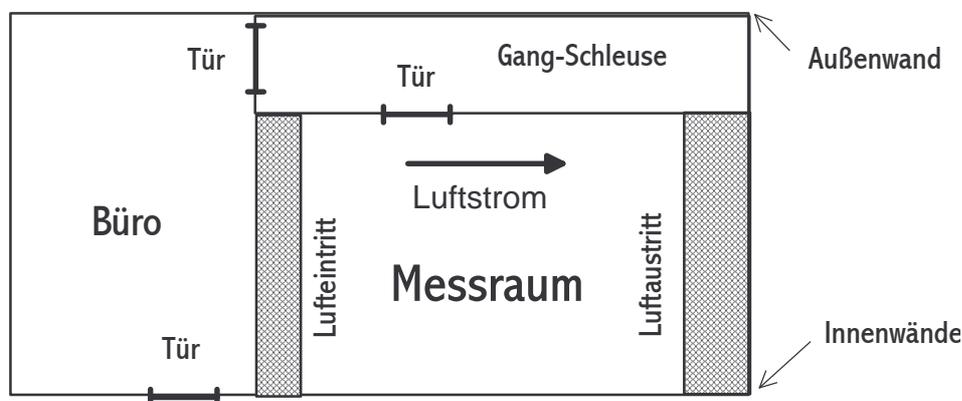


25. Messlabor

Im Messlabor werden die Kalibrierungen der Prüflinge durchgeführt. Da diese mit höchster Präzision erfolgen sollen, sind die Umgebungsbedingungen der Räume von Bedeutung. So wirken Temperatur, Feuchte aber auch elektromagnetische Strahlung verschieden stark auf Normale und die Messaufbauten. Im Prinzip können Kalibrierungen bei beliebigen Umgebungsbedingungen, so auch in der Sahara oder Arktis durchgeführt werden. Jedoch sind die zum Teil erheblichen Umwelteinflüsse in den Messunsicherheitsberechnungen mit zu berücksichtigen. So gibt es auch beim DAKKS Akkreditierungen für die vor Ort Kalibrierungen mit erweitertem Temperaturbereich. (Hinweis: Preise etwa 2016)

25.1 Die Raumtechnik

Vor der Einrichtung eines Messraums sollte eine ausführliche Planung stehen. So sind die Größe und die Klimabedingungen abhängig von den Messgrößen und dem Umfang der Messplätze. Die Norm VDI/VDE 2627 behandelt Messräume. Hier gilt die höchste Güteklasse 1 für Präzisionsmessräume in denen zum Beispiele Bezugsnormale kalibriert werden. Wenn möglich sollte für eine Normalienstelle, die DAKKS Kalibrierungen durchführt, die Güteklasse 1 angestrebt werden. Die wichtigste Umweltgröße in den Kalibrierlabors ist die Temperatur. Sie kann nur mit einer Klimaanlage optimal eingestellt werden. Da es nicht nur für den Menschen angenehmer ist, sondern auch im Bereich der Kapazitätsmessung, hochohmigen Widerstandsmessungen und bei Hochspannungskalibrierung von Vorteil ist die Feuchte mit zu regeln, sollte man dies mit in Betracht ziehen. Im Winter kann die Luft sonst extrem trocken und im Sommer zu feucht werden. Für üblichen Umgebungswerte im elektrischen Labor gelten für die Temperatur $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ und die relative Luftfeuchte $50\% \pm 10\%$. In mechanischen Labors sind Temperatur und Feuchte geringer. Grundsätzlich ist die Planung der Klimaanlage mit den strengen Regelvorgaben immer problematisch und im Gegensatz zu den Versprechen der Klimabauern, funktionieren sie in seltensten Fällen von Anfang an optimal. So kann es bis zu einem halben Jahr dauern bis man die Räume beziehen kann. Ein gute Anlage ist teuer und braucht Platz, aber dann ist sie auch für den Menschen gut zu vertragen, denn sie sollte möglichst zugfrei und leise sein. Da in den meisten Anlagen Luftfilter eingebaut sind, hält sich auch die Staubentwicklung für die Luftreinheit in Grenzen. Grundsätzlich ist das Messlabor kein Büro und Speiseraum. Für die Papierablage, Handbücher, Büro-PCs und Versandstelle sollte es einen Extraraum geben. Der Zutritt zum Labor kann



über eine Luftschleuse erfolgen, besonders wenn die Klimaanlage mit leichtem Überdruck arbeitet, um zusätzlichen Staub abzuhalten. Das Labor, was hier als Beispiel abgebildet wird, hat einen Messraum der von der Luft laminar durchströmt wird. An der Außenwand des Gebäudes liegt die Gangschleuse zur Vorklimatisierung. Mit Vorhängen kann die Wärmestrahlung von außen, die nicht zu unterschätzen ist, eingedämmt werden. Die Klimaanlage mit Temperatur- und Feuchteregelung drückt die Luft an den Seitenwänden (Luft Eintritt) großflächig in den Raum. Durch die Ausnützung der ganzen Seitenwandfläche, kann bei hohem Luftdurchsatz mit geringer Strömungsgeschwindigkeit gearbeitet werden. Dies ist nicht nur leiser, als kleine Düsen mit starker Strömung, sondern auch angenehmer für den Menschen. In der Mitte (Luftaustritt) wird von beiden Räumen die Luft wieder abgeleitet. Fluke gibt für die Luftaustauschgeschwindigkeit 50 Kubikmeter pro Minute an. Die Vorklimatisierung im Gang erfolgt über die Decke. Zusätzlich zur elektronischen Klimaanlagesteuerung werden die Räume mit Thermo-Hydrographen überwacht. So kann das Klima auch bei totalem Stromausfall registriert werden.

Früher wurden in den Labors Netzkonstanter für die 220/230V-Wechselspannung eingesetzt. Das ist heute in den meisten Fällen nicht mehr nötig, da die Versorgungsnetz relativ stabil sind und sich in den elektronischen Geräte sehr gute Netzteile befinden, die selbst große Netzschwankungen gut ausregeln können. Eventuell können jedoch Netzfilter, gegen Störimpulse und Oberwellen auf dem Netz von Nöten sein, besonders wenn unter erheblichen Abschirmungsaufwand in einer Messkammer gearbeitet wird. In dieser dürfen dann aber auch keine oder nur extra geschirmte Rechner-PCs stehen.

Neben Temperatur und Feuchte sind die elektromagnetischen Störungen in der Luft oder auf Leitungen für die Messungen unerwünscht. Das heißt absolutes Handyverbot - auch kein Standbybetrieb und erhebliche Vorsicht beim Platzieren der Messrechner. Die Rechneinheit sollte in respektvollem Abstand vom Messaufbau aufgestellt werden. Die Einflüsse hängen erheblich vom Messfall ab und können daher nicht spezifiziert werden, sollten aber im Hinterkopf besonders bei unverständlichen Ergebnissen immer berücksichtigt werden.

Die Strahlung der Leuchtstoffröhren an der Decke ist meistens unproblematisch, jedoch empfiehlt es sich die Drossel-HF-störungsfrei im Vorraum zu plazieren. Heute bieten sich LED Lampen als Leuchtmittel an. Die Helligkeit der Räume sollte den üblichen Vorschriften für das Büroarbeiten mit normale Lichtbedarf entsprechen.

Selbst starke Vibrationen und Lärm haben in einem elektrischen Messlabor nichts zu suchen. So sind besonders Spiegelgalvanometer in älteren Messgeräten sehr empfindlich gegen mechanische Schwingungen. In einem mechanischen Labor gelten für diese Störungen ganz besondere Anforderungen.

25.2 Der Mensch

Grundsätzlich hat in den Laborbereichen nur Fachpersonal Zutritt.

Das berühmte kreative Chaos, was immer für Unordnung erhalten muß, ist in einem Kalibrierlabor fehl am Platz. Nicht nur, dass es auf Besucher (Kunden) einen schlechten Eindruck macht, es passt einfach nicht zu Genauigkeit und Präzision.

Dem Meßaufbau wird zu Unrecht oft zu wenig Beachtung geschenkt. Hierzu ein paar Anmerkungen.

So ist Schutzschirmtechnik (Guard-Technik) geeignet den Einfluß von Gleichtaktspannungen herabzusetzen. Ein- und Ausgangsimpedanzen sind häufig Quellen von unbekanntem Abweichungen. Das können belastete Teiler, Reflexionsfaktoren bei HF-Messungen (sehr starker Einfluß) und frequenzabhängige Impedanzen sein. Leitungs- und Kontaktwiderstände wirken

sich grundsätzlich auf Messungen aus. Allerdings ist der Einfluß unterschiedlich groß. So müssen aus diesem Grund Widerstände unter 1M Ω bei Präzisionsmessungen immer vierpolig angeschlossen werden. Für Strommessungen sind dicke Kabel zu verwenden. Bei HF-Messungen sind den Steckern und Buchsen, sowohl mechanisch wie elektrisch eine große Beachtung zu schenken. Daß die Dämpfung bei HF-Kabel mit zunehmender Frequenz und Länge stark ansteigt sollte bekannt sein. Isolationswiderstände wirken sich negativ bei der Messung hoher Widerstände und kleiner Stromstärken aus. Sie liegen parallel zu dem zu kalibrierenden Widerstand oder speisen Leckströme ein. Speziell isolierte Kabel sowie Schutzschirme mindern die störenden Einflüsse. So ist bei Messungen über 10 k Ω unbedingt eine Berührung von Standardmesskabel zu verhindern. Auch die Leitungsführung (möglichst kurze Meßkabel, keine Schleifen, nicht über Netzleitungen führen, nicht in der Nähe von Störquellen wie PC und Monitor), die Schirmung (abgeschirmte Leitungen für störempfindliche Signale verwenden - ACHTUNG: normale BNC-Kabel sind nicht sehr gut geschirmt, es gibt aber doppelt geschirmte Versionen) und die Erdung (nur an einer Stelle erden, stern- oder baumförmig, um Erdschleifen zu vermeiden) sind Maßnahmen zur Verringerung der äußeren Störeinflüsse. So sind auch die Nullkapazitäten bei LCR-Meßbrücken stark von den Anschlussleitungen und deren Lageveränderung abhängig. Thermospannungen entstehen bei Temperaturgradienten oder bei Paarungen unterschiedlicher Materialien (z.B. Kabelstecker-Anschlussbuchsen) auf. Sie können unter Umständen durch eine "Nullmessung" ermittelt und korrigiert werden. Fast ganz vermeiden lassen sie sich durch reine Kupferverbindungen. Auf jedenfall muß sich der Messaufbau außerhalb des Lüfterbereichs von Geräten befinden, sonst macht dies die aufwendige Klimatisierung der Räume zu nichte.

Dem Beobachter (Kalibrierer) können Ablesefehler oder Übertragungsfehler passieren. Hier sind die digitalen Meßgeräte weniger betroffen als die Analogen. Auch der Rechner, der Meßwerte ausliest und bearbeitet, ist ein Beobachter. Jedoch lassen sich Fehler in rechnergesteuerten Meßplätzen durch vorheriges aufwendiges Testen leichter vermeiden. Dabei sollte jedoch auf die gute Bedienbarkeit Wert gelegt werden, damit sich nicht doch unnötige Fehler einschleichen. Der Bediener des Programms sollte trotzdem die Ergebnisse auf Plausibilität überprüfen, als zusätzliche Kontrolle. Auch die Person selbst übt unbewußt gelegentlich Einfluss auf die Messergebnisse aus. So erzeugt das Anfassen von Kontakten und Thermistoren Thermospannungen, die nicht zu unterschätzen sind. Auch elektrische Ladungsänderungen durch Bewegung bei hochohmigen Messungen lassen beliebige Ergebnisse zu. Unter Umständen ist auch die Temperaturstrahlung des Menschen ist zu beachten.

Doch was ist zu tun?

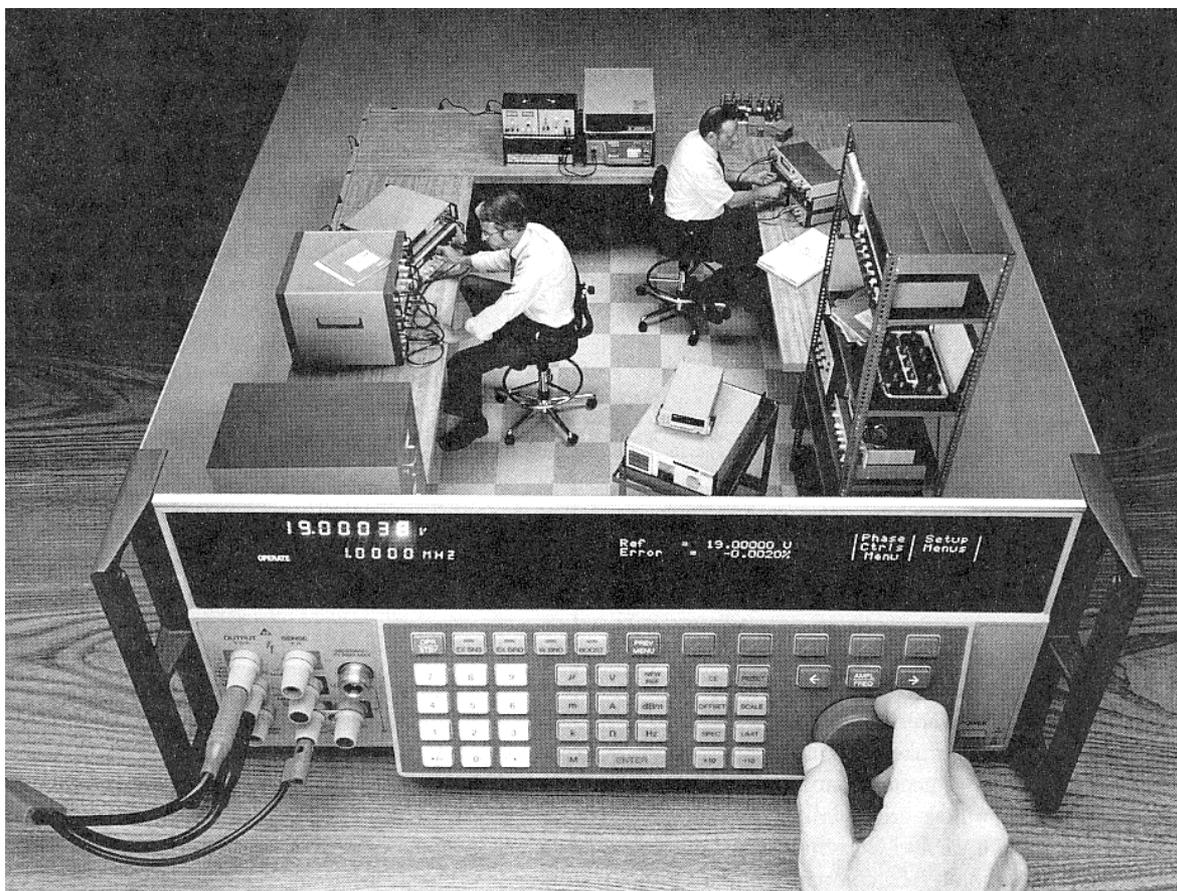
Wenn man sich über die relevanten Fehlereinflüsse klar ist, muss man sie an Hand von Unterlagen oder der Erfahrung als Zahlenwert bestimmen. Was sind Erfahrungen? Das ist, wenn man weiß was man tut und was so alles dabei passieren kann. Diese "Passieren" ist durch Probemessungen z.B. durch Änderung der Anschlußtechnik zu verifizieren.

Da der Mensch stark in die Kalibrierung eingreift, muß er sich immer bewußt sein, dass er durch sein Verhalten oft einen nicht unerheblichen Einfluß auf die Messungen ausübt und daher haben Hilfskräfte in einem Kalibrierlabor für Präzisionsmessungen nichts verloren.

25.3 Die Ausstattung

Die Ausstattung eines elektrischen Kalibrierlabors hängt stark davon ab, welche elektrischen Größen man kalibrieren möchte. Dazu muss erst einmal zwischen dem Kalibrieren von NiederFrequenz-Größen und HochFrequenz-Größen unterschieden werden. Auch wenn es dort gewisse Übergangsbereiche gibt, so ist alleine vom finanziellen Aufwand ein NF Labor

im Unterhalt und bei der Beschaffung bei gleicher Leistung um mehrere Faktoren preiswerter, als ein HF Labor. Auch die gewünschten Messunsicherheiten bilden sich in den Kosten wieder. Nicht nur beim Kauf der Geräte, sondern auch bei der messtechnischen Rückführung der Messgrößen auf die nationalen Normale sind diese höchst unterschiedlich. Die Rückführung wird um so teurer, je geringer die Messunsicherheiten sind. Besonders dann, wenn die Kalibrierungen bei der PTB oder anderen nationalen Instituten durchgeführt werden müssen, kann für ein NF/HF Labor der jährliche Unkostenbeitrag bei einem fünfstelligen Euro Betrag liegen. Hier sollen aber auch für den Hobbykalibrierer Hinweise für ein kleines Labor gegeben werden. Heute ist auch Dank der Auswahl an Gebrauchtgeräten zum Beispiel bei Ebay und wegen der mittlerweile kleinen Preise bei den Neugeräten ein Aufbau eines privaten Labors möglich. Die Messunsicherheit wird für den Hobbyisten nicht so entscheidend sein. Ganz anders bei einem kommerziellen Labor, was sich schon aus juristischen Gründen darüber Gedanken machen muß und zu jedem Messwert eine Rückführung benötigt. Für jede Messgröße, die vollständig bereitgestellt werden soll, ist sowohl eine Quelle als auch eine Senke anzuschaffen. Im NF-Bereich für Gleichspannung wäre das zum Beispiel ein Kalibrator (Quelle) und ein Multimeter (Senke). So kann Gleichspannung präzise erzeugt (Quelle) und gemessen (Senke) werden. Im HF-Bereich für die HF-Leistung wäre das beispielsweise ein Generator (Quelle) und ein Power Sensor [Leistungsmesser] (Senke). Grundsätzlich ist der Aufwand im Labor und bei der Beschaffung der Geräte unkomplizierter geworden. So vereinigen heute einzelne Geräte die Funktionsweise von einer Anzahl von vielen Einzelgeräten aus früherer Zeit. Wo früher zum Beispiel ein ganzer Messschrank für die Kalibrierung von Multimetern stand, reicht heute ein einzelner Multifunktionskalibrator (Abb. Fluke 5700).



Auch die Ansteuerung durch einen Rechner ist heute meist möglich und erlaubt so ohne sehr aufwendige Programmierarbeit einen automatischen Kalibrierablauf, einschließlich Berechnungen und Kalibrierscheinerstellung [Metcalf-Fluke]. Hinweis: Genaue Ausführungen zu der Funktion und Technik der vorgestellten Geräte und Normale sind teils in anderen Kapiteln vorhanden.

Hinweis: Normalerweise haben bedeutende Hersteller von Messgeräten über alle Jahre ihren Namen behalten. Der „High End“- Hersteller Hewlett Packard (HP) hat dies nicht getan, obwohl die beiden Gründer 1939 mit dem Bau von Messgeräten angefangen haben. Für etwa 10 Jahre hießen sie Agilent und seit 2015 Keysight. Daher tauchen bei mir alle drei Namen gleichwertig auf !

25.3.1 NF-Labor

Die Hauptmessgrößen im Niederfrequenzlabor bis etwa 1MHz sind Gleichspannung, Wechselspannung, Gleichstrom, Wechselstrom, Widerstand, Kapazität, Induktivität und Frequenz. Typische Prüflinge in diesem Labor sind Multimeter, Stromzangen, Frequenzzähler, Generatoren, LCR-Meter und Oszilloskope.

Für Spannungen, Ströme und Gleichspannungswiderstand zu messen wird ein Multimeter benötigt. Je höher die Messunsicherheit ist, desto größer ist die Auswahl auch an preiswerten DVMs. Grundsätzlich haben alle Multimeter die geringste Messunsicherheit bei der Gleichspannung. Das hängt damit zusammen, das bei dem wichtigsten Referenzelement des DVMs, eine hochstabile Spannung um die 6 Volt erzeugt wird. Von diesem wird dann vieles intern abgeleitet. Im Hobbybereich ist so schon für unter 150 Euro ein tragbares Gerät mit 0,1% Messunsicherheit zu haben. Für geringere Messunsicherheiten von 0,02% muß man mit etwa 600 Euro rechnen. Hier gibt es dann nur noch wenige Anbieter. Bei Messunsicherheiten um 0,003% für die Gleichspannung liegt der Preis zwischen 1000 und 2000 Euro. Für die zur Zeit genauesten Multimeter: Keysight/HP 3458, Fluke 8508 und Transmille 8081 mit einer Jahrespezifikation von etwa 3ppm (0,0003%) sind rund 10000 Euro zu zahlen. Hier an diesen Beispielen für Gleichspannung sieht man ganz klar, dass kleine Messunsicherheiten viel Geld kosten, was auch bei anderen Messgrößen gilt. Im kommerziellen Labor könnte man auf die Idee kommen, Gebrauchtgeräte zu einem günstigeren Preis zu erwerben. Wenn man nur ein einzelnes Multimeter höchster Präzision beschafft ist das mit Vorsicht zu genießen. Das HP3458 beispielsweise könnte schon fast 30 Jahre alt sein und durch Alterung versteckte Mängel haben. Auf jeden Fall ist es ratsam ein Gebrauchtgerät dieser Klasse nur mit einer DAKKS-Kalibrierung und Jahresgarantie zu erwerben. So können eventuelle Mängel und Schwächen schon bei der Kalibrierung entdeckt werden. Außerdem schreckt dieser Wunsch unseriöse Anbieter ab. Als Zweitgerät und im Hobbybereich sind Gebrauchtgeräte im Unsicherheitsbereich von 0,02% bis 0,003% keine schlechte Wahl. Man sieht an diesem Beispiel recht deutlich, dass sich der Laborbetreiber für jede Messgröße im voraus überlegen muß, welche Messunsicherheiten er wirklich benötigt um seinen internen oder externen Kunden gerecht zu werden. Da die Spezifikationen selbst bei Geräten der mittleren Preisklasse ziemlich gut sind, erfordert es schon einen gewissen Aufwand beim Gerätepark, da die Messunsicherheiten der Normale möglichst um den Faktor vier kleiner sein sollten, als die des Prüflings. Allerdings ist dieses Verhältnis bei der Oberklasse nicht mehr zu erreichen und wird dann bei der Messunsicherheitsanalyse mit Korrektur- und Driftdaten speziell betrachtet.

Messgröße	Quelle	Senke	Bemerkung
Gleichspannung	DC-Spannungskalibrator	DVM	bis 1000V
Wechselspannung	AC-Spannungskalibrator	DVM	oft bis 1000V
Gleichstrom	DC-Stromkalibrator	DVM	teils mit Shunts
Wechselstrom	AC-Stromkalibrator	DVM	teils mit Shunts
Widerstand	Multifunktionskalibrator	DVM	Quelle auch Einzelwiderstände

Ein Multifunktionskalibrator beinhaltet mindestens einen DC-Kalibrator, AC-Kalibrator, Widerstände. Ein Multiproduktkalibrator hat mögliche weitere Messmöglichkeiten für die Kalibrierung von Oszilloskopen, einfachen Kapazitätsmessern, Leistung ($U \cdot I$) und Thermoelemente-Simulation.

Ein Multimeter (DVM) beinhaltet mindestens die Messgröße für Gleich- und Wechselgrößen und Widerstand. Ströme teils mit externen Shunts (Stromwiderständen).

Kleinste Messunsicherheit: meist bei U-DC für 95% Vertrauensniveau und 1 Jahr
 $1 \text{ ppm} = 1 \cdot 10^{-6} = 0,0001\%$

Bei den Multimetern (teils Differentialvoltmeter) ist die Auswahl im unteren und mittleren Unsicherheitsbereich bei Neu- und Gebrauchtgeräten groß. Daher werden hier nur die Präzisionsmultimeter vorgestellt; Datrongeräte nur gebraucht.

Hersteller	Typ	Messgrößen	Kl. Messuns.	Bemerkung
Fluke	8508A	DC-AC/U+I/R	3 ppm	AC: 0,007 % bis 1000V
Keysight/HP	3458A	DC-AC/U+I/R	4 ppm	AC: 0,009 %
Keysight	34470A	DC-AC/U+I/R	0,0018%	AC: 0,07% bis 300kHz
Transmille	8081	DC-AC/U+I/R	4,5 ppm	AC: 0,02 %
Datron	1281	DC-AC/U+I/R	5 ppm	ca.1999, AC: 0,008 %
Datron	1081	DC-AC/U/R	9 ppm	AC: 0,025% , ohne Strom
Datron	1271	DC-AC/U+I/R	8 ppm	AC: 0,007%
Datron	4920	AC / U	0,003 % (AC)	nur AC Spannung
Prema	6048	DC-AC/U / R	5 ppm	ca.1990, AC: 0,02%
Keithley	2002	DC-AC/U+I/R	0,001 %	AC: 0,05%
Solatron	7081	DC-AC / U / R	0,001 %	ca.1985, AC: 0,02 %
Prema	6001	DC-AC/U+I/R	0,003 %	ca. 1990, AC: 0,08 %
Fluke	8506A	DC-AC/U+I/R	0,003 %	ca.1983, AC: 0,025 %
Fluke	887AB	DC-AC / U	0,003 %	ca.1966, bis 1100V
Fluke	895A	DC / U	0,003 %	ca.1966, bis 1100V

Bei den Kalibratoren, die für DVM Kalibrierungen geeignet sind ist die Auswahl recht übersichtlich. Die Firmen Hewlett Packard und Datron (Wavetek) haben schon lange ihre Produktion eingestellt und so ist Fluke als einer der bekanntesten Hersteller übrig geblieben. Bei hochwertigen Kalibratoren ist mit etwa 50000 Euro (gebraucht 18000 Euro) zu rechnen.

Hersteller	Typ	Messgrößen	Kl. Messuns.	Bemerkung
Fluke	5730A	DC-AC/U+I/R	3,5 ppm	Wideband 30 MHz möglich
Fluke	5720A	DC-AC/U+I/R	4 ppm	5700A = 7 ppm
Fluke	5522A	DC-AC/U+I/R	0,0012 %	AC:0,015% bis 500 kHz
Fluke	5502A	DC-AC/U+I/R	0,0055 %	AC:0,03% bis500 kHz
Fluke	5080A	DC-AC/U+I/R	0,01 %	AC:0,1 % bis 1 kHz
Fluke	5500A	DC-AC/U+I/R	0,005 %	AC:0,03% bis 500 kHz

Orbit Controls	OCM-140	DC-AC/U+I/R	0,0035 %	AC:0,025% bis 50 kHz
Orbit Controls	OCM-142	DC-AC/U+I/R	0,0015 %	AC:0,025% bis 100 kHz
Orbit Controls	OCM-141	DC-AC/U+I/R	0,01 %	AC:0,06% bis 1kHz, 750V
Orbit Controls	OCM-143	DC-AC/U+I/R	0,01 %	AC:0,06 % bis 2kHz
Datron	4808	DC-AC/U+I/R	7 ppm	ca.1992 , AC: 0,004%
Datron	9100	DC-AC/U+I/R	0,004 %	ca.1993, AC: 0,025%
Datron	4708	DC-AC/U+I/R	5 ppm	ca.1990, AC: 0,006%
Datron	4700	DC-AC/U+I/R	0,0016%	ca.1990, AC: 0,018%
Transmille	3010	DC-AC/U+I/R	8 ppm	AC:0,015% bis 500kHz
Transmille	3041	DC-AC/U+I/R	0,0025 %	AC:0,035% bis 500kHz
Transmille	3050	DC-AC/U+I/R	0,005 %	AC:0,035% bis 100kHz
Valhalla	2730GS	DC-AC/U+I/R	6 ppm	AC:0,008% bis 1,2MHz
HP	745A	AC / U	0,02 % (AC)	ca.1968
Fluke	335D	DC / U	0,005 %	ca.1972
Fluke	5200/5215	AC / U	0,02 % (AC)	ca.1972, bis 1200V,1MHz
Fluke	5100A	DC-AC/U+I/R	0,007 %	ca.1978, AC:0,05%

Grundsätzlich läßt sich ein preiswerter Kalibrator, durch Parallelmessung an diesem mit einem Präzisionsmultimeter, auf eine geringer Messunsicherheit verbessern.

Für den Hobbyisten ist bis hinunter zu 0,01% besonders im Gebrauchtbereich immer ein kostengünstiges DVM (Senke) zu erwerben. Wer zwischen 1000 und 1500 Euro für ein neues DVM ausgeben kann, hat wie die folgende Tabelle zeigt, Möglichkeiten inzwischen recht genauen Multimetern auszuwählen. (jeweils beste Jahresspezifikation, HP=Keysight , GDM=GwInstek , RI=Rigol)

Typen	DCV	ACV	DCI	ACI	R	Fr
Fluke 8846	0,0029%	0,09%	0,055%	0,14%	0,011%	0,01%
HP34410A	0,0035%	0,09%	0,056%	0,14%	0,011%	-
Hameg8112	0,0036%	0,16%	0,022%	0,18%	0,006%	0,05%
GDM8261A	0,0040%	0,10%	0,055%	0,14%	0,011%	0,03%
HP34461A	0,0040%	0,09%	0,055%	0,14%	0,011%	0,01%
RI_DM3068	0,0041%	0,09%	0,053%	0,14%	0,011%	0,007%
Keithley2000	0,0035%	0,09%	0,088%	0,14%	0,011%	0,01%

Das Problem ist einen Kalibrator (Quelle) preiswert zu kaufen. Als einziger Multifunktionskalibrator bleibt da nur der Fluke 5100 übrig. Er wurde in großer Stückzahl verkauft und ist ein robustes Gerät. Der Preis wird jedoch gebraucht bei 2500 Euro liegen. Es gibt noch einen Exoten, das HP 6920B. Diese Gerät kann DC-AC/U+I bis 1000V, 5A und AC nur bei 50Hz-Netzfrequenz. Da die eigene Messunsicherheit bei nur 0,2% liegt, sollte es parallel zu einem Vergleichsmultimeter betrieben werden. Auf Jedenfall ist es eine gute Quelle zur Überprüfung einfacher DVM. Mit einer einfachen Widerstandsdekade (PeakTech) oder Einzelwiderständen, auch im Selbstbau möglich, ergibt das in Summe einen „Ersatzmultifunktionskalibrator“.

Dies sind die Möglichkeiten der Rückführung der Messgrößen Spannung, Strom und Widerstand für ein Standardlabor. Wird jedoch eins der Präzisionsgeräte mit den Messunsicherheiten im ppm-Bereich kalibriert, so ist der Aufwand und die dazu nötigen Normale etwas umfangreicher. Dazu müssen die einzelnen Messgrößen gesondert betrachtet werden.

Für die Rückführung der Gleichspannung werden normalerweise im Labor keine Josephson-Normale eingesetzt, da der Betrieb und die Anschaffung teuer und aufwendig sind. Üblicherweise reicht dort ein extern kalibriertes elektronisches 10V und 1V Normal wie das Fluke 732. Gelegentlich werden auch noch Westonelemente verwendet, die gegenüber den elektronischen Normalen über Jahre so gut wie keine Drift haben. Um Spannungen über 10 V kalibrieren zu können werden Widerstandsteiler benötigt. Das können, mit Normalwiderständen selbst gebaute Teiler, der Refenzteiler Fluke 752A mit festen Verhältnissen von 10:1 und 100:1 oder ein Kelvin-Varley-Teiler Fluke 720A mit 1 ppm Unsicherheit, sein. Für die Nullanzeige der Verhältnisse können Nanovoltmeter (Keithley/Guildline) oder hochauflösende Multimeter verwendet werden. So sind mit Einrechnung der Drift der 10V Normalspannung und jährlicher Kalibrierung Rückführungen ab 2ppm möglich. Hier wird es für den Hobbykalibrierer etwas schwieriger einzusteigen. Jedoch werden gelegentlich Westonelemente, 10V Standards und Differentialvoltmeter (Fluke 895A) für so eine Laborausrüstung angeboten, da heute kaum noch Labore diese aufwendigen Messungen, dank der sehr guten DVMs und Kalibratoren, durchführen. Ob sie jedoch die Spezifikationen einhalten ist nur durch eine externe Kalibrierung zu überprüfen.

Für die Wechselspannung bietet Fluke das 5790A an. Es ist ein reiner Wechselspannungsmesser. Er kann mit Direktanzeige oder im AC/DC Transfermodus gegen eine externe Gleichspannung betreiben werden. Das Gerät reicht für die Kalibrierung aller Kalibratoren und Multimeter voll aus. Ein reines AC/DC Transferstandard ist das Guildline 7130 oder Ballantine 1605A. Nur wer das 5790A kalibrieren möchte, muß aufrüsten und sich das Fluke 792A anschaffen. Diese Gerät ist mit einem Teiler und einem thermischen Halbleitersensor ausgestattet. Es arbeitet ähnlich wie früher das Thermal Transfer Standard Fluke 540B oder Thermalkonverter plus Vorwiderstand. Thermalkonverter waren vor Jahren das Beste, was es für die Wechselspannungsmessung bis weit in den MHz-Bereich gab, sind aber aus praktischen Gründen verschwunden. Das Hauptproblem war die leichte Zerstörung durch Überlast und die Zeitkonstante des Elements bei nur etwa 7mV Ausgangsspannung. Grundsätzlich wird für eine AC/DC Transfermessung immer ein genaues Gleichspannungssignal (Kalibrator) im ppm Bereich benötigt. Im Hobbybereich wären nur über gebrauchte Thermokonverter mit Vorwiderständen vergleichsweise genaue Messungen zu machen. Als Geber wird immer mal wieder der Fluke 5200A plus Verstärker (>100V) 5215A/5205A angeboten, der sich über Jahrzehnte in den Labors bewährt hat.

Für den Gleichstrom benötigt man ein Präzisionsmultimeter und Gleichstromwiderstände. So können die Stromeinstellungen der Kalibratoren überprüft werden. Als Quelle wird ein Multifunktionskalibrator und / oder ein Transconductance Amplifier für die „Umwandlung“ von Gleichspannung zu Gleichstrom bis 20 A benötigt. Bei der Auswahl der Widerstände zum Beispiel von Burster ist die Erwärmung durch den Messstrom zu beachten. Hersteller von älteren Modellen bis 10 Watt belastbar aus Manganin sind: Hartmann und Braun, AEG und Otto Wolf. Privat kann man sich vielleicht mit gebrauchten Shunts oder Vishay-Lastwiderständen helfen. Der alte Fluke Current Shunt A90 ist von 0,1mA bis 10A, auch für Wechselstrom, eine Lösung.

Für den Wechselstrom zu bestimmen, werden spezielle Wechselstromwiderstände benötigt. In der Kombination von dem Fluke 5790A und den Widerständen Fluke A40 kann Wechselstrom sehr genau bestimmt werden. Auch die Widerstände wie der Guildline 7320 und das Ballantine 1625A können mit dem 5790A eingesetzt werden. Da bei den Kalibratoren oft bei 1A die Obergrenze ist, müssen mit Transconductance Amplifier von Guildline 7620, Fluke 5725A (nur in Kombination mit 5700-Serie) und Fluke 5220A bis zu 20A erzeugt werden. Diese Verstärker sind von DC bis in den oberen kHz Bereich zu gebrauchen. Wer noch an

gebrauchte Thermalkonverter kommt, kann diese wie früher, mit einem Shunt zusammenschaltet, zur Wechselstrommessung benutzen.

Bei manchen Kalibratoren sind nur dekadische Gleichstromwiderstände einzustellen. Dann werden hochwertige Dekaden zum Beispiel von Genrad/IET-Labs 1433; Guildline oder Burster benötigt. Für die Rückführung mit geringsten Unsicherheiten werden dekadische Einzelnormale von Fluke 742A, IET-Labs SRL, Guildline 9330 / 9334 oder Wekomm RS9010A verwendet. Sie haben geringe Drift und sind im ppm Bereich genau. Heute werden die Präzisionswiderstände meist in Luft betrieben. Bei höchstgenauen Messungen wird jedoch wie früher üblich, der Prüfling und das Normal in ein Ölbad wie Guildline 9730CR gestellt und besonders die Widerstände unter 100 Ohm mit dem Direct Current Comparator 9975 oder dem Nachfolgemodel von Guildline 6670 (0,1ppm) mit dem High Current Range Extender 9923 betrieben. So können auch noch Widerstände unter 1mOhm genau gemessen werden. Viele Labore benutzen auch noch die AEG/H&B (1W) Manganin Widerstände, die auch heute noch als Standard gelten, aber nur im Ölbad ihre Genauigkeit entfalten. Weitere Hersteller dieser offenen „Töpfe“ sind: Croydon Precision Instrument, Leeds&Northrup, Yokogawa und russische Produktionen. Als Öl kann man Esso-Marcol 82 empfehlen.

Für den Hobbybereich kann man sich einzeln hochwertige Zeranin Drahtwiderstände von Burster oder andere von Vishay kaufen und mit denen sich sehr gute stabile Normale aufbauen. Niederohmige Widerstände lassen sich mit hoher Messunsicherheit mit der Strom/Spannungs-Messung von Normal und Prüfling bestimmen.

Bei einige Kalibratoren wird die Messgröße Kapazität simuliert, da viele Handmultimeter diese Messgröße können. Jedoch hat diese Simulation Tücken und ist nur für einfache Messungen geeignet. Es müssen daher die Einschränkungen und Bedingungen des Kalibrators / Prüflings beachtet werden. Je nach Frequenz und Messmethode des Prüflings kann es zu Fehlmessungen kommen. Es hat jedoch den Vorteil, dass keine eigenen Kapazitätsnormale vorgehalten werden müssen. Zur Kalibrierung von hochwertigen LCR Metern (Uns. <0,5%) mit verschiedenen Messfrequenzen müssen jedoch passive Normale verwendet werden. Für Kapazitäten von 1pF bis 1000pF werden Luftkondensatoren verwendet. Die gibt es in verschiedenen Genauigkeitsklassen und Anschlußbelegung. Im Labor sind folgende zu gebrauchen: HP-Satz 16380A mit 4-BNC Anschlüssen, Genrad 1404 3-polig mit GR874 Stecker oder Tettex 3320. Diese Luftkondensatoren haben so gut wie keine Verluste, kaum Alterung und sind bis fast 1MHz zu gebrauchen. Ein Sondertyp ist der Quarzkondensator 1408 von Genrad. Von 1nF bis 1µF haben sich Glimmerkondensatoren bewährt. Von Genrad/IET-Labs wird der dreipolige Typ 1409, von Tettex der Typ 3300 und von HP der Satz 16380B angeboten. Hierbei sind die frequenzabhängigen Werte bis etwa 10kHz von von C und D zu beachten. IET-Labs bietet vom Typ 1409 Kapazitäten von 10µF, 100µF und 1mF aus Polykarbonat an. Auch die Firma T.O.P.Elektronik verkauft Großkapazitäten. Für große dekadische Kapazitäten 1µF bis 1F werden transformierte Kapazitätsnormale bei 120 Hz / 1kHz von Genrad den Typ 1417 und Soshin TM-520-C angeboten. Der Selbstbau mit vielen Kondensatoren aus Styroflex, Polypropylen (MKY) oder Zelluloseacetat (MKL) als Dielektrikum ist möglich. Die Kondensatorgehäuse müssen versiegelt sein, daher können auch keine Elkos verbaut werden. Allgemein gilt, je größer der Wert, desto höher die Zeitdrift und die Frequenzabhängigkeit steigt an. Hier nun noch eine Aufzählung neuer und gebrauchter Dekaden: USSR P5025, HP4440B, Genrad 1413, GR1423A, GR1412, Siemens und IET-Labs Typ HACS-Z.

Für den Hobbybereich gibt es einfache Dekaden von PeakTech, Cosinus und EKF zu erwerben.

Als Standard Normal und für die Rückführung der Induktivität von $50\mu\text{H}$ bis 10H ist das Model Genrad 1482 bekannt. Es gibt auch ähnliche Typen ohne Eisenkern anderer Hersteller wie: VEB-Erfurt 0204 / 0021, Felten&Guillaume Ringform , USSR P596 und Yokogawa Sx. Zudem werden verschieden Induktivitätsdekaden von Genrad/IET-Labs Typ GR1490C, GR1491, GR1490-F auch von Siemens und Danbridge, teils mit Metallkern angeboten. Alle Induktivitäten sind stark frequenzabhängig und mit Eisenkern auch noch stromabhängig. Eine Simulation wie bei Kapazitäten in Multiproduktkalibratoren steht bisher nicht zur Verfügung. Für den Hobbybereich gibt es einfache Dekaden von PeakTech und Cosinus zu erwerben. Gelegentlich werden auch gebrauchte Genrad Normale angeboten.

Bei Kapazität und Induktivitäten wurde bisher nur die Quellen angesprochen. Zum Messen dieser Größen werden LCR Meter benötigt. Auch hier gibt es eine große Anzahl von besonders einfachen Geräten. Zudem haben viele Handmultimeter eine Kapazitätsmessfunktion (Uns. $>0,5\%$) eingebaut.

Bei einfachen Geräten oder in Handmultimetern wird zum Beispiel über einen eingepprägten Strom der Spannungsanstieg als Rampe gemessen und über den Zeitverlauf die Kapazität bestimmt. Normalerweise haben die LCR Messgeräte einen Wechselspannungsgenerator dessen Sinusspannung am Prüfling anliegt. Durch Messung der Amplituden und Phasenverschiebung von Spannung und Strom kann dann vektoriell der komplexe Widerstand bestimmt werden. Mathematisch werden die Werte schließlich zu Kapazitäts- und Induktivitäts-Ergebnissen umgerechnet und angezeigt.

Messgeräte (LCR) Tabelle

Hersteller	Typ	Messgrößen	Kl. Messuns.	Bemerkung
Keysight	E4980AL	LCR bis 1MHz	0,01 %	DC-Bias 40V
Keysight	E4982A	LCR bis 3 GHz	0,80 %	ab 1 MHz
HP	4274A	LCR bis 100 kHz	0,10 %	ca. 1980
HP	4275A	LCR bis 10 MHz	0,10 %	ca. 1980
HP	4263A	LCR bis 100 kHz	0,10 %	ca. 1993
GwInstek	LCR-821	LCR bis 200 kHz	0,05 %	
GwInstek	LCR-8110	LCR bis 10 MHz	0,1 %	
Hameg	HM8118	LCR bis 200 kHz	0,05 %	
ESI	2150	LCR bis 150 kHz	0,02 %	ca. 1988
Tinsley	6451	LCR 100/1k/10kHz	0,10 %	ca. 1995
Philips	PM6304	LCR bis 100 kHz	0,10 %	ca. 1995
Genrad	1615	C Handbrücke	0,01 %	neu: von Iet-Labs
Andeen Hagerling	2500	C Brücke (1kHz)	0,005 %	1988 ; Präzision
Wayne Kerr	6440	LCR bis 3 MHz	0,05 %	
PeakTech	2170	LCR bis 100kHz	0,3 %	sehr preiswert

Da die Anschlüsse der Prüflinge oft nicht mit denen der Messbrücken übereinstimmen, muß mit Adaptern gearbeitet werden. Diese werden teils vom Hersteller angeboten oder müssen selbst gebaut werden. Hierbei ist zu beachten, das die Open/Short Kalibrierung der LCR-Brücke am Adapter (Prüflingsanschluß) durchgeführt werden muß und es zu keiner Veränderung des Nullwerts durch mechanische Lageänderung kommt. Die angegeben

Messunsicherheiten der LCR Geräte lassen sich durch Substitutionsmessungen mit den entsprechenden Bezugsnormalen teils um den Faktor zehn verbessern.

Für die Frequenz wird als Senke ein Frequenzzähler und als Quelle ein Oszillator/Generator benötigt. Bei Frequenzzählern bis in den dreistelligen MHz-Bereich gibt eine riesige Auswahl. Daher kann hier nur auf einige Auswahlpunkte eingegangen werden. Für ein Kalibrierlabor ist der Funktionsumfang nicht so bedeutend. Drei Punkte sind besonders wichtig; der Frequenzbereich (optional bis in den GHz-Bereich [50Ohm]), die Stabilität des Referenzoszillators mit geringem Phasenrauschen und die Möglichkeit die Referenzfrequenz abzugreifen oder zu stabilisieren (10MHz - OUT/IN). Hilfreich haben sich Hoch- und Tiefpass-Filter erwiesen, da sie bei gestörten Signalen die Triggerung auf die zu messende Frequenz erleichtern. Selbst die manuelle Möglichkeit die Triggerschwelle zu verändern, kann das Problem von Fehlmessungen nicht immer beheben. Die Stabilität des Referenz hängt unmittelbar mit der Drift des Quarzes im Oszillators zusammen. Um sie erheblich zu verbessern, wird der Oszillator in einem Ofen eingebaut. Diese Version (OCXO) ist bei hochwertigen Zählern als Option vorhanden. So liegt je nach Option die Spannbreite der Jahresspezifikation (Drift) für den Oszillator bei einem Zähler der Firma Pendulum zwischen $7 \cdot 10^{-6}$ und $1,7 \cdot 10^{-8}$. Es gibt auch eine Option mit eingebautem Rubidiumstandard mit $2,5 \cdot 10^{-10}$. Da die Generatoren als Quelle kein gutes Verhalten bei der Frequenzdrift über einen längeren Zeitraum haben, müssen sie über eine externe Referenz synchronisiert werden. Hierbei bietet sich einer der nun beschriebenen Frequenznormale an. Da selbst Rubidiumstandards eine Alterung von $2 \cdot 10^{-10}$ im Jahr haben, sind sie nicht ideal. Daher sind eigentlich Cäsiumfrequenznormale wie das Symmetricom 5071A mit einer Langzeitstabilität über der Lebensdauer von $1 \cdot 10^{-14}$ die erste Wahl; jedoch sind sie sehr teuer. Daher wird als Frequenzreferenz im Labor eher ein GPS synchronisiertes Rubidiumnormal wie zum Beispiel Fluke 910R angeschafft. So ist wie auch bei Geräten von Quartzlock eine Langzeitstabilität über die Lebensdauer von $1 \cdot 10^{-12}$ bei Empfang des GPS Signals möglich. Außer den Frequenzausgängen wie 10 MHz und 5 MHz sollte auch ein 1pps Sekundenpuls vorhanden sein. So kann man, mit einer Start-Stop-Zählermessung die Frequenzdrift gegenüber dem sehr langzeitstabilen 77,5 kHz Trägersignal der PTB, überwachen.

Wie bei Multimetern gibt es auch bei Oszilloskopen eine riesige Auswahl. Dabei bestimmt sich der Preis, selbst bei gleichem Hersteller, über die gewählte Bandbreite. Bei Frequenzen im oberen GHz-Bereich wird es dann richtig teuer. Heute sind alle Oszilloskope digital und sie gibt es auch in tragbarer oder USB-Box Version. In einem Labor wird man das Standgerät mit Bildschirm wählen. Die gewünschte Bandbreite und Messgenauigkeit grenzt dann die Auswahl ein. Eine Liste der einzelnen Typen wäre hier zu aufwendig und veraltet schnell, da es bei Oszilloskopen großen Modellwechsel gibt. Daher hier nur eine Aufzählung bekannter Hersteller: Keysight (HP), Rohde&Schwarz (Hameg), Tektronix, Ley Croy und Pico. Außer der Anzahl der Kanäle sind die wichtigsten Größen die (analoge) Bandbreite (-3dB=71%), die Sampling Rate als Maß für die frequenzmäßige Detailauflösung und die Speichertiefe. Bei Oszilloskopen mit zusätzlichem 50 Ohm Eingang im GHz-Bereich wird auch die Anstiegszeit in ps angegeben. Es wird empfohlen die Bandbreite etwa fünf mal höher als die zu darstellende Frequenz zu wählen. Das ist besonders bei der richtigen Darstellung von Reckecksignalen wichtig.

Als Quelle zur Kalibrierung von Oszilloskopen gab es früher extra verschiedene Oszilloskopkalibriergeräte wie zum Beispiel von Ballentine 6127B, Pico oder von Tektronix. Heute werden für die Multiproduktkalibratoren zum Beispiel von Fluke als Option extra Einbauten angeboten, mit denen man Standardoszilloskope bis maximal etwa 2 GHz kalibrieren kann. Dies muß dann beim Kauf eines Multiproduktkalibrators, der ja auch DVM kalibrieren soll,

beachtet werden. Bei höheren Frequenzen wird dann zusätzlich eine Messung der Bandbreite, meist mit einem HF-Leistungssensor, nötig sein. Auch besteht die Möglichkeit mit dem Oszilloskopkalibrator 9500B von Fluke Prüflinge bis zu 14 GHz zu kalibrieren. Hierbei wird im Gegensatz zu den Multiproduktkalibratoren mit abgesetzten Messköpfen gearbeitet.

Im Hobbybereich liegt für Oszilloskope die untere Preisgrenze bei 300 Euro für 25MHz Bandbreite. Bis 200MHz kommt man bei günstigen Geräten mit 1000 Euro aus. Gebrauchte Analoge Oszilloskope über 200MHz zu erwerben, kann nur Einzelfall sinnvoll sein. Zur einfachen Überprüfung des eigenen Gerätes reicht ein Rechteckgenerator und eine DC-Quelle aus. Die Bandbreite (-3dB) kann man mit einem gebrauchten HF-Generator und zusätzlicher 50Ohm Last am Oszilloskopeingang oder mit einem Level-Generator überprüfen. Gelegentlich werden auch alte Oszilloskopkalibratoren angeboten.

25.3.2 HF-Labor

Die Hauptmessgrößen im Hochfrequenzlabor ab 1MHz im 50 Ohm-System sind Leistung, Dämpfung, Reflexion, Rauschen und Frequenz. Typische Prüflinge in diesem Labor sind Power-Meter, Dämpfungsglieder, Loads, Rauschquellen, HF-Generatoren, Netzwerkanalysatoren, Spektrumanalysatoren und auch Oszilloskope im GHz-Bereich.

Für die Messgröße Leistung wird als Senke ein Leistungsmesser und als Quelle ein Generator benötigt. Die Rückführung der Leistung erfolgt im Labor über einen kalibrierten Leistungsmesser. Die Auswahl der Generatoren ist sehr groß und die Typen wechseln häufig. Daher können keine Modelle angegeben werden. Für die reine Leistungsmessung ist im gewünschten Frequenzbereich eine möglichst hohe Leistung bis zu 25dBm sinnvoll (Option: Verzicht auf Teiler unter -20dBm) um auch die höheren Leistungsbereiche von Prüflingen messen zu können. Bei der Kalibrierung eines Sensors mit einer Power Splitter Einheit als Normal gehen nämlich um die 8 dB verloren. Außerdem sollte auf geringes Phasenrauschen und Oberwellen geachtet werden. Andere Funktionen wie Modulationen sind hier nicht von Nutzen. Bekannte Hersteller sind Keysight (Agilent/HP), Rohde und Schwarz, Tektronix, Hameg, Anritsu und andere. Der übliche angebotene Frequenzbereich liegt zwischen 10kHz und 50 GHz; mit Modulerweiterungen bis zu 110 GHz. Grundsätzlich benötigt man für eine Messunsicherheitsberechnung der Leistungsmessung Kenntnisse über die Reflexionsfaktoren im Aufbau. Wenn man diese selbst ermitteln muß, ist dazu ein extra Messgerätepark nötig (siehe Reflexion).

Bekannte Hersteller von Sensoren sind Keysight, Rohde&Schwarz, Marconi und Anritsu. Der Frequenzbereich geht von DC bis 110 GHz und der Pegelbereich von -70dBm bis 45dBm. Früher war HP führend auf dem Gebiet der Leistungsmessung aber heute hat Rohde&Schwarz eine weite Produktpalette von fast 30 sehr hochwertigen Sensoren. Es gibt zwei Arten von Sensoren, einen mit einem Lastwiderstand, der sich erwärmt (-35dBm bis +20dBm) und ab DC funktioniert und einen mit Dioden (-70dBm bis -20dBm) und daher sehr empfindlich ist. Da früher zur Überdeckung des gesamten Pegelbereichs mindestens zwei Sensoren nötig waren, ist der Dreifach-Sensor (Three-Path) erfunden worden. Er besteht aus einem eingebauten passiven Leistungsteiler, der das Signal auf drei interne Dioden verteilt. Da heutzutage fast alle Sensoren direkt mit dem USB-Port verbunden werden können, ist eine Auslesung mit jedem Rechner möglich. Die Messunsicherheiten liegen bei den unteren Frequenzen um 0,05dB (1%) und steigen dann je nach Frequenzbereich bis etwa 0,26dB (6%) an.

Der Preis startet für einen Sensor bis 6 GHz (N-Stecker) bei etwa 2500Euro (Keysight U2001A). Es empfiehlt sich für jeden Steckertyp einen eigenen Sensor zu beschaffen, da die Verwendung von Adaptern die kalibrierten Werte des Sensors, auch bei Korrektur, immer verschlechtern. Man wird sich üblicherweise für einen Hersteller entscheiden und dann auch

ein Power Meter erwerben. Es hat außer der Anzeige ohne Rechner zusätzliche Funktionen und Anschlüsse wie zum Beispiel einen 1mW Referenzquellen-Ausgang.

Mit entsprechenden Transfornormalen bestehend aus Power-Splitter (Keysight, Weinschel) und Sensor können Leistungsmesser kalibriert werden. Als stabile Labornormale für die Rückführung und Kalibrierung der Transfornormale werden Thermistoren (-20dBm bis +10dBm) oder thermische Leistungsmesser verwendet. Es gibt heute ein erhebliches Problem bei der Rückführung der Leistung auf nationale Institute wie der PTB. Die Messungen mit den geringsten erreichbaren Messunsicherheiten von etwa 0,0086dB (0.2%) werden in einem Mikrokalorimeter bei der PTB trotz ihren hohen Reflexionsfaktors nur mit Thermistoren erreicht. Thermistoren, der Standardleistungssensor früherer Zeiten bis 110 GHz, sind meistens nur noch gebraucht zu erhalten. Jedes Labor welches noch Thermistoren (HP/Hughes) hat sollte sie behalten oder bei der PTB abliefern. Es gibt immer wieder Bedarf, besonders bei hohen Frequenzen. Als Powermeter für Thermistoren gibt es das 432 von Keysight oder TEGAM 1830A.

Für den Hobbybereich und für kleinere Labore sind neue HF Generatoren und Sensoren zu teuer. Hier gibt es bei Ebay oder professionellen Gebrauchthändlern immer wieder preiswerte Geräte zu kaufen. Die Generatoren mit Halbleiter sind dann vielleicht rein Analog (Handbetrieb) ohne digitale Schnittstelle, haben aber trotzdem gute Kenndaten. Wer ein älteres Gerät von HP kauft und sich dazu die sehr ausführlichen Handbücher (Manual/Service) besorgt, bekommt zudem Einblicke in die Funktionsweise und Reparaturmöglichkeiten des Geräts. Die Möglichkeit gibt es bei den heutigen Messgeräten nicht mehr. Bei Sensoren können die HP8480-Serie oder Thermistoren wie HP478A (10GHz) , HP8478B (18GHz) empfohlen werden. Auch die passenden Powermeter wie N436A und 432A mit Spezialkabel sind erhältlich. Mini-Circuits bietet neue USB Powersensoren (-30dBm bis +20dBm) bis zu 8 GHz ab etwa 800 Dollar an.

Die bisherigen Betrachtungen galten hauptsächlich für CW-Leistung. Wenn modulierte Signale oder Spitzenleistungen gemessen werden müssen, kommen andere Geräte wie ein Peak Power Analyzer (Keysight - 8990B) oder Spektrumanalysatoren zum Einsatz. Die Leistungsmessung ist dort nicht so genau ($>0,5\text{dB}$), aber selbst komplexe Signale können in ihren Frequenzanteilen gemessen werden. Bei Spektrumanalysatoren gibt es eine große Auswahl von etwa 4000 Euro bis weit in den 5-stelligen Bereich. Der Frequenzbereich liegt zwischen 10 Hz und 110 GHz mit externen Mixern. Es gibt sie tragbar oder als Standgeräte. Das wichtigste Entscheidungskriterium ist der Frequenzbereich und damit auch der Preis, der zu höheren Frequenzen stark ansteigt. Bekannte Hersteller sind Keysight, Rohde&Schwarz und Anritsu. Wenn man sich einen Vektoriellen Netzwerkanalysator (VNA) sparen möchte und mit größeren Messunsicherheiten bei Reflexion und Dämpfung leben kann, gibt es die Möglichkeit mit Optionen die Modelle bis etwa 8 GHz entsprechend nachzurüsten. Mit dem eingebauten Trackinggenerator (Mitlaufgenerator) und eine VSWR Brücke sind dann Dämpfungs- und Reflexionsmessungen in nur eine Richtung möglich. Man erkennt an dieser Möglichkeit, daß der Aufbau des Empfangsteils in einem VNA und Spektrumanalysator ähnlich ist. Preiswerte Modelle auch für den Hobbybereich (ca. 2000 Euro) bis etwa 1,5 GHz und teils mit eingeschränkten Funktionen und höheren Messunsicherheiten ($>1,5\text{dB}$) gibt es von TTI, Hameg, GWInstek und PeakTech.

Für das Kalibrieren der Dämpfung können verschiedene Verfahren angewendet werden, die sich dann im Messgerätepark widerspiegeln. Zuvor müssen drei grundlegende Vorgaben entschieden werden. Erstens der Frequenzbereich DC bis 110 GHz, zweitens der Dämpfungsbereich 0dB bis 130dB und drittens ob nur Betrag oder auch Phase bestimmt werden sollen. Wie man sich denken kann ist ein Aufbau für eine Betragsmessung bei niedrigen Frequenzen

bis 40dB am preiswertesten zu erhalten. Für die Rückführung der Dämpfung werden Dämpfungsnormale (Quelle), die den Messaufbau überprüfen, benötigt. Auch diese richten sich nach den oben benannten Vorgaben. Mit einem Satz Dämpfungsnormale der Nenngrößen 3dB, 6dB, 10dB, 20dB und 30dB kann so eine Rückführung bis 69dB erfolgen. Die höchste gewünschte Frequenz bestimmt den Steckertyp der Normale. Mit Adaptern kann durch Subtraktion der Adapterdämpfung auch mit anderen Steckern zum Beispiel 3,5mm zu N gemessen werden. Gute HF Dämpfungsglieder gibt es von Keysight, Anritsu, Maury Microwave und Weinschel. Für die einfache Messung des Betrags je Frequenzpunkt wird ein Generator und ein Powersensor benötigt. Zur Verbesserung des Generatorreflexionsfaktors sollte man an dessen Ausgang ein Dämpfungsglied von 6dB oder besser 10dB anschließen. Für diese beiden benötigten Geräte gilt die Information von oben. Wenn man über einen Frequenzbereich messen möchte, muß das Ausgangssignal des Generators über eine Levelung oder Auslesung eines Power Splitters (Keysight, Weinschel) plus zweiten Sensor überwacht und korrigiert werden. Das Messgerät der Wahl für Dämpfungen und auch Reflexionen in Betrag und Phase zu Messen ist ein Netzwerkanalysator (VNA). Es ist ein hoch komplexes Gerät, das jedoch in der Bedienung schnell zu erlernen ist. Verständlicherweise sind die Preise für diese Geräte selbst im unteren Frequenzbereich sehr hoch (5-stellig), da sie ja einen Generator und eine Messeinheit für Betrag und Phase enthalten. Bekannte Hersteller sind wieder Keysight, Rohde&Schwarz und Anritsu. Es gibt sie ab 10kHz bis zu 500 GHz stationär und tragbar mit bis zu acht Messtoren. Für ein Messlabor reichen zwei Messtore voll aus und man muß sich nur noch Gedanken über den Frequenzbereich mit den entsprechenden koaxialen Steckern machen. Da für jeden Stecker spezielle Calibration Kits (Hersteller oder Maury Microwave) nötig sind, müssen auch diese eingeplant werden. Auch die Anschlußkabel dürfen nicht von minderer Qualität sein. Einfache tragbare Geräte von Rohde&Schwarz sind das FSH und ein stationärer VNA bis 3 GHz von Keysight der ENA. Da die Dynamik um die 120dB betragen können bis zu 80dB Dämpfungsglieder ausgemessen werden. Weil die Calibration Kits nur zur Referenzmessung an der Messtoren dienen, muß zur Kalibrierung des Grundgeräts ein Verifikations Kit angeschafft werden oder man schickt es zum Kalibrieren weg. Die Verifikations Kits, die normalerweise aus zwei Dämpfungsgliedern und zwei Luftleitungen bestehen, müssen beim Hersteller kalibriert werden. Die entsprechenden Ergebniswert werden dann für die Vergleichskalibrierung benötigt. So können der VNA mit Kabel und das Calibration Kit gleichzeitig überprüft werden. Für das Verifikation Kit wählt man die Anschlußstecker für den höchsten Frequenzbereich.

Messempfänger zum Messen von geringen Leistungen oder hohen Dämpfungen für einzelne Frequenzpunkte werden heute nicht mehr benötigt. Da sie oft nur bis etwa 1 GHz funktionierten, wurde der Frequenzbereiche über externe Mischer erweitert. Mit einem Spektrumanalyzer und speziellen Optionen sind Messungen wie mit einem Messempfänger möglich. Auch die Möglichkeit von einfachen Rauschmessungen werden als Optionen angeboten.

Grundsätzlich benötigt man für eine Messunsicherheitsberechnung der Dämpfungsmessung Kenntnisse über die Reflexionsfaktoren im Aufbau. Wenn man diese selbst ermitteln muß und kein VNA verwendet wird, ist dazu ein extra Messgerätepark nötig (siehe Reflexion).

Im Hobbybereich und kleinen Labors reicht die Ausrüstung von Generator und Leistungsmesser um Dämpfungsmessungen bis zu 40dB (Betrag) durchzuführen. Früher wurden auch Messaufbauten wie Reflektometer mit Hohlleitern aufgebaut. Das wird heute mit HF-Kabeln und Adaptern erledigt.

Für das Kalibrieren der Reflexion können verschiedene Verfahren angewendet werden, die sich dann im Messgerätepark widerspiegeln. Zuvor müssen zwei grundlegende Vorgaben entschieden werden. Erstens der Frequenzbereich DC bis 110 GHz und zweitens ob nur

Betrag oder auch Phase bestimmt werden sollen. Wie man sich denken kann ist ein Aufbau für eine Betragsmessung bei niedrigen Frequenzen am preiswertesten zu erhalten. Für die Rückführung der Reflexion werden Reflexionsnormale (Quelle), die den Messaufbau überprüfen, benötigt. Auch diese richten sich nach den oben benannten Vorgaben. Gute HF Reflexionsnormale gibt es von Keysight, Anritsu, Maury Microwave und Weinschel.

Betragsmessungen können mit einem Reflektometeraufbau bestehend aus zwei Sensoren und einem Dual-Directional Coupler (HP11692D/2GHz bis 18GHz) der sowohl die hinlaufende als auch die rücklaufende Welle gleichzeitig auskopplern kann, durchgeführt werden. Für die Referenzmessung wird noch ein Kurzschluß benötigt. Das war vor der VNA Zeit der übliche Aufbau. Wegen der Direktivität von nur 40dB ist die Messung von kleinen Reflexionen mit einem großen Messfehler von 0,01 behaftet. Im Frequenzbereich von 5 MHz bis 3 GHz kann man eine VSWR-Messbrücke in Verbindung mit einem Generator und Sensor einsetzen. Es gibt sie von Rohde&Schwarz (ZRC) und Wiltron (60NF50). Die Direktivität liegt bei 46dB was einem Messfehler von 0,005 für den Reflexionsbetrag entspricht. Wie schon bei der Dämpfung beschrieben ist für die Betrag und Phasenmessung der VNA das ideale Gerät. Wer eine geringe Messunsicherheit benötigt sollte auf jeden Fall ein Calibration Kit mit Open, Short, Load und Sliding Load benutzen. Bei Kalibrierung mit der zusätzlichen Sliding Load kann die Direktivität des VNA von etwa 40dB auf mindestens 50dB (0,003) erheblich verbessert werden. Leider sind diese Calibration Kits teurer als die Economy Kits. Dafür enthalten sie aber auch mechanische Messuhren um die Steckerinnenleiter zu überprüfen. Solche Uhren, die auch einzeln gekauft werden können, gehören unbedingt in ein HF-Labor. Nur so sind die Stecker auf ihre richtigen Maße zu überprüfen. Das ist wichtig um zusätzliche Fehler bei der Reflexion auszuschließen und die Innenleiter vor mechanischer Zerstörung durch Druck zu schützen. Es sollte unbedingt darauf geachtet werden im Kalibrierbereich Adapter, Kabel und weitere Anschlüsse nur mit Präzisionssteckern zu benutzen. Besonders bei N-Anschluß gibt es dort auch in den Normen Unterschiede!

Ohne auf spezielle HF-Teile einzugehen, hier der Hinweis in der Präzisionsmesstechnik nur hochwertige Kabel, Adapter, Stecker und Abschlüsse zu verwenden. Die Hersteller können die von den Messgeräten sein oder spezielle wie Weinschel, Suhner, Gore, Spectrum, Maury Microwave und andere.

Für die Messgröße Frequenz gilt das im Kapitel NF-Labor gesagte. Die speziellen Frequenzzähler, die bis weit in den GHz-Bereich messen können, haben für diese Funktion einen extra Eingang mit 50 Ohm Abschluß und N oder SMA Stecker. Zudem sind Messungen ab 10 Hz bis 125 MHz über einen weiteren BNC Eingang möglich. Ein Modell ist beispielsweise der Keysight Mikrowellenzähler Typ 5315xA bis 46 GHz. Mit diesem Zähler kann auch HF-Leistung mit einer Messunsicherheit von 1dB gemessen werden. Auch können digitale Oszilloskope für die Frequenzmessung mit etwas geringerer Messunsicherheit gut verwendet werden und haben zudem den Vorteil das man das Signal sieht. Wenn man viele spezielle Funktionen benötigt und nicht im GHz-Bereich messen muß, sollte nur ein Standardzähler beschafft und dafür etwas mehr Geld in eine Ofenoption gesteckt werden. Im Hobbybereich kann man mit einem GHz-Teiler einen normalen Zähler leicht aufrüsten.

Zum Messen der Messgröße Rauschen (Noise), wird immer als Referenz zum Anzeigegerät (Senke) eine Rauschquelle als Quelle benötigt. Es kann so eine Rauschquelle mit einer zweiten kalibriert werden oder es wird nach einer Referenzmessung und dem Einfügen eines Prüflings bei diesem Rauschen und Verstärkung (Gain) bestimmt. Früher wurde für die Messung des Rauschens ein spezieller Messempfänger wie HP 8970B (bis 1,5 GHz) oder einer der Firma Ailtech/Eaton/NoiseCom benötigt. Der Frequenzbereich über 2 GHz mußte mit einem externen Mischer (z.B.: TestSet HP8971C) und Generator aufgestockt werden.

Auch heute gibt es noch diese Möglichkeit (Keysight-N8975 bis 26,5GHz) oder man benutzt einen Spectrumanalyser mit spezieller Software, wie die K30 von Rohde&Schwarz oder anderer Hersteller wie zum Beispiel Anritsu. In allen Fällen muß dem Messgerät die Kalibrierdaten der benötigten Rauschquelle zur Korrektur bekannt sein. Zudem erfolgt der Betrieb und Steuerung der Quelle über das Messgerät. Als Rauschquellen mit höchster Präzision werden Hohlleiter- oder Koaxial-Quellen mit eingebauten Röhren (ähnlich einer Leuchtstoffröhre) verwendet. Sie sind über Jahrzehnte sehr stabil und lassen sich auf Grund ihres linearen Frequenzgangs gut zwischen den Kalibrierpunkten interpolieren. Die Firma Nore und HP bauten diese mit den zugehörigen Hochspannungsnetzteilen. Diese dienen dazu Halbleiterrauschquellen zu kalibrieren, die für die Messungen mit den üblichen Anzeigegeräten ideal sind. Heute gibt es sehr gute Halbleiterrauschquellen von HP/Agilent/Keysight (HP346) und auch ähnliche von NoiseCom. Der Frequenzbereich geht bis 50 GHz.

Für die Messgröße Phasenrauschen, ein wichtiger Parameter bei Oszillatoren und Generatoren, ist entweder je nach Messmethode ein spezieller Aufbau nötig, oder es werden mit vergrößerter Messunsicherheit Messungen mit einem Spectrumanalyser durchgeführt. So gibt es bei Rohde&Schwarz für die besseren Modelle eine Software (K40) um das Phasenrauschen von Generatoren bis 50 GHz einfach durchzuführen und auszuwerten. Es gibt auch komplette Phasenrauschsysteme von Aeroflex und HP Typ E5500 mit geringer Messunsicherheit bis zu 110 GHz.

Da selbst im Kalibrierbereich immer wieder neue Gerätetypen der verschiedenen Hersteller erhältlich sind, müssen zum Zeitpunkt der Beschaffung die Prospekte der bekannten Hersteller beachtet werden. In manchen Bereichen wie zum Beispiel Kapazitätsnormalen werden sich kaum noch technisch große Veränderungen zeigen. Selbst bei elektronischen Geräten werden durch bessere Software oft nur die Bedienungs und Messmöglichkeiten unabhängig von der schon ausgereizten Hardware verbessert.

Ver. 2.2017