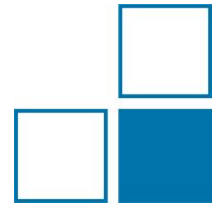


HF-Leistungsmessung in der PTB

Jürgen Rühaak
AG 2.22: Hochfrequenz-Basisgrößen



- HF-Leistungsmessung
- Mikrokalorimeter
- Kalibrierung im Mikrokalorimeter
- Kalibrierung im Außenvergleich
- Messunsicherheiten
- Aktuelle Aktivitäten und zukünftige Aufgaben

Hier ein kleiner Überblick:

- Die HF-Leistungsmessung in der PTB
- Unsere Mikrokalorimeter
- Die Kalibrierung im Mikrokalorimeter
- Die Kalibrierung im Außenvergleich (direct comparison method)
- Eine kurze Übersicht über Messunsicherheiten die wir weitergeben
- Aktuelle Aktivitäten und zukünftige Aufgaben

- Kalibrierung des "Wirkungsgrades" bzw. des Kalibrierungsfaktors $\eta_{\text{cal}}(f)$ eines Messkopfes definiert als

$$\eta_{\text{cal}}(f) = \frac{P_{\text{Anz}}(f)}{P_{\text{Ein}}(f)}$$

$P_{\text{Anz}}(f)$ Angezeigte HF-Leistung

$P_{\text{Ein}}(f)$ Eingestrahlte HF-Leistung



In der PTB werden Kalibrierungen des "Wirkungsgrades" bzw. des Kalibrierungsfaktors von HF-Leistungsmessköpfen durchgeführt.

Der Kalibrierungsfaktor ist definiert als das Verhältnis der angezeigten Leistung am Messgerät zur eingestrahnten HF-Leistung am Messtor (bzw. in der Messebene) bei einer bestimmten Frequenz.

Auf der rechten Seite sind einige der an der PTB verwendeten Messköpfe zu sehen.

Für die Kalibrierung wird dabei ein sogenanntes Mikrokalorimeter oder genauer ausgedrückt ein Tinline-Mikrokalorimeter verwendet.

- Kalorimetrie bezeichnet die Messung von Wärmemengen, die an physikalische, chemische oder biologische Prozesse gekoppelt sind.
- Benutzung zum Messen eines kleinen Temperaturunterschieds → Mikrokalorimeter.
- Zwei HF-Leitungen gleichen Aufbaus, eine als Wärmequelle (Messobjekt) und eine thermische Referenz (Dummy) → Twinline-Mikrokalorimeter.

Die Kalorimetrie bezeichnet die Messung von Wärmemengen, die an physikalische, chemische oder biologische Prozesse gekoppelt sind.

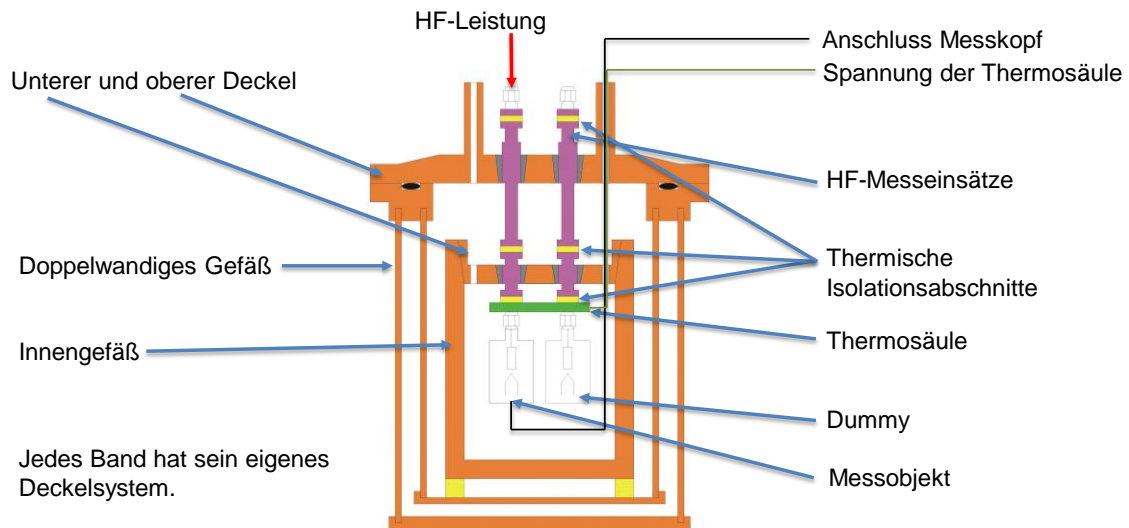
Für die Leistungsmessung wird sie zur Bestimmung eines kleinen Temperaturunterschieds verwendet. Deswegen wird der Messaufbau im Hochfrequenzbereich als **Mikrokalorimeter** bezeichnet.

Weiterhin wird einen Aufbau mit zwei gleichen HF-Leitungen verwendet, eine als Wärmequelle mit dem Messobjekt, die andere als thermische Referenz mit einem Dummy.

Daher die Bezeichnung als **Twinline-Mikrokalorimeter**.

Der Dummy ist ein Messkopf gleichen Typs wie das Messobjekt, aber er wird nicht angeschlossen. Sehen wir uns nun mal den Aufbau eines Twinline-Mikrokalorimeters an.

Twinline-Mikrokalorimeter



Physikalisch-Technische Bundesanstalt ■ Braunschweig und Berlin
5. Mai 2021

5

Nationales Metrologieinstitut
HF-Leistungsmessung in der PTB

Hier ein schematisches Bild von einem der Mikrokalorimeter.

Unsere Twinline-Mikrokalorimeter bestehen aus einem oberen und einem unteren Deckel.

Der obere Deckel liegt auf dem äußeren doppelwandigen Gefäß auf. Der untere (konische) Deckel liegt auf dem Innengefäß auf.

Oben eingesetzt sind die HF-Messeinsätze (lila).

Zur Messung des Temperaturunterschieds zwischen dem Messobjekt und dem Dummy wird eine Thermosäule (grün) benutzt. Die Thermosäule besteht aus 64 in Reihe geschalteten Thermokontakten.

Zur thermischen Isolation der Messebene der HF-Messeinsätze zur Außenwelt dienen mehrere thermische Isolationsabschnitte (gelb). Diese sorgen dafür, dass Wärme von außen nicht in das Mikrokalorimeter, an das Messobjekt und somit an die Thermosäule gelangt.

Die HF-Leistung wird dem HF-Messeinsatz von oben zugeführt und erwärmt das Messobjekt.

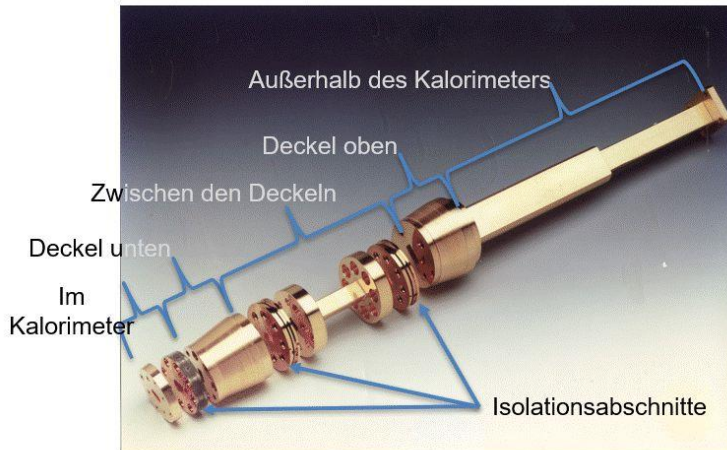
Der DC-Anschluss des Messobjektes wird nach außen an eine selbstabgleichende Bolometermessbrücke (Wheatstone'sche Messbrücke) geführt.

Die Spannung der Thermosäule wird mit einem Nanovoltmeter gemessen.

Jedes Band bzw. jedes Konnektorsystem hat ein eigenes Deckelsystem, welche jeweils etwas unterschiedlich aufgebaut sind.

Auf der nächsten Folie wird ein Messeinsatz genauer betrachtet.

R220 (18 GHz - 26,5 GHz) Messeinsatz



Etwa 6 mm dick, aus ABS-Kunststoff
In der Mitte das Loch für den Hohlleiter

Schichtenaufbau:

- Etwa 1 μm chemisches Kupfer
- Etwa 5 μm bis 40 μm galvanisches Kupfer
- Etwa 1 μm galvanisches Gold zum Schutz

Hier ist der Messeinsatz des R220 Mikrokalorimeters im Frequenzband R220 demontiert worden. Als Hinweis, wir benutzen gerne die Bezeichnung der Hohlleiterbänder mit dem "R", wie z.B. R100, R220 usw.

Wenn Sie bei dieser Bezeichnung die letzte Null wegnehmen, steht dort 22. Das entspricht in etwa der Mittenfrequenz des Hohlleiterbandes in GHz. So lassen sich die Bezeichnungen besser merken. Außerhalb des Kalorimeters wird oben am Flansch der HF-Generator angeschlossen, dann folgt der obere Deckel. Anschließend folgt in diesem Messeinsatz der erste thermische Isolationsabschnitt, sowie die Leitung zwischen dem oberen und unteren Deckel und ein zweiter thermischer Isolationsabschnitt oberhalb des unteren Deckels.

Darauf folgt der untere Deckel und wiederum ein dritter thermischer Isolationsabschnitt. Im Kalorimeter befindet sich der Flansch mit dem Konnektor als Messebene.

Das Bild oben rechts zeigt einen thermischen Isolationsabschnitt. Er ist folgendermaßen aufgebaut: Zuerst wird in das etwa 6 mm dicke ABS Teil das Loch für den Hohlleiter in der Mitte gefräst.

Anschließend werden die Löcher für die Befestigungen gebohrt.

Der zukünftige Isolationsabschnitt wird danach mit weniger als 1 μm chemischem Kupfer galvanisiert und es werden zwischen 5 μm und 40 μm galvanisch Kupfer aufgebracht. Abschließend wird als Schutzschicht gegen Oxidation noch etwa 1 μm galvanisch Gold aufgebracht.

Diese dünnen Schichten reichen aus, da in der Hochfrequenz der "Strom" nur auf der Oberfläche fließt (Skin Effekt/äquivalente Leitschichtdicke).

Bei 500 MHz beträgt die äquivalente Leitschichtdicke etwa 3 μm . Bei 50 GHz nur etwa 0,3 μm .

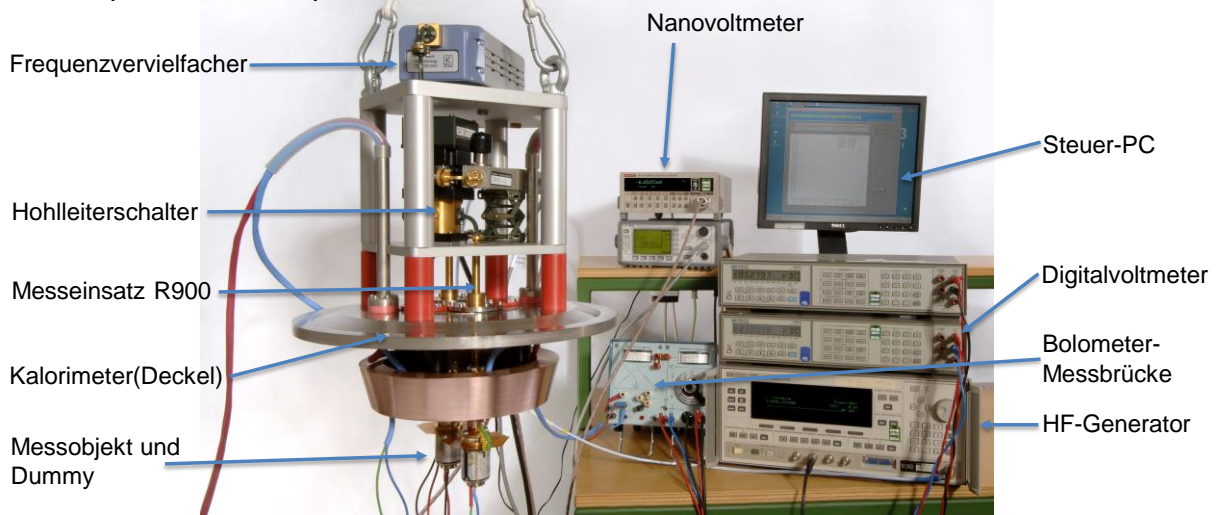
Wichtig für die Weiterleitung des HF-Signals durch den Isolationsabschnitt ist hier nicht die Oberfläche oben und unten auf dem Isolationsabschnitt, sondern die Galvanisierung im Loch des Hohlleiters. Dort sind die Wellen.

Mit diesem Aufbau hat der Isolationsabschnitt einen geringen Widerstand für die HF-Welle (Metall), aber einen hohen thermischen Widerstand, da Kunststoff die Wärme nicht gut leitet.

Kalibrierung im Mikrokalorimeter



R900 (75 GHz - 110 GHz) Mikrokalorimeter



Physikalisch-Technische Bundesanstalt ■ Braunschweig und Berlin
5. Mai 2021

7

Nationales Metrologieinstitut
HF-Leistungsmessung in der PTB

Hier sehen Sie unser R900 Mikrokalorimeter für den Frequenzbereich 75 GHz bis 110 GHz. Sie sehen das Deckelsystem (oberer und unterer Deckel) sowie die Messeinsätze. Angeschlossen an der Messebene unten im Mikrokalorimeter sind das Messobjekt (vorne) und der Dummy.

Zur Bestimmung der Thermospannung der Thermosäule dient ein Nanovoltmeter. Das Messobjekt ist ein Thermistor Messkopf und wird an eine selbstabgleichende Bolometermessbrücke (Wheatstone'sche Messbrücke) angeschlossen. Die Spannung der Bolometer-Messbrücke wird mit einem Digitalvoltmeter gemessen.

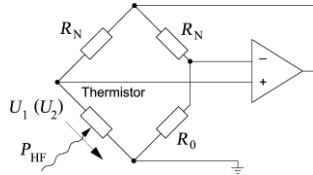
Zur Kalibrierung wird noch ein HF-Signal aus einem HF-Generator benötigt. Da die Maximalfrequenz allerdings nur 20 GHz beträgt, wurde hier ein Frequenzvervielfacher mit einem Vervielfachungsfaktor von 6 benutzt. Das HF-Signal wird über einen Hohlleiterschalter, welcher das HF-Signal ein- bzw. ausschaltet, in den Messeinsatz geführt.

Die Steuerung der Kalibrierung und die Messwertaufnahme übernimmt erfolgt durch einen Steuer-PC.

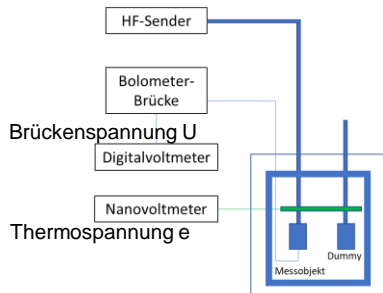
Kalibrierung im Mikrokalorimeter



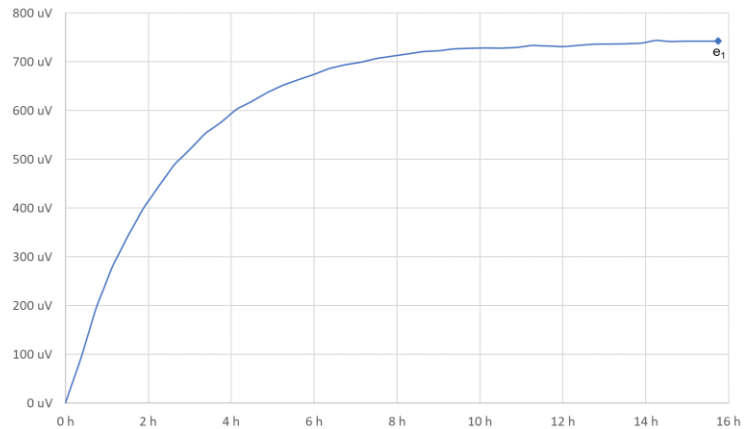
Bolometer Messbrücke



Schematischer Messaufbau



Verlauf der Thermospannung e nach dem Einbau/Einschalten



Wie erfolgt nun eine Kalibrierung im Mikrokalorimeter?

Oben ist der Anschluss des Thermistors des Messobjektes an die selbstabgleichende Bolometerbrücke gezeigt.

Wird das Signal eingeschaltet, wird der Thermistor erwärmt.

Der Widerstand wird kleiner (es ist ein NTC) und der Operationsverstärker senkt dann die Versorgungsspannung der Bolometermessbrücke.

Unten links sehen Sie einen schematischen Aufbau solch einer Kalibrierung mit dem Mikrokalorimeter, dem HF-Sender, einer Bolometermessbrücke zum Anschluss des Messobjektes, einem Digitalvoltmeter zur Messung der Brückenspannung " U " und einem Nanovoltmeter zur Messung der Thermospannung " e " der Thermosäule.

Die rechte Seite zeigt den Verlauf der Thermospannung " e " nach dem Einbau des Messobjektes in das Mikrokalorimeter.

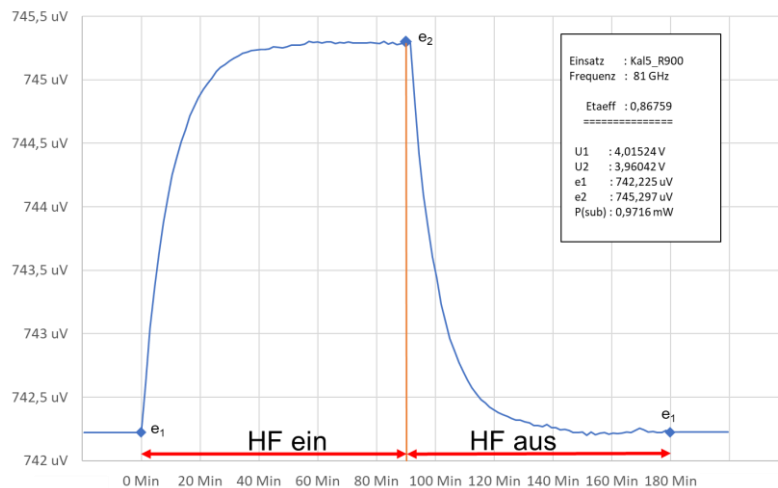
Wird der Messkopf zum Zeitpunkt 0 h eingebaut, so ist die Thermospannung 0. Dann wird die Bolometer-Brücke eingeschaltet.

Das Messobjekt wird wärmer und die Thermospannung " e " steigt, bis sich, nach ca. 16 Stunden, ein stabiles Gleichgewicht eingestellt hat. Dies ist hier am Punkt " e_1 " erreicht.

Kalibrierung im Mikrokalorimeter



Kalibrierung eines Thermistor Messkopfes



Effektiver Wirkungsgrad

$$\eta_{eff} = \frac{P_{Anzeige}}{P_{Absorbiert}}$$

$$\eta_{eff} = \frac{1 - \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2}{\frac{e_2}{e_1} - \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2}$$

Kalibrierungsfaktor

$$\eta_{cal} = \frac{P_{Anzeige}}{P_{Eingestrahlt}}$$

$$\eta_{cal} = \eta_{eff} \cdot (1 - |\Gamma|^2)$$

Das linke Bild zeigt den Punkt "e₁" vom vorherigen Bild.

Mit Start der Messung, werden die ersten Messwerte aufgenommen.

Als erstes die Brückenspannung der Bolometermessbrücke "U₁" und die Spannung der Thermosäule "e₁".

Danach wird das HF-Signal eingeschaltet. Das Messobjekt erwärmt sich, da die Hochfrequenz mehr und andere Verluste hervorruft als die Gleichspannung der Bolometermessbrücke.

Nach etwa 90 Minuten, am oberen Punkt, hat sich wieder ein stabiles Gleichgewicht eingestellt.

Hier werden die Brückenspannung "U₂" und die Thermospannung "e₂" bestimmt und anschließend die Hochfrequenz ausgeschaltet.

Das Messobjekt "kühlt" sich ab und die Thermospannung sinkt.

Auch hier, nach 90 Minuten, erreicht der Aufbau ein Gleichgewicht. Am Ende wird noch einmal die Brückenspannung "U₁" und die Thermospannung "e₁" bestimmt.

Idealerweise sollen die Werte von "U₁" und von "e₁" am Anfang und am Ende der Kalibrierung gleich sein. Weichen sie zu weit voneinander ab war dies eine Fehlmessung und die Kalibrierung muss wiederholt werden.

Die Daten der Messpunkte sehen Sie oben in dem Kasten. Dort sind die Werte für U₁, U₂, e₁ und e₂ aufgetragen. Daraus kann die substituierte Leistung (hier 0,9716 mW) sowie der effektive Wirkungsgrad (hier 0,86759 oder 86,759 %) berechnet werden. Je kleiner der Unterschied zwischen "e₁" und "e₂" ist, desto größer ist der effektive Wirkungsgrad.

Der effektive Wirkungsgrad, welcher hier im Mikrokalorimeter bestimmt werden kann, ist das Verhältnis der angezeigten Leistung zur absorbierten HF-Leistung und kann mit der obigen Formel bestimmt werden.

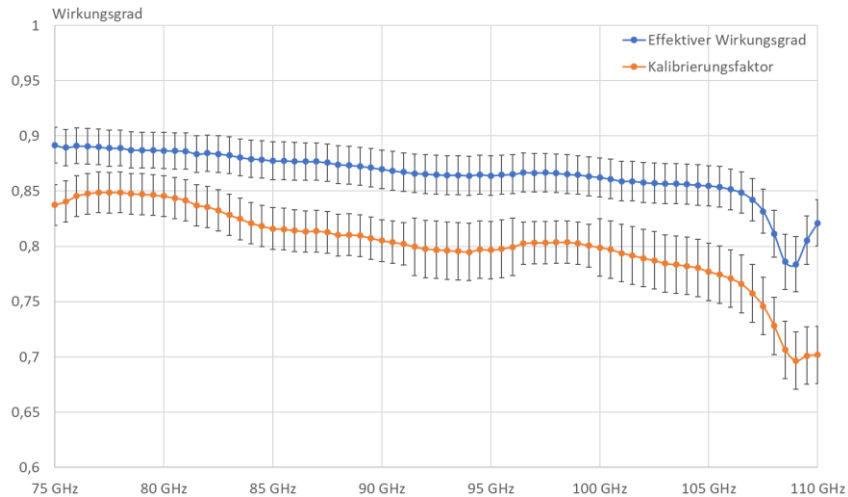
Sie als Kalibrierlaboratorium benötigen allerdings den Kalibrierungsfaktor, der das Verhältnis der angezeigten Leistung zur eingestrahlteten Leistung beschreibt. Der Kalibrierungsfaktor kann mit der untenstehenden Formel aus dem effektiven Wirkungsgrad und dem Reflexionsfaktor bestimmt werden.

Dies war jetzt **eine einzige** Kalibrierung **eines** Frequenzpunktes innerhalb von **drei Stunden**.

Kalibrierung im Mikrokalorimeter



Kalibrierergebnisse für den Messkopf Hughes 45776H SerNr 083



$$\eta_{cal} = \eta_{eff} \cdot (1 - |\Gamma|^2)$$

Hier ist einmal der effektive Wirkungsgrad (blau) und der Kalibrierungsfaktor (rot) eines Thermistor Messkopfes für den Frequenzbereich zwischen 75 GHz und 110 GHz aufgetragen. Die Formel rechts zeigt noch einmal den Zusammenhang zwischen den Kurven des effektiven Wirkungsgrades oben und des Kalibrierungsfaktors unten. Die Balken zeigen die erweiterten Unsicherheiten mit $k=2$ an.

Für dieses Messobjekt wurde der Kalibrierungsfaktor im Abstand von 500 MHz kalibriert. Das sind insgesamt 71 Frequenzpunkte.

- **Bedingung zur Kalibrierung im Mikrokalorimeter**
 - Passive Messköpfe (ohne Elektronik) wie Thermistor Messköpfe, Barretter Messköpfe oder Thermische Leistungsmessköpfe.
- **Mikrokalorimeter Normalmessplätze der PTB**
 - 2 x koaxial N.
 - 7 x Hohlleiterbänder (8,2 GHz bis 110 GHz).
 - 5 x Kalorimeter Gefäße und Geräte.
- **Kalibrierzeiten**
 - **Eine** Messung **eines** Frequenzpunktes dauert etwa 3 Stunden.
 - Pro Frequenzpunkt werden mindestens 6 Wiederholungen durchgeführt (→ 18 h).
 - 20 Kalibrierfrequenzen → (360 h) 15 Tage + Einbau + Ausbau + Reflexion + Kalibrierschein.

Kommen wir zu den Bedingungen zur Kalibrierung eines Messobjektes im Mikrokalorimeter.

Es können nur passive Messköpfe, also ohne Elektronik im Mikrokalorimeter vermessen werden.

- Dieses sind einerseits Thermistor Messköpfe mit Thermistoren (als NTC),
- Barretter Messköpfe, das sind Drähte z.B. aus Platin die ihren Widerstand ändern (PTC) wenn sie durch die HF erwärmt werden oder
- Thermische Leistungsmessköpfe bei dem das HF-Signal auf einen Widerstand gegeben wird und die Temperaturerhöhung mit einem Thermokontakt gemessen wird,

Die PTB besitzt zurzeit zwei koaxiale N-Mikrokalorimeterdeckel und sieben Hohlleiter Mikrokalorimeterdeckel.

Wir haben aber nur fünf Mikrokalorimeter Gefäße und Geräte wie z.B. Messsender, Bolometer-Messbrücken usw. für eine Kalibrierung.

Das heißt wir können gleichzeitig maximal fünf Messobjekte vermessen.

Kommen wir zu den Kalibrierzeiten einer Kalibrierung.

Sie haben es vorhin gesehen, **eine einmalige** Kalibrierung **eines** Frequenzpunktes dauert 3 Stunden. Pro Frequenzpunkt werden mindestens 6 Kalibrierungen durchgeführt. Das entspricht 18 Stunden pro Frequenzpunkt.

Bei 20 Kalibrierfrequenzpunkten ergibt das eine reine Kalibrierzeit von 360 Stunden also 15 Tagen. Hinzu kommen dann noch eventuelle Wiederholungsmessungen, weil ein Messpunkt vielleicht nicht in Ordnung war.

Weiterhin kommt auch noch der Einbau, der Ausbau, die Reflexions-messung sowie die Erstellung des Kalibrierscheins dazu.

■ Herausforderungen bei der Kalorimetermessung

- Hohlleiter Thermistor-Messköpfe (40 GHz bis 170 GHz): Produktion seit etwa 1995 eingestellt.
- Hohlleiter Thermistor-Messköpfe (8,2 GHz bis 40 GHz): Produktion seit etwa 2004 eingestellt.
- Koaxiale Thermistor-Messköpfe (N) werden noch hergestellt (1 MHz - 18 GHz)
→ nicht RoHS konform → dürfen nicht in die EU eingeführt werden.

→ Er gibt keine "neuen" Thermistor-Messköpfe, die im Mikrokalorimeter kalibriert werden können.

→ Einsatz von Thermischen Leistungsmessköpfen.

■ Zur Sicherstellung und Erweiterung des Kalibrierangebots

→ Aufbau eines sekundären Messplatzes.

Kommen wir nun zu den Herausforderungen bei der Mikrokalorimetermessung.

- Hohlleiter Thermistor-Messköpfe im Bereich 40 GHz bis 170 GHz werden seit etwa 1995 nicht mehr hergestellt.
- Die Produktion der Hohlleiter Thermistor-Messköpfe im Frequenzbereich zwischen 8,2 GHz bis 40 GHz wurde etwa im Jahre 2004 eingestellt.
- Koaxiale Thermistor-Messköpfe im Frequenzbereich zwischen 1 MHz und 18 GHz werden noch hergestellt. Sie können aber leider nicht in die EU eingeführt werden, da sie nicht der RoHS Richtlinie entsprechen.

RoHS ist eine Abkürzung in Deutsch etwa "Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten".

Somit können wir und auch Sie keine neuen Thermistor-Messköpfe kaufen.

Mit Hilfe einer großen deutschen Messgerätebaufirma sind wir dabei Thermische Leistungsmessköpfe im Mikrokalorimeter zu vermessen.

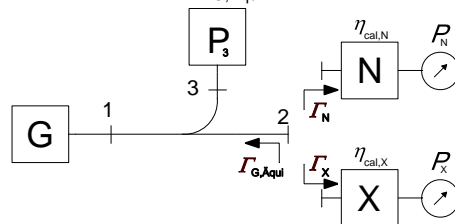
Zur Sicherstellung und Erweiterung des Kalibrierangebots haben wir uns deswegen vor einiger Zeit dazu entschlossen unser Angebot zur HF-Leistungskalibrierung zu erweitern und einen zusätzlichen sekundären Messplatz aufzubauen um ihnen die Möglichkeit zu geben ihre HF-Leistungsmessköpfe auch weiterhin bei uns kalibrieren zu lassen.

Kalibrierung im Außenvergleich



■ Außenvergleich (Direct comparison method):

- In der Industrie seit Jahrzehnten etabliert.
- "Alle" Messobjekte können kalibriert werden (auch mit Elektronik).
- Es werden weiterhin Messköpfe benötigt, die im Kalorimeter kalibriert wurden.
- Messaufbau mit Generator (G), Leistungsteiler oder Richtkoppler, Referenzleistungsmesser (P_3), Normal (N) und Messobjekt (X).
- Zur Bestimmung des Kalibrierungsfaktors des Messobjektes $\eta_{\text{cal},X}$ werden die Reflexionsfaktoren $\Gamma_{G,\text{Äqui}}$, Γ_N , Γ_X sowie der Kalibrierungsfaktor des Normals $\eta_{\text{cal},N}$ benötigt.



$$\eta_{\text{cal},X} = \eta_{\text{cal},N} \cdot \frac{\frac{P_X}{P_{3,X}}}{\frac{P_N}{P_{3,N}}} \cdot \frac{|1 - \Gamma_{G,\text{Äqui}} \cdot \Gamma_X|^2}{|1 - \Gamma_{G,\text{Äqui}} \cdot \Gamma_N|^2}$$

Wir haben bei uns einen sogenannten Außenvergleich aufgebaut. Er ist auch unter dem Namen "direct comparison method" bekannt.

- Er ist seit Jahrzehnten in der Industrie, etabliert.
- Es können "alle" Messobjekte gemessen werden, auch solche mit Elektronik.
- Es werden allerdings immer noch Thermistor-Messköpfe, die im Mikrokalorimeter kalibriert wurden als Normale benötigt.

Zum Aufbau solch eines Außenvergleiches:

Als Signal Quelle wird Generator "G" mit einem Richtkoppler mit den Ports 1, 2 und 3 verwendet.

Am Seitenarm, dem Port 3 des Kopplers befindet sich ein Referenzleistungsmesskopf "P₃".

Ein Richtkoppler koppelt, wie der Name schon sagt, einen Teil der Leistung die aus einer Richtung kommt aus. HF-Leistung aus der anderen Richtung kommend, wird (idealerweise) nicht ausgekoppelt.

Also ein Teil der Leistung von Port 1 nach Port 2 laufend wird ausgekoppelt und an Port 3 abgegeben. Leistung von Port 2 kommend und an Port 1 gehend wird nicht ausgekoppelt und wird somit nicht an Port 3 detektiert.

Das Normal (N) und das Messobjekt (X), werden nacheinander an den Messport 2 angeschlossen.

Zur Bestimmung des Kalibrierungsfaktors $\eta_{\text{cal},X}$ werden die Reflexionsfaktoren $\Gamma_{G,\text{Äqui}}$, Γ_N und Γ_X benötigt. Weiterhin der Kalibrierungsfaktor des Normals $\eta_{\text{cal},N}$.

Auf der rechten Seite ist die Formel zur Bestimmung des Kalibrierungsfaktors der Messobjekte $\eta_{\text{cal},X}$ dargestellt.

Eine Voraussetzung dieses Aufbaues ist, dass das Normal und der Richtkoppler den gleichen Verbinder oder Flansch haben müssen wie das Messobjekt.

Dies kann umgangen werden, wenn vor dem Messobjekt einen Adapter eingebaut wird und dieser bei der Berechnung des Kalibrierungsfaktors berücksichtigt wird.

▪ Der Außenvergleich in der PTB

- Kalibrierung von koaxialen Messobjekten >18 GHz über Hohlleiternormale mit Adaptern.
- Herausforderung: Für jedes Hohlleiterband wird ein kalibrierter(!) Adapter benötigt.

▪ Messobjekt 3,5 mm (10 MHz bis 26,5 GHz) benötigt:

- | | | | |
|----------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|
| 10 MHz bis 18 GHz: | N-Powersplitter, | koaxiales N-Normal, | Adapter N(m) auf 3,5(f) |
| 18 GHz bis 26,5 GHz: | R220 Richtkoppler, | R220 Hohlleiternormal, | Adapter R220 auf 3,5(f) |

Mit diesem zusätzlichen Adapter ergibt sich die Möglichkeit koaxiale Messobjekte über 18 GHz auch über Hohlleiternormale mit Adaptern zu vermessen.

Die Herausforderung dabei ist, dass für jedes benutzte Hohlleiterband, ein kalibrierter Adapter benötigt wird.

Betrachten wir die Kalibrierung eines Messobjektes mit einem 3,5 mm Stecker für den Frequenzbereich von 10 MHz bis 26,5 GHz.

Für den Frequenzbereich von 10 MHz bis 18 GHz wird ein N-Powersplitter, ein koaxiales N-Normal, sowie einen Adapter von N (male) auf 3,5 (female) benötigt.

Zusätzlich wird für den Frequenzbereich von 18 GHz bis 26,5 GHz ein R220-Richtkoppler, ein R220 Hohlleiternormal sowie einen Adapter R220 auf 3,5 mm (female) benötigt.

Kalibrierung im Außenvergleich



Benötigte Adapter für Kalibrierungen

Kalibrierung PC3,5 mm

N(m) auf PC3,5(f)
R220 auf PC3,5(f)

Kalibrierung PC2,92 mm

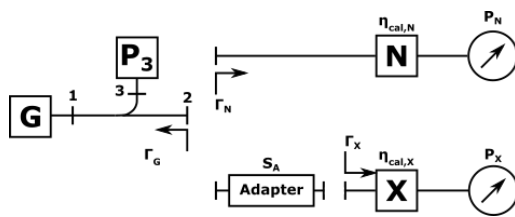
N(m) auf PC2,92(f)
R220 auf PC2,92(f)
R320 auf PC2,92(f)

Kalibrierung PC2,4 mm

N(m) auf PC2,4(f)
R220 auf PC2,4(f)
R320 auf PC2,4(f)
R400 auf PC2,4(f)

Kalibrierung PC1,85 mm

N(m) auf PC1,85(f)
R220 auf PC1,85(f)
R320 auf PC1,85(f)
R400 auf PC1,85(f)
R620 auf PC1,85(f)



Insgesamt:

- 14 kalibrierte Adapter
- 5 kalibrierte Normale
- 1 N-Powersplitter
- 4 Richtkoppler
- 5 Referenz-Leistungsmessköpfe

Hier zeige ich Ihnen die benötigten Adapter für die koaxialen Bänder über 18 GHz, die wir anbieten.

Unten ist der Messaufbau mit dem Adapter vor dem Messobjekt gezeigt.

Für die vier koaxialen Steckersysteme werden benötigt:

- 14 kalibrierte Adapter,
- 5 kalibrierte Normale,
- 1 N Powersplitter und
- 4 Richtkoppler mit
- 5 Referenzleistungsmessköpfen.

Dies ermöglicht uns nun auch koaxiale Normale über 18 GHz, welche wir bisher in unseren Mikrokalorimetern nicht vermessen konnten für sie zu kalibrieren.

■ Besonderheiten der Kalibrierung im PTB-Außenvergleich

- Kalibrierung mit 2 bis 3 Thermistor-Normale gleichen Typs.
- Kalibrierung mit 4 mal "drehen" des Normals und des Messobjektes (Reproduzierbarkeit).

- Kalibrierung "aller" Messobjekte (auch mit Elektronik).
- Längere Kalibrierzeiten (mehrere Normale), allerdings geringer als im Mikrokalorimeter.
- Messunsicherheit etwas höher als im Mikrokalorimeter.
- Kalibrierung "vieler" Frequenzpunkte.
- Kalibrierzeit für ein 1,85 mm Messobjekt (10 MHz bis 67 GHz) mit etwa 70 Frequenzpunkten: etwa 4 Wochen.

Die Besonderheiten der Kalibrierung im PTB-Außenvergleich sind:

- Wir benutzen für die Kalibrierung pro Band 2 bis 3 Normale und
- drehen das Messobjekt und das Normal 4 Mal.

- Durch den Außenvergleich können wir nun "alle" Messobjekte auch mit Elektronik kalibrieren. Dies war uns mit den Mikrokalorimetern bisher nicht möglich.
- Allerdings ergeben sich längere Kalibrierzeiten durch die Benutzung von mehreren Normalen. Diese Zeiten sind deutlich geringer als die im Mikrokalorimeter.
- Die Messunsicherheiten sind durch die Verwendung der Adapter etwas höher als im Mikrokalorimeter.
- Es möglich auch "viele" Frequenzpunkte zu kalibrieren.

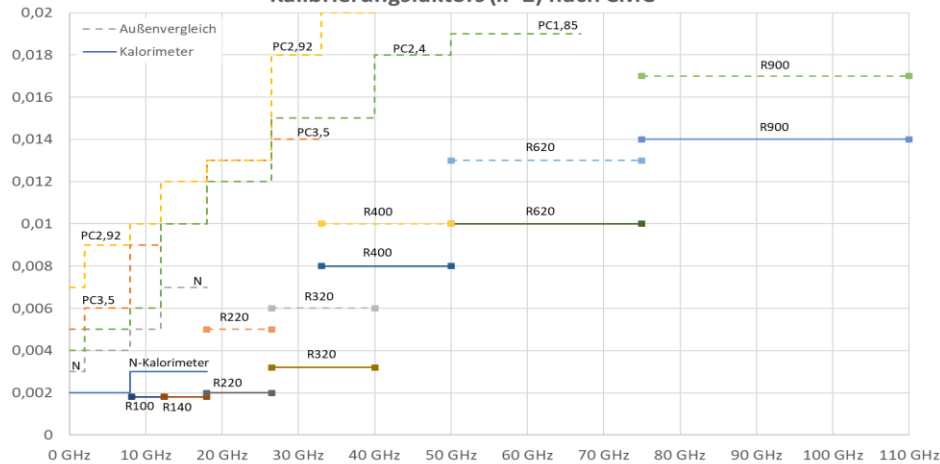
Als Beispiel für die Kalibrierzeit nehme ich ein 1,85 mm Messobjekt von 10 MHz bis 67 GHz mit 70 Frequenzpunkten.

Dies würde im Außenvergleich etwa 4 Wochen benötigen. Im Kalorimeter würden 70 Frequenzpunkte etwa 8 Wochen benötigen.

- HF-Leistungsmessung
- Mikrokalorimeter
- Kalibrierung im Mikrokalorimeter
- Kalibrierung im Außenvergleich
- Messunsicherheiten
- Aktuelle Aktivitäten und zukünftige Aufgaben

Kommen wir jetzt zu den Punkten Messunsicherheiten und zu den aktuellen Aktivitäten und den zukünftigen Aufgaben.

Kleinste angebbare erweiterte Messunsicherheiten des Kalibrierungsfaktors ($k=2$) nach CMC*



*Calibration and Measurement Capabilities, Stand 2021-05-04

Betrachten wir die kleinste angebbare Messunsicherheit des Kalibrierungsfaktors mit $k=2$. Diese Unsicherheiten sind in den "Calibration and Measurement Capabilities (CMC)" für alle Staatsinstitute in einer Liste beim BIPM hinterlegt. Das sind die minimalen Messunsicherheiten, die wir angeben dürfen.

Aufgezeigt ist hier unten die Frequenz und links die erweiterte Messunsicherheit. Durchgezogene Linien repräsentieren hier die Unsicherheiten im Mikrokalorimeter. Die gestrichelten sind die Unsicherheiten im Außenvergleich. Sie erkennen hier zum Beispiel bei R220, R320, R400, R620 und R900 die Erhöhung der Messunsicherheiten von der Kalorimetermessung zur Kalibrierung im Außenvergleich. Auch die Erhöhung der Messunsicherheiten bei dem koaxialen Außenvergleich im Gegensatz zur Hohlleitermessung im Mikrokalorimeter sind zu erkennen. Im Frequenzbereich zwischen 50 GHz bis 67 GHz erkennen sie bei einer Messunsicherheit von 0,01 die R620 Mikrokalorimeter Kalibrierung (grün durchgezogen). Dieses Normal wird dann zur Kalibrierung im Außenvergleich für ein 1,85 mm Messobjekt benutzt und hat dann Messunsicherheiten von 0,019 (grün gestrichelt).

Aktuelle Aktivitäten und zukünftige Aufgaben



- Verkleinerung der Messunsicherheiten durch weitere Optimierungen.
- Kalibrierung im R1400 Band (110 GHz bis 170 GHz) → TEMMT Projekt.
- Konstruktion und Aufbau eines Kalorimeters im Zwischenband R740 (60 GHz bis 90 GHz).
- Konstruktion und Aufbau von Hohlleiter-Kalorimetern für Frequenzen größer als 170 GHz.
- Unterstützung bei der Entwicklung und beim Test von neuen Sensoren (alle Bänder) → TEMMT Projekt, Industrie.
- Aufbau eines Kalorimeters mit dielektrischem Wellenleiter → TEMMT Projekt.
- Kalibrierungen im R900 Band und mit koaxialen PC1,0 mm Konnektoren bis 115 GHz.

- Doktorand für 3 Jahre ab Herbst 2021.

EURAMET Project Number: 18SIB09; Kurzname: **TEMMT**; Von 2019 - 2022; "Traceability for electrical measurements at millimetre-wave and terahertz frequencies for communications and electronics technologies".
Mit Dank für die wissenschaftliche Unterstützung an Frau Phung und Herrn Dr. Judaschke

Zu den aktuellen Aktivitäten und den zukünftigen Aufgaben:

- Wir möchten die Messunsicherheiten weiterhin optimieren.
- Wir werden in nächster Zeit Kalibrierungen im Frequenzbereich zwischen 110 GHz und 170 GHz anbieten können. Das war ein Teil eines Projektes namens TEMMT in Zusammenarbeit mit verschiedenen Staatsinstituten aber auch mit der Industrie.
- Wir werden ein Mikrokalorimeter im Frequenzbereich 60 GHz bis 90 GHz aufbauen. Das schließt eines der Zwischenbänder, die noch fehlen und soll Kalibrierung zum Beispiel im Bereich 5G ermöglichen.
- Wir möchten zusätzlich noch Kalorimeter für die höheren Frequenzbänder bauen. Das sind Wünsche, die von der Industrie an uns herangetragen wurden.
- Wir unterstützen die Entwicklung und den Test von neuen Sensoren. Dieses ist ein Teilbereich im Projekt TEMMT, aber es liegen auch Entwicklungen der Industrie vor.
- Wir haben ein Kalorimeter mit dielektrischem Wellenleiter gebaut. Dielektrischer Wellenleiter heißt, der Hohlleiter wird durch eine Kunststoffaser ersetzt und die Wellen werden auf dieser Faser geführt. Auch dieses ist ein Teilbereich im TEMMT Projekt.
- Und das erfreuliche ist, dass wir einen Doktoranden für drei Jahre ab Herbst 2021 bekommen.

Zum Schluss möchte ich mich für die wissenschaftliche Unterstützung bei Frau Phung und Herrn Dr. Judaschke bedanken.

Vielen Dank.

- Oberwellen bei einem Vervielfacher:

Die Oberwellen bei einem Vervielfacher sind ein großes Problem. Wir versuchen eine Signalpegeldifferenz zwischen dem Sollsignal und der höchsten Oberwelle von mehr als -20 dBc zu erreichen. Dabei ist es sehr wichtig nicht nur die Oberwellen im Frequenzband zu betrachten, sondern auch außerhalb (meist oberhalb) des Frequenzbandes.

- Kalibrierung der Adapter:

Die Adapter werden bei uns selbst kalibriert. Die Kalibrierung erfolgt entweder durch UOSM Kalibrierung oder durch die Eintormethode.



**Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin**

Bundesallee 100

38116 Braunschweig

Jürgen Rühaak

Telefon: 0531 592-2223

E-Mail: juergen.ruehaak@ptb.de

www.ptb.de