



Bild 1: Bei der DMS-Messtechnik im mobilen Fahrversuch 1960 waren das vorausfahrende Testfahrzeug und der Messwagen durch einen Messkabelbaum verbunden.

Geschichte der DMS-Messtechnik: mit Wheatstone bis zur Cloud

Ausgefeilte Sensortechnik ist nur so gut wie das Auswerteverfahren. Die Erfolgsgeschichte der Dehnmessstreifen ist deshalb eng verknüpft mit facettenreichen Entwicklungen der Messverstärkertechnik.

MARTIN RIEDEL, NILS BECKER *

Manchem gilt der mobile Fahrversuch als die Königsdisziplin der physikalischen Messtechnik, weil hier anspruchsvollste Anforderungen zusammenkommen: raue Umweltbedingungen wie Klima und Erschütterungen, Platzbeschränkungen für Installation, wenig zuverlässige Energieversorgung und nicht zuletzt sichere

Bedienkonzepte auch unter erschwerten Arbeitsbedingungen oder gar ein autarker Messbetrieb. Bei der Fahrerprobung wird deutlich, wie wichtig DMS-Technik als Werkzeug der Produktentwicklung und Erprobung ist, wie wertvoll dort zu gewinnende Erkenntnisse sind und welchen Aufwand dies rechtfertigt.

Bild 1 zeigt dies beispielhaft anhand der Avantgarde mobiler Messtechnik in den 1960er Jahren: Ein mit DMS instrumentiertes Versuchsfahrzeug für Fahrdynamik-Messungen benötigte einen hinterherfahrenden Messwagen, angekoppelt über einen Kabelbaum als Nabelschnur. Dieses rollende Mini-Messlabor (ca. 12 m³) enthielt röhrenbetriebene Messverstärker, Papierschreiber – und nicht zuletzt einen mitfahrenden Messtechniker auf spartanischem Arbeitsplatz, um

gerade einmal vier DMS-Kanäle zu registrieren (heute üblich mehrere hundert Kanäle).

Jahrzehnte stürmischen technologischen Fortschritts illustriert als Kontrast ein moderner, miniaturisierter DMS-Verstärker in Bild 4. Mit CAN-Bus-Schnittstelle erlaubt er eine räumlich verteilte Installation, jeweils direkt an der Messstelle, sowie die direkte Integration in etablierte Daten- und Kommunikations-Infrastruktur moderner Fahrzeuge. Dort bildet der CAN-Bus einen Pool für Daten unterschiedlicher analoger und digitaler Sensoren und macht auch bereits vorhandene Messdaten etwa von Steuergeräten verfügbar. Die Rolle des mitfahrenden Messtechnikers übernimmt mittlerweile ein autarker CAN-Bus-Logger, der DMS- und Fahrzeugdaten synchron aufzeichnet, speichert und sogar drahtlos via Internet in der Cloud



* Dipl.-Ing. Martin Riedel
... ist Leiter Produkt-Marketing
bei imc Meßsysteme, Berlin.



Dipl.-Ing. Nils Becker
... ist verantwortlich für Marketing
bei imc Test & Measurement,
Friedrichsdorf.



Bild: Daimler AG

Bild 2: Das mobile Messlabor mit Messverstärkern in Röhrentechnik erfasste gerade einmal vier DMS-Kanäle. Bei heutigen Fahrdynamik-Untersuchungen sind mehrer Hundert Kanäle keine Seltenheit.



Bild: Daimler AG

Bild 3: Statt Flachdisplay und SSD kam 1960 ein Papierschreiber zum Einsatz, der nur bedingt rüttelfest und nur zur Aufzeichnung eines einzigen, ausgewählten Kanals geeignet war.

verfügbar machen kann. Ein solcher dezentraler Miniaturverstärker ist jedoch nur eine von vielen aktuellen Ausprägungen von DMS-Verstärkern. So vielfältig wie die Anwendungen sind auch die Anforderungen an Messgeräte, auf die moderne Elektronikentwicklung maßgeschneiderte Antworten geben kann, die zu Zeiten von Röhrenverstärkern noch undenkbar schienen. So gibt es Messverstärker speziell für DMS oder flexibel konfigurierbare Universalverstärker, die auch viele andere Sensortypen und Messmodi beherrschen. Der Geräteausbau kann fest sein oder modular erweiterbar in unterschiedlicher Kanal-Granulierung. Dies kann sowohl in Form von Rack-Systemen mit Einschubkarten realisiert sein oder aber auf Basis von individuellen Modulen mit eigenen Gehäusen, die über Systembusse oder Ethernet vernetzt und räumlich verteilt installiert werden können. Andere Spezialisierungen zielen auf besonders anspruchsvolle Betriebs- und Umweltbedingungen wie Temperatur, Feuchte und Erschütterung, wie sie im mobilen Fahrversuch gefordert sind.

Das Prinzip der Wheatstone'schen Brückenschaltung bildet bei aller Vielfalt jedoch bis heute die Basis: Den DMS-Widerstand (etwa mittels Referenzstrom) nämlich direkt zu messen, ist nicht praktikabel, da er sich nur um winzige Bruchteile (ppm) um seinen statischen Wert herum ändert. Die symmetrische Brückenschaltung dagegen setzt dies direkt in ein messbares differenzielles Signal um, und stellt zudem weniger extreme Anforderungen an die Stabilität der Speisespannung. Dieses kleine Differenzsignal wurde in der Frühzeit der DMS-Technik direkt mit Drehspulinstrumenten zur Anzeige gebracht. Es mittels elektronischer Verstärkung für weitere Verarbeitung aufzubereiten, zeichnet dann echte Messverstärker aus. Als Messumformer (für z.B. 10-V- oder

20-mA-Signale) konnten damit auch digitale Ziffernanzeigen (BNC-Röhren oder 7-Segment LEDs) betrieben werden, insbesondere aber Papier-Schreiber. Mit ihnen brachte man nicht nur Momentanwerte zur Anzeige, sondern konnte nun dynamische Zeitverläufe lückenlos, hochaufgelöst und archivierbar dokumentieren.

Beginnend mit Röhrentechnik, über Transistorschaltungen, hin zur Silizium-Chip-Technologie brachten schließlich Digitalisierung und Datentechnik die größten technologischen Durchbrüche. Integrierte Schaltkreise und Operationsverstärker eroberten erst das analoge Front-End, ADCs und Mikroprozessoren, dann die weiteren digitalen Stufen der Signalverarbeitung. Für die Wahl unterschiedlicher Realisierungskonzepte, beispielsweise mit Mikrocontroller (MMU), digitalem Signalprozessor (DSP) oder rekonfigurierbarer Logik (FPGA), gibt es bis heute je nach Entwicklungszielen jeweils gute Gründe. Allen Konzepten gemeinsam sind jedoch stetig wachsende Flexibilität und Leistungsfähigkeit bei sinkenden Kosten und Baugrößen.

Die Digitalisierung eröffnete darüber hinaus ganz neue Perspektiven für eine systeme-



Bild: imc Messsysteme

Bild 4: Ein aktueller einkanaliger Miniatur-DMS-Verstärker mit digitaler CAN-Schnittstelle, der dezentral als intelligenter Sensor installierbar ist.

matische algorithmische Signalanalyse, dem eigentlichen Ziel jeder Testmessung. Damit übernehmen heute individuell anpassbare Computer-Displays die Funktion des starren Papierschriebs. Elektronische Speicherung auf Festplatte, Datenbanken und Cloud-Plattformen machen die Daten für arbeitsteilige und automatisierte Auswertungen verfügbar. Entsprechend sind Messverstärker auf der Bedienerseite den anfänglichen Schalttafeln mit Knöpfen und Zeigern längst entwachsen und haben sich zu integrierten Software-Systemen entwickelt. Neben der Einstellung von Betriebsparametern decken diese mittlerweile eine Vielzahl von Funktionalitäten ab: von datenbankgestützter Projektverwaltung bis zur Automatisierung des Messprozesses und der Programmierschnittstellen.

Das Front-End ist und bleibt analog

Doch auch die Digitaltechnik benötigt nach wie vor das analoge Front-End zur Sensor-Konditionierung: Zunächst ist eine stabile und präzise Speisung der Brückenschaltung nötig, da ja die DMS-Dehnung repräsentiert wird als relativer Bruchteil der Speisespannung (die sogenannte ratiometrische Auswertung). Von komfortablen Verstärkern wird darüber hinaus erwartet, eine Halb- oder Viertelbrücke intern zur Vollbrücke zu ergänzen – früher mittels Drehschalter oder Relais, heute durch softwaregesteuerte elektronische Schalter. Erst wenn das minimale DMS-Signal mit ausreichend präzisen und stabilen Vorverstärkern aufbereitet und gefiltert ist, kann eine Analog-Digital-Wandlung erfolgen (ADC). Damit ist alle weitere Signalverarbeitung digital gestützt und kann von der auf diesem Feld fortschreitenden technologischen Weiterentwicklung profitieren.

So wächst die in Messverstärkern integrierte digitale Signalverarbeitung (basierend auf Mikrocontrollern, DSPs oder in FPGA-Technologie) und deren Rechenleistung immens. Sie erstreckt sich von der statischen Skalierung, Kalibrierung und Justage der bauteilbedingten Toleranzen und Fehler, über dynamisch nachgeführte Korrektur- und Kompensationsalgorithmen (Temperatur- oder Kabeleinflüsse), den automatischen Abgleich der stets individuellen DMS-Null-Lage, bei Trägerfrequenz auch mit Phasenabgleich, Shunt-Kalibrierung, bis hin zu Signalfiltern und live berechneten Analysen wie Rosetten oder FFT-Spektren. Was früher durch Bedienfelder voller Schalter und Potis manuell eingestellt werden musste, ist heu-

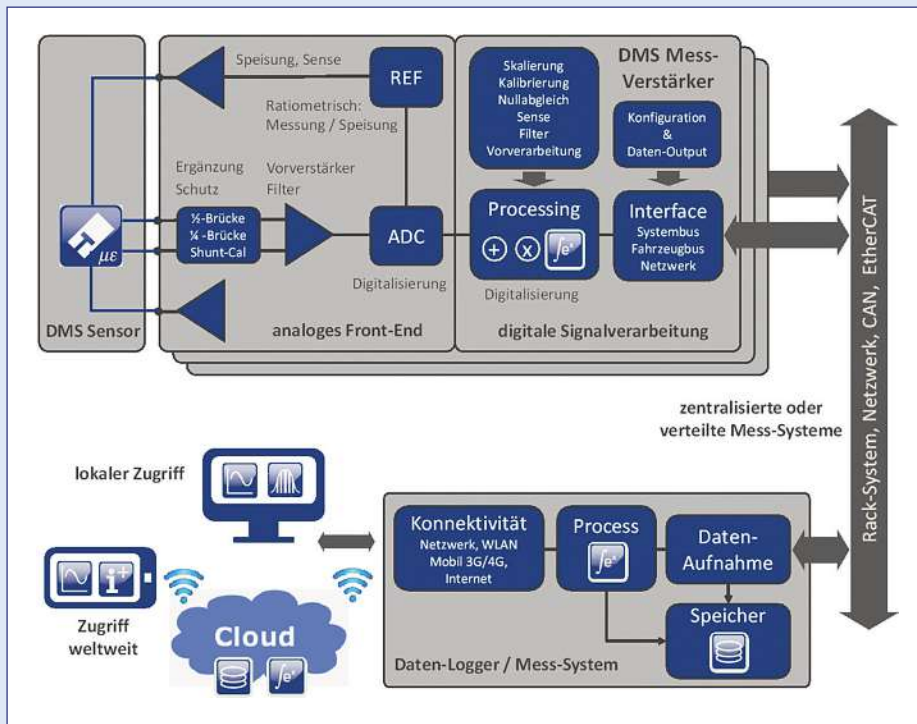


Bild: imc Meßsysteme

Bild 5: Beispiel eines modernen Messsystems, das vom analogen Frontend bis zum weltweiten Datenzugriff über die Cloud ausgeführte Messtechnik ermöglicht.

te per Maus-Klick konfigurierbar. Entsprechend geht der Trend zunehmend vom Spezialsystem zum Universalverstärker, der für aktuelle Aufgaben flexibel konfiguriert werden kann – auch für andere Sensor- und Signaltypen wie beispielsweise Temperatur, Strom, Widerstand und Beschleunigung. Dem Sensor zugeordnete Speicher-Chips mit elektronischem Sensordatenblatt (TEDS) können dies komfortabel unterstützen, beispielsweise beim modularen Rüsten umfangreicher Test-Anordnungen, auch wenn dies sich bislang noch nicht auf breiter Front durchsetzen konnte.

Die Technologie-Entscheidung Trägerfrequenz (TF) oder DC-Modus ist heute längst keine Glaubensfrage mehr. Das TF-Modulationsverfahren hat die Eigenschaft, jegliche Offset-Drift und niederfrequente 50-Hz-Netzstörungen inherent zu unterdrücken; nämlich durch die Transformation auf den Trägerfrequenzbereich von typisch 4,8 kHz – vergleichbar der AM-Modulation. Dies war gerade in der Anfangszeit ein entscheidender Vorteil, als die Stabilität DC-gekoppelter Verstärker noch eine enorme Herausforderung darstellte. Moderne Halbleitertechnologie hat diese Grenzen verschoben und kann mit dem DC-gekoppelten Ansatz wiederum TF-Limitierungen überwinden, etwa die begrenztere Bandbreite und Phasenempfindlichkeit. Auch in Anwendungen in denen

potenzielle Störungen nicht mehr nur auf den Netzfrequenz-Bereich begrenzt sind, wie dies zunehmend gegeben ist, sondern sogar in den TF-Bereich selbst fallen können, ist diese Technologieentscheidung heute nicht mehr so eindeutig festzumachen – wie ohnehin die Trägerfrequenz-Technologie in den USA nie in gleichem Maße populär war wie in Europa.

Scanner, Shunt-Kalibrierung, Sense und andere Spezialitäten

Als die Messverstärker noch überaus aufwändig und teuer waren, erfreuten sich sogenannte Scanner großer Beliebtheit: Ein Messstellen-Umschalter, realisiert als Matrix von vergleichsweise preiswerten (MOSFET-) Relais-Schaltern, konnte so einen einzigen Verstärker mit vielen Kanälen jeweils nacheinander auslasten. Zumindest für Viertelbrücken-Schaltungen hielt sich die Zahl der umzuschaltenden Leitungen dabei noch im Rahmen. Allerdings ist der parasitäre Durchlasswiderstand von MOSFET-Schaltern nicht ausreichend stabil und symmetrisch. Die patentierte Kreuzer-Schaltung konnte diese Voraussetzung der Viertelbrücken-Messung sehr geschickt lösen bzw. umgehen. Heute indes erlaubt preiswerte Halbleitertechnik eine durchgängige Realisierung kanalindividueller Vorverstärker und ADCs. Die durch Unterabtastung bedingten Probleme der

nicht-kontinuierlichen Scanner, mit dem daraus resultierenden Aliasing und ungenügender Störunterdrückung, sind damit Vergangenheit.

24-Bit-ADC-Technologie gilt dabei mittlerweile als Standard. Noch höhere Auflösung, etwa mittels Auto-Ranging-Verfahren durch zwei parallele ADC-Pfade unterschiedlicher Verstärkung, sind dabei weder sinnvoll noch möglich. Mögen solche Konzepte für andere Anwendungen mitunter attraktiv sein, so versagen sie bei DMS-Messungen: Da die Signale durch den Brückenoffset nicht nullsymmetrisch sind, können sie bei kleiner DMS-Aussteuerung also nicht einfach wie mit einer Lupe weiter hochverstärkt werden.

Auch die Shunt-Kalibrierung hat durch die technische Entwicklung mittlerweile etwas an Bedeutung verloren. Sie dient nur noch zur qualitativen Überprüfung der Messstrecke, etwa auf Verkabelungsfehler und nicht wirklich zur maßgeblichen Korrektur einer Skalierung. Denn die mittels Kabelkompensation (Sense), geregelte Viertelbrücken-Dreileiterschaltung, und durch digitale Kalibrierverfahren bereits erreichte Präzision ist kaum zu übertreffen.

Verteilte Topologie: sensornah und dennoch global vernetzt

Systemseitig gibt es eine Tendenz zu räumlich verteilten Messverstärker-Systemen. Zunächst bezieht sich das auf lokale Vernetzung innerhalb eines Testfeldes, z.B. über digitale Systembusse wie CAN, EtherCAT oder FibreOptic-Medien. So können nah am Sensor platzierte Messverstärker elektromagnetische Störeinkopplung drastisch minimieren und teure Sensorkabel durch wenige und robuste Bus-Kabel ersetzen. Ein weiterer Trend dehnt diese Dezentralisierung noch weiter aus: über Netzwerk und Mobilfunk bis ins Internet. Denn sowohl wachsende Erfassungsmöglichkeiten als auch zunehmende Arbeitsteilung erfordern es, die Daten verfügbar zu machen. Auf riesige Datenberge (Big Data) weltweit Zugriff zu haben, um mittels datenbankgestützter Auswertungen und algorithmischer Signalanalyse damit Antworten auf heute noch nicht einmal gestellte Fragen zu finden – das ist die Vision neuer Cloud-basierter Ansätze.

Einen detaillierten Technologieartikel zum Thema Messtechnik in der Cloud finden Sie als Abschluss unseres DMS-Dreiteilers im kommenden Sonderheft „Messtechnik, Sensorik und Test“, das am 6. September 2016 erscheint.

// KU

imc Meßsysteme Berlin