig und vergrößert sich zu den Grenzen des Einsatztemperatur-Bereichs hin noch.

Bei der digitalen Signalübertragung hingegen beeinflusst lediglich die Ungenauigkeit des Sensors die Gesamtgenauigkeit der Messkette. Nach der Sensor-internen A/D-Wandlung steht der Druck als Zahlenwert zur Verfügung, der sich über einen Mikroprozessor auf beliebige digitale Bussignale adaptieren lässt. Diese Adaptierung hat keinerlei Einfluss auf die Genauigkeitsspezifikation. Auch die Übertragung des digitalen Signals unterliegt keinen genauigkeitsverschlechternden Einflüssen. Mit dem Übertragungsprotokoll CANopen beispielsweise sind Kabellängen von 1000 m möglich, ohne Einfluss auf die Genauigkeit des Drucksignals.

Auch auf der auswertenden Seite kommen keine zusätzlichen Fehler hinzu. Dort befindet sich ein digitaler Bus-Master, der die digitalen Messwerte vom Bus ausliest und an die entsprechende Software/Prozessregelung weitergibt. Dies alles geschieht als digitaler Zahlenwert, unabhängig von Umwelteinflüssen.

Ein Vergleich einer analogen mit einer digitalen Messkette verdeutlicht die Stellen, an denen externe Störungen wie EMV oder Temperatur zusätzliche Fehler einbringen.





Fehlerbetrachtung der Messkette im Vergleich.

EMV-Aspekte

Allerdings sei der Vollständigkeit erwähnt, dass starke EMV-Störungen auch digitale Bussignale beeinflussen können. Eine Überlagerung pulsformiger Störungen kann dazu führen, dass eine ursprüngliche „0“ im Master als „1“ ankommt. Hier zeigt sich jedoch wieder der Vorteil von Mikroprozessoren, die diese Fehler aufgrund der integrierten „Intelligenz“ erkennen und korrigieren können: Während der Übertragung stellen in den Sensor und in die SPS eingebaute Algorithmen sicher, dass Übertragungsfehler erkannt werden. Aus den Messwerten werden mittels zyklischer Redundanzchecks (CRC) Checksummen ermittelt; bei Abweichungen wird der Messwert verworfen und neu angefordert. Teilweise ist es auch möglich, den korrekten Messwert aus den ebenfalls mit übermittelten Checksummen zu errechnen und somit entstandene Übertragungsfehler zu korrigieren. Dies erspart eine erneute Übertragung und den damit verbundenen Zeitverlust.

Nicht zuletzt reduziert sich beim digitalen Aufbau einer Messkette auch der Verdrahtungsaufwand: Nicht für jeden Sensor und Aktor ist eine eigene Signalleitung nötig, vielmehr sind viele Teilnehmer über eine einzelne, verzweigte Leitung anbindbar. Im Falle von CANopen lassen sich bis zu 127 Teilnehmer über eine Leitung (CAN HIGH, CAN LOW, UB+, 0V) an eine SPS-Eingangskarte anknüpfen.

Viele Hersteller gehen mittlerweile dazu über, aufgrund von Gleichbauteilstrategien digitale Sensoren aufzubauen, deren kompensierter Druckwert anschließend wieder über eine D/A-Wandlung als analoges Normsignal bereitgestellt wird. Im Rahmen des Vergleichs von analoger und digitaler Sensortechnik ist dies quasi der worst case, indem das digitale, kompensierte, „saubere“ Sensorsignal wieder zurück in einen durch Temperatureinflüsse, Quantisierungsfehler und weitere Störgrößen verfälschten Analogwert gewandelt wird. Ratsam ist es vielmehr, das digital aufbereitete Sensorsignal auch digital und unter Ausschluss weiterer Fehlerquellen an die SPS zu übertragen.

Genauigkeit unter der Lupe

Der Vorteil der digitalen Messkette lässt sich auch rechnerisch am Beispiel einer Genauigkeitsbetrachtung demonstrieren: Drucksensoren gibt es sowohl in digitaler als auch in analoger Ausführung zu vertretbaren Preisen mit Toleranzen bis 0,1 %. Diese Genauigkeit dient nachfolgend als Basis.

Bei der analogen Signalkette können noch auf dem Weg der Übertragung Fehler in der Größenordnung von 0,1 % hinzukommen – hohe Übergangswiderstände der Kontaktierungsstellen im Falle von 0–10-V-Signalen oder die Überlagerung von EMV-Störungen zum Beispiel der Nähe von Pumpen oder Motoren oder anderen

potenten Störquellen können ursächlich für Beeinflussungen auf dem Übertragungsweg sein.

Günstige Analog-Eingangsmodule haben Auflösungen im Bereich von 10 bis 14 bit und weisen eine Grundtoleranz von beispielsweise 1 % auf; dieser Fehler addiert sich zum Fehler des Sensors. Doch Vorsicht: Bei dieser Angabe handelt es sich nur um die Genauigkeit bei Referenz-Bedingungen – werden die Referenz-Bedingungen verlassen, kommen weitere Fehler hinzu. Typische Werte liegen hier im Bereich von zusätzlichen

1 % Temperaturfehler über den gesamten Temperaturbereich.

Auch hochwertige Analog-Eingangsmodule mit bis zu 24 bit Auflösung haben immer noch Toleranzen von 0,1 %. So ist auch bei diesen Modulen mit zusätzlichen Temperaturfehlern zu rechnen, die zwar sehr gering sind, aber dennoch im Bereich 10 ppm/K liegen. Bei einem Modul, das im Bereich –40 bis +125 °C verwendbar ist, macht dies über den Temperaturbereich einen zusätzlichen Fehler von 0,165 % aus.

Rein rechnerisch stellen sich die beiden Fälle folgendermaßen dar:

„Günstiges“ Analog-Eingangsmodul:
 $0,1\% \text{ (Druckmessumformer)} + 0,1\% \text{ (Übertragungsweg)} + 1\% \text{ (Analog-Eingangsmodul)} + 1\% \text{ (Temperaturfehler Analog-Eingangsmodul)} = 2,2\%$

„Hochwertiges“ Analog-Eingangsmodul:
 $0,1\% \text{ (Druckmessumformer)} + 0,1\% \text{ (Übertragungsweg)} + 0,1\% \text{ (Analog-Eingangsmodul)} + 0,165\% \text{ (Temperaturfehler Analog-Eingangsmodul)} = 0,465\%$

Die Abschätzung der digitalen Signalkette hingegen fällt bedeutend einfacher aus: Hier gilt die Genauigkeit des Druckmessumformers (im Beispiel mit der Toleranz von 0,1 %). Auf dem weiteren Signalweg kommen keine Fehlereinflüsse hinzu, so dass der Messwert, der in der Prozessauswertung verwendet wird, tatsächlich mit einer Toleranz von 0,1 % vorliegt.

Nürnberg, Germany
24.-26.2.2015

embedded world

Exhibition & Conference

... it's a smarter world

Session Highlights:

- **Internet of Things:** Security, Application Profiles, Short Range Wireless, Functional Safety, M2M, Secure Communication
- **Management Focus:** Managing People, Teams and Processes
- **Software Quality:** Design & Verification Methods, Development Methods, Debugging & Test Methods, Code Analysis
- **Embedded OS:** RTOS & Linux, Android
- **Hardware Focus:** Cortex-M, Memory Technologies, Low Power / Ultra Low Power, SoC, Multicore
- **Engineering Focus:** Embedded GUI Development & Test, Image Processing, Automotive, DSP Workshops

Class Highlights:

- Security Fundamentals for Embedded Software
- Mastering Embedded Linux
- Open-Source Risk Management
- Secure Embedded Communication
- Designing Secure and Reliable Code using MISRA C / C++
- Legal Aspects of Open-Source
- Design of Safety-critical Systems and Software
- Ultra Low Power
- DSP Demystified – Signals Analysis and Processing for IoT
- The Adaptive and Multirate Signal Processing Special Topics
- Linux for Safety-critical Systems
- Embedded Android
- Architectural Design of Software for Multicore Systems

www.embedded-world.eu

Organized by

**DESIGN &
ELEKTRONIK**
KNOW-HOW FÜR ENTWICKLER

NÜRNBERG MESSE

Kostenaspekte

Auch auf der Kostenseite weisen die digitalen Systeme inzwischen Vorteile auf. So sind die Aufpreise für Sensoren mit digitaler Schnittstelle in den vergangenen Jahren gesunken. Bei Druckmessumformern gibt es bereits Anbieter kompletter Druckmessumformer-Familien, bei denen Anwender ohne Aufpreis direkt zwischen analogen und digitalen Ausgangssignalen wählen können. Zwar sind die zur Übertragung der digitalen Signale benötigten Kabel in der Anschaffung durchaus teurer als die für das analoge Pendant, jedoch ist im Falle eines Bussystems nur eine Leitung nötig. Bei der analogen Signalübertragung hingegen fällt pro Messstelle ein Kabel an, so dass in Summe die Verkabelung für das digitale System sogar kostengünstiger ist.

Der Löwenanteil der Kosten verbirgt sich jedoch in der Signalauswertung: So schlagen hochwertige A/D-Module mit beispielsweise acht Analog-Eingängen und 16 bit Auflösung mit Anschaffungskosten in Höhe von 2000 Euro zu Buche. Pro Messstelle bedeutet dies einen Aufpreis von 250 Euro.

Bus-Master für die gängigen Feldbusse bewegen sich preislich zwischen 200 und 500 Euro, unabhängig von der Anzahl der benötigten Messstellen. Da in den meisten Automatisierungssystemen ohnehin ein oder mehrere Feldbusse im Einsatz sind, entfallen die Anschaffungskosten für die Sensorauswertung sogar teilweise. *ik*



Maurice Bildstein

ist Entwicklungsingenieur für elektronische Druckmesstechnik bei Wika in Klingenberg.



Stefan Heusel

ist Produktmanager für elektronische Druckmesstechnik bei Wika in Klingenberg.