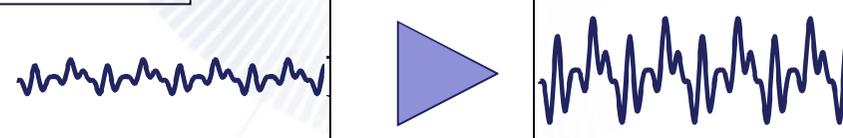


Präzisionsmesstechnik für das elektrische Messen mechanischer Größen

Dr.-Ing. André Schäfer
Business Development Manager
High Precision Measurement
and Calibration



Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH
Darmstadt



- **Messsystembedingte Messunsicherheit** ist ein wichtiges Thema der diesjährigen „testXpo“. In Fällen, in denen nur ein sehr kleines Messunsicherheitsbudget vorhanden ist, und dies ist bei der Messung mechanischer Größen wie Kraft, Drehmoment oder auch höhere Drücke sehr oft der Fall, werden heute fast ausschließlich Aufnehmer verwendet, die auf der Basis von Dehnungsmessstreifen realisiert sind. Dies reicht bis hin zu metrologischen Anwendungen, wo hochgenaue Referenzaufnehmer die Rückführung auf das nationale Normal sicherstellen.
- Um das relativ kleine Signal von dehnungsmessstreifenbasierten Aufnehmern, welche in der Regel nur eine Empfindlichkeit von 2 mV/V (also 2 mV Signal pro V Speisespannung) zur Anzeige zu bringen oder weiterzuverarbeiten werden **Präzisionsverstärker** benötigt. Auch vor dem Hintergrund von dynamischen- und Ermüdungsprüfmaschinen sollen die Anforderungen an derartige Präzisionsverstärker als Brückenverstärker für Dehnungsmessstreifen **nicht nur für statische**, sondern auch **für quasi-statische und dynamische Anwendungen** diskutiert werden.

Teil 1

Motivation, Geschichte der Präzisionsmesstechnik für DMS

Teil 2

Aufbau von Gleichspannungs- und Trägerfrequenzverstärker

Teil 3

Zukünftige Notwendigkeit dynamischer Kalibrierung am Beispiel der Drehmomentmessung

Teil 4

Eignung von DC- und TF-Verstärkern für quasi-statische und dynamische Aufgaben

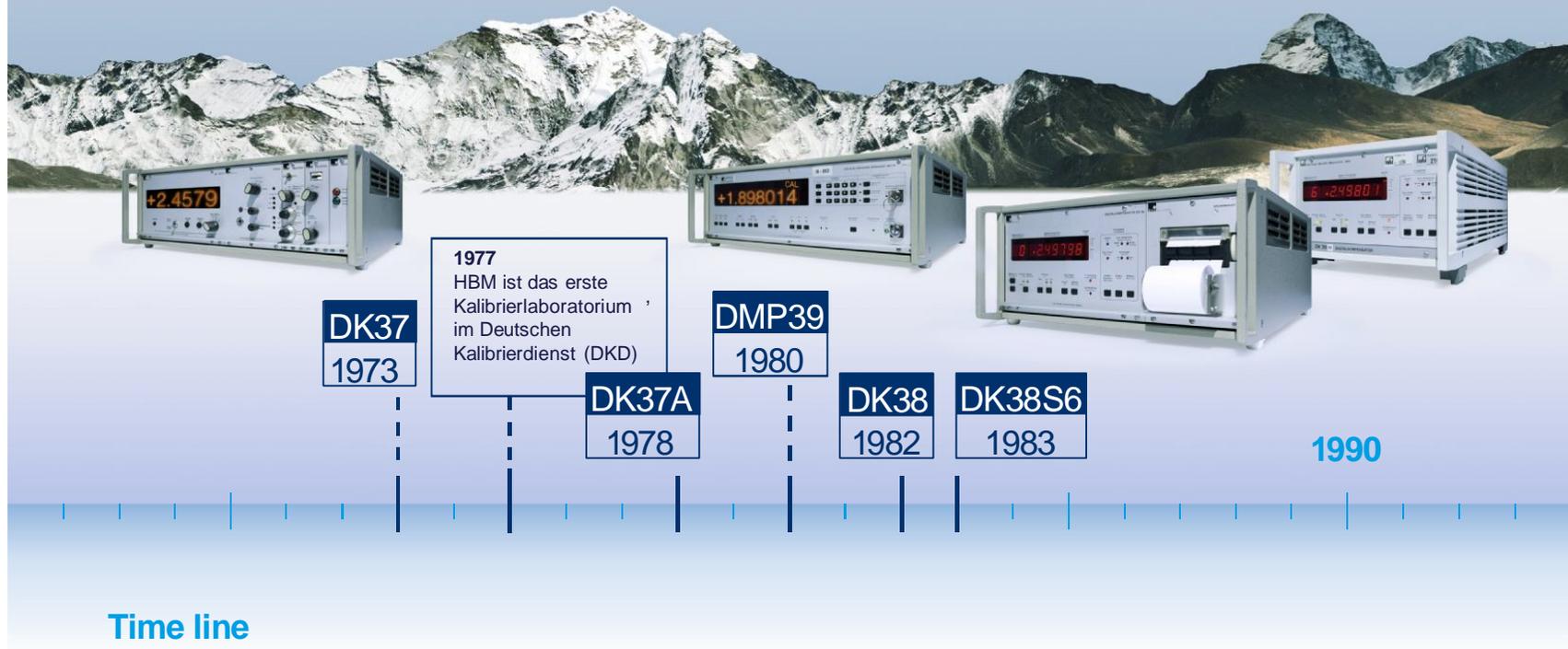
Teil 5

Schlussfolgerungen und Ausblick

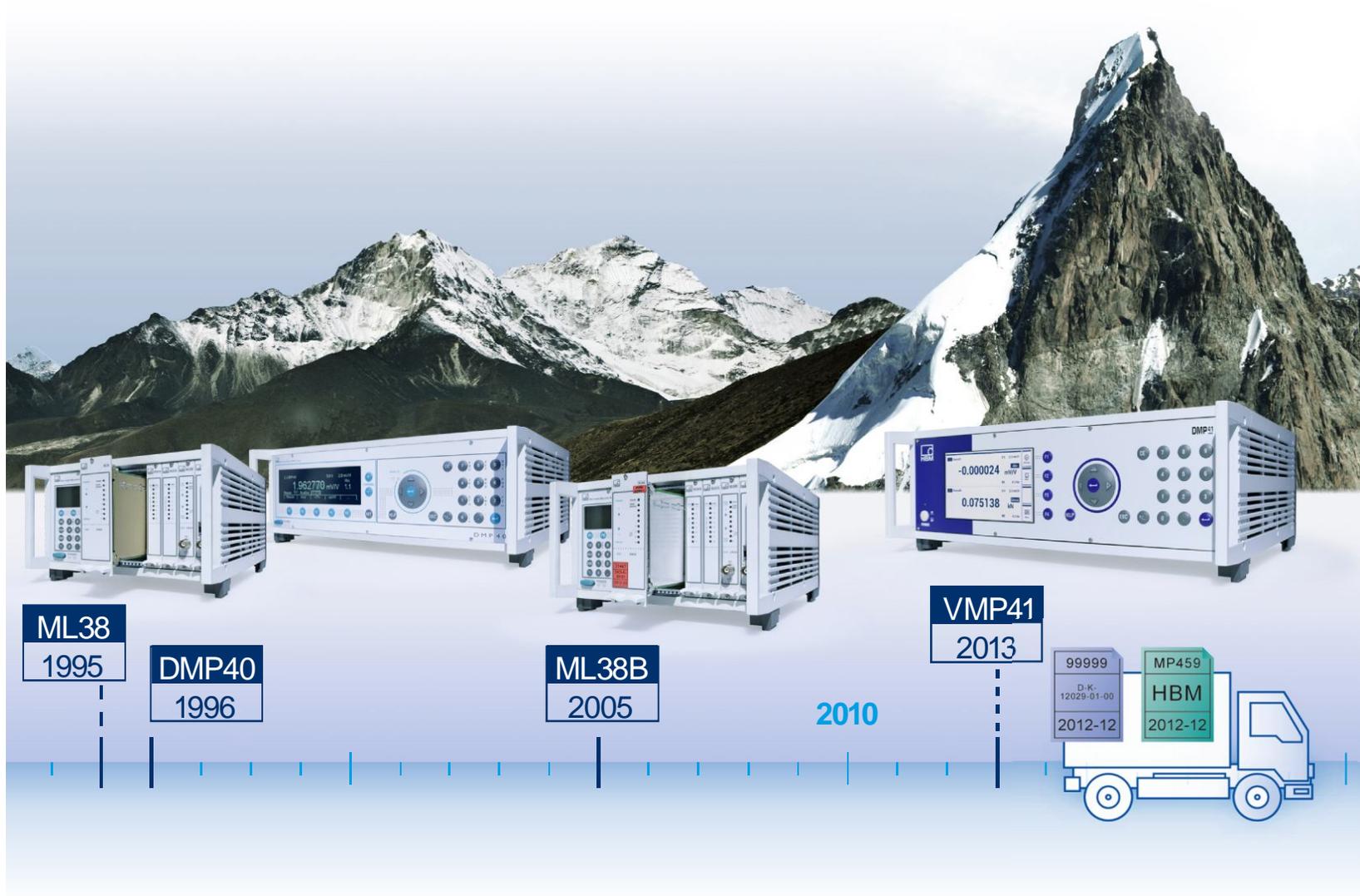
Geschichte der HBM-Präzisionsmesstechnik (I)



Qualitätssicherung bei HBM (um 1970)



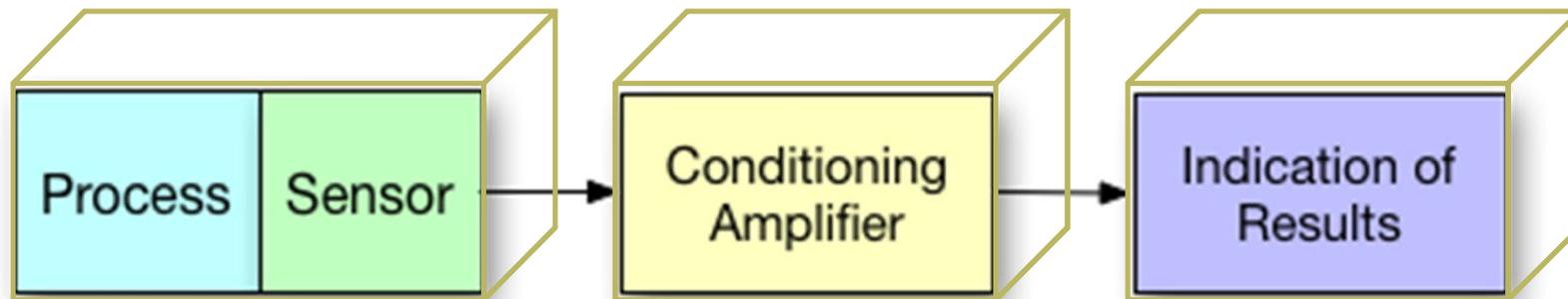
Geschichte der Präzisionsmessgeräte von HBM (II): Zeitstrahl nach 1990



Messverstärker und Messkette

Sensoren für mechanische Messgrößen, wie beispielsweise Kraft, Drehmoment oder auch Druck müssen durch einen **Messverstärker** ergänzt werden, um an Datenerfassungs- und/oder Anzeigesysteme angeschlossen zu werden.

Zusammen mit diesem Verstärker bildet der Sensor dann eine **Messkette**.



Im Sinne der Rückführbarkeit aber auch der Austauschbarkeit von Komponenten der Messkette ist es notwendig, Sensor und Messverstärker einzeln zu charakterisieren.

Dabei kann der Messverstärker quasi als „Black Box“ mit definiertem Ein- und Ausgang gut beschrieben werden.

Dass DMS imstande sind, ungewöhnlich genaue Messergebnisse zu liefern, ist von den Messgrößenaufnehmern bekannt. Gleichzeitig ist aber auch eine hochwertige Instrumentierung erforderlich.

- Die Auflösung, definiert als die kleinste detektierbare Änderung des Wertes eines Eingangssignals
 - Hängt von der ADU-Auflösung ab
 - Ist gleichzeitig durch das Signal-Rausch-Verhältnis als physikalische Grenze limitiert
- 7-stellige Anzeige ist ein Muss (vorzugsweise 2 Millionen dig. Schritte),
 - dann ist die Auflösung kein wesentlicher Faktor für die Gesamtunsicherheitsberechnung
- Reproduzierbarkeit & Drift sollten niedrig sein.

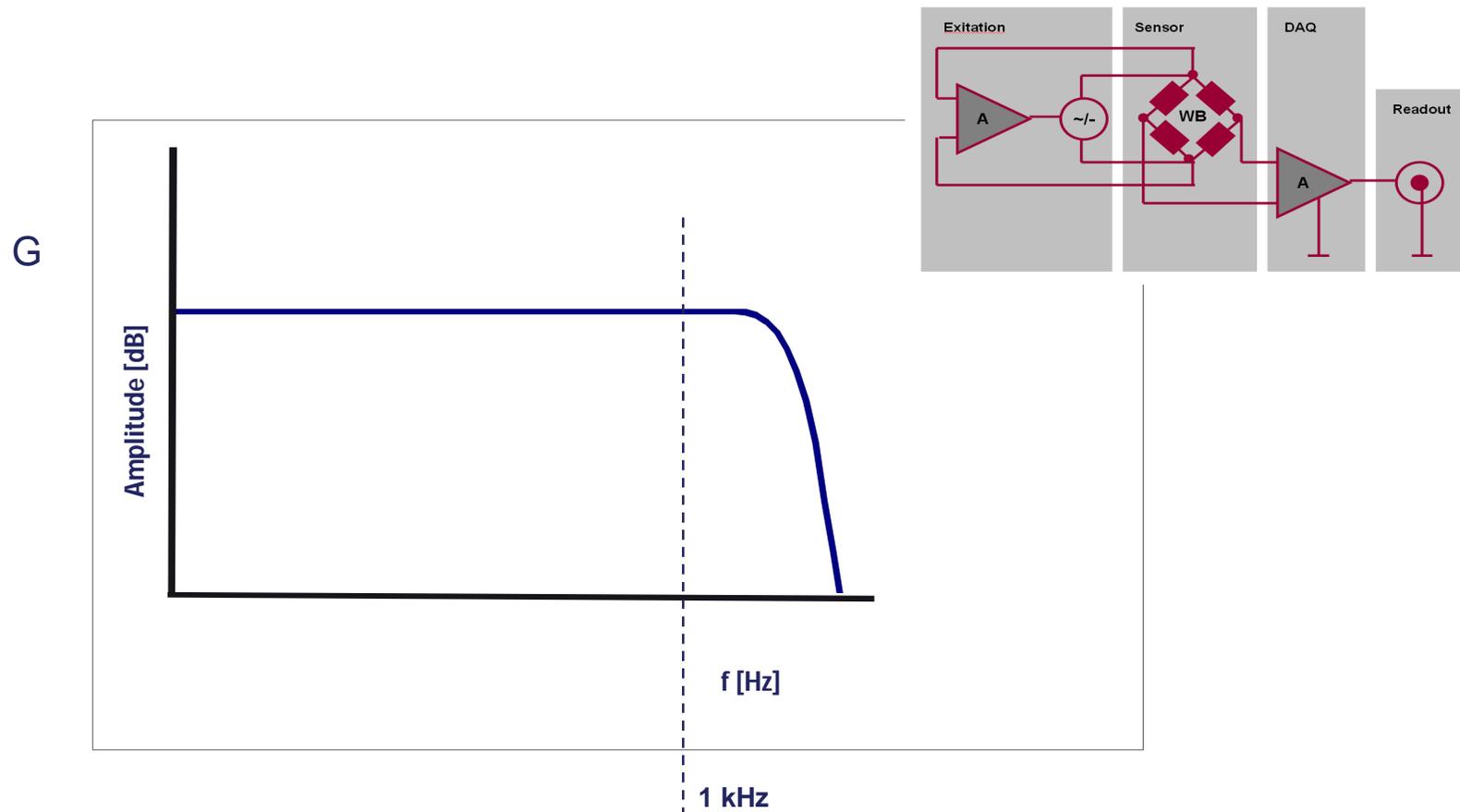
Der Messverstärker sollte zweckmäßigerweise so gewählt werden, dass sein Einfluss auf die Gesamtmessunsicherheit gegenüber dem Aufnehmer (für den sich keine beliebig kleine Unsicherheit erreichen lässt) vernachlässigbar ist, d.h. dass die Messunsicherheit der Messkette ungefähr der Messunsicherheit des Aufnehmers entspricht. Der Beitrag des Messverstärker ist somit nicht signifikant und kann ggf. vernachlässigt werden

► Zumindest für statische Messungen ist es realistisch, derart hohe Anforderungen an den Verstärker zu stellen.

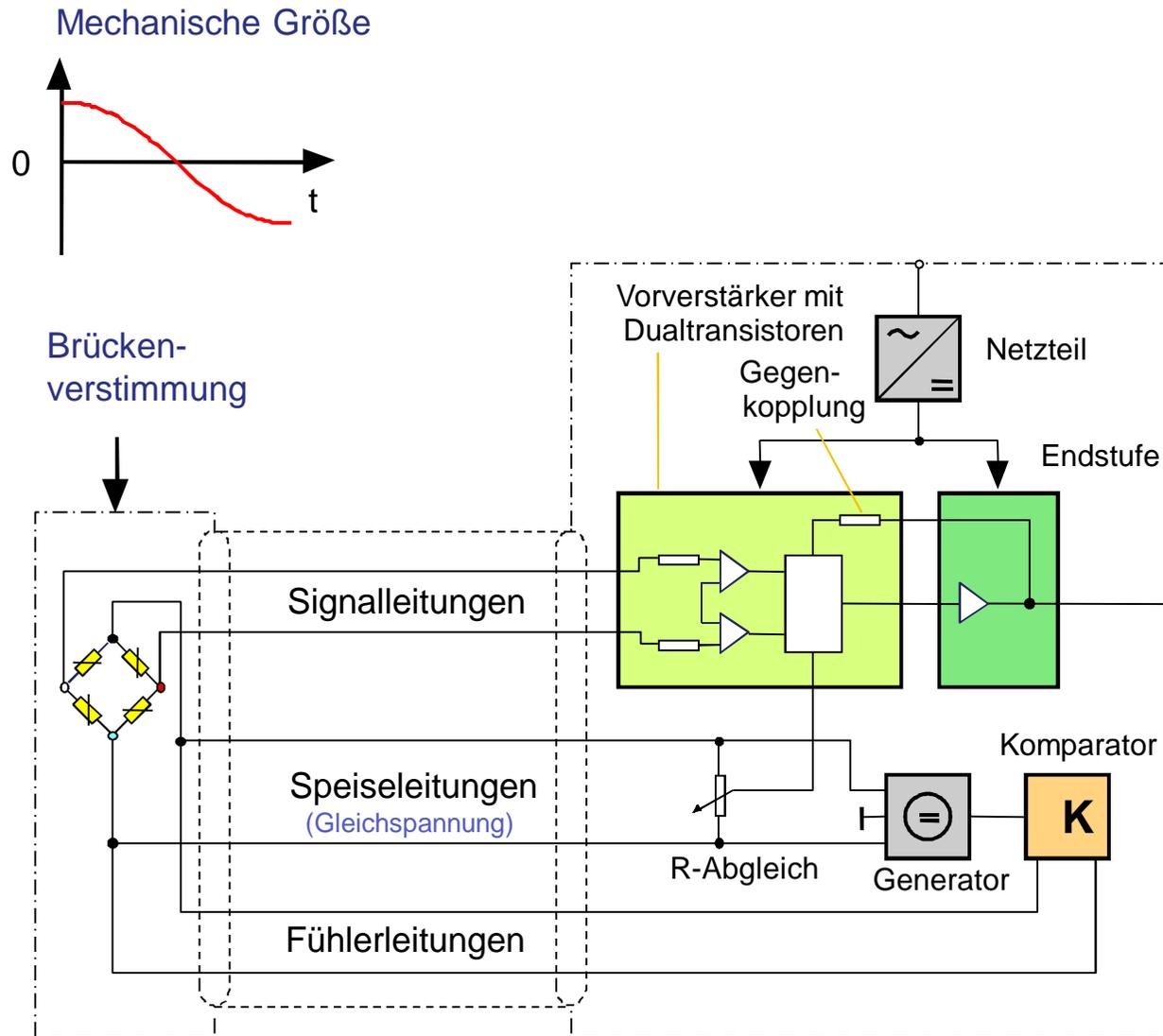
Anforderungen an Brückenverstärker (II)



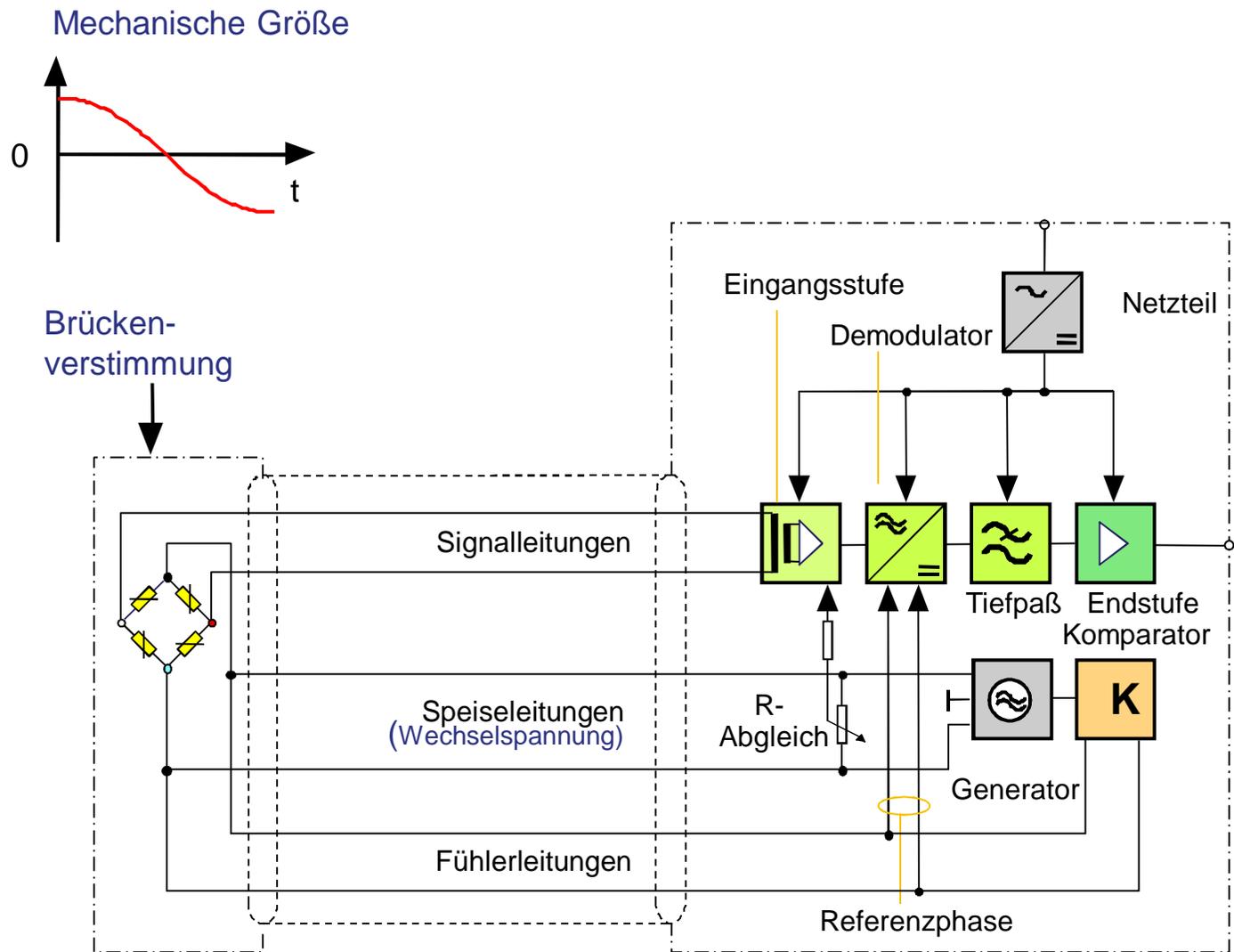
Ob realisiert mittels Gleichspannungs- oder Trägerfrequenz-Verstärker:
Ein idealer Tiefpass muss realisiert werden



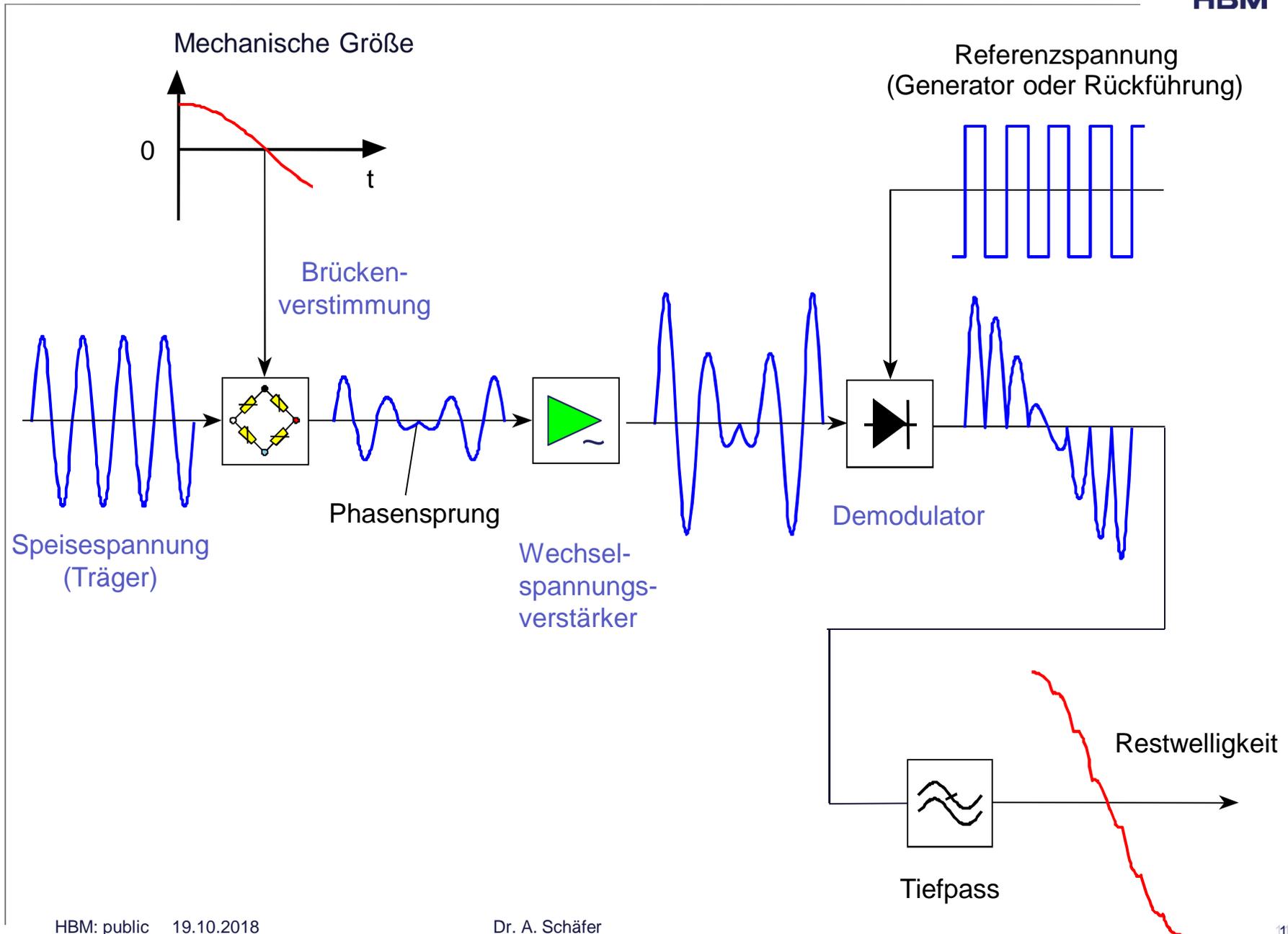
Blockschaltbild eines Gleichspannungsverstärkers



Blockschaltbild eines Trägerfrequenzverstärkers



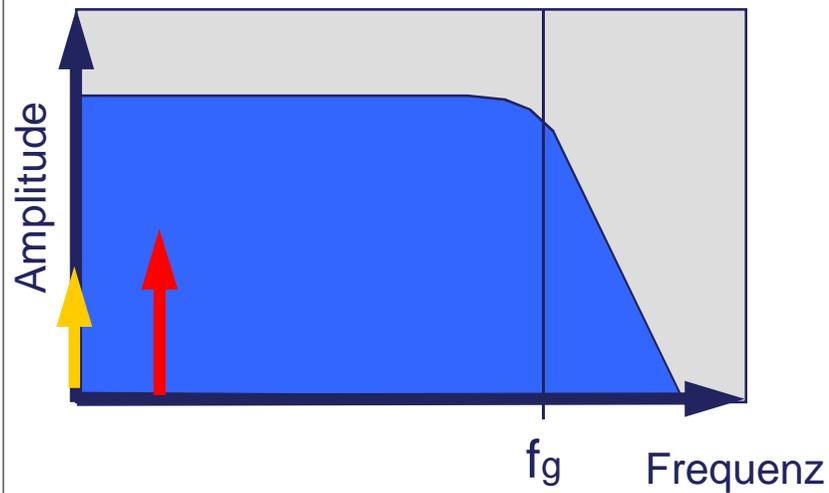
Arbeitsprinzip des Trägerfrequenz(TF)- Verstärkers



Übertragungsverhalten im Vergleich

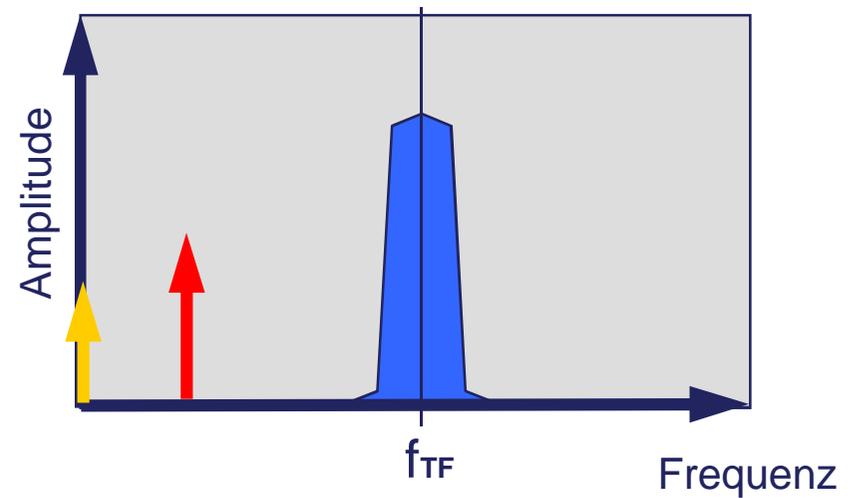


Gleichspannungs-Verstärker



f_g Grenzfrequenz

Trägerfrequenz-Verstärker



f_{TF} Trägerfrequenz

-  Thermospannung
-  Netzfrequenz

DMP-Digitales Präzisionsmessgerät- die weltweite >>Referenz<<



Die DMP Serie ist weltweiter Standard in nationalen Metrologie-Instituten (NMIs).

Hauptsächlich eingesetzt in:

- Kraftlaboratorien
- Drehmomentlaboratorien
- Drucklaboratorien
- Masselaboratorien

Ebenso bei der

- Herstellung von Sensoren



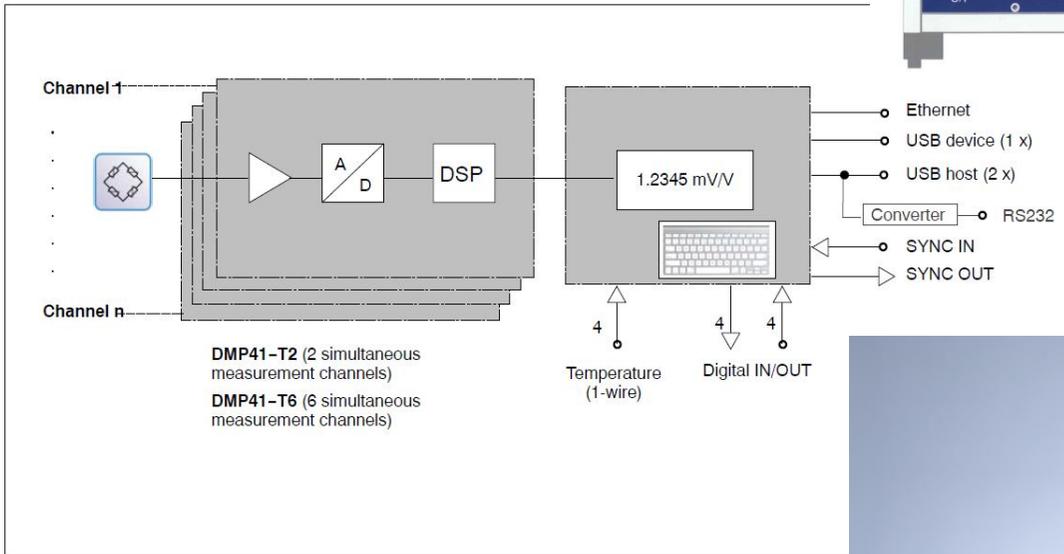
DMP41(I) – Messwertanzeige



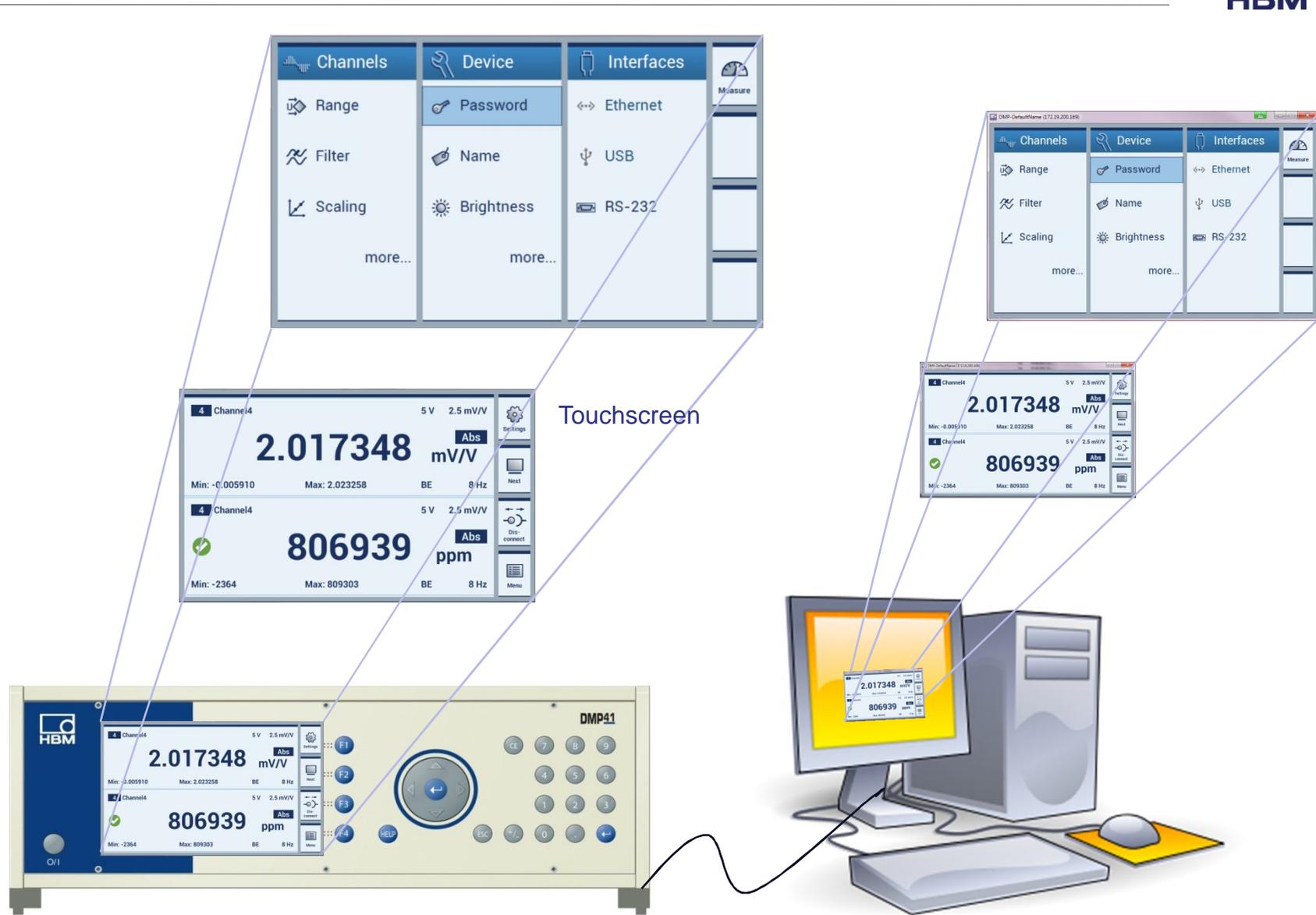
DMP41 (II) – Einstellmenüs



DMP 41 – ein Überblick



DMP41- vielfältige Bedienmöglichkeiten

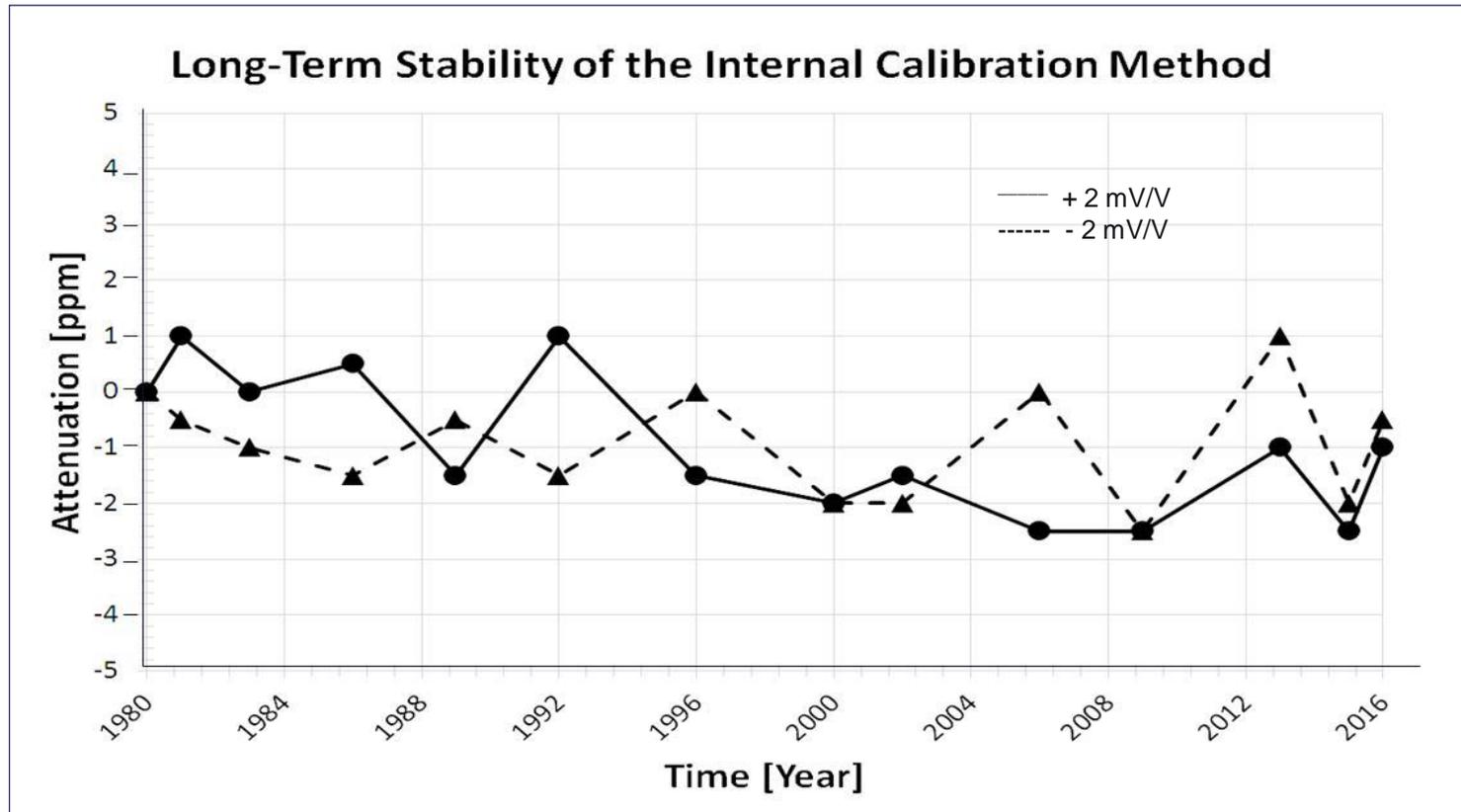


Zusammenfassung wichtiger Highlights



- „Hintergrundkalibrierung“ –
während der Kalibrierung wird die Messung unterbrechungsfrei fortgesetzt
- Erweiterte Möglichkeiten zur Einbindung in die Laborumgebung

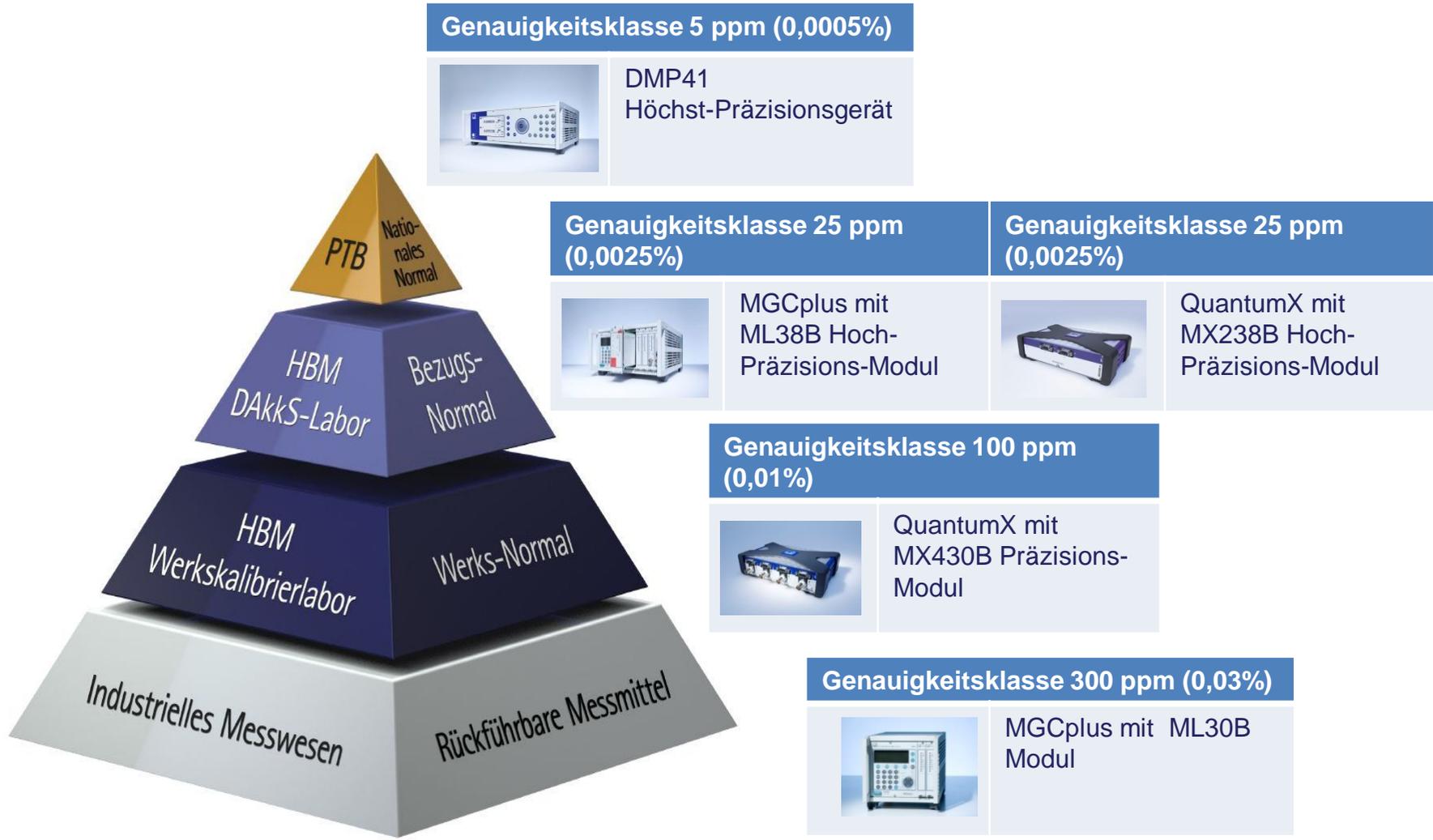
Wichtige technischen Daten im Vergleich zum Vorgänger	DMP40	DMP40S2	DMP41-T2	DMP41-T6
Anzahl simultaner Kanäle	1	2	2	6
Genauigkeitsklasse bei 10 V Speisespannung, Messbereich 2,5 mV/V, Aufnehmerwiderstand 350 Ω, Kabellänge <10 m	0,0005		0,0005	
Genauigkeitsklasse, bei zusätzlichem Einfluss eines elektromagnetischen Feldes nach EN 50082-1 (Feldstärke 10 V/m)	0,005		0,0005	
Möglichkeiten für den Anschluss von Aufnehmern	8x DP15P	16x DP15P	2x DP15P 2x Amphenol	6x DP15P 6x Amphenol
Einbindung in die Laborumgebung	RS232 RS422/485		Ethernet RJ45 USB device, 2x USB host RS232 mittels USB adapter	



- Über 37 Jahre beobachtete Langzeitstabilität einer Messkette bestehend aus BN100; Seriennummer 010 & DMP39; Seriennummer 001
- Der Höchstpräzisionsverstärker DMP39 ist der 1980 eingeführte Vorgänger von DMP40 und den heutigen Modell DMP41



Brückenverstärker nach Ihrer Eignung für Einsatzfälle



	Messgröße Kraft	Messgröße Drehmoment
Reale Messaufgabe	 Source: DEKRA, Germany  Source: Knorr-Bremse AG, Germany	 Source: KSB, Germany  Source: KSB, Germany
Zugehörige Kalibriermethode	 Source: HBM	 Source: HBM

Gegenwärtig:

- Von den Anwendern wird derzeit eine statische Kalibrierung toleriert
- Übertragungsfunktion der mechanischen Aufnehmer ist aber stark frequenzabhängig
- Dynamische Effekte der elektrischen Signalkonditionierung sind Untersuchungsgegenstand
- **dynamische Anwendungen müssen zunehmend auch dynamisch abgebildet werden**



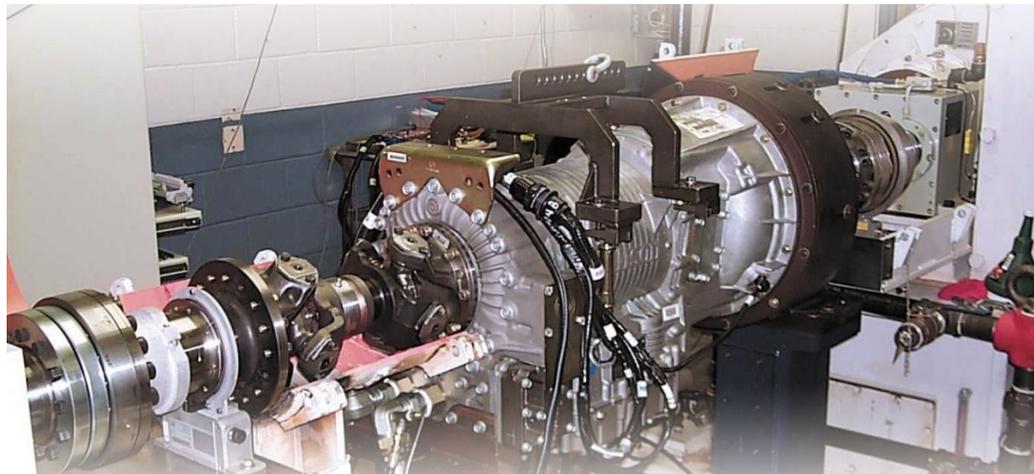
C 7.3.4. Dynamische Eichung von Kraftgebern

Während die absoluten Bewegungsgeber in sich abgeschlossene Systeme mit genau definierter Frequenzcharakteristik sind, hängt das Frequenzverhalten der Kraftgeber sehr stark von den an den Geber angekoppelten Massen der gesamten Meßeinrichtung ab. Wie schon in Abschn. C 1.1 erwähnt, ändert sich z. B. bei Wägungen die angekoppelte Masse mit der Kraft. Sollen Aussagen über einen Geber in einer bestimmten Meßeinrichtung gemacht werden, muß der Geber mitsamt den angekoppelten Massen geeicht werden. Soll dagegen die Frequenzcharakteristik eines Gebers allein, ohne Bezug auf eine spezielle Meßaufgabe, ermittelt werden, wird man den Geber möglichst ohne jede Zusatzmasse eichen, um z. B. den größten mit dem Geber erfaßbaren Frequenzbereich zu erhalten.

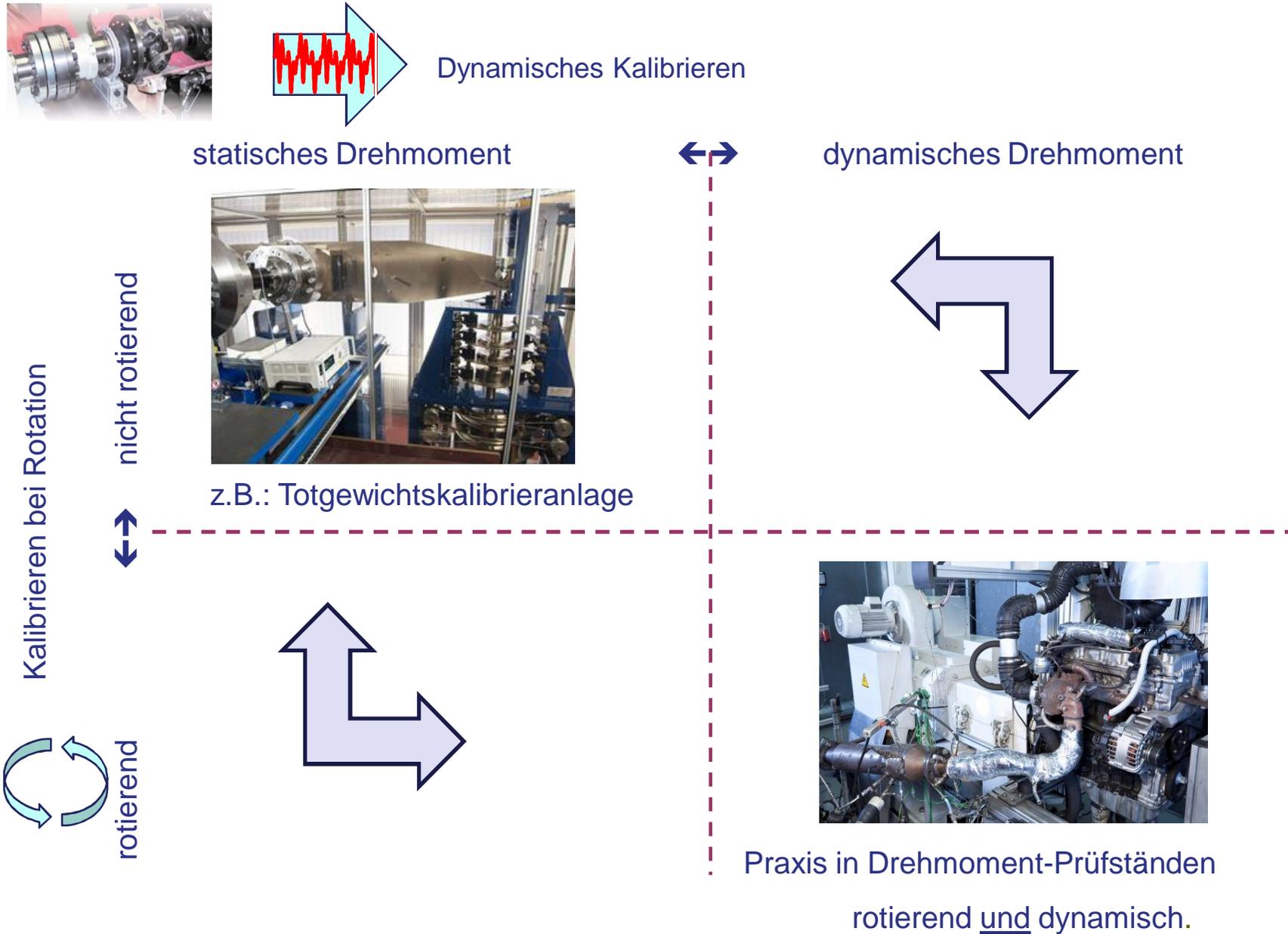
Zusammenfassung aus Beispielen der zuvor gezeigten Anwendungen:

- Bestimmung der Leistung von Verbrennungsmotoren, Schiffsmotoren etc.
- Bestimmung von Wirkungsgraden
- Abgasprüfung bei Automobilen, Einhaltung strengerer Abgasvorschriften für Schiffsantriebe
- Prüfung von Pumpen, Elektromotoren, etc.

➤ Drehmoment-Messaufgaben sind oft hochdynamisch



Zur Begrifflichkeit der Dynamik in der Drehmomentmesstechnik



Dynamische Kalibrierung – langfristig zu verfolgendes Thema



Das Europäische Metrologie-Forschungsprogramm



„DYNAMIC“ IND 09

„IMPACT“ 14SIP08

„Met4FoF“ & „DYNAMIC“

Traceable Dynamic Measurement of Mechanical Quantities

JRP201 - Dynamic Measurement, 3564 MC, 242 PM

JRP Objectives

- Establish infrastructure for traceable dynamic measurements of force, pressure and torque
- Set up and validate primary calibration methods
- Develop methods for consistent measurement uncertainty calculation
- Provide dynamic traceability of electric measurement chain

State of the Art

- Static calibration only
- Transducer's response to dynamic signals is frequency dependent
- Dynamic effects of electrical conditioning equipment not quantified
- Interaction with embedding mechanical structures not considered
- Static calibration not sufficient for dynamic applications

Dynamic Force (JRP, 14 F14)

- Technical work package
- Development of methods and devices
- Measurement range up to 50 kN, 1 kHz
- Measurement range up to 20 kN

Dynamic Pressure (JRP, 14 P14)

- Technical work package
- Development of methods and devices
- Measurement range up to 10 MPa, 1 kHz
- Measurement range up to 10 MPa

Dynamic Torque (JRP, 14 T14)

- Technical work package
- Development of methods and devices
- Measurement range up to 10 kNm, 1 kHz
- Measurement range up to 10 kNm

Electrical Characterisation of Measuring Amplifiers (JRP, 14 E14)

- Technical work package
- Development of methods and devices
- Measurement range up to 10 V, 1 kHz
- Measurement range up to 10 V

Mathematical and Statistical Methods and Models (JRP, 14 M14)

- Technical work package
- Development of methods and devices
- Measurement range up to 10 V, 1 kHz
- Measurement range up to 10 V

Creating Impact (JRP, 14 I14)

- Technical work package
- Development of methods and devices
- Measurement range up to 10 V, 1 kHz
- Measurement range up to 10 V

JRP Participants

- PTB (Germany)
- NPL (United Kingdom)
- LNEC (France)
- WZL (Spain)
- SP (Sweden)
- IMM (Italy)
- CM (Czech Republic)
- TUBITAK-UME (Turkey)

Scientific and Technical Excellence

- Leading participation of largest European NMIs
- Incorporation of technical expertise of internationally recognised experts in force, pressure, torque, electrical quantities and mathematical modelling
- Collaboration with manufacturers and end-users of dynamic measurement equipment
- Build on previous cooperations in field of dynamic measurement (EURAMET projects 890 and 1078)

Relevance to Objectives of EMRP

- Aligns closely with EMRP Outline 2003, bringing traceability to a field of mechanical metrology where a gap has not existed before, and for which industrial end-users have identified a clear need
- Developing novel metrological methods and tests for traceable dynamic measurements of key mechanical quantities: force, pressure and torque

Quality and Efficiency

- Share best ideas and highly innovative equipment
- Join forces and competence to exploit synergies between the fields
- Avoid cost and time expenditure due to parallel development
- Distribute knowledge and experience across Europe

“Standards to maximise end user uptake of NMI calibrations of dynamic force, torque and pressure sensors”

MATHMET
The European Centre for Mathematics and Statistics in Metrology

Home | Research | Projects | Publications | Events | Members | Blog

EMPIR 14SIP08
“Standards and software to maximise end user uptake of NMI calibrations of dynamic force, torque and pressure sensors”

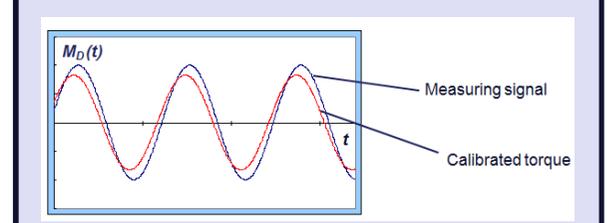
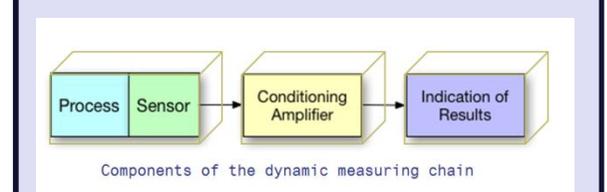
EURAMET
PTB Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig und Berlin
NPL National Physical Laboratory

Acknowledgement
This work has been carried out partly as part of the European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR) project 14SIP08. The EMPIR initiative is co-funded by the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and the EMPIR Participating States.

HORIZON 2020
The EU Framework Programme for Research and Innovation

“Development of measurement and calibration techniques for dynamic quantities”

The research aimed at developing improved measurement and calibration are of direct relevance to our activities and those of our industrial customers in research and development and manufacturing.



Brückenverstärker – Charakterisierung der Betriebsarten



Betriebsarten	Statisch	Quasi-statisch	Dynamisch
Trägerfrequenz	AC-statisch <ul style="list-style-type: none"> • robust • genau 	AC-dynamisch <ul style="list-style-type: none"> • Robust • Genau • Bandbreite realisierbar 	AC-dynamisch <ul style="list-style-type: none"> • Robust • Genau • Prüfen: Ist Bandbreite realisierbar?
Gleichspannung	DC-statisch <ul style="list-style-type: none"> • Breitbandig • Einfach aufgebaut • Ggf. Störungen auf das Messsignal 	DC-dynamisch <ul style="list-style-type: none"> • Breitbandig • Einfach aufgebaut • Ggf. Störungen auf das Messsignal 	DC-dynamisch <ul style="list-style-type: none"> • Breitbandig • Einfach aufgebaut • Ggf. Störungen auf das Messsignal
Beschreibungen in	VDI/VDE/DGQ/DKD 2622: Kalibrieren von Messmitteln für elektrische Größen; Blatt 20: 2013, Hier beschrieben: Gleichspannungsverstärker, Trägerfrequenzverstärker etc.	In Vorbereitung: Richtlinie DKD-R 3-2: Kalibrierung von Messverstärkern für dynamische Anwendungen Hierin werden beschrieben sein: Gleichspannungsverstärker, Trägerfrequenzverstärker etc.	

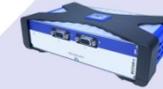
➤ Wenn möglich, sollten - wegen der deutlich geringeren Störanfälligkeit- auch für quasi-statische und dynamische Anwendungen Trägerfrequenzverstärker erwogen werden

QuantumX: Auswahlmöglichkeit nach Genauigkeit und Bandbreite



- Mit der Einführung dieses Moduls bietet QuantumX nun **sehr unterschiedliche Genauigkeits-Bandbreiten Kombinationen** an, welche gleichzeitig verarbeitet werden können.
- Man kann jetzt **aus einer großen Anzahl verschiedener Module auswählen**, nämlich Quantum MX238B, Quantum MX430B, Quantum MX840B und Quantum MX410B und dies in feinen Schritten von sehr unterschiedlicher Genauigkeit Bandbreite Kombinationen in Abhängigkeit von der jeweiligen Messaufgabe auswählen.

QUANTUMX MX238B



25 ppm Genauigkeit @
50 Hz Signalbandbreite

QUANTUMX MX430B



100 ppm Genauigkeit @
6000 Hz Signal Bandwidth

QUANTUMX MX840B



Universelle 500 ppm Genauigkeit @
7,77 kHz Signalbandbreite

QUANTUMX MX410B



500 ppm Genauigkeit @
38 kHz Signalbandbreite

Bewertung der Eignung der Module MX238B, MX430B und MX410B



MX238B

MX430B

MX410B

Genauigkeitsklasse: 0,0025 %

Genauigkeitsklasse: 0,01 %

Genauigkeitsklasse: bis 0,05 %

Trägerfrequenz: 225 Hz

Trägerfrequenz: 600 Hz + DC

Trägerfrequenz: 4800 Hz + DC

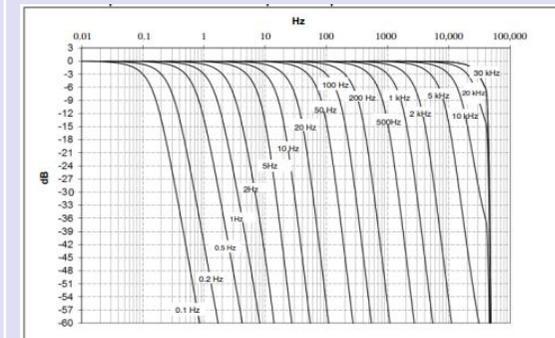
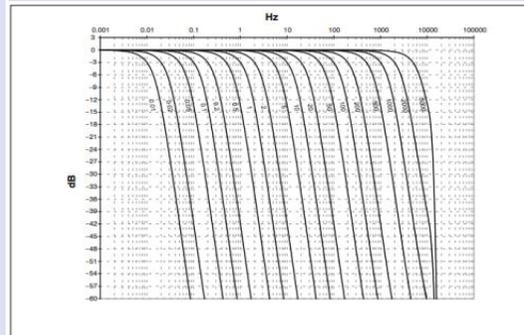
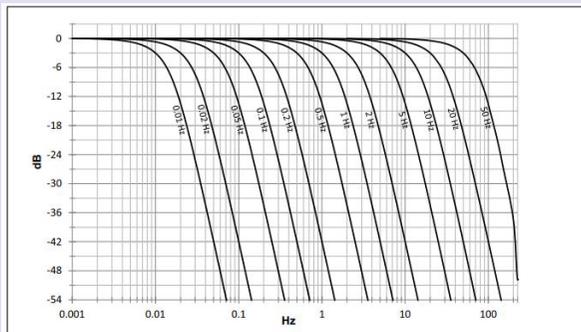
Signalbandbreite TF: 50 Hz

Signalbandbreite TF: 200 Hz

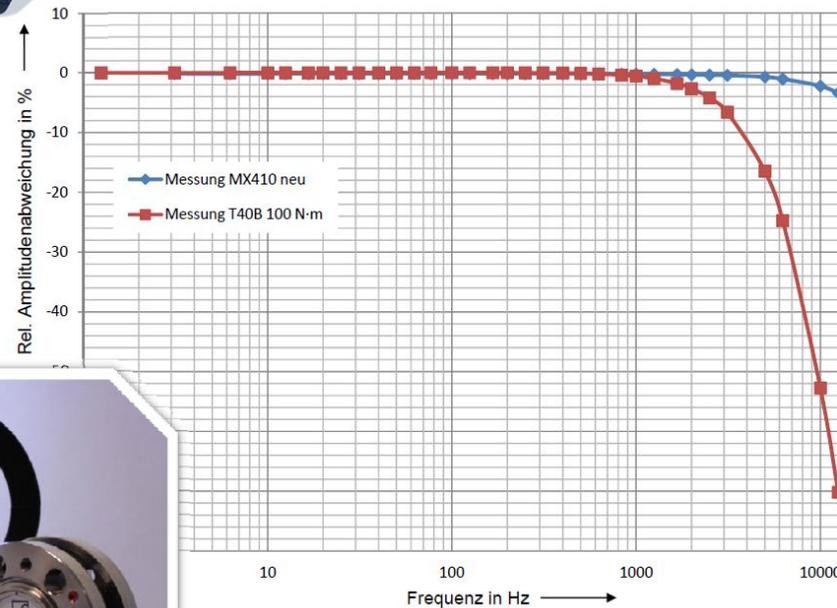
Signalbandbreite TF: 1600 Hz

Signalbandbreite DC: 5000 Hz

Signalbandbreite DC: 30000 Hz
(bei nur 2 Kanälen 60000 Hz)



Praxis: Gemessener Frequenzgang zweier Verstärker



Quelle: "Dynamische Kalibrierung von Brückenverstärkern", Leonard Klaus (PTB), Florian Beug (PTB), Darmstadt, HBM, 2013

Dynamisches Brückennormal der PTB, Braunschweig, ursprüngliche Bauform: Dyn-BN-1



Weiterentwickeltes dynamisches Brücken-normal f. FB "Akustik und Dynamik"/ Abt. "Mechanik und Akustik : Dyn-BN-S



Eingesetzt f. Test von HBM Quantum MX410B



- Für messtechnische Aufgaben der Kraft-, Drehmoment oder auch Druckmessung mittels der Dehnungsmesstreifen-Technologie, ob nun realisiert mittels Gleichspannungs- oder Trägerfrequenz-Verstärker, wird ein idealer Tiefpassfilter benötigt.
- Der Aufbau von Trägerfrequenzverstärkern ist etwas komplizierter als der von Gleichspannungsverstärkern, allerdings ist deren Störfestigkeit deutlich besser.
- Von den Anwendern wird derzeit eine statische Kalibrierung toleriert, wegen der dynamischen Messrealität werden Anwendungen aber auch zunehmend dynamisch abgebildet werden müssen.
- Bei der Qualifizierung dynamisch geeigneter Komponenten nahm HBM an vielerlei Forschungsprojekten statt. Im Ergebnis des Projektes EMRP IND09 unter Führerschaft der PTB (Physikalisch-Technischen Bundesanstalt) konnte zum Beispiel der Verstärker Quantum MX410B als dynamisch geeigneter Brückenverstärker qualifiziert werden.

Wenn möglich, sollten -wegen dieser deutlich geringeren Störanfälligkeit verglichen mit den Gleichspannungsverstärkern- auch für quasi-statische und dynamische Anwendungen z.B. im Hinblick auf dynamische Prüfmaschinen und Ermüdungsprüfmaschinen der Einsatz von Trägerfrequenzverstärkern dem von Gleichspannungsverstärkern vorgezogen werden.

www.hbm.com

Dr.-Ing. André Schäfer
Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH
Business Development Manager
High Precision Measurement and Calibration
Im Tiefen See 45, 64293 Darmstadt, Germany
Tel: +49-6151-803224, Fax: +49-6151-8039224



Quelle: PTB, Braunschweig, Abteilung 1