

Weltweit größte Anlage für Drehmomentkalibrierungen

Drehmomentaufnehmer können in der PTB jetzt bis in den MN · m-Bereich kalibriert werden. Mit der neuen 1,1-MN · m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung stehen in der PTB Messeinrichtungen über neun Dekaden zur Verfügung, die weitgehend alle Anforderungen aus Industrie und Forschung mit der erforderlichen Messunsicherheit abdecken können.

Weltweit waren bisher rückführbare Kalibrierungen bis 200 kN · m nur in Frankreich, im metrologischen Staatsinstitut LNE/Paris, möglich. Mit der neuen PTB-Anlage können nun Messmittel bis zu einem Drehmoment von 1,1 MN · m mit einer Messunsicherheit von 0,1 % kalibriert werden. Der Einbauraum dieser Normalmesseinrichtung ermöglicht es auch, Messgeräte mit einem höheren Nennmoment (derzeitig werden weltweit Aufnehmer bis 2,5 MN · m hergestellt) in die Einrichtung einzupassen und in Teilbereichen zu kalibrieren.

Das Drehmoment wird – im Gegensatz zu der mit Direktbelastung dargestellten Skala bis 20 kN · m – über einen gleicharmigen Doppelhebelarm mit mechanischen Spindelantrieben in der unteren Maschinenplattform erzeugt. Der zu kalibrierende Drehmomentaufnehmer wird vertikal in Reihe zu einem Drehmoment-Referenzaufnehmer eingebaut. Die Konstruktion erlaubt es, das wirkende Drehmoment über die Zug-Druckkraftaufnehmer, die an einem Doppelhebelarm in dem oberen Querhaupt angeordnet sind, nahezu störkomponentenfrei zu messen.

Seit Mai 2004 befindet sich das Normal in der Erprobung und Justage. Erste Kalibrierungen bis 100 kN · m und nachfolgend bis 700 kN · m sowie

Testergebnisse bis 1,1 MN · m bestätigen die Funktionsfähigkeit der Einrichtung und des gewählten Funktionsprinzips. Bereits in dieser Phase wurden erste Kalibrieraufträge der Industrie durchgeführt. Ab 2005 soll der reguläre Kalibrierbetrieb aufgenommen werden.

Weitergehende Informationen von D. Peschel, Tel. (05 31) 592-11 30, E-Mail: diedert.peschel@ptb.de



Die neue 1,1-MN · m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung der PTB befindet sich derzeit in der Erprobungsphase, wird aber von der Industrie bereits nachgefragt. So konnte schon mit dieser Anlage für das Prüffeld von Siemens Power Generation eine spezielle Messwelle kalibriert werden, die zur Leistungsmessung an Prototypen von schweren Kraftwerks-Gasturbinen zum Einsatz kommt.

SQUID-Stromsensoren messen ungeschirmt

In der PTB wurden hochempfindliche, leicht einzusetzende Stromsensoren mit speziell verschalteten SQUIDs entwickelt, die aufgrund ihrer Störfestigkeit ohne weitere Abschirmmaßnahmen in magnetischen Störfeldern von der Größenordnung des Erdfelds betrieben werden können. Sie haben dadurch kleine Abmessungen und sind für eine breite Palette messtechnischer Aufgaben geeignet.

SQUIDs (Superconducting QUantum Interference Devices), die üblicherweise zur empfindlichen Magnetfeldmessung verwendet werden, lassen sich auch sehr gut für die Messung kleinster elektrischer Ströme einsetzen. So sind sie hervorragend als Vorverstärker für bestimmte Typen von

Strahlungsdetektoren wie Mikrokalorimeter oder supraleitende Hot-Spot-Detektoren geeignet, die wie die SQUIDs selbst bei Helium- (4,2 K) oder noch tieferen Temperaturen betrieben werden.

In einem vom BMWA geförderten Vorhaben hat die PTB in Kooperation mit der Vericold GmbH, Ismaning, und der Magnicon GbR, Schenfeld, SQUID-Stromsensoren entwickelt, die speziell für die Anwendung bei der energiedispersiven Röntgenspektroskopie ausgelegt sind, aber auch für andere messtechnische Aufgaben wie bei der Darstellung und Weitergabe der elektrischen Einheiten eingesetzt werden können. Üblicherweise wird bei einem als Stromsensor eingesetzten SQUID der zu

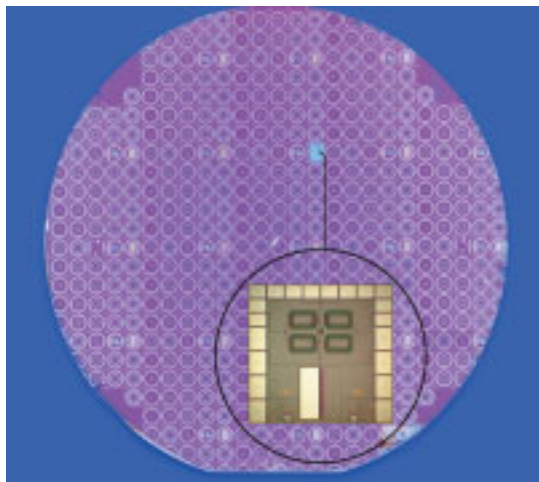
Fortsetzung auf Seite 2

messende Strom in eine Spule eingespeist, die so angeordnet ist, dass der magnetische Fluss der Spule das SQUID durchdringt. Mit derartigen Stromsensoren ließen sich in der PTB sehr gute Rauschwerte realisieren (bisher ca. 1 pA/√Hz für Frequenzen >1 Hz). Die verwendeten Schaltungen werden mit Niob als Supraleiter in einer Mehrlagentechnologie mit Strukturbreiten von 2,5 µm gefertigt. Kürzlich wurden erste Stromsensoren mit

einem neuen störungsunempfindlichen Design erfolgreich getestet. Aufgrund ihrer gradiometrischen Anordnung können sie trotz ihrer höchsten Empfindlichkeit ungeschirmt in magnetischen Störfeldern mit Amplituden in der Größenordnung des Erdfeldes (ca. 50 mT) abgekühlt und dann ohne Degradation der Kennlinien und des Stromrauschens betrieben werden. Außerdem kann man sie direkt auf massive Kupfersubstrate, die üblicherweise starkes Rauschen produzieren, montieren, ohne dass es zu einer Verschlechterung der Kenngrößen kommt. Eine solche Montage verbessert die thermische Kontaktierung erheblich und macht die neuen Sensoren erstmals für den Einsatz bis in den Millikelvinbereich geeignet. In der neuesten Version werden Serienschaltungen von bis zu 16 gleichen SQUIDs eingesetzt, um den Dynamikbereich zu erhöhen. Die gleichzeitig betriebene Weiterentwicklung der zur Auslesung der Sensoren verwendeten Elektronik soll eine Erweiterung der Bandbreite von derzeit 5 MHz auf 20 MHz ermöglichen. Die neuen Stromsensoren sind für interessierte Anwender kommerziell über die Firma Magnicon GbR verfügbar, die auch die PTB-SQUID-Elektroniken in Lizenz fertigt und vertreibt.

Weitergehende Informationen von Th. Schurig, Tel. (030) 34 81-290, E-Mail: thomas.schurig@ptb.de

Abbildung: 3" Wafer mit ca. 400 Stromsensorchips, darin ein vergrößerter Einzelchip.



Ausleuchtung von Kernspinaufnahmen

Mit Hilfe einer in der PTB entwickelten kohärent betriebenen 4-Kanal-Arrayspeule für die 3-Tesla-Kernspintomographie kann die hochfrequente Magnetfeldverteilung im zu untersuchenden Körperareal aktiv beeinflusst und damit eine gleichmäßigere Ausleuchtung der Kernspinaufnahmen von Hoch- und Höchstfeld-Tomographen erreicht werden.

In der klinischen Kernspintomographie (auch MRT genannt) werden derzeit Magnetfelder mit einem statischen Grundfeld von bis zu 3 T eingesetzt. Der Trend geht in Richtung noch höherer Magnetfelder von 7 T und mehr, um Empfindlichkeit und Auflösung des Verfahrens weiter zu erhöhen. Zur Abbildung der Wasser-Protonen im menschlichen Körper wird mit Hilfe einer Hochfrequenzspule ein zusätzliches Magnetfeld B_1 mit Frequenzen zwischen 125 MHz (3 T-MRT) und 500 MHz (11,7 T-MRT) eingestrahlt. Im Körper wird, wegen der hohen Dielektrizitätskonstanten von Wasser, die Wellenlänge dieser elektromagnetischen Strahlung auf etwa 30 cm bis 8 cm verkürzt. Dadurch kommt es zu wellenartigen Ausbreitungsphänomenen, die zu stark inhomogen ausgeleuchteten Kernspinaufnahmen führen und den angestrebten Empfindlichkeitsgewinn von Höchstfeld-Tomographen zum Teil wieder zunichte machen.

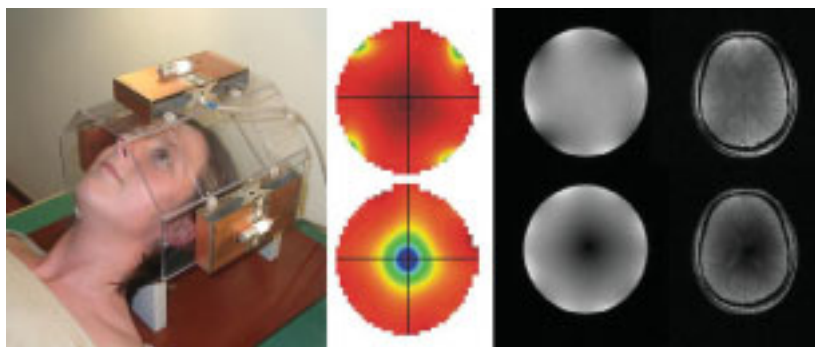
Mit kohärent angesteuerten Anordnungen von mehreren Sende-Empfangsspulen (TR-Arrays) kann jedoch die Verteilung des hochfrequenten magnetischen B_1 -Feldes im Körper kontrolliert werden, vorausgesetzt, die einzelnen Sendespulen

werden mit geeigneten HF-Amplituden und HF-Phasen angesteuert.

Die PTB hat in einem BMWA-geförderten Projekt gemeinsam mit der Bruker Biospin MRI GmbH eine auf diesem Prinzip basierende 4-kanalige Kopfspule aufgebaut und Messverfahren zur Bestimmung der B_1 -Verteilung entwickelt. In Modellrechnungen wurden die Verteilung des B_1 -Feldes und der spezifischen Absorptionsrate (SAR) im menschlichen Kopf bestimmt. Zum Schutz des Patienten vor Überwärmung darf die SAR bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten. Über Vergleiche mit Phantommessungen wurde das numerische Modell validiert. Mit den Simulationsrechnungen können die Ansteuerbedingungen des Arrays bestimmt werden, die eine möglichst homogene Verteilung des B_1 -Feldes im Körper ergeben und die Patientensicherheit gewährleisten.

Weitergehende Informationen von F. Seifert, Tel. (030) 34 81-377, E-Mail: frank.seifert@ptb.de

Die neue 4-Kanal-Kopfspule (l.) mit für verschiedene Ansteuerbedingungen berechneten B_1 -Verteilungen (oben: „homogener“ Modus, unten: „Donut“-Modus) und den zugehörigen Kernspinaufnahmen im Phantom bzw. in vivo.



Lichtmikroskop misst Nanostrukturen

Zwei in der PTB entwickelte Verfahren machen es möglich, mit einem Lichtmikroskop die Größe von Strukturen bis hinunter zu hundert Nanometern zu erfassen und damit unterhalb der klassischen Auflösungsgrenze zu messen.

In vielen Bereichen der Naturwissenschaft und Technik werden immer kleinere Strukturen mit Abmessungen im Mikro- und Nanometerbereich verwendet. Dabei müssen oft, beispielsweise um die Funktionsfähigkeit eines mikroelektronischen Bauelements zu beurteilen, die geometrischen Abmessungen dieser Strukturen ermittelt werden. Lichtmikroskopische Messungen sind einfach, schnell und kostengünstig. Liegt die Größe der zu messenden Strukturen jedoch im Bereich der verwendeten optischen Wellenlänge (365 nm bis 546 nm), werden die so genannten Proximity-Effekte zu einem Problem. Dabei überlagern sich die Beugungsbilder der beiden Strukturkanten.

In der PTB konnte gezeigt werden, dass sich diese Effekte deutlich reduzieren lassen, wenn man die Strukturen seitlich im streifenden Einfall beleuchtet und dabei die Beleuchtungsrichtung abwechselt. Bei einseitiger Beleuchtung mit einem Laserstrahl mit geeigneter Polarisation wird das Licht hauptsächlich an der der Einstrahlrichtung zugewandten Strukturkante gestreut. Wechselt man die Richtung des Lichts, kann man gezielt zwischen den Beugungsbildern der ansteigenden und abfallenden Kanten einer Struktur schalten und diese damit zeitlich getrennt messen.

Basierend auf diesem Prinzip wurden zwei (Dunkelfeld-) Mikroskopieverfahren entwickelt, die es erlauben, Strukturgrößen unterhalb der klassischen Auflösungsgrenze der Lichtmikroskopie hochgenau zu messen, wobei die Messunsicherheit von 50 nm auf 20 nm reduziert werden konnte.

Bei der ersten Methode, der AGID-Mikroskopie (alternating grazing incidence dark field microscopy), wird die zu untersuchende Struktur in Auflicht beleuchtet, während bei der zweiten Methode, dem FIRM-Verfahren (frustrated total internal reflection microscopy), die Beleuchtung in Durchlicht erfolgt. Hier ist zusätzlich eine spezielle Optik realisiert worden, mit der das Licht in das Substrat der zu messenden Probe eingekoppelt wird.

Die beiden Methoden sind bereits von der Industrie aufgegriffen worden und sollen Anwendung im Bereich der Inspektionssysteme für Photomasken in der Halbleiterindustrie sowie in der Strukturgrößencharakterisierung von Nano- und Mikropartikeln finden.

Zurzeit wird die Technologie im Rahmen eines gemeinsamen Projektes mit Industriepartnern weiterentwickelt mit dem Ziel, Anwendern verbesserte Strukturbreitenmesssysteme zur Verfügung zu stellen, die bei Verwendung einer Wellenlänge von 375 nm eine lineare Messung von Strukturbreiten bis hinunter zu 100 nm erlauben. Gegenüber konventionellen Hellfeld-Mikroskopen der gleichen Wellenlänge entspricht dies einer Verbesserung um einen Faktor zwei.



Weitergehende Informationen von B. Bodermann, Tel. (05 31) 592-42 22, E-Mail: bernd.bodermann@ptb.de

Messeinrichtung für kleinste Kräfte

Die zunehmende Miniaturisierung in der Mikrosystemtechnik und Nanotechnologie erfordert von der dimensionellen Messtechnik rückführbare Antastkräfte im mN-Bereich und darunter. Eine in der PTB aufgebaute Mikrokräftmesseinrichtung für den Bereich von 1 mN bis 5 N ermöglicht über eine modifizierte Kompensationswaage den Anschluss an die Masseskala.

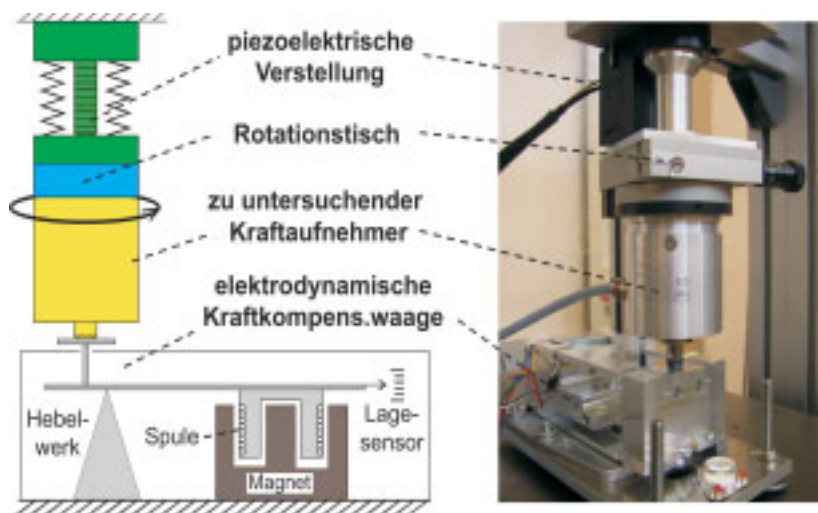
In der Messeinrichtung dienen eine piezoelektrische Feinverstellung zur Erzeugung und eine modifizierte elektrodynamische Kompensationswaage zur Rückführung der Kraft. Der zu untersuchende Kraftaufnehmer wird zwischen Waage und Feinverstellereinrichtung positioniert. Durch Variation des piezoelektrisch erzeugten Verschiebeweges können unterschiedliche Lastverläufe generiert werden, wobei das Kraftaufnehmersignal mit dem kalibrierten Waagensignal verglichen wird.

Um möglichst den gesamten piezoelektrisch zur Verfügung stehenden Verschiebeweg von 100 mm

zur Krafterzeugung zu nutzen, sind an der Waage verschiedene Modifikationen vorgenommen worden, die die lastabhängige Absenkung der Antastposition minimieren. Auf Grund der endlichen Steifigkeit des Hebelmechanismus in der Waage verbleibt bei einer eingeleiteten Kraft von 5 N eine interferometrisch bestimmte geringe Absenkung von etwa 4,5 mm.

Der Messbetrieb erfolgt kraftgeregelt auf das Signal eines zu prüfenden Kraftaufnehmers. Die Linearitätsabweichungen zwischen den Aufnehmerwerten und den mit der Messeinrichtung erzeugten und gemessenen Kraftwerten liegen innerhalb von ± 5 Digitalisierungsschritten des Aufnehmerverstärkers. Mögliche Wechselwirkungseinflüsse zwischen Aufnehmer und Messeinrichtung werden mit Hilfe eines integrierten Rotationstisches – durch Rotation um seine eigene Kraftachse – erfasst und über Mittelwertbildung berücksichtigt.

Fortsetzung auf Seite 4



Die relativen Messabweichungen zu den Kalibrierungen der Aufnehmer in der 200-N-Kraft-Normalmesseinrichtung der PTB im Messbereich von 1 N bis 5 N liegen unterhalb von $5 \cdot 10^{-4}$.

Der modulare Aufbau der Messeinrichtung ermöglicht durch den Einsatz präziserer Laborkompensationswaagen die Erweiterung auch in den mN-Kraftbereich.

Weitergehende Informationen von R. Kümme,
Tel. (05 31) 592-11 21,
E-Mail: rolf.kuemme@ptb.de

Sind Naturkonstanten wirklich konstant?

Die Diskussion über mögliche Variationen von Naturkonstanten war in den letzten Jahren sehr angeregt, da astrophysikalische Beobachtungen auf eine signifikante Änderung der Feinstrukturkonstanten α vor etwa fünf bis zehn Milliarden Jahren hinzuweisen scheinen. Die PTB hat eine mögliche zeitliche Änderung von α aufzuspüren versucht und dazu über einen Zeitraum von drei Jahren verschiedene atomare Frequenzen miteinander verglichen. Das Ergebnis: Eine gegenwärtige zeitliche Änderung von α kann bis auf eine Grenze von $2 \cdot 10^{-15}$ pro Jahr (relative Änderung) ausgeschlossen werden.

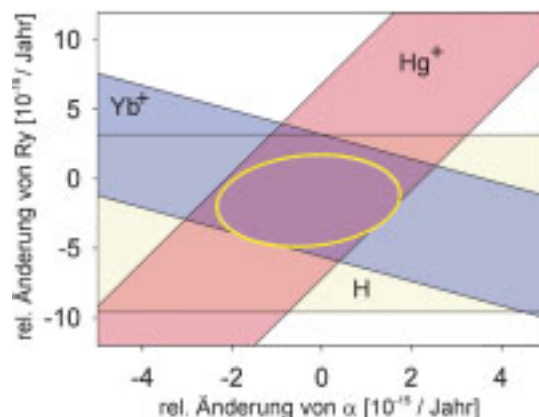
Das Postulat der Konstanz von fundamentalen Größen – wie etwa der Lichtgeschwindigkeit – ist grundlegend für unser physikalisches Weltbild, damit auch entscheidend für die Metrologie und sollte experimentell verifizierbar sein. Neue theoretische Modelle einer einheitlichen Beschreibung der physikalischen Wechselwirkungen lassen Variationen dieser Größen nämlich durchaus zu oder lassen sie sogar als unabdingbar erscheinen.

Der wichtigste Testfall ist die Feinstrukturkonstante α , eine aus der Lichtgeschwindigkeit, der Elementarladung und der Planck-Konstanten zusammengesetzte, einheitenlose Zahl, die bei vielen elektrischen und atomaren Phänomenen auftritt. Durch den Vergleich von Atomuhren, die auf unterschiedlichen atomaren Übergangsfrequenzen basieren, kann ein empfindlicher Test durchgeführt werden: Würde α sich mit der Zeit ändern, so würden diese Uhren in ihrem Gang mehr und mehr voneinander abweichen, da α jede atomare Übergangsfrequenz auf spezifische Weise beeinflusst.

In der PTB wurde ein optisches Frequenznormal auf der Basis eines gespeicherten Ytterbium-Ions im Abstand von drei Jahren zweimal mit der primären Caesium-Uhr CSF1 („Springbrun-

nenuhr“) verglichen. Im Rahmen der kombinierten Unsicherheit stimmten beide Ergebnisse gut überein; die Frequenz des optischen Normals hat sich relativ zur Caesiumuhr nicht verändert. Ähnliche Resultate wurden im Zeitraum 1999 bis 2003 auch im amerikanischen Metrologie-Institut NIST in Boulder mit der optischen Frequenz eines gespeicherten Quecksilber-Ions und in einer Kooperation des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik (MPQ) in Garching mit dem französischen Metrologie-Institut BNM-SYRTE (Paris) bei der Untersuchung atomaren Wasserstoffs gewonnen.

Die Kombination dieser Ergebnisse erlaubt es, eine eindeutige Aussage über die Konstanz von α zu treffen. Sollte es dynamische Entwicklungen der Konstanten in der Frühzeit des Universums gegeben haben, so sind diese in unserer Zeit offensichtlich soweit abgeklungen, dass sie mit heutiger Messpräzision nicht nachweisbar sind.



Das Diagramm zeigt die Ergebnisse der optischen Frequenzmessungen von Übergängen an Yb- und Hg-Ionen und am H-Atom (mit ihren jeweiligen 1-s-Unsicherheiten). Aufgetragen ist die relative Änderung der Rydbergfrequenz gegen die relative Änderung der Feinstrukturkonstanten. Da der Nullpunkt des Diagramms, in dem Ry und α streng konstant sind, sich innerhalb des kombinierten „Unsicherheitsbereichs“ (zentrale Ellipse) befindet, kann das Messergebnis keine Variation von Ry und α feststellen.

PTBnews 04.3
Deutsche Ausgabe
Dezember 2004
ISSN 1611-1621

Herausgegeben von der
Physikalisch-Technischen
Bundesanstalt (PTB)
Braunschweig und Berlin

Chefredakteur Jens Simon
PTB, Bundesallee 100
38116 Braunschweig
Telefon: (05 31) 592-30 06
Fax: (05 31) 592-30 08
E-Mail: ptbnews@ptb.de
Webseite: <http://www.ptb.de/>

Weitergehende
Informationen von E. Peik,
Tel. (05 31) 592-44 12,
E-Mail:
ekkehard.peik@ptb.de