

319. PTB-SEMINAR 18.05.2022 – MATTHIAS OHLROGGE

Aufbau und Charakterisierung eines breitbandigen Messsystems für Stromwandler bis 2000 A

29.06.2022

www.testotis.de

Motivation I

- ▶ Zunehmende Elektrifizierung in allen Bereichen der Industrie und Messtechnik
 - Kommunikation 5G
 - Elektromobilität
 - Power Management
- ▶ Stetig steigende Präzision der Messtechnik und der Messbereiche
- ▶ Herausforderung für die Kalibrierung und Rückführung

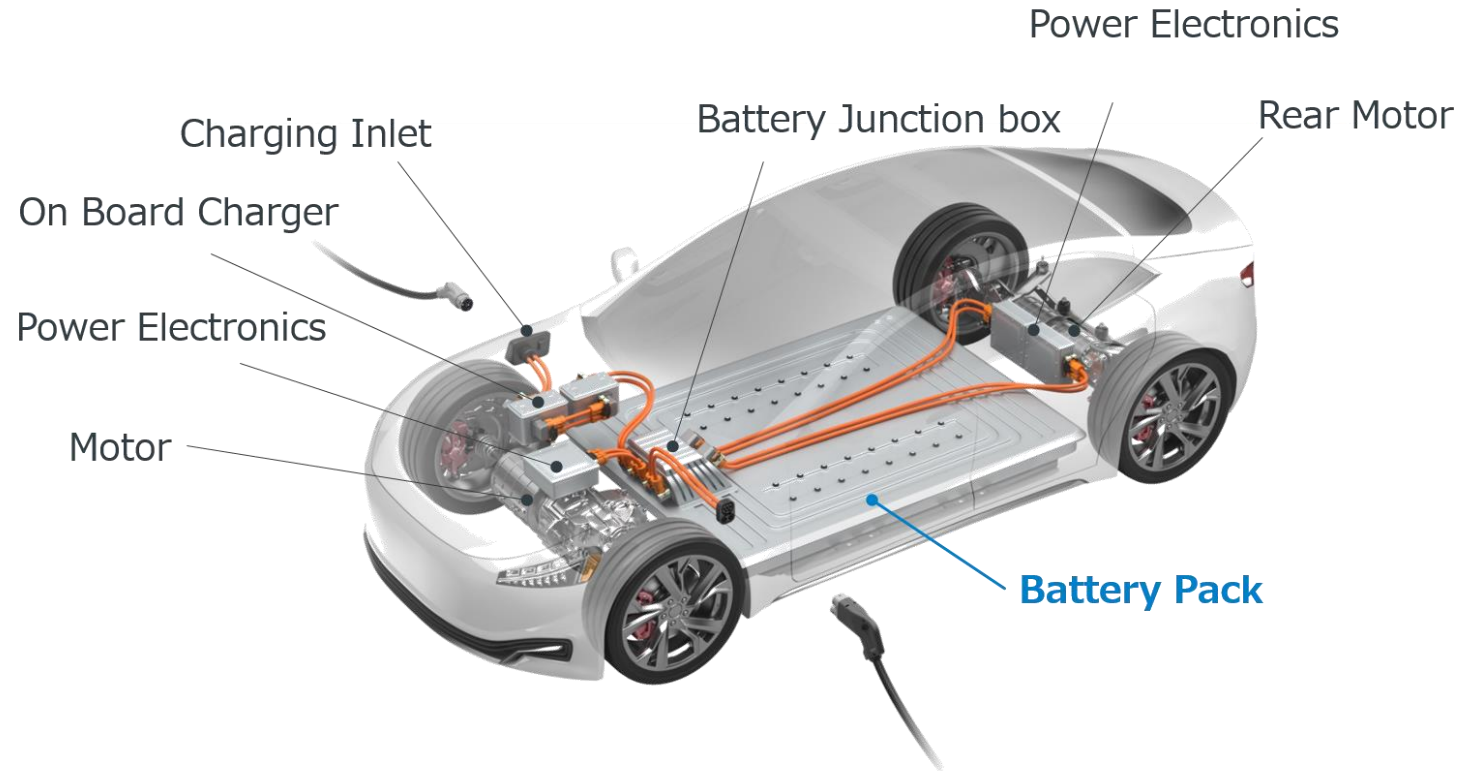


[© petovarga - stock.adobe.com]

[FROST & SULLIVAN, "Electronic Test and Measurement Market, Forecast to 2022"
United States: Frost & Sullivan, Aug. 2018.]

Motivation II

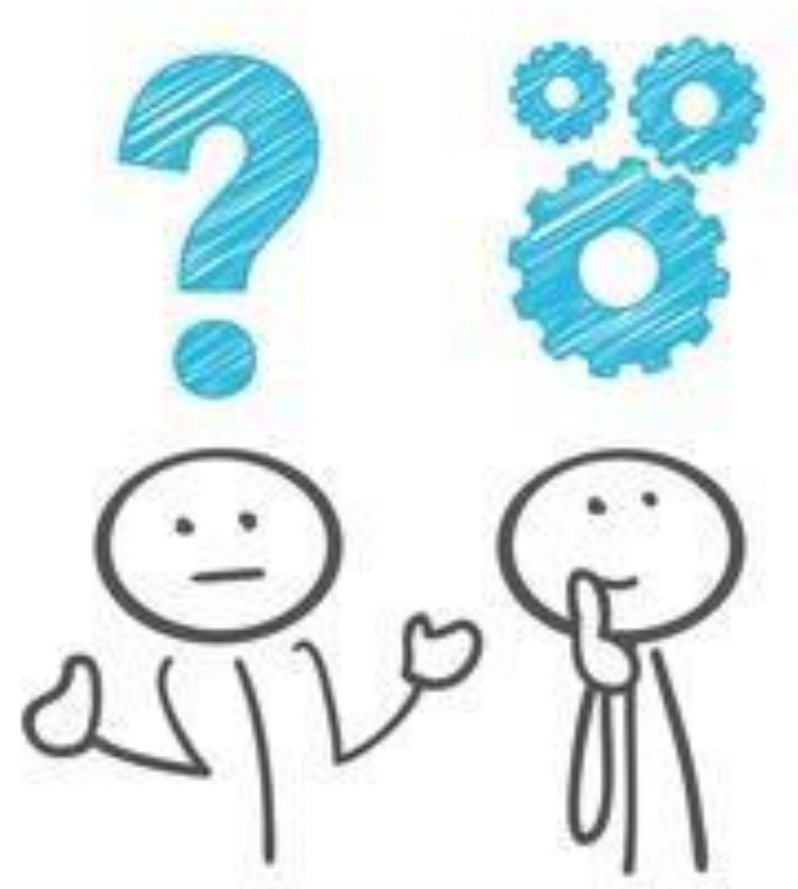
- ▶ E-Mobilität erfordert neue weitreichende Messungen z.B. im Bereich der Antriebstechnik
- ▶ Ziele:
 - Hohe Effizienz
 - Maximale Leistung
 - Erweiterter Dynamikbereich
- ▶ Notwendig für die Entwicklung solcher System ist eine präzise Messtechnik



[https://www.jae.com/en/connector-special/ev_phev_batterysystem]

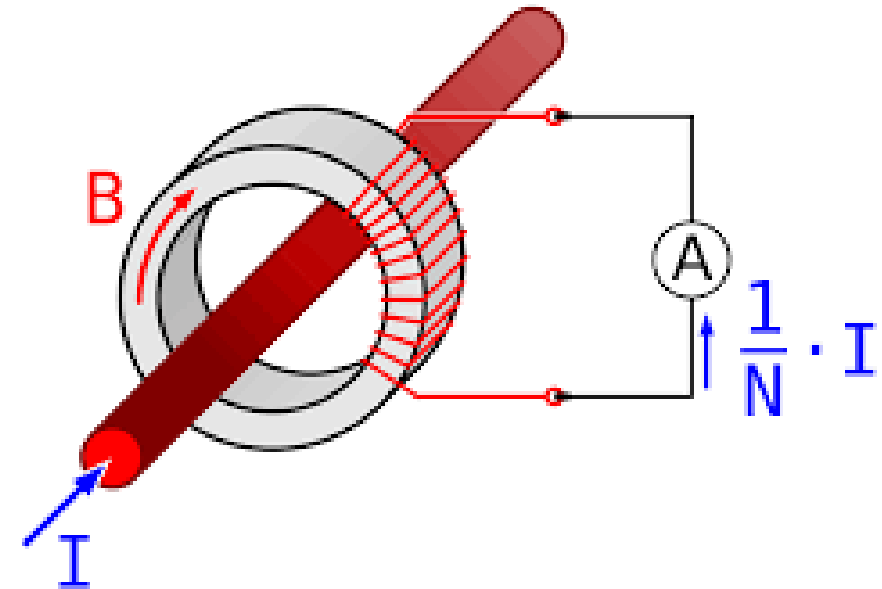
Herausforderung

- ▶ Messung von Strömen im Bereich der E-Mobilität
 - Gleichstrom und Wechselstrom bis mehrere kA
 - Oberwellen mit Frequenzen im kHz-Bereich
 - Dynamische Signale wie z.B. Impulsströme
- ▶ Einsatz von Stromwandler zur berührungslosen Messung von Gleich- und Wechselströmen
 - Hoher Messbereiche bezüglich Strom und Frequenz
 - Hohe Präzision im ppm Bereich



Stromwandler - Messprinzip

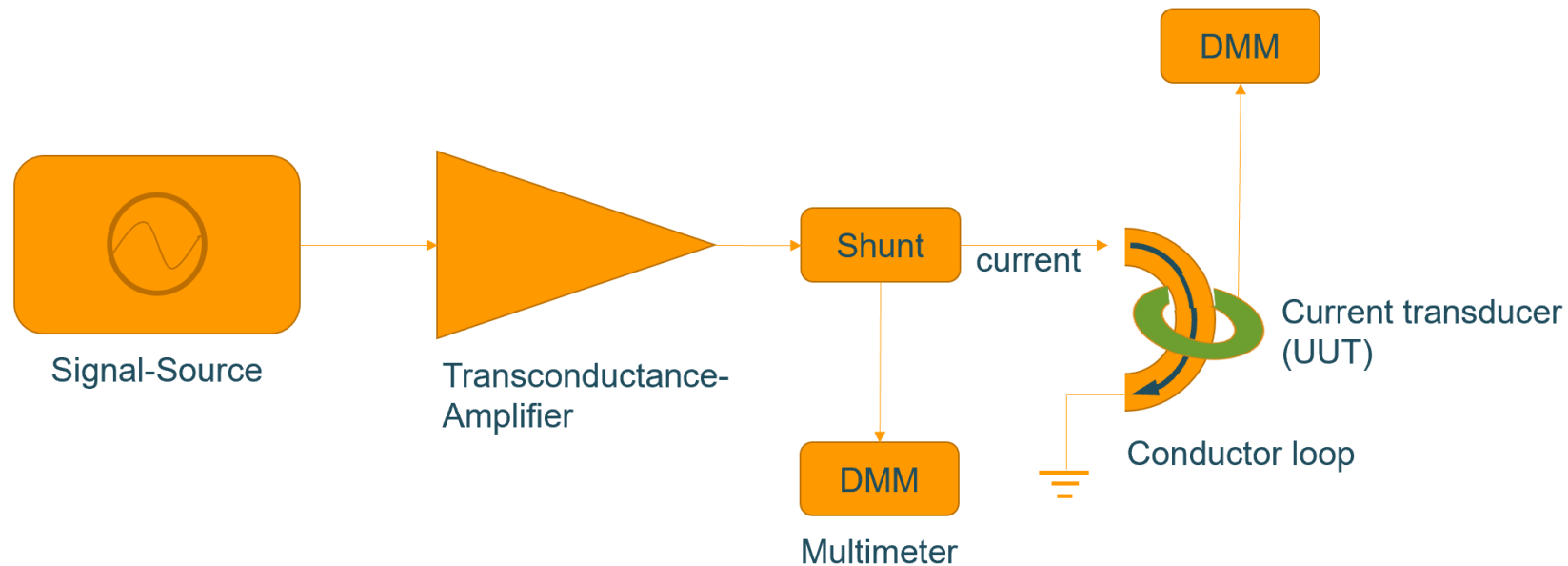
- ▶ Berührungslose Messung
- ▶ Zu messender Strom erzeugt ein Magnetfeld, dass über unterschiedliche Verfahren ausgewertet werden kann
 - Hall Sensor
 - Induktive Kopplung
 - Flux-Gate Technologie
- ▶ Charakterisierung über Strom- und Frequenzabhängiges Übertragungsverhältnis



[<https://testguy.net/content/190-Current-Transformer-Basics-Understanding-Ratio-Polarity-and-Class>]

Stromwandler – Kalibrierung I

- ▶ Erzeugung eines präzisen Referenzsignals
- ▶ Charakterisierung des Wandlers bei unterschiedlichen Frequenzen und Strömen im gesamten Bereichen
- ▶ Ermittlung des Übersetzungsverhältnisses



Stromwandler – Kalibrierung II

- Erzeugung des Referenzstromes über Transkonduktanzverstärker

Type	Max. current	Max. frequency	Compliance voltage
Datron 4600	11 A	5 kHz	2 V _{RMS}
Guildline Instruments 7810	100 A	2 MHz	8 V _{RMS}
Fluke 52120A	120 A	10 kHz	4.5 V _{RMS}
Clarke Hess Trans-conductance amplifier 8200	100 A	100 kHz	7 V _{RMS}

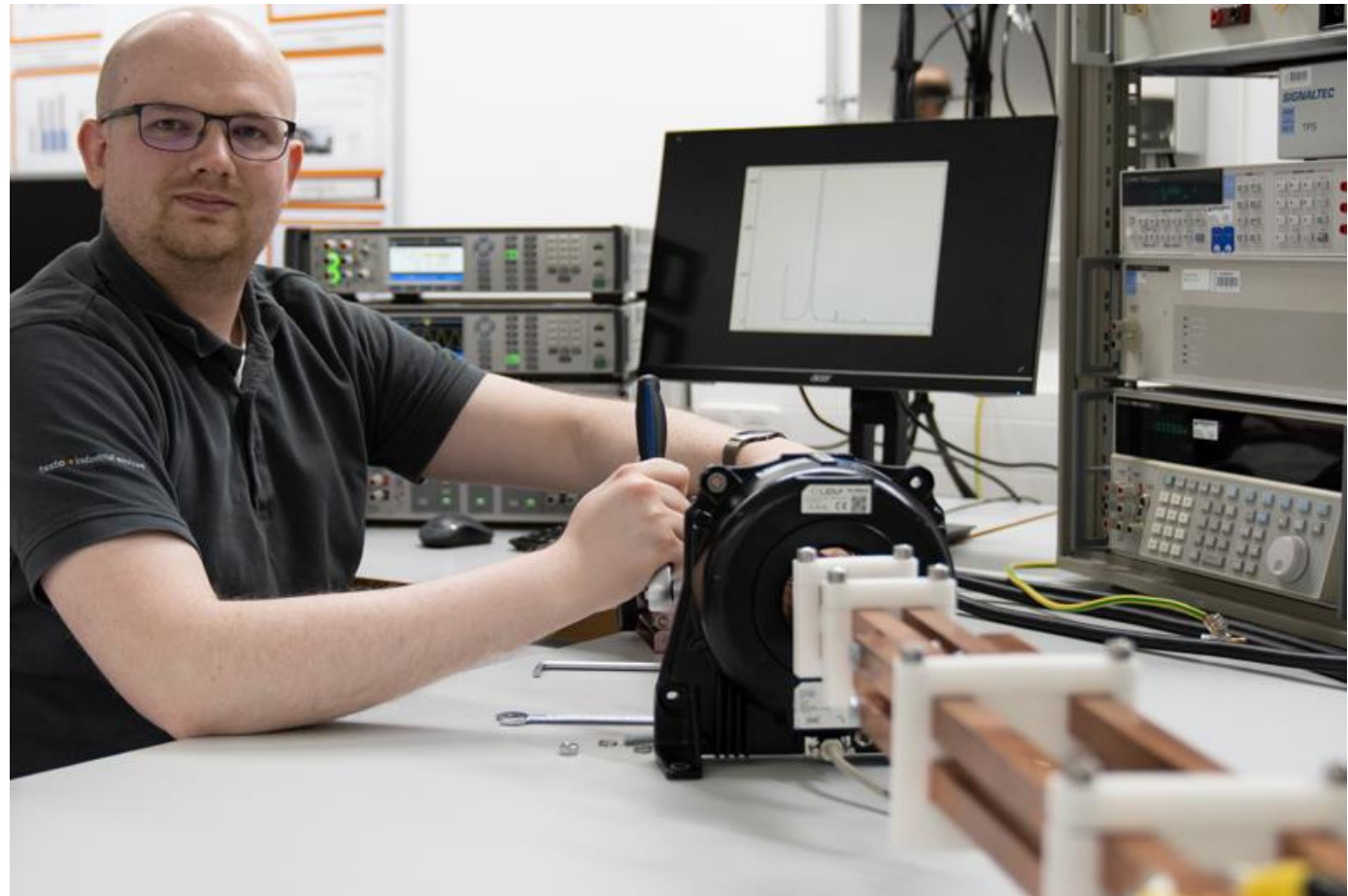
- Multiplikation des Referenzstroms über Leiterschleifen durch den Stromwandler
- Problem:
Durch die benötigte Kabellänge und den Windungsdurchmesser erhöht sich die Induktivität des Aufbaus

=> Höhere Compliance Spannung notwendig



Anforderungen Kalibriereinrichtung

- ▶ Ströme bis 2000 A
- ▶ Frequenz bis 10 kHz
- ▶ Geringe Messunsicherheit unter 100ppm
- ▶ Rückführbar
- ▶ Erzeugung von dynamischen Signalverläufen



Messaufbau – Mechanisch I

- ▶ Anforderungen:
 - Stromtragfähigkeit
 - Wiederholgenauigkeit
 - Mittige Ausrichtung in der Durchführung des Stromwandlers
 - Geringe Induktivität
 - Hohe Packungsdichte



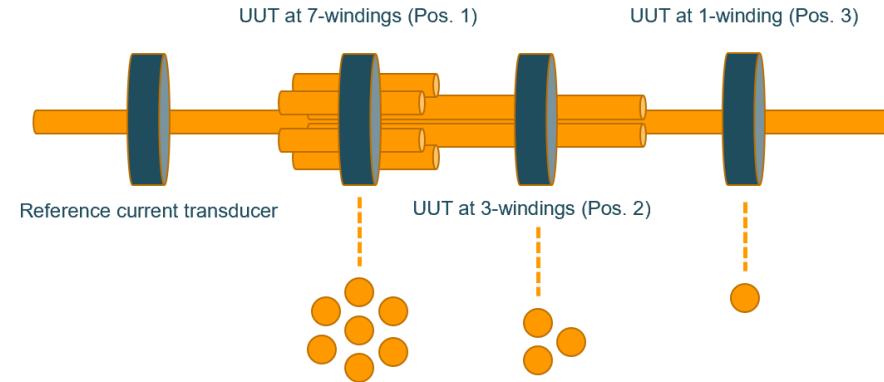
Messaufbau – Mechanisch I

- ▶ Anforderungen:
 - Stromtragfähigkeit
 - Wiederholgenauigkeit
 - Mittige Ausrichtung in der Durchführung des Stromwandlers
 - Geringe Induktivität
 - Hohe Packungsdichte



Messaufbau – Mechanisch I

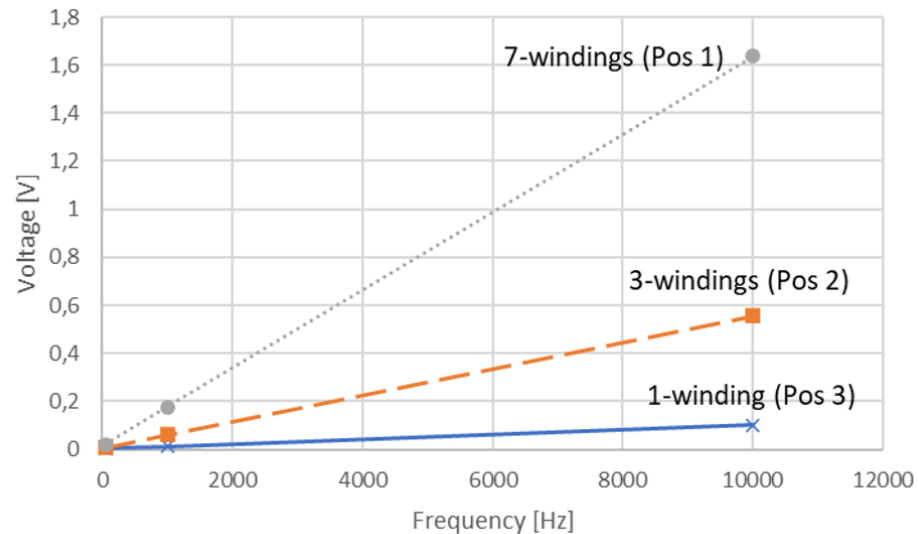
- ▶ Anforderungen:
 - Stromtragfähigkeit
 - Wiederholgenauigkeit
 - Mittige Ausrichtung in der Durchführung des Stromwandlers
 - Geringe Induktivität
 - Hohe Packungsdichte



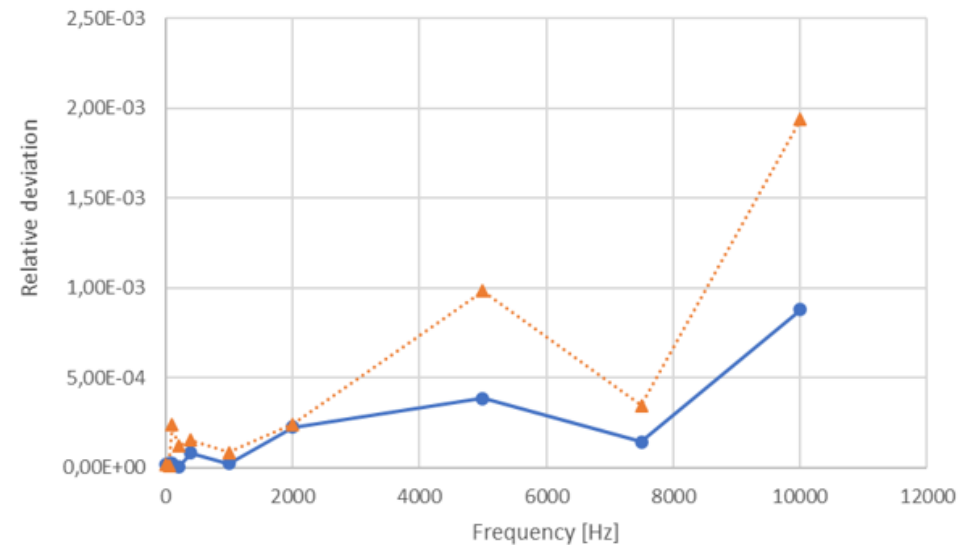
Messaufbau – Mechanisch II



- ▶ Impedanzverhalten des gewählten mechanischen Aufbaus kann stufenweise angepasst werden (links)
- ▶ Mittige (Innerhalb 1 cm) und wiederholbare Positionierung des Leiterschleifenpaketes möglich



Frequenz-Spannungsverlauf der unterschiedlichen Abschnitte der Leiterschleife. Gemessen mit einem konstanten Strom von 1 A

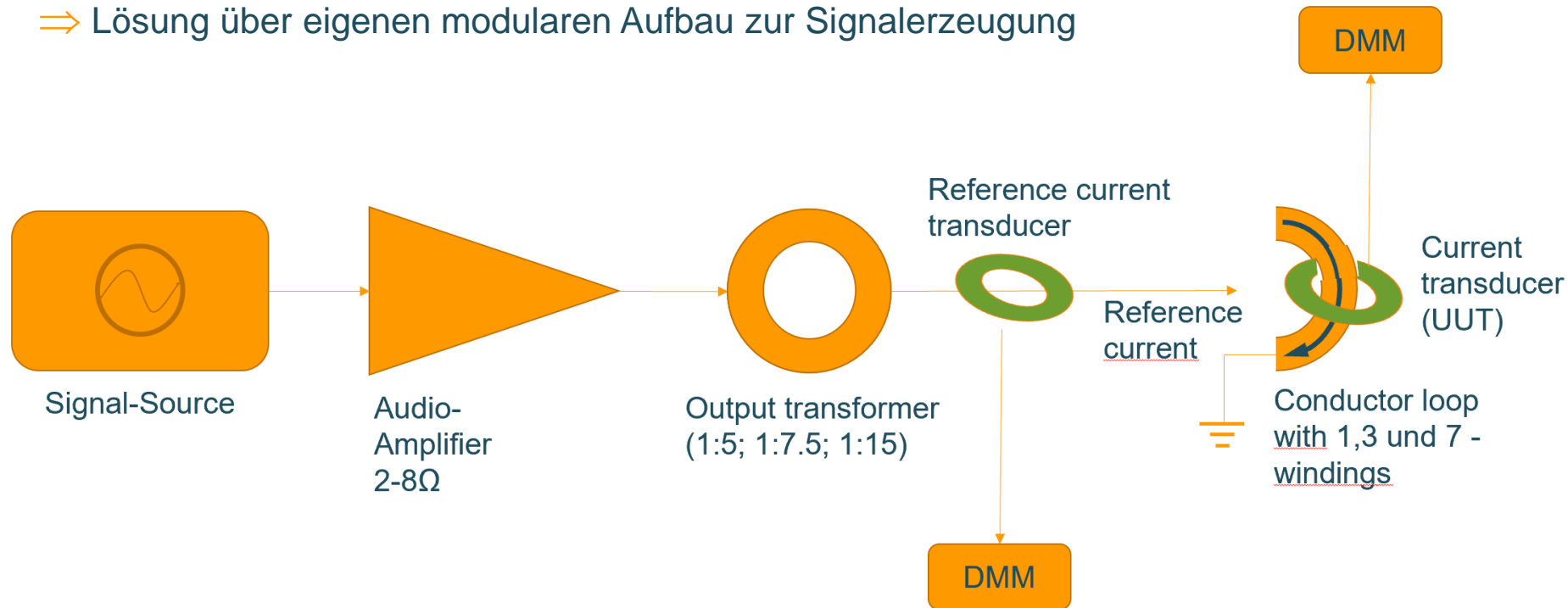


Relative Abweichung des gemessenen Stroms bei einer nicht mittigen Leiterdurchführung durch den Stromwandler (Blau – 1 cm off-center Orientierung; Orange - 2 cm off-center Orientierung).

Messaufbau – Signalerzeugung I

- ▶ Verfügbare Transkonduktanzverstärker sehr unflexibel
 - Fixe Compliance Spannung
 - Fester Ausgangswiderstand

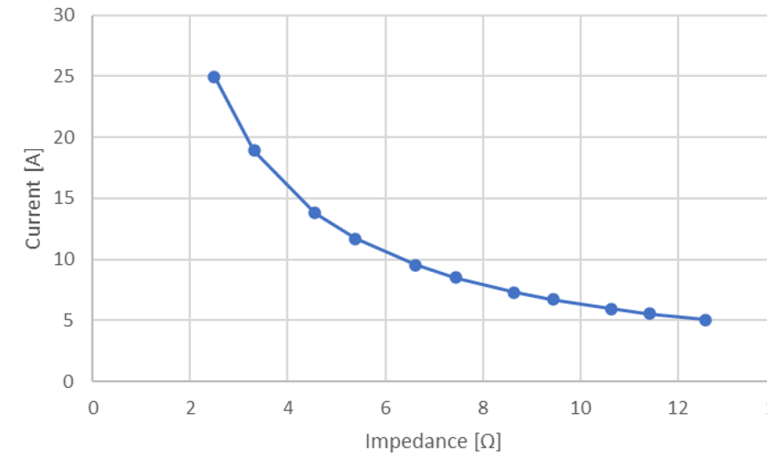
⇒ Lösung über eigenen modularen Aufbau zur Signalerzeugung



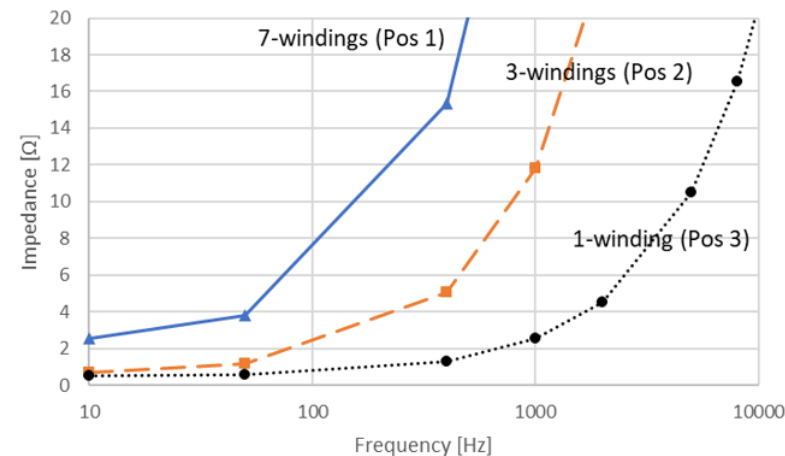
Messaufbau – Signalerzeugung II



- ▶ Audioverstärker
 - Hohe Signalreinheit
 - Nötige Ausgangsleistung von 10 kW
 - Ausgelegt auf dynamische Signale
- ▶ Ausgangsübertrager
 - Anpassung der Ausgangsimpedanz von 2 Ω - 8 Ω auf Impedanz der mechanischen Leiterschleife
 - Transformation des Ausgangsstroms
 - Unterschiedliche Transformatoren für unterschiedliche Strom-Frequenzbereiche



Ausgangsstroms des Audio-Verstärkers bei unterschiedlichen Lastimpedanzen.

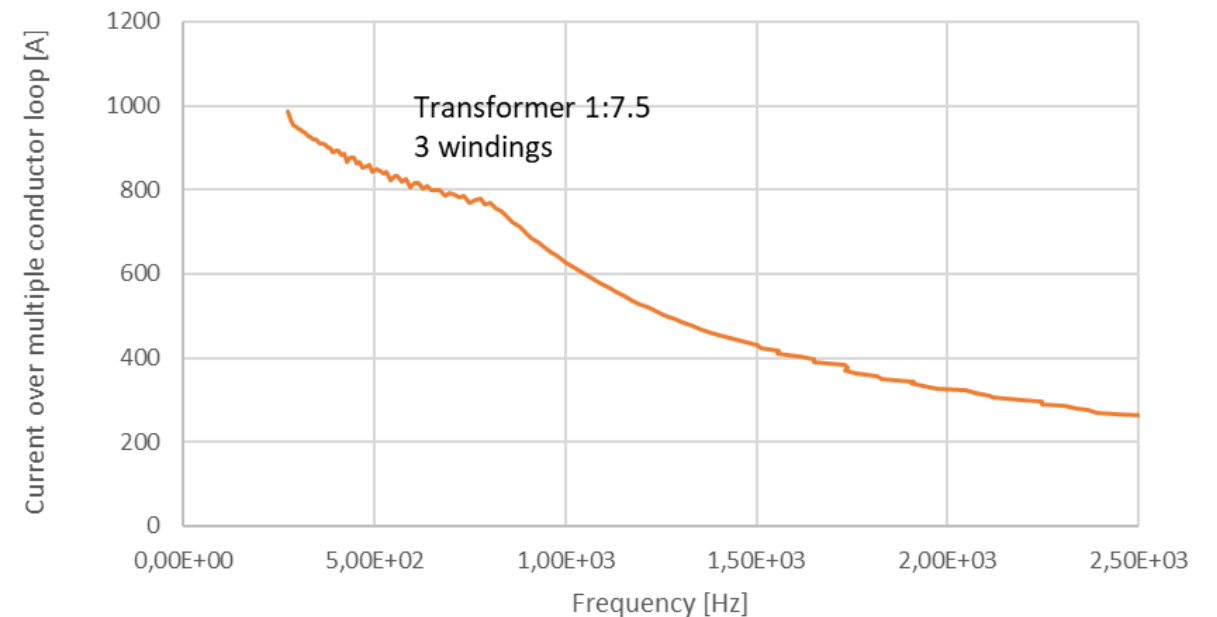
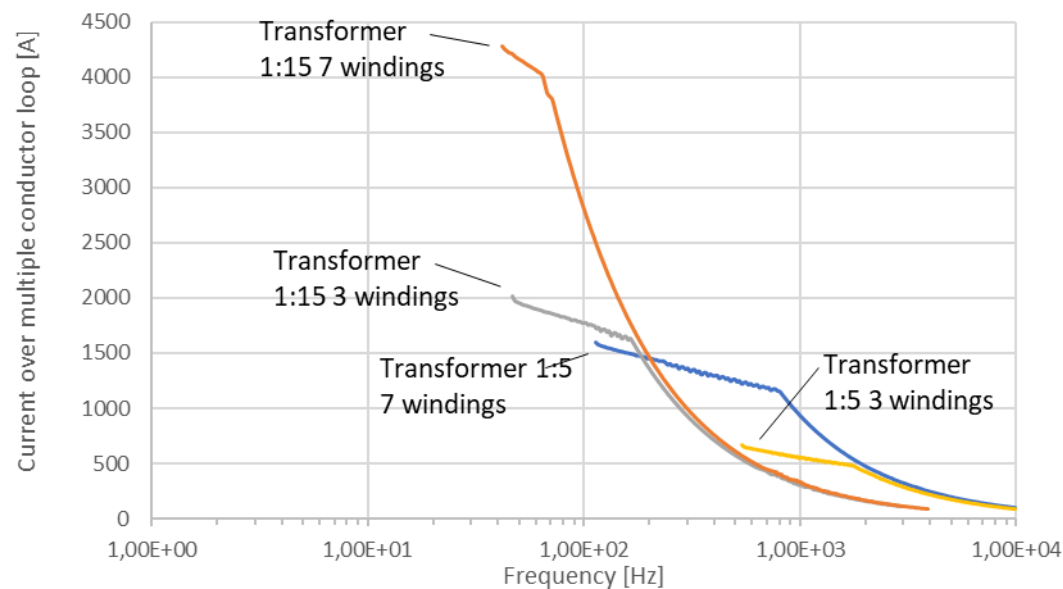


Transformierte Impedanz der jeweiligen Abschnitte der Leiterschleife am Eingang des Audio-Verstärkers bei einem Ausgangsübertrager mit Widnungsverhältnis 1:15

Charakterisierung I



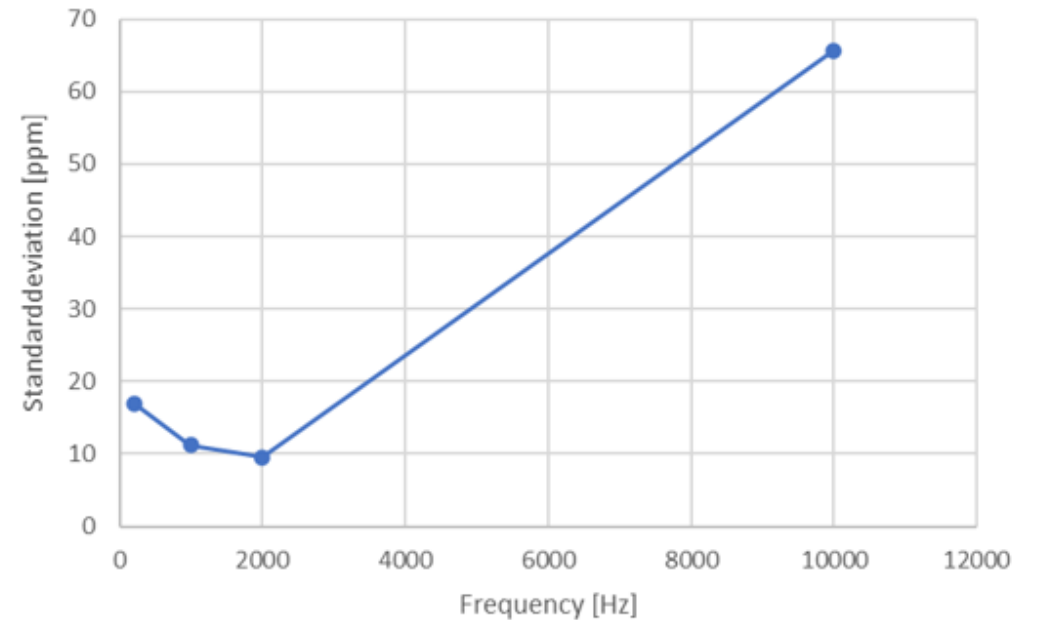
- ▶ Ströme über 4000 A erzeugbar
- ▶ Frequenzen bis 10 kHz erzeugbar
- ▶ Dynamische Signale mit Frequenzbestandteilen von 50 Hz – 2 kHz bei einem Grundsignal von 800 A
- ▶ Flexible erweiterbar durch andere Übertragungsverhältnisse der Ausgangsübertrager



Charakterisierung II

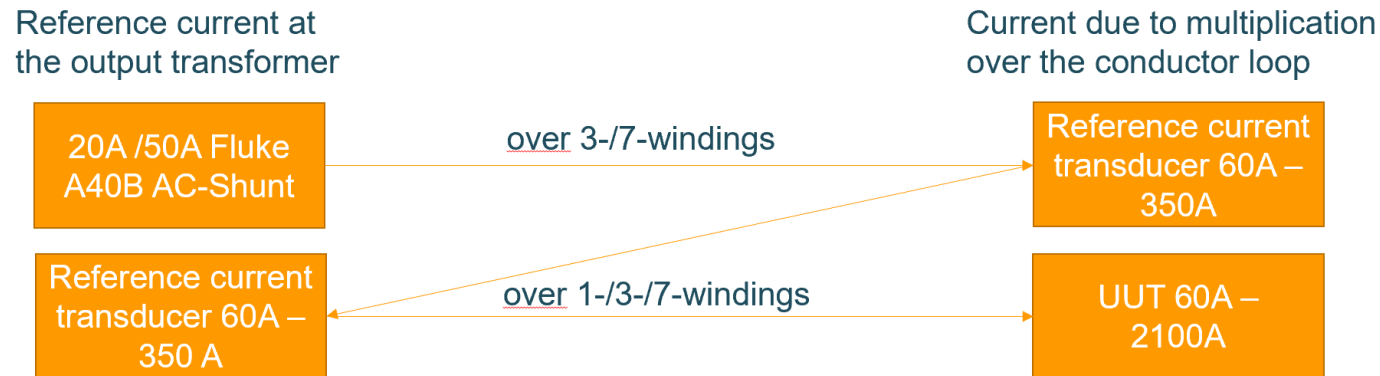


- ▶ Stabilitätsbetrachtung zur Ermöglichung kleinster Messunsicherheiten
 - Stabilität bis 10 kHz sehr gut
- ▶ Klirrfaktor gemäß Hersteller unter 0,05%



Rückführung

- ▶ Ermittlung des referenzwertes über integrierten Referenzwandler
- ▶ Kalibrierung des Referenzwandlers im Bootstrapping-Verfahren [1]



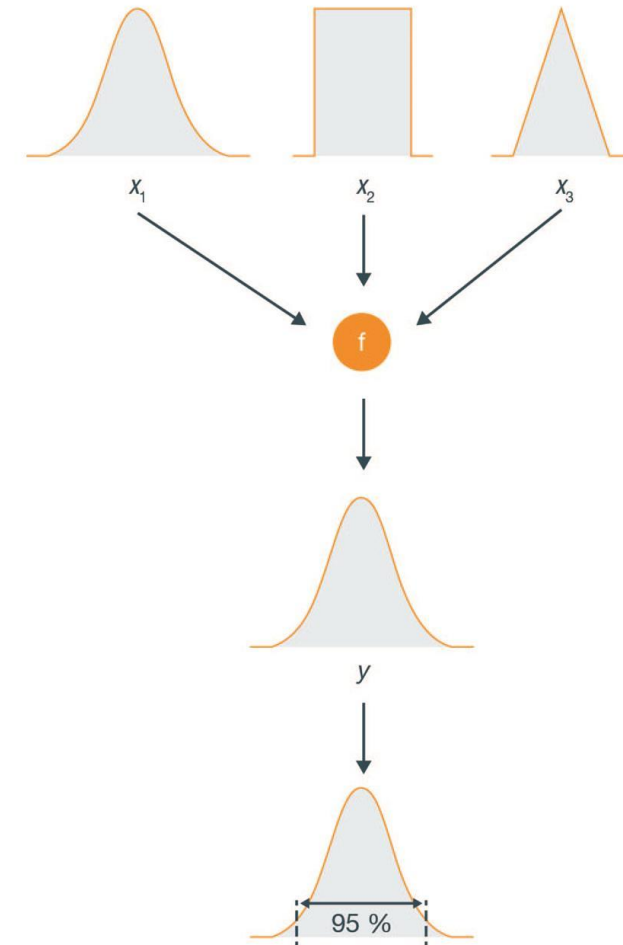
- ▶ Rückführung über PTB kalibrierte AC-Shunts bis 2100 A und 10 kHz

[1] Y. Chen et al., "Entwicklung und Verifikation eines breitbandigen Referenzstromwandlersatzes für Ströme von 10 A bis 2000 A und 9 kHz," 316. PTB Seminar zu aktuellen Fortschritten von Kalibrierverfahren im Nieder- und Hochfrequenzbereich 2020, September 03.2020, Braunschweig, Germany.

Messunsicherheitsbetrachtung



- ▶ Berücksichtigung von
 - Bootstrapping Rückführung
 - Einsatz mehrerer Windungen und damit verbundener dezentraler Ausrichtung einzelner Leiter im UUT
 - Messung des Referenz- und Prüflingsstroms
 - Kurz- und Langzeitstabilität des Referenzsignals
 - Endliche Positioniergenauigkeit des eingesetzten Referenzwandlers
- => Messunsicherheiten im Bereich von 90ppm – 410 ppm werden erreicht



Zusammenfassung

- ▶ Messaufbau für die Kalibrierung von Stromwandlern
 - 2000 A bei 50 Hz/60 Hz
 - 900 A bis 1 kHz
 - Dynamische Signale mit Oberwellen bis 10 kHz
- ▶ Mechanischer wiederholgenauer Aufbau
 - Unterschiedliche Abschnitte für unterschiedliche Wandlerdurchmesser
- ▶ Rückführung über Bootstrapping-Verfahren
- ▶ Messunsicherheiten zwischen 90 ppm – 410 ppm

