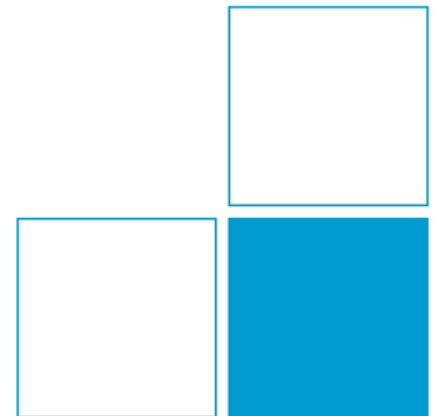


Verbesserte Messeinrichtung für die Kalibrierung von Brückennormalen im Frequenzbereich von 225 Hz bis 5 kHz

Florian Beug, Axel Kölling, Harald Moser, Michael Hinz

303. PTB-Seminar
Aktuelle Fortschritte von Kalibrierverfahren
im Nieder- und Hochfrequenzbereich
Braunschweig, 17. Mai 2017



Einleitung und Motivation statische Brückennormale

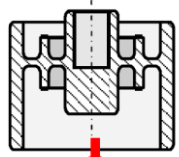
Alter und neuer Messaufbau für Brückennormal Kalibrierungen

Ergebnisse und Unsicherheitsanalyse der Kalibriermessplätze

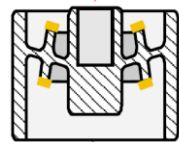
Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Elektrische Messungen mit Dehnungsmessstreifen- (DMS-) Aufnehmern

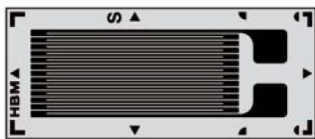
DMS-Aufnehmer



Messkörper

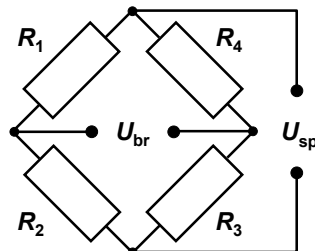


Eingeleitete Kraft führt zur Dehnung



Wandlung Dehnung in Widerstandsänderung

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon$$



Widerstandsänderung wird in messbare Spannung umgewandelt

$$\frac{U_{br}}{U_{sp}} = \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4} \right)$$

Typische Werte:

$$R_i = 350 \, \Omega, \quad U_{sp} = 10 \, \text{V}$$

Einfaches Beispiel: DMS R_1 und R_3 werden gestreckt, R_2 und R_4 werden gestaucht

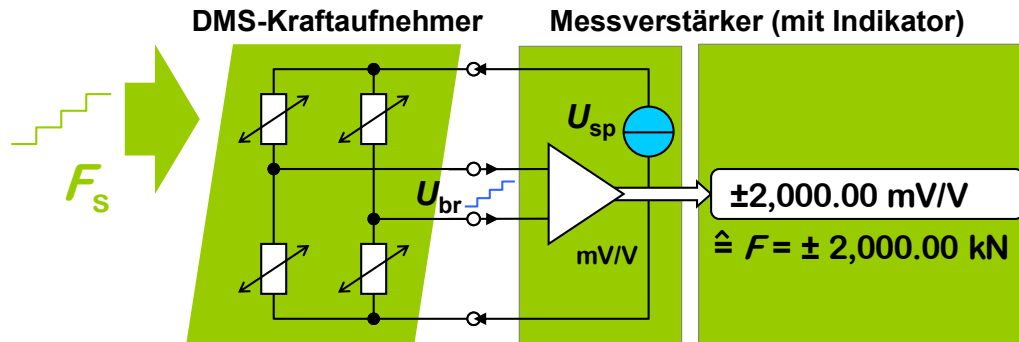
$$\Delta R_1 = \Delta R_3 = -\Delta R_2 = -\Delta R_4 = 0,7 \, \Omega$$

$$\rightarrow U_{br} = \left(\frac{350,7 \, \Omega}{700 \, \Omega} - \frac{349,3 \, \Omega}{700 \, \Omega} \right) \cdot 10 \, \text{V} = 20 \, \text{mV}$$

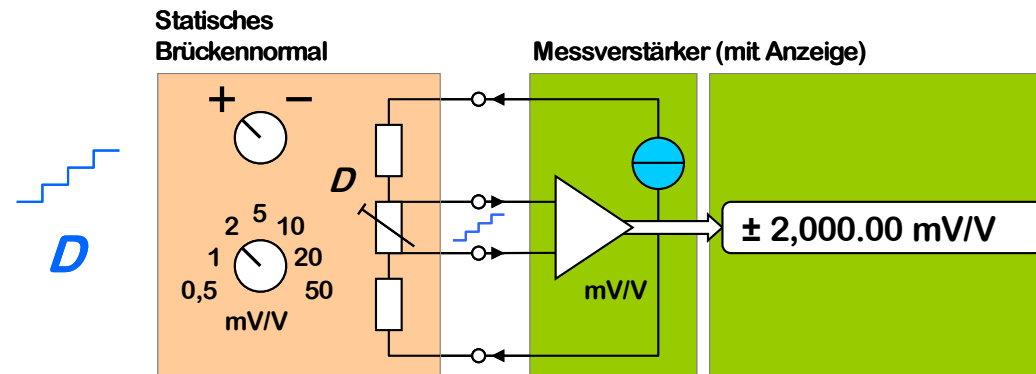
$$\frac{U_{br}}{U_{sp}} = \frac{20 \, \text{mV}}{10 \, \text{V}} = 2 \frac{\text{mV}}{\text{V}} = 2 \cdot 10^{-3}$$

Größe	Verhältnis	Unsicherheit (k=2)
$\frac{U_{br}}{U_{sp}}$	$2 \frac{\text{mV}}{\text{V}}$	$\pm 0,01 \frac{\mu\text{V}}{\text{V}}$
	$2 \frac{\text{mV}}{\text{V}}$	$\pm 10 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mV}}{\text{V}}$
	$\frac{1}{500} \frac{\text{V}}{\text{V}}$	$\pm 1 \cdot 10^{-8} \frac{\text{V}}{\text{V}}$

- Messverstärker für DMS Aufnehmer und deren statische Kalibrierung



- DMS-Aufnehmer mit DC Speisespannung
- Brückenverstimmung U_{br}/U_{sp} ist eine **rationetrische Größe** in mV/V (z.B. 2 mV/V „full scale“)



- Das statische Brückennormal simuliert eine definierte (**rationetrische**) Brückenverstimmung in **mV/V** zur Kalibrierung von Messverstärkern.

Einleitung und Motivation statische Brückennormale

Alter und neuer Messaufbau für Brückennormal Kalibrierungen

Ergebnisse und Unsicherheitsanalyse der Kalibriermessplätze

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

- Letzte Publikation zu statischen Brückennormal Kalibrierungen:

Development of calibration equipment

RAM Vol. 6 (1990) No. 1

Calibration of bridge standards for use in strain-gage measurements

by Günther Ramm

Within the field of stress analysis the signal provided by the measuring element, usually a strain gage bridge, is normally at a low level not exceeding a few millivolts. This signal must therefore be amplified with a calibrated amplifier before it can be recorded. A common method of calibrating the amplifier system prior to using it for measurement is to substitute the strain gage bridge with a bridge standard which supplies an accurate signal. Obviously the accuracy of the bridge standard itself is a critical feature in the whole process. This article describes the method used for accuracy tests made on the BN 100 Bridge Calibration Unit.

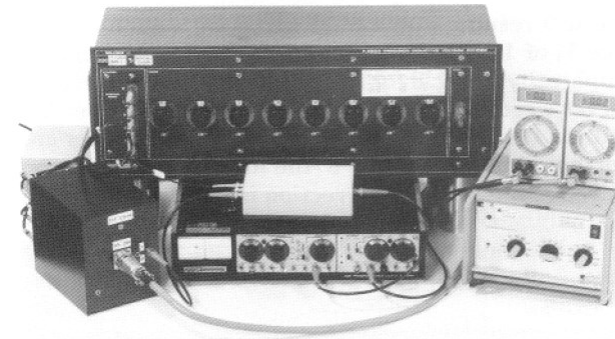
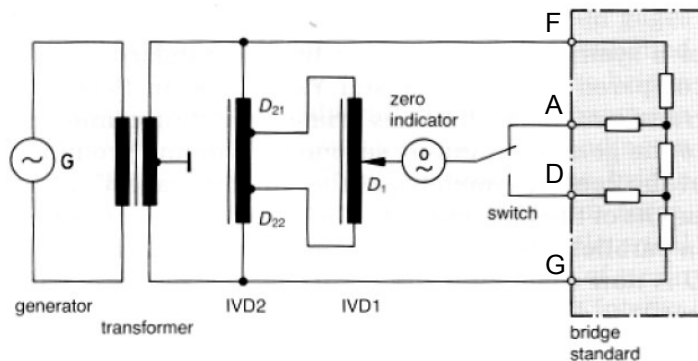
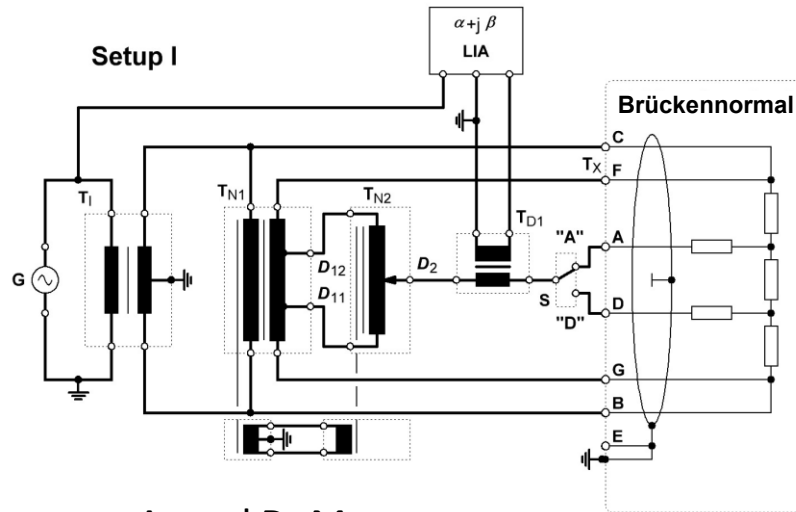


Fig. 6: Test equipment incorporating the circuit shown in Fig. 5

- Publikation von Günther Ramm aus 1990 war zuletzt die Referenz für Brückennormal Kalibrierungen.
- Dabei wird das Spannungsverhältnis zwischen dem Eingang F-G und dem Ausgang A-D kalibriert.

• Der alte Messaufbau (Setup I) für die Brückennormal-Kalibrierung



A- und D- Messung:

$$\frac{U_{AG}}{U_{sp}} = D_{11} + (D_{12} - D_{11}) \cdot D_{2A} + \alpha_{0A}$$

$$\frac{U_{DG}}{U_{sp}} = D_{11} + (D_{12} - D_{11}) \cdot D_{2D} + \alpha_{0D}$$

Das Teilungsverhältnis des Kalibrierteilers T_{N1} ist:

$$D_{12} - D_{11} = \frac{1}{25}$$

- Zwei separate Verhältnismessungen sind nötig um das A-D zu F-G Spannungsverhältnis durch Differenzbildung zu ermitteln.
- Die A- und D-Potentiale müssen dafür während der Zeitspanne beider Messungen stabil sein und sich nicht durch das Umschalten beeinflussen lassen.

Kalibrierergebnis: Brückennormal Verhältnis:

$$D_{X,S1} = \frac{U_{AD,S1}}{U_{sp}} = \frac{U_{AG} - U_{DG}}{U_{sp}}$$

Darstellung des Kalibrierergebnisses in Form der Korrektur K_{S1} (Differenz zum Nennverhältnis) in mV/V:

$$K_{S1} = D_{X,S1} - D_{nX}$$

- Kunden und andere NMIs beziehen sich auf Publikation von 1990

17th International Congress of Metrology, 04004 (2015)
 DOI: 10.1051/metrology/201504004
 © Owned by the authors, published by EDP Sciences, 2015

Calibration of bridge standard for strain gauge bridge amplifier

David Corninboeuf^a

Federal Institute of Metrology METAS, Lindenweg 50, 3003 Bern-Wabern, Switzerland

Abstract. This paper presents an automatic system developed at METAS for the calibration of bridge standards used as reference for strain gauge bridge amplifiers. This system, based on a comparison method, uses a PXI chassis with two acquisition boards to balance the bridge automatically. The use of two specific inductive voltage dividers is required to reach the very high accuracy of this type of bridge standard. With a ratio of 2 mV/V, an input voltage of 10 V at 225 Hz, the relative uncertainty is 8 ppm, which is 16 ppb of the input voltage.

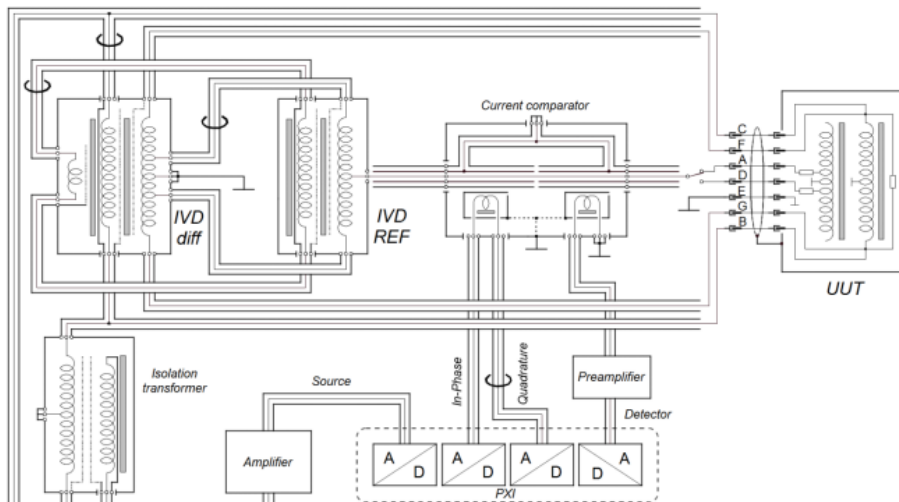


Figure 4. Schematic of the bridge to calibrate the bridge standard

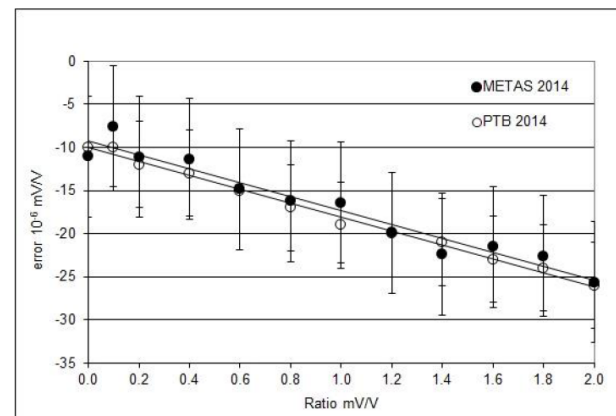


Figure 5. Comparison of the measurement results from METAS and PTB about the error of a bridge standard for the ratio 0.0 mV/V to 2.0 mV/V

- Die METAS Kalibriereinrichtung adaptiert die separate A- und D-Messung.
- Die Unsicherheiten sind geringfügig höher $15 \cdot 10^{-6}$ mV/V als die per Kalibrierung an METAS weitergegebene Unsicherheit von $10 \cdot 10^{-6}$ mV/V.

• Anforderung an neuen Messplatz und Publikation (CPEM 2016/TIM 2017):

Erweitertes Anforderungsprofil für neuen Messplatz:

- Reduzierung von Kalibrier-Aufwand und -Zeit
- Erweiterung des Frequenzbereiches von 225 Hz → 4,8 kHz

Die Ergebnisse wurden auf der CPEM 2016 präsentiert und in TIM publiziert.

Die neue Publikation bildet die Basis für die CMC-Einträge und dient als Referenz für Kalibrierkunden.

[IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 66, no. 6, pp. 1531-1538, June 2017. doi: 10.1109/TIM.2017.2653520]

IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 66, NO. 6, JUNE 2017

1531

A New Calibration Transformer and Measurement Setup for Bridge Standard Calibrations Up To 5 kHz

M. Florian Beug, Axel Kölling, and Harald Moser

Abstract—This paper presents an improved calibration setup for static bridge standards with a carrier frequency supply voltage in the frequency range between 225 Hz and 5 kHz. In the past, the small bridge differential voltage in the mV/V range was calibrated in two subsequent voltage ratio calibrations. However, this procedure is time-consuming and only works reliably if both voltages are stable over time. For this purpose, a new setup was developed that is able to measure the differential voltage of the bridge standard in one single measurement. This reduces the calibration time by approximately two thirds, thereby also reducing the uncertainty.

Index Terms—Carrier frequency supply voltage, inductive voltage divider (IVD), static bridge standard calibration.

I. INTRODUCTION

PRECISE measurements of static mechanical quantities, such as force and torque, are based on strain gauge transducers. These transducers, in a Wheatstone bridge configuration, generate a voltage ratio in mV/V that is proportional to the mechanical measurand. The voltage ratio is amplified and measured by means of a corresponding bridge amplifier and indicator device [1]. For the calibration of bridge amplifiers, so-called bridge standards are used that simulate a ratiometric strain gauge bridge signal in mV/V with high accuracy when calibrated accordingly [2]. The internal working principle of static bridge standards is based on either inductive voltage divider (IVD) or resistive voltage divider (for details, see Fig. 1). Based on our static bridge standard calibration experience, we previously presented a dynamic bridge standard that is able to calibrate bridge amplifiers for dynamic mechanical measurements [3]. However, since dynamic measurements cannot compete with static measurements in terms of measurement uncertainty, the calibration requirements are reduced.

Transducers use typical full-scale nominal values in the range of 1–10 mV/V, and consequently, these values are also required for bridge standards. Accordingly, voltage ratios in the range from 1/100 to 1/1000 are required for bridge standard calibrations that can be performed based on IVDs.

In the past, bridge standard calibration at PTB was based on a calibration setup that is described in detail in [2]. Currently, we use an improved calibration setup [4] that not only

Manuscript received July 8, 2016; revised November 15, 2016; accepted November 16, 2016. Date of publication February 17, 2017; date of current version May 10, 2017. The Associate Editor coordinating the review process was Dr. Behmood Ghamsari.

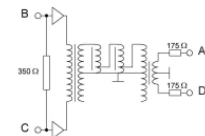
The authors are with the Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 38116 Braunschweig, Germany.

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online at <http://ieeexplore.ieee.org>.

Digital Object Identifier 10.1109/TIM.2017.2653520

0018-9456 © 2017 IEEE. Personal use is permitted, but republication/redistribution requires IEEE permission. See http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/index.html for more information.

(a) Inductive Bridge Standard



(b) Resistive Bridge Standard

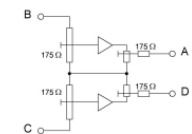


Fig. 1. Schematic of the internal structure of bridge standards based on (a) IVDs and (b) resistive voltage dividers.

improves the measurement uncertainty for higher measurement frequencies, but also reduces the calibration effort and time significantly. This new measurement setup will be described in detail and compared extensively to the old setup.

II. BRIDGE STANDARD CALIBRATION SETUPS

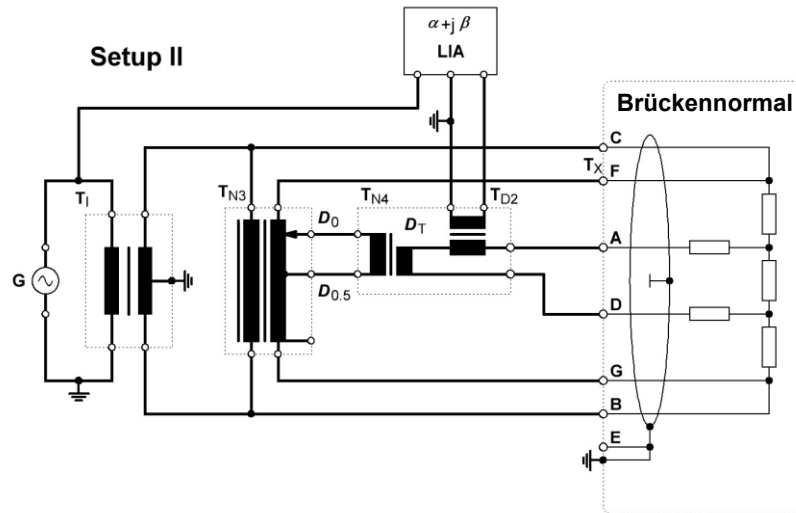
For the calibration of bridge standards in the range between 0 and 10 mV/V, it is beneficial to use cascaded voltage dividers, because (as described above) voltage ratios of 1/100, 1/1000 or even higher are needed. For the calibration of the bridge standard output voltage ratio, different calibration strategies are possible. Two calibration strategies that were used in different calibration setups will be presented in section II.A and section II.B, including their model equations and uncertainty budgets.

A. Calibration Setup I

The measurement setup for static bridge standard calibration that was used at PTB in the past [2] is shown in Fig. 2(a) (Setup I).

Kalibrierung von Brückennormalen

• Der neue Messaufbau (Setup II) für die Brückennormal-Kalibrierung



- Nur eine Messung ist nötig um das A-D zu F-G Spannungsverhältnis zu messen.
- Die A-D Spannungsdifferenz ist demnach direkt gemessen und unterliegt somit keinen Störungen durch Spannungsschwankungen bzgl. GND.
- Die Kalibrierzeit konnte um 2/3 im Vergleich zum alten Aufbau reduziert werden.

Das Kalibrierergebnis ergibt sich aus dem Abgleich des D_0 Wertes:

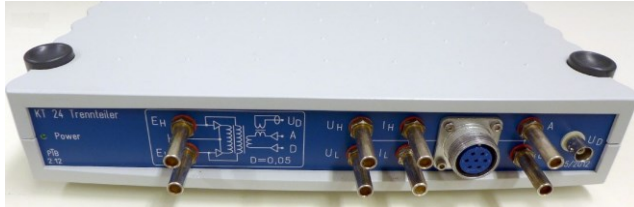
$$D_{X,S2} = \frac{U_{AD,S2}}{U_{sp}} = (D_0 - D_{0,5}) \cdot D_T + \alpha_{0,S2}$$

Dabei wird die Korrektur K_{S2} in mV/V direkt erhalten:

$$K_{S2} = D_{X,S2} - D_{nX}$$

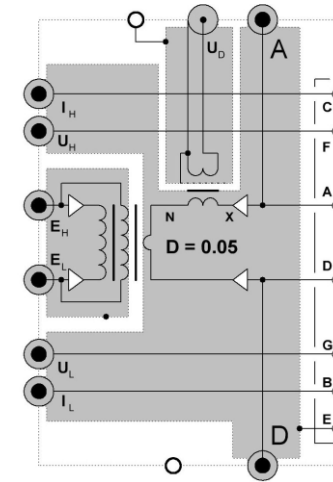
Kalibrierung von Brückennormalen

• Der neue PTB Messaufbau (Setup II)

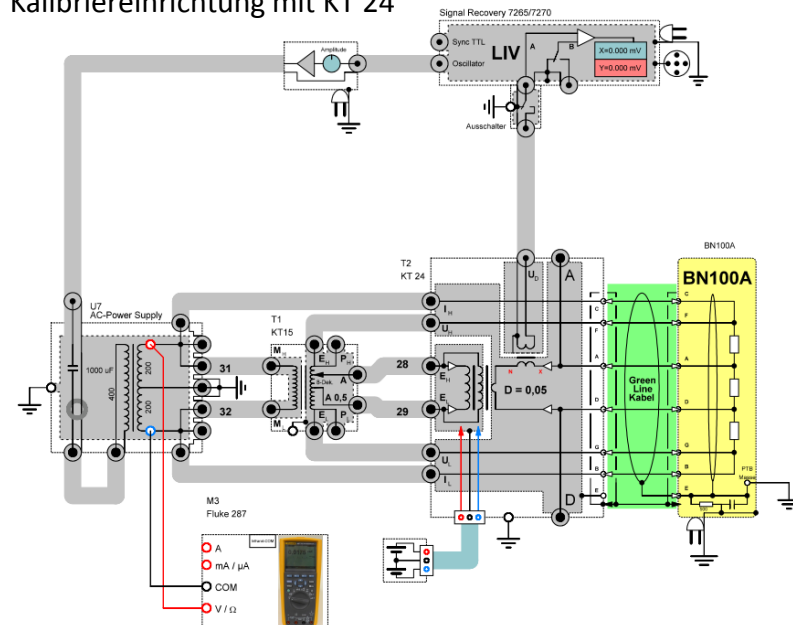


- Herzstück der neuen Kalibriereinrichtung ist der Kalibrier-Trennteiler KT 24 mit einem Teilungsverhältnis von 1/20.
- Der KT 24 wird in Reihe hinter dem acht-dekadischen Teiler Sullivan F9200 betrieben.
- Durch eine elektronisch gesteuerte Magnetisierungswicklung kann er direkt hinter den 8-dekadischen Teiler (KT 15) geschaltet werden ohne diesen zu belasten.
- Die Anschlüsse zu den A- und D-Potentialpunkten sind mit hochpräzisen Bufferverstärkern versehen (keine Belastung des Brückennormals).
- Der Auskoppelwandler ist im Gehäuse integriert wodurch die Komplexität des Messaufbaus reduziert wird.

KT 24 im Detail



Kalibriereinrichtung mit KT 24



Einleitung und Motivation statische Brückennormale

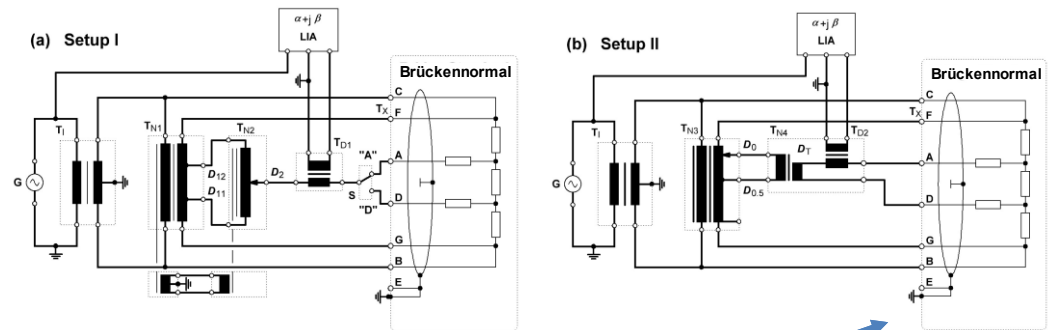
Alter und neuer Messaufbau für Brückennormal Kalibrierungen

Ergebnisse und Unsicherheitsanalyse der Kalibriermessplätze

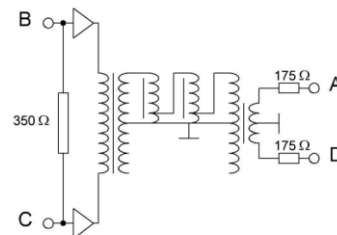
Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

• Brückennormal Kalibrierungen mit beiden Messplätzen

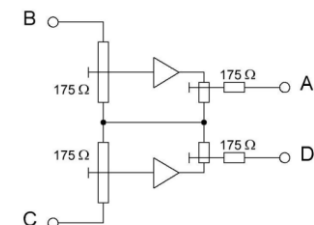
- Der alte (Setup I) und der neue Messplatz (Setup II) wurden unter Verwendung von drei verfügbaren Brückennormalen Charakterisiert.
- Die Brückennormale unterscheiden sich bzgl. Des internen Aufbaus (induktive bzw. resistive Spannungsteiler).
- Der interne BN-Aufbau hat Rückwirkungen auf die Kalibriermessplätze.
- Die im Folgenden angegebenen **Unsicherheiten** sind eine **Charakteristik des Messplatzes** bzgl. der in Verbindung mit dem jeweiligen Brückennormal (unter optimalen Bedingungen) erreichbaren Messunsicherheit.



Induktiver Aufbau



Resistiver Aufbau

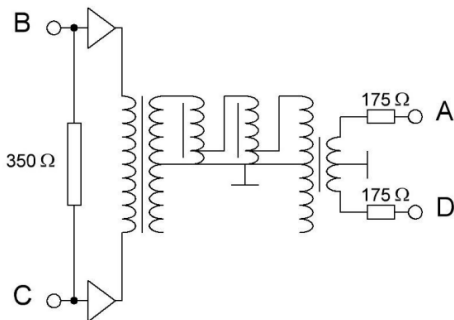


Vergleich der Kalibriermessplätze

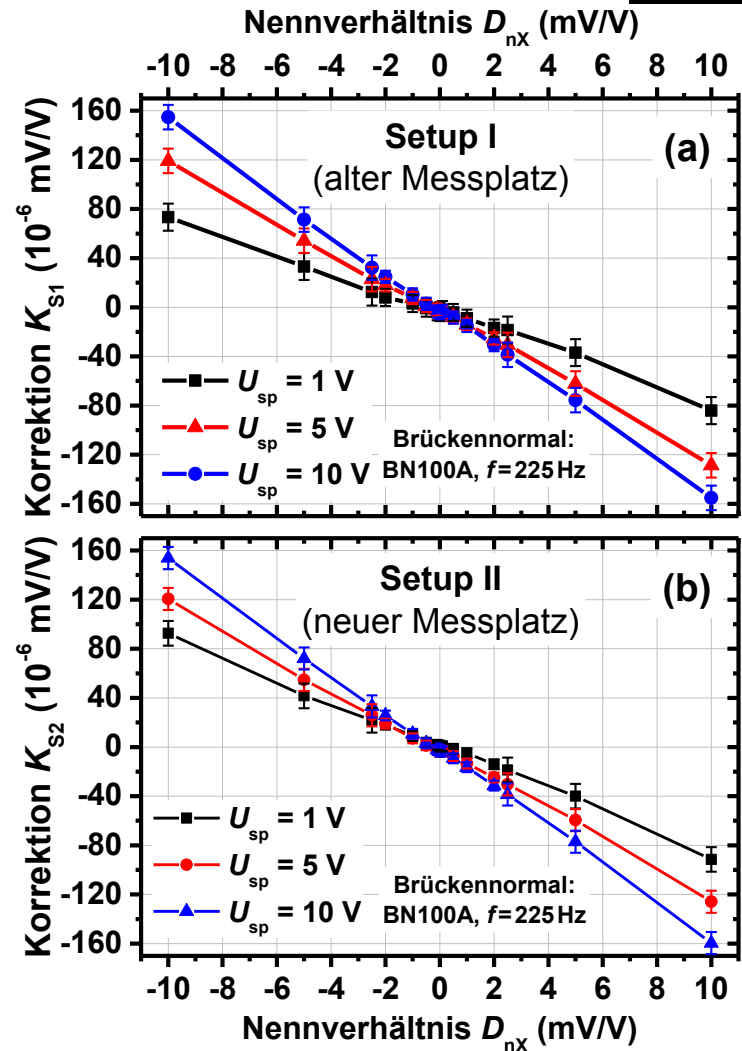
• Kalibrierung des induktiven Brückennormals BN100A



- Das Brückennormal BN100A basiert auf induktiven Spannungsteilern.
- Das hoch präzise BN100A wird ausschließlich bei der Messfrequenz $f = 225 \text{ Hz}$ betrieben.

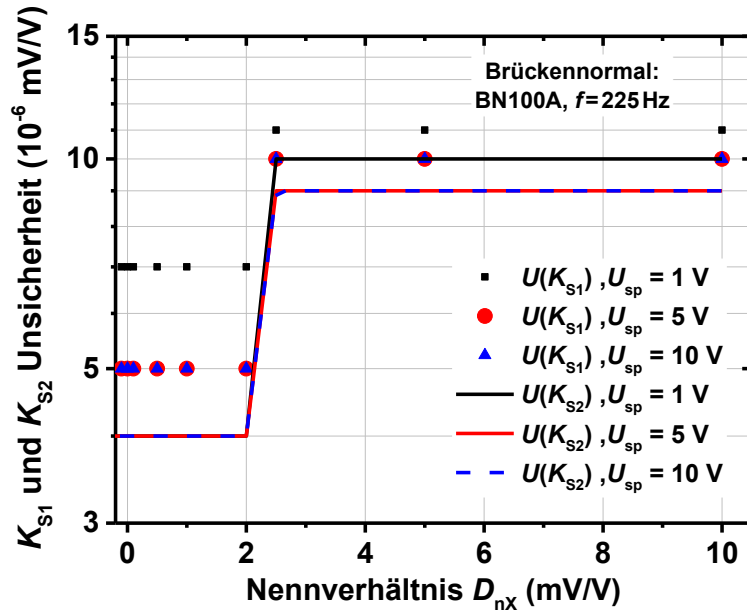


- Das BN100A ermöglicht durch die symmetrische Erdung am Ausgangsteiler auf beiden Kalibriermessplätzen sehr stabile Messungen.
- BN100A Kalibrierungen wurden für 1 V, 5 V, und 10 V Speisespannung durchgeführt.
- Kalibrierergebnisse zeigen die typische lineare Abhängigkeit mit einer negativen Steigung von $-7 \cdot 10^{-6}$ bis $-15 \cdot 10^{-6}$.



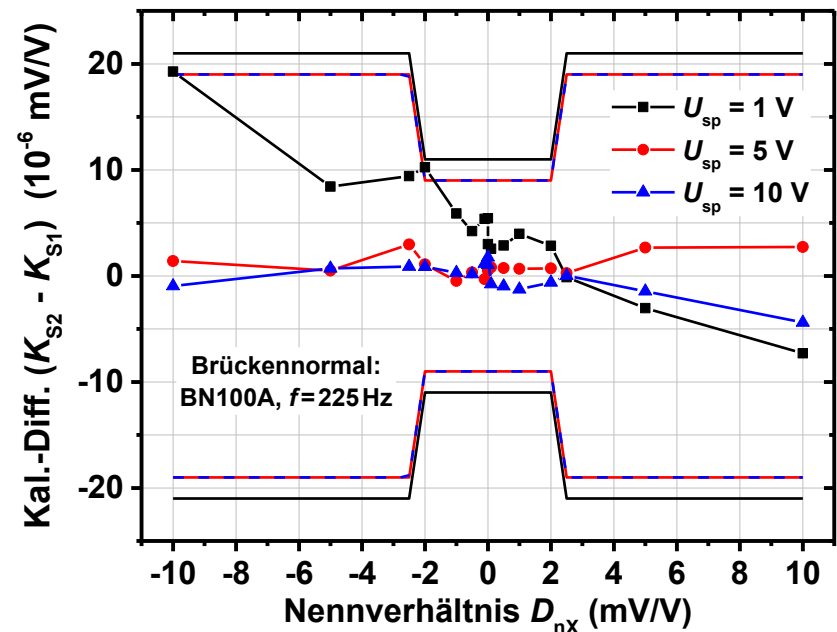
Vergleich der Kalibriermessplätze

• Kalibrierung des induktiven Brückennormals BN100A



- Die Kalibrierdifferenz $K_{S2} - K_{S1}$ zwischen den Kalibrierungen mit beiden Messplätzen ist für 1 V Speisespannung am größten.
- Dennoch bleibt die Kalibrierdifferenz innerhalb der Summe der jeweiligen Unsicherheiten $U(K_{S2}) + U(K_{S1})$.

- Die Messung des BN100A zeigte die geringsten erweiterten ($k=2$) Messunsicherheiten, die weitgehend unter $10 \cdot 10^{-6} \text{ mV/V}$ liegen und nur eine geringe Abhängigkeit von der Speisespannung zeigen.
- Die Unsicherheiten konnten durch den neuen Kalibrieraufbau geringfügig verkleinert werden.

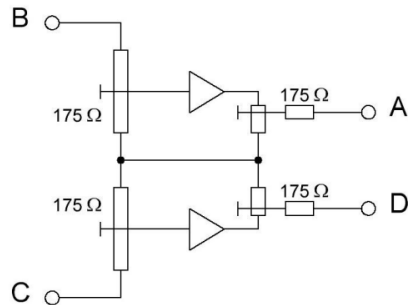


Vergleich der Kalibriermessplätze

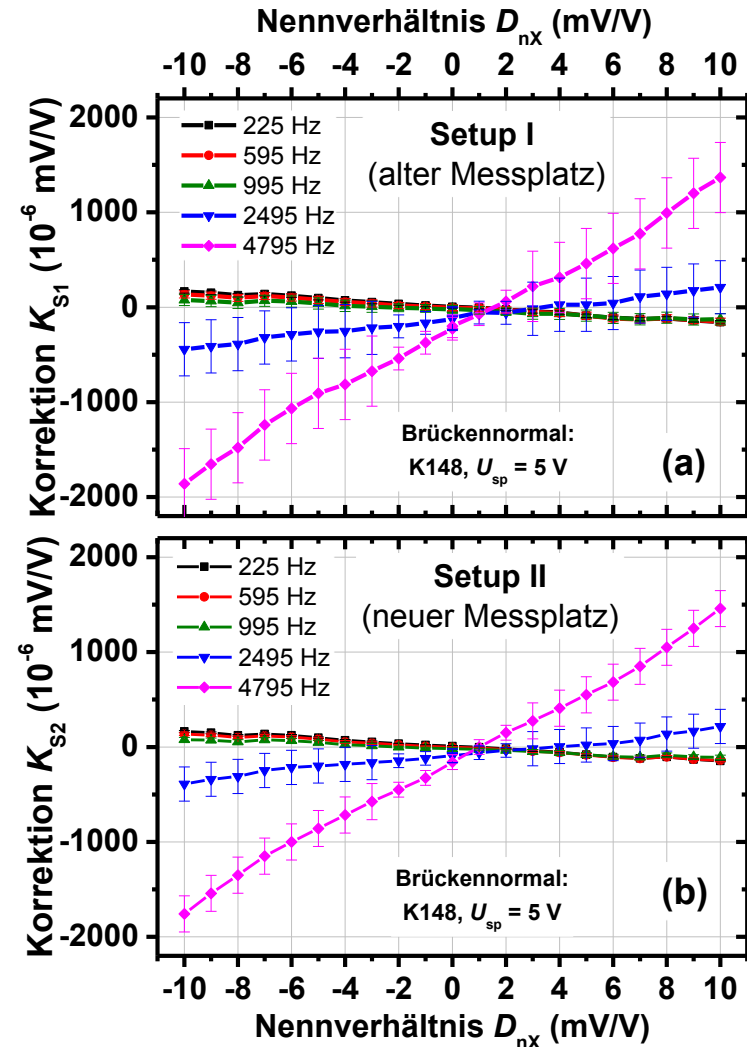
Kalibrierung des resistiven Brückennormals K148



- Das Brückennormal K148 basiert auf resistiven Spannungsteilern.

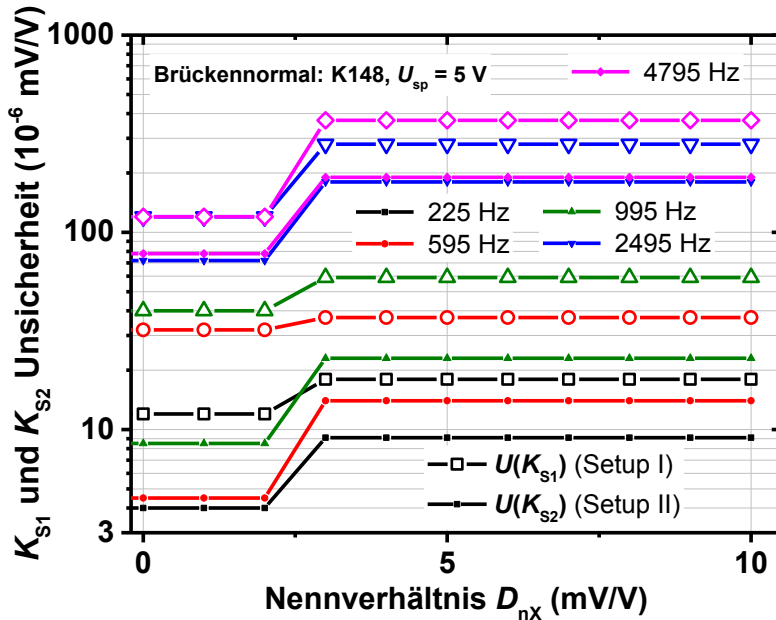


- Das K148 zeigt Korrekturen mit einer linearen Abhängigkeit vom Nominalwert:
 - mit negativer Steigung ($-16 \cdot 10^{-6}$ bis $-10 \cdot 10^{-6}$) für Frequenzen zwischen 225 Hz und 995 Hz,
 - und positiver Steigung für die Frequenzen 2495 Hz und 4795 Hz.
- Für ein resistives Brückennormal zeigt das K148 vergleichsweise stabile Messergebnisse mit dem alten Kalibriermessplatz.



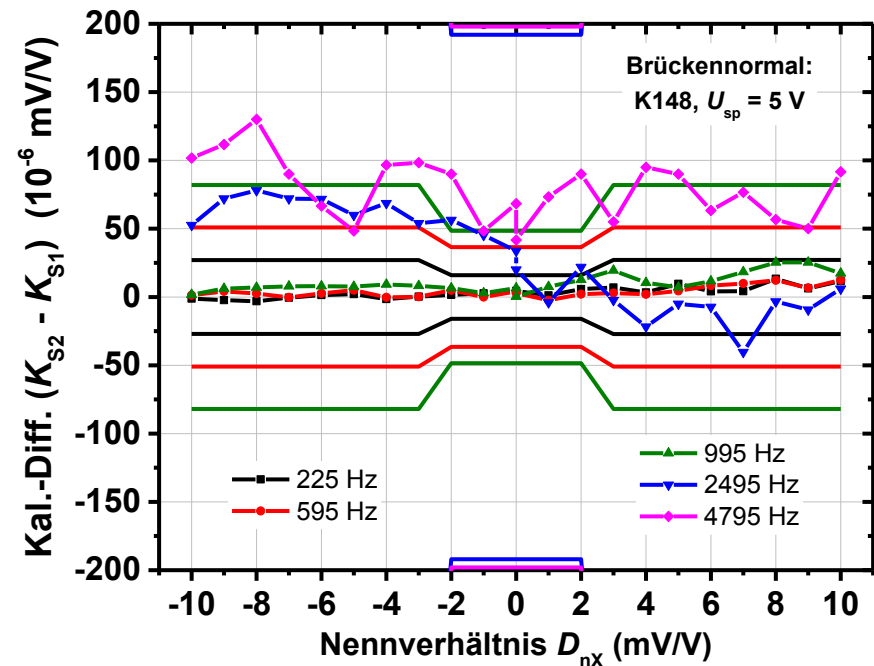
Vergleich der Kalibriermessplätze

Kalibrierung des resistiven Brückennormals K148



- Die Kalibrierdifferenz $K_{S2}-K_{S1}$ liegt innerhalb der Summe der Unsicherheiten $U(K_{S2})+U(K_{S1})$.
- Für höhere Frequenzen sind die Unsicherheitsgrenzen ($U(K_{S2})+U(K_{S1})$) nur am Rand des Graphen zu sehen.

- Die Unsicherheiten für K148 konnten mit dem neuen Messplatz um Faktoren von 2 bis 7 verbessert werden.
- Die Unsicherheit bei 225 Hz nähern sich denen des BN100A.

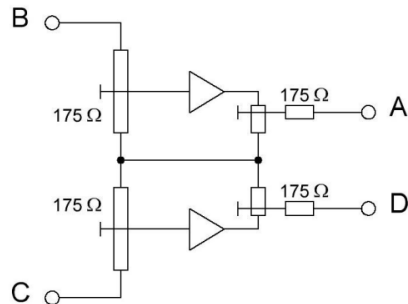


Vergleich der Kalibriermessplätze

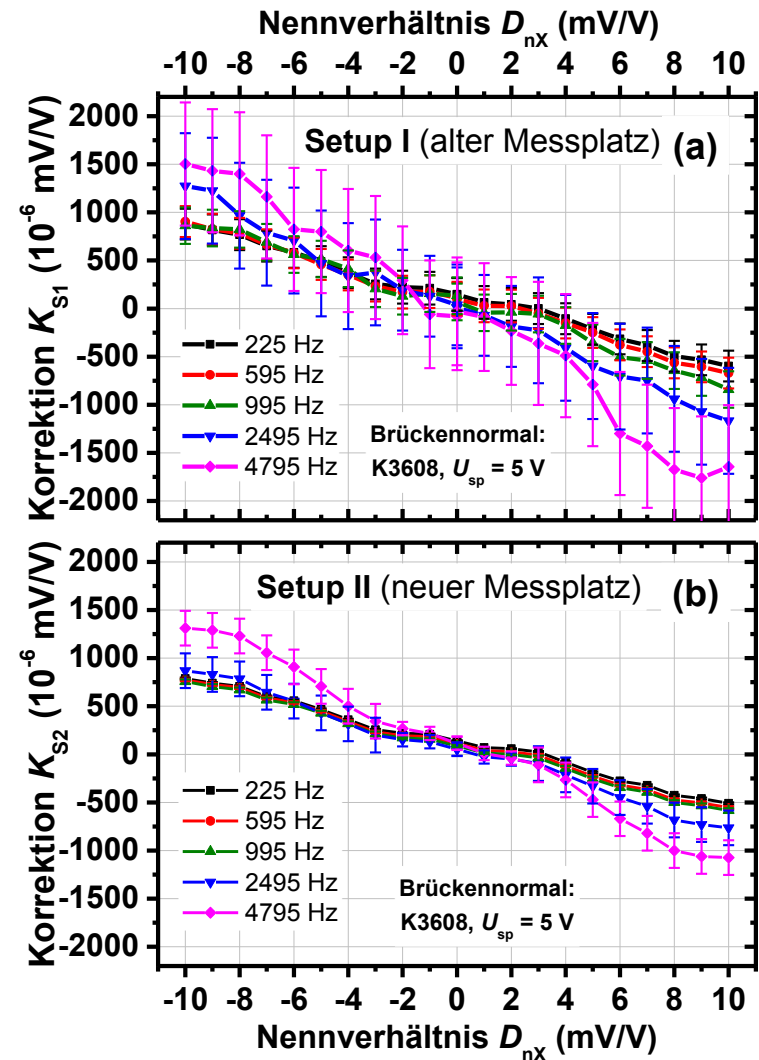
• Kalibrierung des resistiven Brückennormals K3608



- Das K3608 ist ebenfalls ein Brückennormal welches auf resistiven Spannungsteilern basiert.

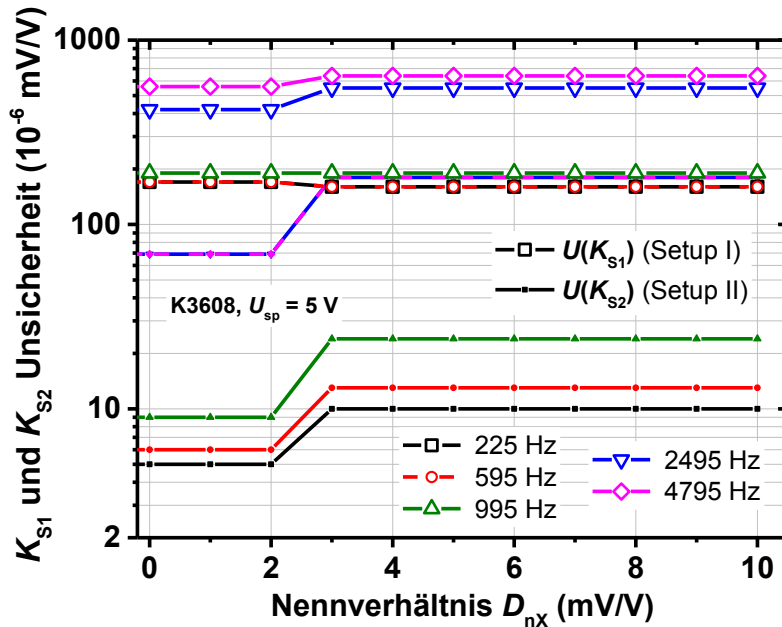


- Während der Kalibrierung mit dem alten Messaufbau (Setup I) konnten bei 15 maligen hin- und herschalten zwischen der A- und D-Messung sehr deutliche Potentialschwankungen dieser beiden Messungen beobachtet werden.
- Für den alten Messaufbau sind die Unsicherheiten durch diese Potentialvariationen insbesondere bei höheren Messfrequenzen deutlich erhöht.



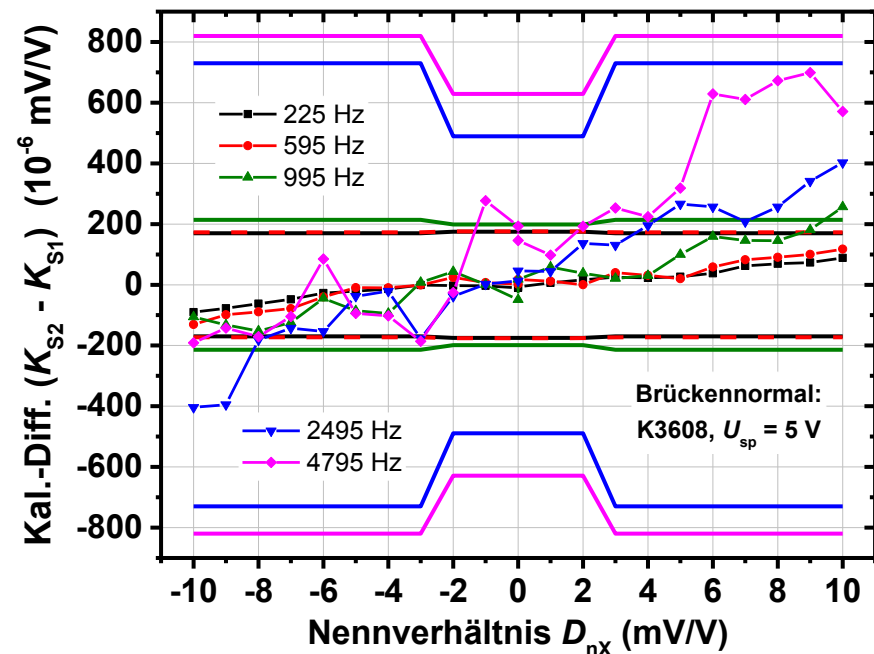
Vergleich der Kalibriermessplätze

• Kalibrierung des resistiven Brückennormals K3608



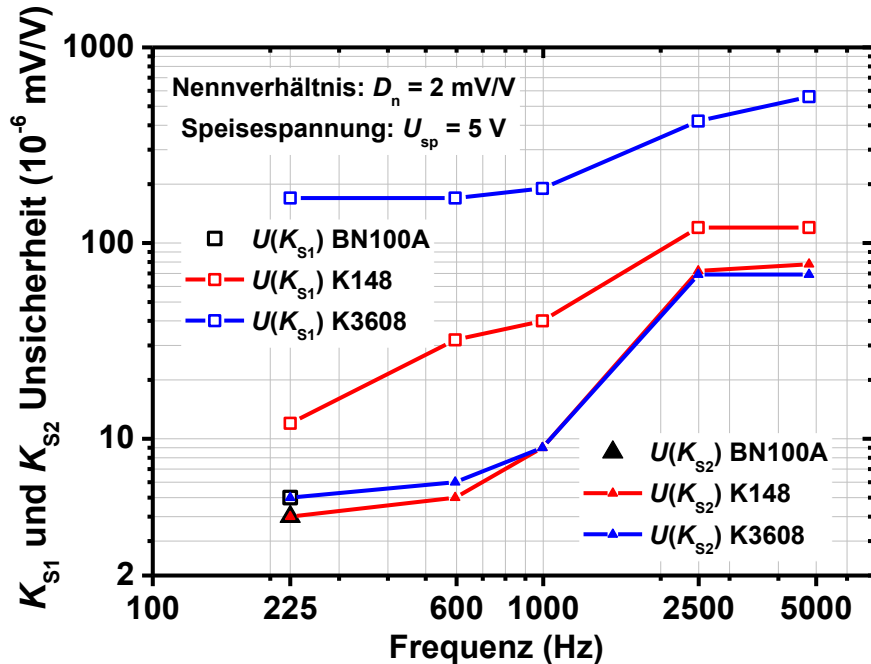
- Der Unterschied zwischen den Kalibriermessungen mit den beiden Messplätzen ist für das K3608 am größten.
- Dennoch stimmen die Kalibrierungen mit beiden Messplätzen innerhalb ihrer Unsicherheiten überein.

- Die Unsicherheiten der Kalibriermessungen unter Verwendung des K3608 ließen sich durch den neuen Messplatz am stärksten verbessern (um Faktoren zwischen 4 und 35).
- Die Unsicherheit bei 225 Hz liegt unter $10 \cdot 10^{-6} \text{ mV/V}$.



Vergleich der Kalibriermessplätze

Vergleich der Kalibriermessungen mit allen Brückennormalen



- Das Unsicherheitsbudget des **alten Messplatzes** ist durchweg von den **Messvariationen/Potentialschwankungen** dominiert.
- Der **Neue Messplatz** wird bzgl. des Unsicherheitsbudgets von den Beiträgen der **induktiven Komponenten** dominiert.

- Die Kalibriermessungen zeigten für alle Brückennormalen für $V_i=5 \text{ V}$ und das Nennverhältnis 2 mV/V eine Verringerung der erweiterten ($k=2$) Messunsicherheiten.
- Demzufolge konnten die Kalibrierungen problemlos auf den neuen Messplatz umgestellt werden.
- Zusatznutzen: Verringerung Kalibrierzeit auf 1/3.

Setup I	Anteil an Gesamtunsicherheit (%)				
	BN100A 225 Hz	K148 225 Hz	K3608 225 Hz	K148 4795 Hz	K3608 4795 Hz
Unsicherheitsbeitrag					
$U(T_{N1})$	14%	5%	0%	28%	2%
$U(\text{"A"-Mess.})$ (Type A)	34%	47%	48%	11%	48%
$U(\text{"D"-Mess.})$ (Type A)	35%	22%	52%	18%	48%
$U(T_{N2})$	16%	6%	0%	33%	2%
$\alpha_{0A/B}$	1%	20%	0%	10%	0%
$U(K_{S1})$ (10^{-6} mV/V)	5	12	170	120	560
Setup II	Anteil an Gesamtunsicherheit (%)				
	BN100A 225 Hz	K148 225 Hz	K3608 225 Hz	K148 4795 Hz	K3608 4795 Hz
Unsicherheitsbeitrag					
$U(T_{N3})$	52%	61%	37%	59%	75%
$U(D_{\text{bal}})$ (Type A)	23%	10%	16%	14%	0%
$U(T_{N4})$	23%	27%	16%	19%	25%
$\alpha_{0,S2}$	2%	2%	31%	8%	0%
$U(K_{S2})$ (10^{-6} mV/V)	4	4	5	78	69

Einleitung und Motivation statische Brückennormale

Alter und neuer Messaufbau für Brückennormal Kalibrierungen

Ergebnisse und Unsicherheitsanalyse der Kalibriermessplätze

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

- Der verbesserte Messplatz für Brückennormalkalibrierungen wurde für drei verschiedene Brückennormale detailliert untersucht und mit den alten Messplatz verglichen.
- Die Hauptkomponente des neuen Messplatzes ist ein elektronisch gesteuerter zweistufiger Kalibriertrafo, der die A- / D-Potentialdifferenz in einer Messung und damit gleichzeitig und unabhängig von Potentialschwankungen ermöglicht.
- Der neue Messplatz ermöglicht Brückennormalkalibrierungen in einem Drittel der Kalibrierzeit durchzuführen.
- Für resistive Brückennormale (z.B. K3608) zeigt sich insbesondere für höhere Frequenzen eine deutlich reduzierte Unsicherheit durch gleichzeitige A-/D-Messung.
- Für induktive Brückennormale des Typs BN100 zeigen sich vergleichbare Messunsicherheiten auf beiden Messplätzen.
- Durch weiterführende Erkenntnisse aus BN100A Untersuchungen mit dem neuen Messplatz wird es zukünftig eine neue und verbesserte Hardwareversion des BN100A von HBM geben.

Vielen Dank!



**Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin**

Bundesallee 100
38116 Braunschweig



Dr.-Ing. Florian Beug
Arbeitsgruppe 2.12 Verhältnismessungen, Abtastverfahren

Telefon: 0531 592-2120

E-Mail: florian.beug@ptb.de
www.ptb.de



Stand: 05/17