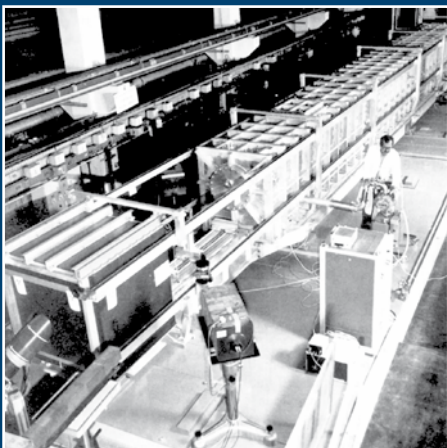
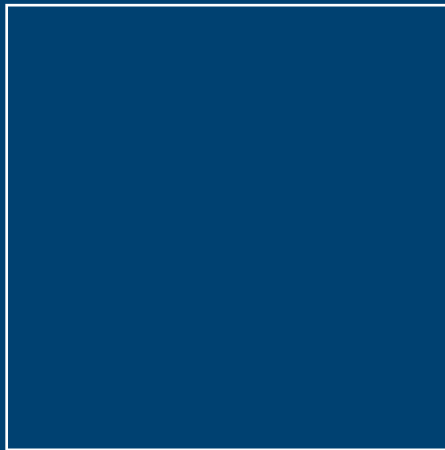


Aus der metrologischen Welt

- Zum Gedenken an Dieter Kind
- Die Doppelnatur des Neutrons
- Qualität von Verbrauchszählern





**Fachorgan für Wirtschaft und Wissenschaft, Amts- und
Mitteilungsblatt der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin**

128. Jahrgang, Heft 2, Oktober 2018

Aus der metrologischen Welt

Inhalt

▪ Zum Gedenken an Prof. Dr.-Ing. Dieter Kind	03
PTB historisch	
▪ Die Doppelnatur des Neutrons: Teilchen und Welle	11
<i>Rüdiger Jahr</i>	
▪ Ehemaliger Forschungsreaktor der PTB	20
<i>Jens Simon</i>	
Recht und Technik	
▪ Sicherung der Qualität von Verbrauchszählern für zukünftige Zeiträume	27
<i>Katy Klauenberg und Clemens Elster</i>	
PTB-Innovationen	
▪ Ausgesuchte Technologieangebote	37

ZUM GEDENKEN AN DIETER KIND

PRESSEMITTEILUNG DER PTB

Professor Dr.-Ing. Dieter Kind verstorben

Der ehemalige Präsident der PTB wurde 88 Jahre alt



Prof. Dr.-Ing. Dieter Kind
5.10.1929 – 10.6.2018
(Foto: PTB; Aufnahmedatum: 24. Mai 2017)

In der über 130-jährigen Geschichte der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) hat er ein sehr gewichtiges Kapitel entscheidend mitgeschrieben. Nahezu 20 Jahre lang hat Prof. Dr.-Ing. Dieter Kind die Geschicke der Bundesanstalt als Präsident geführt und – als ein herausragendes Ereignis seiner Amtszeit – die Vereinigung der PTB mit ihrer ostdeutschen „Schwesterinstitution“ gestaltet. Am Sonntag, den 10. Juni 2018, ist Dieter Kind im Alter von 88 Jahren nach kurzer schwerer Krankheit in einem Braunschweiger Krankenhaus verstorben.

Unter den 14 Persönlichkeiten, welche die PTB bzw. ihre Vorgängerinstitution, die Physikalisch-Technische Reichsanstalt (gegründet 1887), bis heute geleitet haben, fällt bei Dieter Kind die Länge seiner Amtszeit (von 1975 bis 1995) auf. Kein Präsident vor ihm und keiner nach ihm bekleidete so lange das Präsidentenamt. Aber das eigentlich Bemerkenswerte sind die Wirkungen, die Dieter Kind für die PTB erzielen konnte, nicht nur national, sondern auch international, etwa als Präsident des höchsten Gremiums in der Welt der Metrologie, des Internationalen Komitees für Maß und Gewicht der Meterkonvention.

Dieter Kind hatte Elektrotechnik in Berlin und München studiert, in Hochspannungstechnik promoviert und war ab 1962 Professor an der (damals noch) Technischen Hochschule Braunschweig, bevor er 1975 zum Präsidenten der PTB ernannt wurde. Erstmals stand damit ein Ingenieur dieser im Kern sehr physikalisch orientierten Institution vor. Eine Aufgabe, die sicher für beide Seiten – die Welt der Ingenieure und die Welt der Physiker – etwas Besonderes war. Dieter Kind meisterte diese Aufgabe mit Bravour, was sich auch in den zahlreichen Ehrungen und Preisen ausdrückt, die ihm verliehen wurden. Unter anderem wurde ihm am Ende seiner Amtszeit das Große Verdienstkreuz des Verdienstordens der Bundesrepublik Deutschland verliehen.

Zu den großen Herausforderungen seiner Amtszeit zählte die damals noch in der PTB beheimatete Zuständigkeit für die „Sicherstellung und Endlagerung radioaktiver Abfälle“ – ein in jeder Hinsicht schwieriges Thema, das Ende der 1980er Jahre in eine eigene Bundesbehörde, das Bundesamt für Strahlenschutz, ausgelagert wurde. Die größte Herausforderung jedoch wurde durch die Deutsche Wiedervereinigung ausge-

löst. Diese betraf auch die bis dahin geteilte Welt der Metrologie – mit der PTB in Braunschweig und Berlin-Charlottenburg sowie dem Amt für Standardisierung und Messwesen (ASMW) in Berlin-Friedrichshagen. Die erfolgreiche Integration der metrologischen Abteilungen des ASMW und der dort beschäftigten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter war eine der größten Leistungen von Dieter Kind.

Mit Dieter Kind verlieren die PTB und die gesamte metrologische Welt einen unermüdlichen Geist, der sich auch weit nach seiner offiziellen Amtszeit um die Belange „seiner Bundesanstalt“ kümmerte und sie mit Rat und Tat unterstützte.

jes/ptb

Am 10. Juni 2018 verstarb im Alter von 88 Jahren der ehemalige
Präsident der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dieter Kind

Nahezu 20 Jahre lang hat Prof. Dieter Kind die Geschicke der
Physikalisch-Technischen Bundesanstalt als Präsident geleitet.

Sein Wirken hat zum weltweiten hohen Ansehen der PTB
entscheidend beigetragen. Mit Dieter Kind verlieren wir und die
gesamte metrologische Welt einen unermüdlichen Geist, der sich
auch weit über seine offizielle Amtszeit hinaus um die Belange
„seiner Bundesanstalt“ kümmerte und sie mit
Rat und Tat unterstützte.

Wir nehmen in Trauer Abschied von einem großen Präsidenten,
gradlinigen Menschen und Grandseigneur der Wissenschaft
und der Technik.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Der Präsident
Prof. Dr. Joachim Ullrich

Für den Personalrat
Wolfgang Krien

Braunschweiger Zeitung
vom 16. Juni 2018

WORTE DER AMTSNACHFOLGER

Nachruf auf Dieter Kind

Ernst O. Göbel und Joachim Ullrich

In der über 130-jährigen Geschichte der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) und ihrer Vorgängerorganisation, der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (PTR), hat Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dieter Kind ein sehr wichtiges Kapitel entscheidend mitgeschrieben. Nahezu 20 Jahre lang hat er die Geschicke der Bundesanstalt als Präsident geführt und – als ein herausragendes Ereignis seiner Amtszeit – die Vereinigung der PTB mit ihrer ostdeutschen "Schwesterinstitution", dem Bereich Messwesen des "Amtes für für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung (ASMW)", erfolgreich gestaltet. Am 10. Juni 2018 ist Dieter Kind, Träger des Bundesverdienstkreuzes am Bande und des Bundesverdienstkreuzes 1. Klasse, im Alter von 88 Jahren nach kurzer schwerer Krankheit verstorben.

Unter den 14 Persönlichkeiten, die die PTB bzw. die PTR, welche 1887 gegründet wurde, bis heute geleitet haben, fällt bei Dieter Kind zunächst die Länge seiner Amtszeit auf. Kein Präsident vor und nach ihm bekleidete so lange das Präsidentenamt. Aber das eigentlich Bemerkenswerte sind die Wirkungen, die Dieter Kind während dieser Zeit für die PTB erzielen konnte, nicht nur national, sondern insbesondere auch international. Unter anderem war er acht Jahre lang Präsident des höchsten Gremiums in der Welt

der Metrologie, des Internationalen Komitees für Maß und Gewicht der Meterkonvention, die inzwischen mehr als hundert Mitglieds- und assoziierte Staaten umfasst.

Dieter Kind wurde 1929 in Reichenberg in Böhmen geboren, besuchte die Schulen seiner Heimatstadt und legte nach der 1945 erfolgten Aussiedlung nach Freiberg in Sachsen das Abitur ab. Er studierte Elektrotechnik in Berlin und München und wurde 1957 an der Technischen Universität München mit einer Arbeit auf dem Gebiet der Hochspannungstechnik „mit Aus-

zeichnung“ promoviert. Anschließend ging er als Direktionsassistent zur Fa. Meßwandler-Bau GmbH nach Bamberg. 1962 wurde er als Nachfolger von Prof. Erwin Marx zum Direktor des Instituts für Hochspannungstechnik und Elektrische Anlagen an die (damalige) Technische Hochschule Braunschweig berufen. Während seiner Zeit als Institutsdirektor hat Dieter Kind richtungsweisende Forschungsarbeiten auf den Gebieten der Hochspannungsprüf- und -messtechnik sowie der Hochspannungsgleichstromübertragung geleistet. Dabei war er seinen Mitarbeitern und Schülern ein vorbildlicher Lehrer, Freund und Förderer.

Am 1. Juli 1975 bekam die PTB erstmals einen Ingenieur an ihre Spitze. Dieter Kind trat das Amt des Präsidenten an, das er bis zu seinem Eintritt in den Ruhestand 1995 innehatte. In seiner Amtszeit hat Dieter Kind mehrere zukunftsweisende Projekte vorangetrieben. Beispielhaft seien hier die Beteiligung am Berliner Synchrotron BESSY, das ohne das kräftige Mitwirken der PTB nicht zustande gekommen wäre, sowie die Errichtung des Reinraumzentrums in Braunschweig genannt.

Beide Entwicklungen wirken sich bis heute äußerst positiv aus. Ganz wesentlich hat Dieter Kind auch die europäische und internationale Einbindung der PTB vorangebracht, beispielsweise durch sein Engagement bei der Gründung von EUROMET (heute EURAMET), der regionalen Organisation der europäischen Metrologieinstitute, und seine langjährige Tätigkeit als Präsident des Internationalen Komitees für Maß und Gewicht (CIPM) der Meterkonvention.

Auch der verantwortungsvolle Umgang mit der schwierigen Aufgabe der „Endlagerung und Sicherstellung radioaktiver Abfälle“, welche der PTB mit der 4. Novelle zum Atomgesetz 1976 bis zur Gründung des BfS 1989 übertragen wurde, zählt zu seinen großen Verdiensten.

Die größte Herausforderung in seiner Amtszeit war aber sicher die im Rahmen der Wiedervereinigung übertragene Aufgabe, nach der erfolgten Auflösung des ASMW den Standort in Berlin-Friedrichshagen zu übernehmen und die metrologischen Aktivitäten zusammenzuführen.

Dieter Kind ist es gelungen, diesen für viele Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des ASMW schwierigen und zum Teil schmerzlichen Prozess fachlich und menschlich ausgewogen zu gestalten und dabei die PTB wegweisend zu erweitern und fachlich zu stärken.

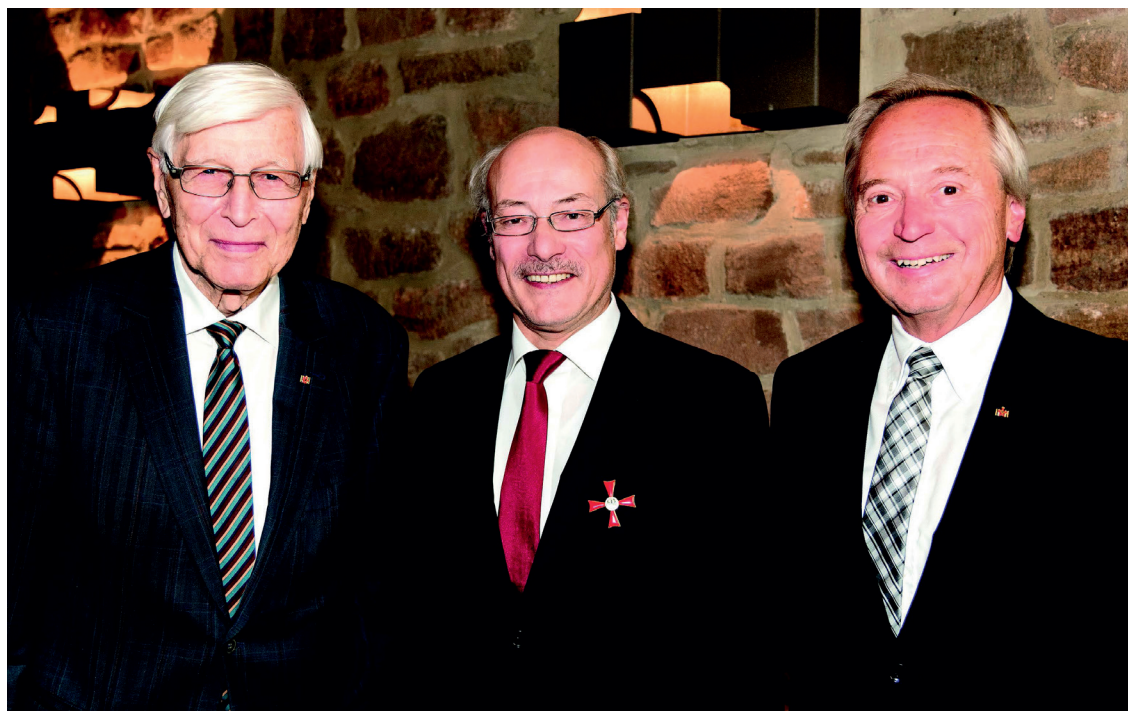
Die Entwicklung der PTB zu einem der international führenden Metrologieinstitute wird für immer mit dem Namen Dieter Kind verbunden sein. Mit ihm verlieren wir und verliert die gesamte metrologische Welt einen unermüdlichen Geist und Förderer, der sich auch weit über seine offizielle Amtszeit hinaus um die Belange „seiner Bundesanstalt“ kümmerte und sie mit Rat und Tat unterstützte. Wir werden Dieter Kind ein ehrendes Andenken bewahren und nehmen in Trauer Abschied von einem großen Präsidenten, gradlinigen Menschen und Grandseigneur der Wissenschaft und der Technik.



Prof. Dr. Ernst O. Göbel,
ehem. Präsident der PTB
von 1995 bis 2011



Prof. Dr. Joachim Ullrich,
Präsident der PTB seit 2012



Von links: Professor Dr. Kind, Professor Dr. Ullrich, Professor Dr. Göbel

NACHRUF DER CHINESISCH-DEUTSCHEN ZUSAMMENARBEIT IN DER METROLOGIE

Zum Gedenken an den früheren Präsidenten der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Prof. Dr.-Ing. Dieter Kind

Zhao Kegong¹, Liu Xinmin², Konrad Herrmann³

Der Begründer der chinesisch-deutschen Zusammenarbeit in der Metrologie und frühere Präsident der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB), Prof. Dr.-Ing. Dieter Kind, ist am 10. 6. 2018 nach kurzer, schwerer Krankheit im Alter von 88 Jahren in einem Braunschweiger Krankenhaus verstorben.



Der Vorläufer der PTB, die Physikalisch-Technische Reichsanstalt (PTR) wurde im Jahre 1887 als die erste staatliche wissenschaftliche Forschungsinstitution der Welt gegründet. In ihrer mehr als 130-jährigen Geschichte nahm Professor Kind an wichtigen historischen Entscheidungen teil. Als Präsident leitete er die PTB zwanzig Jahre lang (1975–1995). Einer seiner herausragendsten Beiträge während seiner Amtszeit war nach der Vereinigung der beiden deutschen Staaten die Integration der Metrologie der früheren DDR in die PTB.

In den mehr als 130 Jahren von der PTR bis zur PTB wirkten 14 Präsidenten. Unter ihnen verdienen die zwanzig Jahre der Amtszeit von Prof. Kind besondere Beachtung. Während seiner Amtszeit war es ihm ein Anliegen, eine enge Verbindung zwischen der Metrologie und den Natur- und Ingenieurwissenschaften herzustellen. Insbesondere wurden umfangreiche Forschungen durchgeführt, um auf der Grundlage der Quantenphysik die Definitionen der sieben Basiseinheiten zu erneuern. Ferner wurden bahnbrechende Arbeiten durchgeführt, damit die Metrologie direkt dem Aufbau der Wirtschaft dient. Prof. Kind leistete nicht nur umfassende Arbeiten zur Entwicklung von Wirtschaft, Technologie und Gesellschaft in Deutschland, sondern mit seinem hervorragenden Wissen übte er einen eminenten Einfluss auf die internationale Metrologie aus. Viele Jahre übte er das Amt eines Präsidenten des höchsten Gremiums der internationalen Metrologie – des Internationalen Komitees für Maß und Gewicht aus. So leistete er einen bleibenden Beitrag für die Entwicklung der internationalen Metrologie und die internationale Zusammenarbeit in der Metrologie!

Prof. Kind hatte Elektrotechnik in Berlin und München studiert und wurde auf dem Gebiet der Hochspannungstechnik promoviert. Ab 1962 war er Professor an der Technischen Hochschule Braunschweig und wurde 1975 zum Präsidenten der PTB ernannt. Eine große Herausforderung während seiner Amtszeit war die „Sicherstellung und Endlagerung radioaktiver Abfälle“, wofür die PTB zuständig war. In jeder Hinsicht war das eine komplizierte Aufgabe. Ende der 80er Jahre des vorigen Jahrhunderts wurde diese Zuständigkeit in das Bundesamt für Strahlenschutz verlagert. Eine andere außerordentliche Aufgabe war nach der Vereinigung der beiden deutschen Staaten die reibungslose, effektive Zusammenführung des staatlichen Metrologieinstituts der Bundesrepublik mit

- ¹ Prof. Zhao Kegong, früherer Präsident des nationalen Instituts für Metrologie Chinas
- ² Liu Xinmin, stellvertretender Leiter der Hauptabteilung für Metrologie des früheren Staatlichen Hauptamts für Qualitätssicherung
- ³ Dr. Konrad Herrmann, ehemaliger Laborleiter in der Abteilung Fertigungsmesstechnik der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt und Kontaktperson der chinesisch-deutschen Zusammenarbeit in der Metrologie

dem Bereich Messwesen des Amts für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung (ASMW) der früheren DDR. Deshalb erhielt er zahlreiche staatliche Auszeichnungen. Unter anderem wurde ihm das Große Verdienstkreuz des Verdienstordens der Bundesrepublik Deutschland verliehen.

Prof. Kind genießt auch hohes Ansehen in der Metrologie Chinas. Im Jahre 1977 besuchte er auf Einladung des Botschafters Chinas in der Bundesrepublik China. Damals suchte er das Nationale Institut für Metrologie Chinas (NIM) auf, das bei ihm einen tiefen Eindruck hinterließ. Nach der Rückkehr in die Heimat untersuchte er mit Unterstützung der Botschaft Chinas in Deutschland Möglichkeiten der wissenschaftlich-technischen Zusammenarbeit in der Metrologie. Durch gemeinsame Anstrengungen der chinesischen und der deutschen Seite besuchte im Oktober 1979 eine Delegation des Staatlichen Hauptamts für Metrologie Chinas die Bundesrepublik und unterzeichnete mit Prof. Kind als Vertreter des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie ein Abkommen über die Zusammenarbeit. Der Inhalt betraf die Entwicklung der Zusammenarbeit auf 12 Gebieten der Metrologie.



Nach der Unterzeichnung des Abkommens setzte die PTB unter Leitung des Präsidenten Kind den Inhalt des Abkommens aktiv um. Zum Beispiel benötigte das NIM damals dringend eine Wolframfadenslampe als Hochtemperaturnormal; auf dem Gebiet der geometrischen Messungen wurde dringend für die Zahnradmetrologie eine Evolventenverkörperung benötigt. Die PTB hatte dem NIM ihre Normale rechtzeitig zur Verfügung gestellt.



Foto: 1980 übergab eine Delegation der PTB bei einem Besuch im NIM ein Evolventennormal für Zahnräder

Auf den Gebieten von Zeit und Frequenz, der Längennormale, der Normale für elektromagnetische Messungen, der Kraftmetrologie, der optischen Messungen und anderen Gebieten der Metrologie erhielt China durch die PTB tatkräftige Unterstützung. Viele Verwaltungsangestellte der Metrologie in China und Angehörige des Forschungspersonals der Metrologie besuchten die PTB. Mehrere hundert chinesische Metrologen hielten sich in der PTB ein halbes Jahr, ein bis zwei Jahre zum Studium und zur Arbeit auf, wobei die Kosten des Aufenthalts in Deutschland von der deutschen Seite getragen wurden. Das ist unter den metrologischen Instituten im internationalen Rahmen das einzige Land, das die Aufenthaltskosten trug, und das wird bis heute so gehandhabt. Beide Seiten veranstalteten regelmäßig wissenschaftliche Berichterstattungen und Konferenzen, wodurch das Niveau der metrologischen Forschung wirksam erhöht wurde.

Prof. Kind besuchte China viele Male mit Delegationen. 1980 begegnete er dem stellvertretenden Ministerpräsidenten Fang Yi und dem Mitglied des Staatsrats Zhang Jingfu.



Foto: Im Jahre 1980 empfing Fang Yi den Präsidenten Kind mit einer Delegation der PTB

Die chinesisch-deutsche Zusammenarbeit in der Metrologie währt schon fast 40 Jahre. Das Jahr 2019 ist der 40. Jahrestag der Unterzeichnung des Abkommens über die chinesisch-deutsche Zusammenarbeit in der Metrologie. Das ist auch eine feste Basis für die von Prof. Kind begründete freundschaftliche Zusammenarbeit unserer beiden Länder in der Metrologie, die bis heute fortgesetzt worden ist. Hierfür erhielt Prof. Kind anlässlich des 50. Jahrestages der Gründung der Volksrepublik China von der chinesischen Regierung die staatliche „Freundschaftsmedaille“, und er nahm auf der Gästetribüne des Tian'anmen an der Feier des Jahrestages teil. Das war eine besondere Ehre, die einem Experten der Metrologie des Auslands erstmals zuteil wurde.

Der Tod von Prof. Kind bedeutet für die PTB und die gesamte Welt der Metrologie zweifellos einen großen Verlust. Wir Metrologen werden ihn für immer in ehrendem Gedenken bewahren!

Die Doppelnatur des Neutrons: Teilchen und Welle

Rüdiger Jahr*

Neutronen gehören neben Protonen zu den Bausteinen der Atomkerne; sie sind dort durch die starke Kernkraft fest gebunden.

Speziell können Neutronen in Laboratorien jedoch auch als frei fliegende Teilchenstrahlen erzeugt und als Geschossteilchen dazu benutzt werden, um Atomkerne zu beschießen und so Kernreaktionen der Neutronen zu erforschen.

Neutronenstrahlen mit niedrigen Energien (s. Glossar: *Neutronengeschwindigkeit*) können an Forschungsreaktoren erzeugt werden. Zur Erzeugung von Neutronen höherer Energie benötigt man einen Teilchenbeschleuniger.

Je nachdem, welchen Neutronen-Prozess man beschreiben möchte, besitzt das Neutron nach den Vorstellungen der Quantentheorie die Eigenschaft eines Teilchens oder einer Welle.

Das Teilchenbild wird erfolgreich verwendet, um Kernreaktionen des Neutrons wie (n,γ) , (n,p) , (n,α) zu beschreiben, wobei in diesen Beispielen als Sekundärprodukt jeweils eine elektromagnetische Strahlung γ , das Proton p , oder der Heliumkern α entsteht. Die charakteristische Größe für das Teilchenbild ist die Neutronengeschwindigkeit v_n . Trifft ein Neutron auf ein Atom, so durchfliegt es als elektrisch neutrales Teilchen die Elektronenhülle des Atoms ohne Wechselwirkung; das Neutron kann anschließend bereits mit niedrigsten Geschwindigkeiten in den Atomkern eindringen und dort beispielsweise eine der o. g. Kernreaktionen auslösen.

Das Wellenbild wird durch die Neutronenwellenlänge λ charakterisiert. Mit ihm lassen sich Ausbreitungs- und Streuvorgänge wie die elastische Streuung sehr langsamer Neutronen an einem Kristall oder die elastische Streuung schneller Neutronen an einem Atomkern beschreiben. Ähnlich wie in der Optik kommt es dabei durch die Überlagerung von Materiewellen zu Interferenz-Erscheinungen. In der Quantentheorie ist

das Quadrat der Amplitude der Neutronenwelle an einem Ort ein Maß für die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Neutrons.

Hier sollen zwei Experimente geschildert werden, die vor Jahren in der PTB durchgeführt worden sind.

Messung der Planck-Konstante h

Die Beziehung zwischen der Neutronengeschwindigkeit v_n beziehungsweise dem Neutronenimpuls $m v_n$ und der Neutronenwellenlänge λ ist nach der de Broglie'schen Beziehung der Quantenmechanik

$$m v_n = h/\lambda, \text{ wobei } h \text{ die Planckkonstante und } m \text{ die Neutronenmasse ist.}$$

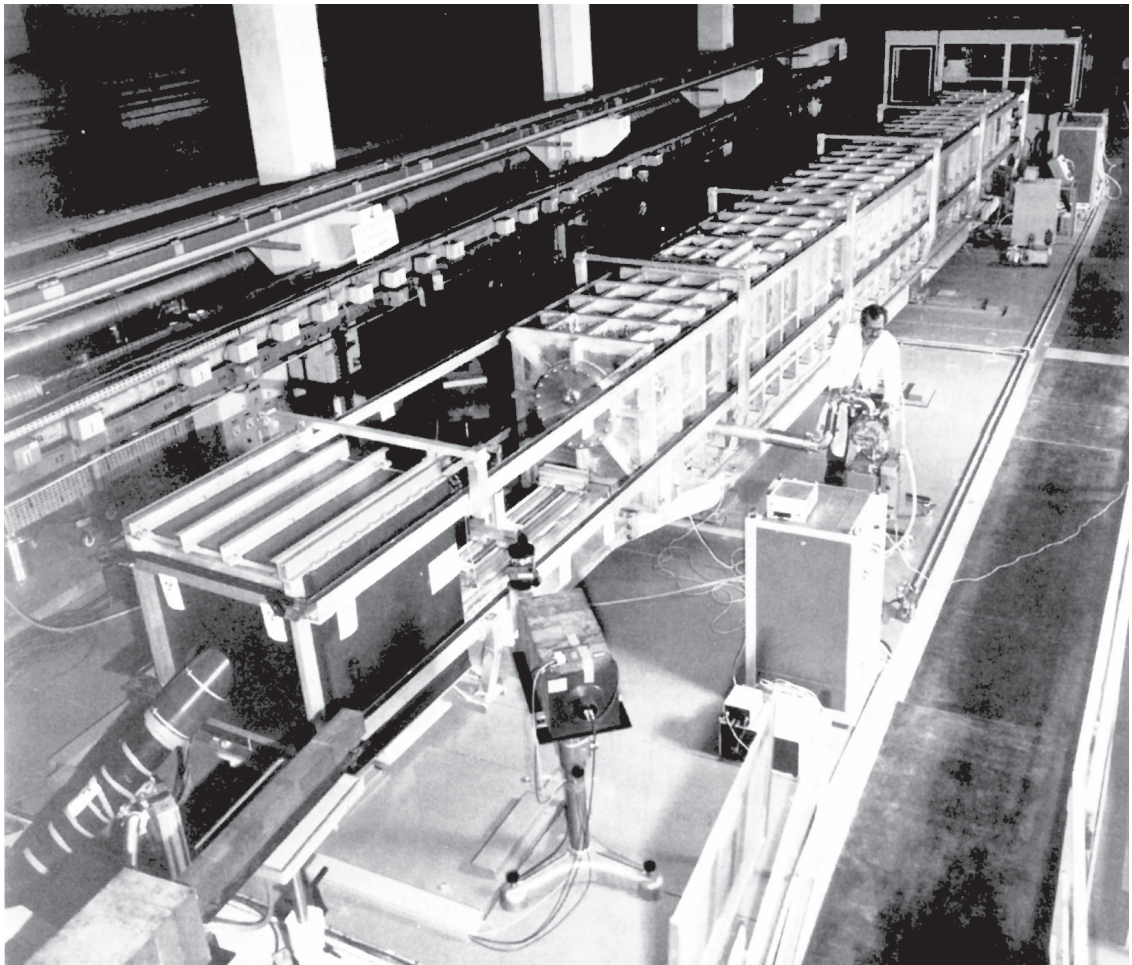
In der PTB wurde diese Beziehung benutzt, um mit thermischen Neutronen (s. Glossar: *Neutronengeschwindigkeit*) aus einem Forschungsreaktor eine Präzisionsmessung der Größe h/m , also

$$h/m = \lambda v_n$$

durchzuführen. Hier wurden die Größen rechts des Gleichheitszeichens, λ und v_n , gleichzeitig für thermische Neutronen in einem 10 m langen, evakuierten Strahlrohr bestimmt (s. Bild 1). Bemerkenswert ist, dass das Teilchen- und Wellenbild in einem einzigen Experiment verwendet wurde: Die Neutronengeschwindigkeit v_n wurde im Teilchenbild durch eine besondere Art der *Flugzeitmessung* (s. Glossar) gemessen, und λ wurde durch eine *Bragg-Reflexion* (s. Glossar) von einem Einkristall im Wellenbild bestimmt. Da die Neutronenmasse m sehr genau von anderen Messmethoden her bekannt ist, hat man hier eine sehr originelle Messmethode für die Fundamentalkonstante h [1, 2].

* Dr. Rüdiger Jahr,
Otto-Hahn-Str. 12,
38116 Braunschweig,
ehemaliger Leiter der
PTB-Abteilung
„Neutronenphysik“

Bild 1:
Apparatur zur
Messung von h/m_n .
Durch das links sicht-
bare schräge Rohr
treten die Neutronen
in die Apparatur ein.
Der anschließende
schwarze Würfel
aus Abschirmma-
terial enthält den
Kristall H1. Die re-
flektierten Neutronen
verlassen den Würfel
durch eine kleine
Öffnung. Nach einem
Weg von 2 m treten
sie in die Vakuum-
kammer ein, die die
Flugstrecke enthält.
Der Kristall H2 steht
zwischen dem Würfel
und der Vakuum-
kammer.



Obwohl hier nicht der Ort ist, um das Ergebnis streng zu diskutieren, kann man unter Benutzung eines Wertes für die Neutronenmasse aus gängigen Tabellen [3] und dem Ergebnis aus der h/m -Messung den Wert von $h = 6,626068 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$ berechnen. Aus den Tabellen [3] entnimmt man andererseits direkt $h = 6,626069 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$, d. h. der kleine Unterschied taucht erst in der 7. Stelle auf. Die beachtlich gute Übereinstimmung spannt einen Bogen zwischen dem Neutronenimpuls, gegeben durch $m v_n = h/\lambda$ und der Energie eines Lichtquants, gegeben durch $E = h \nu$ (ν ist die Lichtfrequenz); die Übereinstimmung der Werte von h ist ein Beweis für die Gültigkeit der Quantenmechanik.

Die Autoren der h/m -Messung [2] interpretieren ihr Ergebnis als eine präzise Bestimmung der Feinstruktur-Konstante α , welche u. a. die Feinstruktur der Energieniveaus $E_{n,l,j}$ des Wasserstoffatoms bestimmt. Diese wird durch die Quantenzahlen n,l,j charakterisiert. Es ist $E_{n,l,j}$ proportional zu α^2 . Die Autoren betonen, dass die Bestimmung von α aus h/m ohne komplexe theoretische Betrachtungen möglich war. Eine eingehende Diskussion findet sich in [2]. Tatsächlich stellt die genau messbare Feinstruktur der Wasserstoff-Energieniveaus einen der empfindlichsten Prüfsteine der relativistischen Quantenmechanik dar.

Messung von Neutronen-Wirkungsquerschnitten

Schnelle Neutronen werden an den Atomkernen gestreut. Das Maß für das Streuvermögen eines Atomkernes ist sein *Wirkungsquerschnitt* (s. Glossar).

In der PTB wurden Wirkungsquerschnitte für die Streuung schneller Neutronen an diversen Kernen systematisch gemessen. Der besondere Wert dieser Messungen lag darin, dass sie in einem Neutronen-Energiebereich von 7 MeV bis 14 MeV durchgeführt wurden, einem Bereich, der in Zukunft eminent wichtige Bedeutung erlangen dürfte, wenn sich die Energieerzeugung durch Kernfusion als technisch und wirtschaftlich möglich erweisen würde. In diesen Energiebereich waren die vorhandenen experimentellen Daten allerdings diskrepant und dürftig.

Wissenschaftler arbeiten weltweit an dem Problem, die Fusionsenergie, die unter anderem die Sonnenenergie liefert, auch für die Energieerzeugung auf der Erde zu nutzen. Aufwendige Großexperimente laufen u. a. im internationalen Maßstab an den Fusionsreaktor-Modellen ITER in Cadarache und in nationalem Maßstab am Stellarator WENDELSTEIN 7-X im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Greifswald.

Die Hoffnungen liegen dabei auf der stark exothermen, also Energie liefernden Fusionsreaktion der Wasserstoffisotope $^2\text{H} + ^3\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + \text{n}$. Die hierbei entstehenden Neutronen haben eine Energie von 14 MeV. Um ihre Energie in Form von Wärme nutzen zu können, müssen die Neutronen in geeigneten Materialien durch Kernreaktionen von 14 MeV auf niedrige Energien abgebremst werden. Eine der wichtigsten Kernreaktionen ist dabei die elastische Streuung.

Das wirft drei Probleme auf. **Erstens** muss das im Fusionsexperiment benutzte Konstruktions- und Neutronen-Bremsmaterial den Belastungen durch Neutronen-induzierte Kernreaktionen dauerhaft standhalten. Beispielsweise können (n,p)- und (n, α)-Reaktionen bei intensiver Bestrahlung mit Neutronen zur Bildung von Wasserstoff- und

Helium-Blasen führen und damit zu Versprödungen des Materials beitragen.

Zweitens muss die Umgebung des Experiments durch Abschirmmaßnahmen vor der Neutronenstrahlung geschützt werden. **Drittens** muss die ggf. für Menschen gesundheitsschädliche, aber mit menschlichen Sinnesorganen nicht wahrnehmbare Neutronen-Reststrahlung hinter der Abschirmung bewertet und dosismäßig erfasst werden. Letzteres geschieht durch Neutronendosimeter.

Ein wichtiges Hilfsmittel zur Lösung der Probleme sind theoretische Berechnungen des Neutronenverhaltens in den oben skizzierten Anordnungen.

Als Voraussetzung, um derartige theoretische Berechnungen durchführen zu können, benötigt man die genauen Daten der Wirkungsquerschnitte

Bild 3: Differentielle Wirkungsquerschnitte (s. Glossar) als Funktion der Neutronenenergie E_0 und des Streuwinkels θ_{cm} für die elastische Neutronenstreuung an Titan, einem Metall, das in den Fusionsexperimenten zur Verwendung findet.

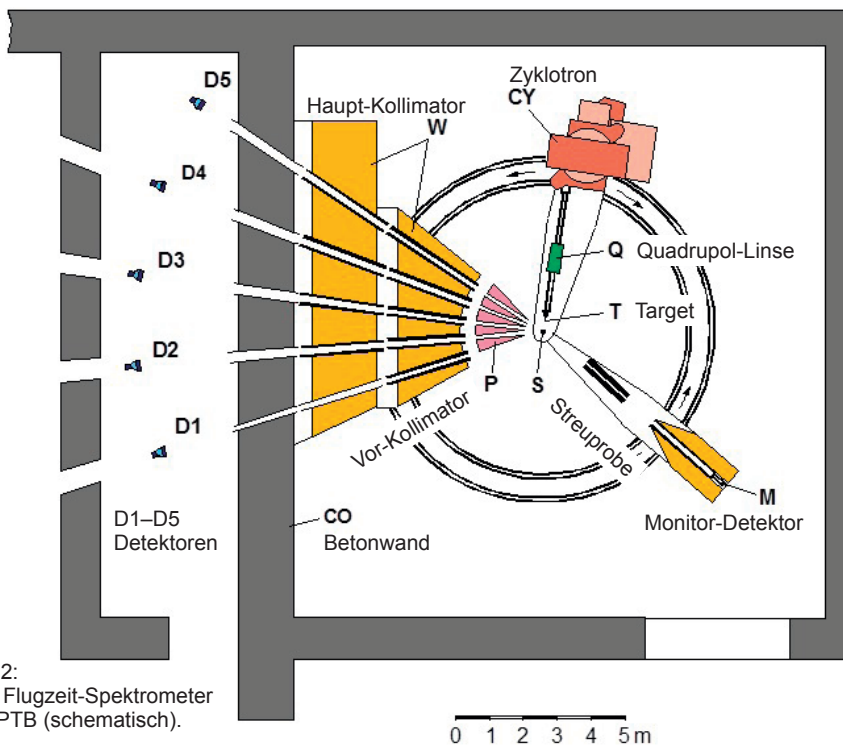


Bild 2: Das Flugzeit-Spektrometer der PTB (schematisch).

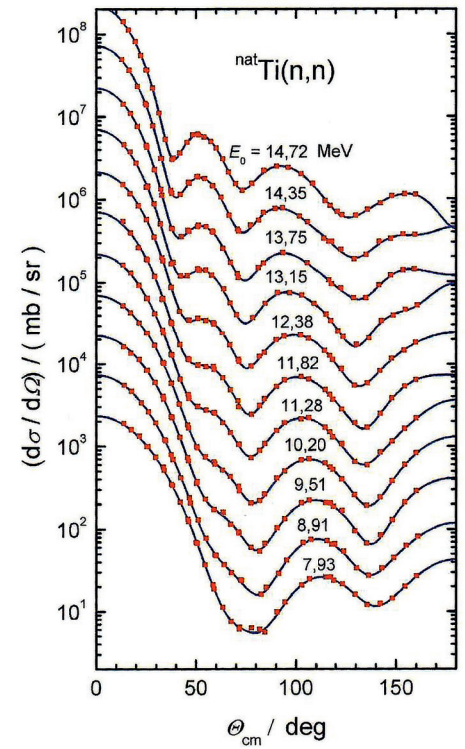


Bild 4: Vorderer Teil des Flugzeit-Spektrometers mit dem schwenkbaren Zyklotron (rechts), den gelben Kollimatorabschirmungen (Mitte) und der gelben Abschirmung des schwenkbaren Monitor-Detektors (links) zur Überwachung der Quellstärke des Gas-targets.

für die in Frage kommenden Kernreaktionen. Mit Hilfe von sehr universell einsetzbaren, sogenannten *Monte-Carlo-Rechnungen* (s. Glossar) kann man dann das Schicksal, also die Bahnen und die Kernreaktionen von Neutronen in Materie bzw. in Versuchsanordnungen rechnerisch verfolgen, und zwar für weitgehend frei wählbare Substanzen und Geometrien: Einerseits für detaillierte

lichen Energiebereich von 7 MeV bis 14 MeV bestimmt und damit eine systematische Datenbasis mit bis dahin weltweit unerreichter Genauigkeit geschaffen [6, 7].

Bild 2 zeigt den Grundriss dieser Einrichtung [4, 5]. Sie umfasste fünf Flugrohre von ca. 12 m Länge in einem tonnenschweren Kollimator (P und W) und ein tonnenschweres, schwenk-

Tabelle 1:
Zusammenfassung der an der PTB durchgeführten Messungen von differentiellen (DX) und doppelt-differentiellen (DDX) Neutronen-Streuquerschnitten sowie Hinweise zur Publikation der Ergebnisse. Für weitere Einzelheiten siehe Ref. [6, 7].

Nuklid	Einschussenergie (in MeV)	EXFOR entry		Bericht		Evaluation
		DX	DDX	DX	DDX	
⁹ Be	7.10 - 9.97	22973		PTB-N-55		
¹² C	13.33 - 15.82	22404	---	---		
¹⁴ N	7.89 - 13.85	22806	---	PTB-N-44	---	
¹⁶ O	6.42 - 14.89	22113	---	PTB-N-1	---	ENDF/B-VI
^{nat} Si	7.89 - 13.85	22666	---	PTB-N-43	---	EFF-3.0
^{nat} Ti	7.93 - 14.72	22961		PTB-N-50		JEFF-3.0
⁵¹ V	7.99 - 14.37	22409	22412	PTB-N-36	PTB-N-46	
^{nat} Cr	7.95 - 14.76	22408	22411	PTB-N-31	PTB-N-48	EFF-3.0
^{nat} Fe	9.41 - 15.20	22403	---	PTB-N-20	---	EFF-3.0
^{nat} Cu	6.95 - 14.18	22974		PTB-N-52		
⁹³ Nb	7.10 - 14.10	22975		PTB-N-56		
^{nat} W	7.19 - 14.10	22962		PTB-N-51		JEFF-3.0
^{nat} Pb	7.93 - 14.23	22407	22410	PTB-N-27	PTB-N-38	

Dosisberechnungen in einem menschähnlichen Phantom, wobei die Neutronendosis in den einzelnen Organen berechnet und somit biologisch bewertet werden kann; andererseits für die Versuchsanordnungen und Abschirmmaßnahmen, die in Fusionsexperimenten von Bedeutung sind. Besondere Bedeutung für das Schicksal eines Neutrons in Materie hat allgemein jeweils der Prozess der elastischen Neutronenstreuung; sie bestimmt die Abbremsung der Neutronen einer ursprünglich hohen Energie, beispielsweise von 14 MeV, auf niedrigere Energien.

Bei der Messung der hier benötigten Wirkungsquerschnitte gibt es allerdings ein Problem im oben bereits genannten, wichtigen Energiebereich zwischen 7 und 14 MeV: Mangels geeigneter, einfacher Neutronenquellen ist die Datenbasis dort sehr mager!

Um diesen Mangel zu beheben, um also allgemein bessere Daten verfügbar zu machen, wurde in der PTB ein aufwendiges Flugzeitspektrometer installiert. Mit diesem Gerät wurden in langen Mess-Serien die Wirkungsquerschnitte von 13 praktisch wichtigen Kernen im schwierig zugäng-

bares Zyklotron (Cy), das auf einer Lafette montiert war [4–5]. Weitere Einzelheiten s. Glossar: *Flugzeitspektrometer*.

Neutronenmessungen erfordern typischerweise sehr lange Messzeiten. Für die aufwendigen Messungen wurden mindestens zwei Wochen Strahlzeit benötigt, um für ein Nuklid/Element die vollständigen Winkelverteilungen zwischen 15° und 160° bei 8 bis 10 Energien zwischen 7 MeV und 14 MeV zu bestimmen. Für die sorgfältige Auswertung der Rohdaten, die Analyse der Ergebnisse, den Vergleich mit anderen experimentellen Daten, soweit überhaupt verfügbar, und verschiedenen Evaluationen benötigte ein Experte bis zu einem Jahr, bevor die Ergebnisse mit allen Details in allgemein verfügbaren PTB-Berichten dokumentiert, im EXFOR-Format an die IAEA/NDS übergeben und auf Fachtagungen vorgetragen werden konnten.

Es war ein großer Vorteil dieses Spektrometers, dass fünf Streuwinkel gleichzeitig gemessen werden konnten. Diese Tatsache und die sehr sorgfältige und ausführliche Untersuchung der Eigenschaften des Spektrometers kam der beson-

deren Qualität der Messergebnisse sehr zu Gute. Eine solche Messanordnung ist in der erreichten Qualität weltweit einmalig.

Bild 3 zeigt ein typisches Ergebnis. Man erkennt in diesen Diagrammen deutliche Interferenz-Strukturen, die eine Erklärung im Rahmen des Wellenbildes nahelegen

Tatsächlich lassen sich die typischen Interferenz-Strukturen nach den Vorstellungen des Optischen Kernmodells (s. Glossar) durch Beugung der einfallenden ebenen Neutronenwelle am Atomkern deuten. Der Kerndurchmesser und die Wellenlänge von beispielsweise 9 MeV Neutronen liegen bei 10 fm, beide sind also etwa gleich groß. Dies ist eine Voraussetzung für die Entstehung solcher Interferenzstrukturen.

Vom kernphysikalischen Standpunkt aus lassen sich die Daten - über den o.g. ‚praktischen‘ Aspekt hinaus - verwenden, um im Rahmen des Optischen Kernmodells Informationen über die Ausdehnung des Kernes und die Tiefe des ‚Potentialtopfes‘ zu bestimmen, mit dem die Kernkraft innerhalb des Kernes theoretisch pauschal beschrieben werden kann.

In Tabelle 1 sind alle Nuklide aufgelistet, die in fast dreißig Jahren bis 2006 untersucht wurden. Die Messungen und Auswertungen sind in PTB-Berichten detailliert dokumentiert worden. Durch Erweiterung der Mess- und Auswertverfahren war es möglich, auch die inelastische Streuung (DDX) zu bestimmen. Verfahren und Ergebnisse dieser wichtigen Erweiterung sind in [6] ebenfalls ausführlich beschrieben.

Alle Ergebnisse wurden im EXFOR-Format in die Datenbibliothek der IAEA/NDS übergeben. Einige Datensätze wurden bereits in neueren Evaluationen berücksichtigt.

Die gut vermessenen primären Neutronenfelder wurden auch genutzt, um Aktivierungsreaktionen, wie (n,p) oder (n, α), von für die Fusionstechnologie wichtigen Konstruktions- und Abschirm-Materialien zu vermessen. In dem vorliegenden Abschlussbericht [9] sind Mess- und Auswertverfahren beschrieben und die endgültigen Ergebnisse dokumentiert.

Der Vergleich mit experimentellen Ergebnissen anderer Gruppen und verschiedenen Evaluationen zeigt, dass die qualitativ hochwertigen PTB-Daten in neuen Evaluationen als Referenzdaten hervorragend geeignet sind.

Nachwort

Das Arbeitsgebiet Neutronenmetrologie begann in der PTB in großem Stil mit der Beschaffung des Forschungs- und Messreaktors (FMRB). Am 3. Oktober 1967, also vor etwa 50 Jahren, wurde der Reaktor kritisch, d. h. es konnte am Forschungs- und Messreaktor eine sich selbst erhal-

tende Kettenreaktion durch Kernspaltung erzeugt werden. Der Betrieb mit voller Leistung von 1 MW begann 1969. Damit wurden Neutronen mit thermischer und verschiedener höherenergetischer Energieverteilung in maximal 10 verschiedenen Strahlrohren verfügbar. Unter anderem dienten sie für die Kalibrierung von Neutronendosimetern und Neutronendetektoren und zur Vorbereitung des o.g. h/m -Experiments. Die eigentlichen Messungen hierzu wurden vom PTB-Team am Hochflussreaktor in Grenoble durchgeführt. Weitere Strahlrohre wurden für Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Physik der kondensierten Materie durchgeführt, beispielsweise die Untersuchung der Anregungsstruktur von flüssigem ^3He und ^4He und deren Gemischen bei niedrigsten Temperaturen zwischen 70 mK und 1,5 K.

Noch Anfang bis Mitte der 80er Jahre war die Kernenergie Bestandteil der offiziellen deutschen Energiepolitik. Die von Kernreaktoren in Kraftwerken gelieferte Energie beruht auf der Neutronen-induzierten Kettenreaktion, der Kernspaltung. Der Neutronendosimetrie musste in diesem Zusammenhang eine wachsende Bedeutung zugemessen werden. Die PTB wurde diesem Anspruch gerecht durch den Neubau einer Beschleunigeranlage zur Erzeugung von Neutronen. Die Anlage wurde 1974 in Betrieb genommen. Mit einer Kombination eines 3,7 MV-Van de Graaff-Generators und eines kompakten CV28 Zyklotrons konnten näherungsweise monoenergetische Neutronen einer Energie bis zu 20,5 MeV erzeugt werden; insbesondere konnte man auch die bei kleineren Beschleunigern in anderen Laboratorien auftretende, oben bereits erwähnte „Energieschlücke“ zwischen 7 und 14 MeV schließen. Dieser Energiebereich, in dem nur wenige Messungen vorlagen, war für die Neutronendosimetrie und die Kernfusionstechnologie von erheblicher Bedeutung. Zusammen mit dem FMRB verfügte die PTB damit über einen Satz von quasi-monoenergetischen Neutronen-Standardfeldern im Energiebereich zwischen thermischen Neutronen und 20 MeV, die zur Prüfung und Kalibrierung von Neutronendosimetern und Neutronendetektoren nicht nur im nationalen, sondern besonders auch im internationalen Rahmen dienten.

Im Jahre 1996 wurde der inzwischen veraltete FMRB abgeschaltet, nachdem er seinen Zweck erfüllt hatte. Ferner wurden die Aktivitäten auf dem Gebiet der Neutronenmetrologie stark eingeschränkt. Ein Rückblick über die vorangegangenen Arbeiten mit ca. 130 Literaturhinweisen findet sich in [10].

Glossar

Bragg-Reflexion

Ein Strahl thermischer Neutronen, der auf einen Einkristall auftrifft, durchfliegt im Allgemeinen ungestört den Kristall. Ausnahme sind Neutronen, deren Wellenlänge in der Größenordnung der Gitterkonstanten des Kristalls liegt. Hier greift das Wellenbild. Von einem solchen Gitter werden ausschließlich Neutronen einer genau bestimmten Wellenlänge reflektiert. Ursache sind Interferenzeffekte in der reflektierten Neutronenwelle.

Flugzeitmessungen

Die Geschwindigkeit v_n von Neutronen kann bestimmt werden, indem man in einer geeigneten Apparatur die Zeit t misst, die ein Neutron braucht, um eine bestimmte Strecke s zu durchfliegen. Dabei ist $v_n = s/t$. Das wurde bei der Messung der Streuung schneller Neutronen mittels des *Flugzeitspektrometers* ausgenutzt (s. Glossar).

Die Flugzeitmessung bei der h/m -Messung war indirekter Natur. Es wurde ausgenutzt, dass Neutronen ein magnetisches Moment besitzen. Die Neutronen aus dem Forschungsreaktor wurden durch Streuung an einem magnetisierten Heusler-Kristall polarisiert und in ein evakuiertes Flugrohr gestreut. Die polarisierten Neutronen trafen darin auf einen Modulator, in dem hochfrequente Magnetfelder die Richtung des Polarisationsvektors periodisch änderte. Am Ende des Flugrohres, nach einer variierbaren Flugstrecke von maximal 10 m, wurden sie an einem Silizium-Einkristall reflektiert (s. Glossar: *Bragg-Reflexion*); sie kehrten zum Modulator zurück. Hier wurde der Neutronenstrahl erneut moduliert (s. Bild 1). Die Gesamtmodulation, zu der sich die beiden Modulationen zusammensetzen, wurde als Funktion der Länge der Flugstrecke gemessen. Aus dieser Funktion ließ sich die Geschwindigkeit der Neutronen berechnen.

Flugzeitspektrometer [4, 5, 7]

Bild 2 zeigt den Grundriss des Spektrometers, Bild 4 die Ansicht. Als Neutronenquelle des Spektrometers („Target“ T) wurden die in dem Zyklotron beschleunigten Deuteronen auf ein Deuteriumtarget ^2H geschossen, also die Kernreaktion $^2\text{H} + d \rightarrow ^3\text{He} + n$ eingesetzt. Diese (primären) monoenergetischen Geschoss-Neutronen trafen auf eine ca. 20 cm entfernte Streuprobe (S) des zu untersuchenden Materials, von der die (sekundären) Neutronen gestreut wurden.

Die Streuprobe war meist zylindrisch (5 cm · 2,5 cm Ø). Die gestreuten Neutronen, und nur sie, gelangten unter den verschiedenen Winkeln in die fünf Flugrohre. Die Trennung von den extrem häufigen primären und den sehr seltenen sekundären Neutronen gelang durch den

aufwendigen Kollimator (P und W), dessen Flugrohre auf die Streuprobe ausgerichtet waren.

Als Neutronendetektoren D1–D5 und im Monitorkollimator wurden verschiedene, teilweise großvolumige NE213-Flüssig-Szintillationsdetektoren (1,5“ · 1,5“ Ø bis 2“ x 10“ Ø) eingesetzt (s. Glossar *Neutronennachweis*).

Der Deuteronenstrahl war gepulst; die natürliche Pulsung des Zyklotronstrahls lag bei 12 bis 20 Hz und einer Pulslänge von 10 ns (1 ns = 10^{-9} s). Sie konnte für die Flugzeitmessungen auf ca. 1 MHz untersetzt und die Pulsbreite auf 1 bis 2 ns komprimiert werden.

Der Puls lieferte das Startsignal für die Flugzeit der gestreuten Neutronen. Das Stoppsignal lieferten die großflächigen Neutronendetektoren am Ende der Flugrohre (D1 bis D5). Die Flugzeit lag bei 200 ns. Aus der Flugzeit konnte die Energie der Neutronen mit einer Unsicherheit von 1 % berechnet werden (s. Glossar: *Flugzeitmessungen*).

Für die systematischen Messungen, wie sie beispielhaft in Bild 3 gezeigt sind, mussten sowohl die Einschussenergie der primären Neutronen als auch der Winkel, unter dem die Neutronen gestreut wurden, variiert werden.

Die Bauart des Zyklotrons gestattete es, die Energie der beschleunigten Deuteronen zu variieren; daher konnte entsprechend die Energie der erzeugten primären Neutronen variiert werden.

Die fünf Winkel, unter denen die gestreuten Neutronen gleichzeitig gemessen wurden, konnten durch Schwenken des Zyklotrons (mitsamt der Neutronenquelle) variiert und neu eingestellt werden.

Im „idealen Streuexperiment“ trifft das gestreute Neutron nach einer *Einfachstreuung* unter einem genau definierten Streuwinkel den Detektor.

Das oben geschilderte reale Streuexperiment weicht vom idealen in mehrfacher Hinsicht ab. Beispielsweise kann es in der Streuprobe zu Mehrfachstreuungen kommen. Durch die geometrische Anordnung – der Abstand der Streuprobe zum neutronenproduzierenden Target war nur ca. 20 cm – konnte der Streuwinkel außerdem geometrisch nicht genau definiert werden. Um diese und andere Fehlerquellen genau untersuchen zu können, wurde das reale Streuexperiment in seinen wesentlichen Teilen mittels der *Monte-Carlo-Methode* (s. Glossar) rechnerisch simuliert. So konnten die Fehler quantifiziert und rechnerisch korrigiert werden [8].

Bei den Messungen musste ferner berücksichtigt werden, dass die Neutronenquelle neben den monoenergetischen Neutronen (Energie E_0) auch Neutronen mit einer kontinuierlichen Energieverteilung etwa 6 MeV unterhalb von E_0 emittierte.

Die erreichten Messunsicherheiten der Wirkungsquerschnitte waren im Allgemeinen kleiner als 3 %.

Monte-Carlo-Rechnungen [8]

Mit einem Rechenprogramm wird der Weg einzelner von außen auf die Materie auftreffender Neutronen unter Verwendung der bekannten Wirkungsquerschnitte verfolgt. Die Wirkungsquerschnitte haben im Falle eines Einzel-Neutrons den Charakter einer Reaktionswahrscheinlichkeit, d. h. ob eine Reaktion stattfindet oder nicht, wird durch eine Zufallszahl quasi ausgewürfelt, daher der Name Monte Carlo. Um aus einer solchen Wahrscheinlichkeitsaussage aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, müssen zur Lösung eines bestimmten Problems viele Neutronenschicksale mit den gleichen Anfangsbedingungen rechnerisch verfolgt werden.

Neutronengeschwindigkeit

Die Neutronengeschwindigkeit v_n wird meistens in Form der Neutronenenergie, genauer der kinetischen Energie des Neutrons angegeben. Letztere ist gegeben durch $E = m v_n^2/2$, wo m die Neutronenmasse ist; oft wird die Einheit der Neutronenenergie in eV (Elektronenvolt) angegeben. Der praktisch interessante Energiebereich erstreckt sich zwischen 0,02 eV und 20 MeV, also über 9 Zehnerpotenzen, was insbesondere für die Neutronendosimetrie eine große Herausforderung darstellt. Neutronen im niedrigen Energiebereich um 0,02 eV werden auch thermische Neutronen genannt, weil sie in Materie durch Stöße nicht nur Energie an Atome (also Atomkerne) abgeben, sondern auch gleichermaßen Energie von den sich thermisch bewegenden Atomkernen aufnehmen. Man sagt: „Das ‚Neutronengas‘ ist im thermischen Gleichgewicht mit der Materie“. Die Neutronengeschwindigkeit liegt bei Zimmertemperatur bei einigen km/s. In Forschungsreaktoren werden überwiegend thermische Neutronen erzeugt.

Schnelle Neutronen von beispielsweise 14 MeV, wie sie mit Teilchenbeschleunigern erzeugt werden, erreichen dagegen Geschwindigkeiten von 50 000 km/s.

Neutronennachweis

Eine der wichtigsten Nachweis-Reaktionen ist die elastische Neutronenstreuung an Wasserstoff (n,p-Reaktion). Nach der Streuung entsteht ein Rückstoß-Proton, welches bei einem zentralen Stoß sogar die gesamte Energie des Neutrons übernimmt. Die Detektoren des Flugzeitspektrometers sind Flüssigkeits-Szintillationszähler. Die Flüssigkeit enthält Wasserstoff; die geladenen Rückstoßprotonen erzeugen darin einen Lichtblitz, der im Sekundärelektronen-Vervielfacher zu einem schnellen elektrischen Signal verarbeitet wird. Der Wirkungsquerschnitt der n,p-Reaktion ist aus genauen Messungen, die allerdings nicht in der PTB durchgeführt wurden, sehr genau bekannt.

Ein Teil der Neutronen durchfliegt den Detektor jedoch ohne jede Reaktion. Besonderer Wert musste daher auf die genaue Bestimmung der Nachweiswahrscheinlichkeit für Neutronen gelegt werden. Durch eine Monte-Carlo-Simulation der Neutronenschicksale im Detektor und Vergleichsmessungen mit der Neutronenstreuung an einer wasserstoffhaltigen Streuprobe konnte die Nachweiswahrscheinlichkeit mit einer Unsicherheit von $\leq 2\%$ bestimmt werden.

Die Detektoren reagieren auch auf die stets vorhandene Gammastrahlung. Die entsprechenden elektrischen Signale haben jedoch eine andere Pulsform, so dass sie von den Neutronensignalen abgetrennt werden konnten.

Optisches Kernmodell

Im Optischen Kernmodell wird der Atomkern rechnerisch als Potentialtopf (der Kernkraft) dargestellt, an dem das einfallende Neutron gestreut und auch absorbiert wird. Typische Interferenz-Strukturen entstehen, wenn die Wellenlänge des Neutrons in der gleichen Größenordnung ist wie die Größe des Atomkerns. In dem Modell interferieren gestreute Kugelwellen miteinander, die von entgegengesetzten Regionen des Kerns ausgehen.

Wirkungsquerschnitt.

Der Wirkungsquerschnitt einer Kernreaktion (meist mit σ bezeichnet) ist definiert als Verhältnis der Zahl der Reaktionen pro Kern zu der Zahl der auf eine Fläche einfallenden Neutronen, wobei mit ‚Fläche‘ eine Fläche (cm^2) senkrecht zur Neutronenflugrichtung gemeint ist.

Anschaulich kann man sich den Wirkungsquerschnitt quasi als eine kleine Scheibe vorstellen, die den Atomkern repräsentiert, und die senkrecht zur Flugrichtung eines Neutrons steht. Trifft das Neutron die Scheibe, so kommt es zu einer Kernreaktion, andernfalls fliegt das Neutron ohne Wechselwirkung weiter. Die Maßeinheit des Wirkungsquerschnitts ist cm^2 . Da diese Maßeinheit im Vergleich zu der Größe von Atomkernen sehr groß ist, hat sich (außerhalb des SI-Systems) die Einheit barn (b), $1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$, eingebürgert. Ein Millibarn ist also $1 \text{ mb} = 10^{-27} \text{ cm}^2$. Wirkungsquerschnitte hängen meist sehr stark von der Neutronenenergie ab.

Bei der Neutronenstreuung, also einer Reaktion vom Typ (n,n), interessiert nicht nur der Wirkungsquerschnitt für die gesamte Streuung, sondern auch der Wirkungsquerschnitt für die Streuung in eine bestimmte Richtung. Das beschreibt der „differentielle Wirkungsquerschnitt“, $d\sigma/d\Omega$, wie er in der Bild 3 gezeigt ist. Der differentielle Wirkungsquerschnitt ist definiert als Verhältnis der Zahl der pro Kern in das Raumwinkelement $d\Omega$ gestreuten Neutronen zu der Zahl der auf eine Fläche einfallenden Neutronen. Die Maßeinheit ist mb/sr

(sr = Steradian = Raumwinkel). Der Streuwinkel θ_{cm} bezieht sich auf ein bestimmtes Bezugssystem, nämlich dem System, in dem der Schwerpunkt von Neutron und Atomkern ruht (cm = center of mass).

Danksagung

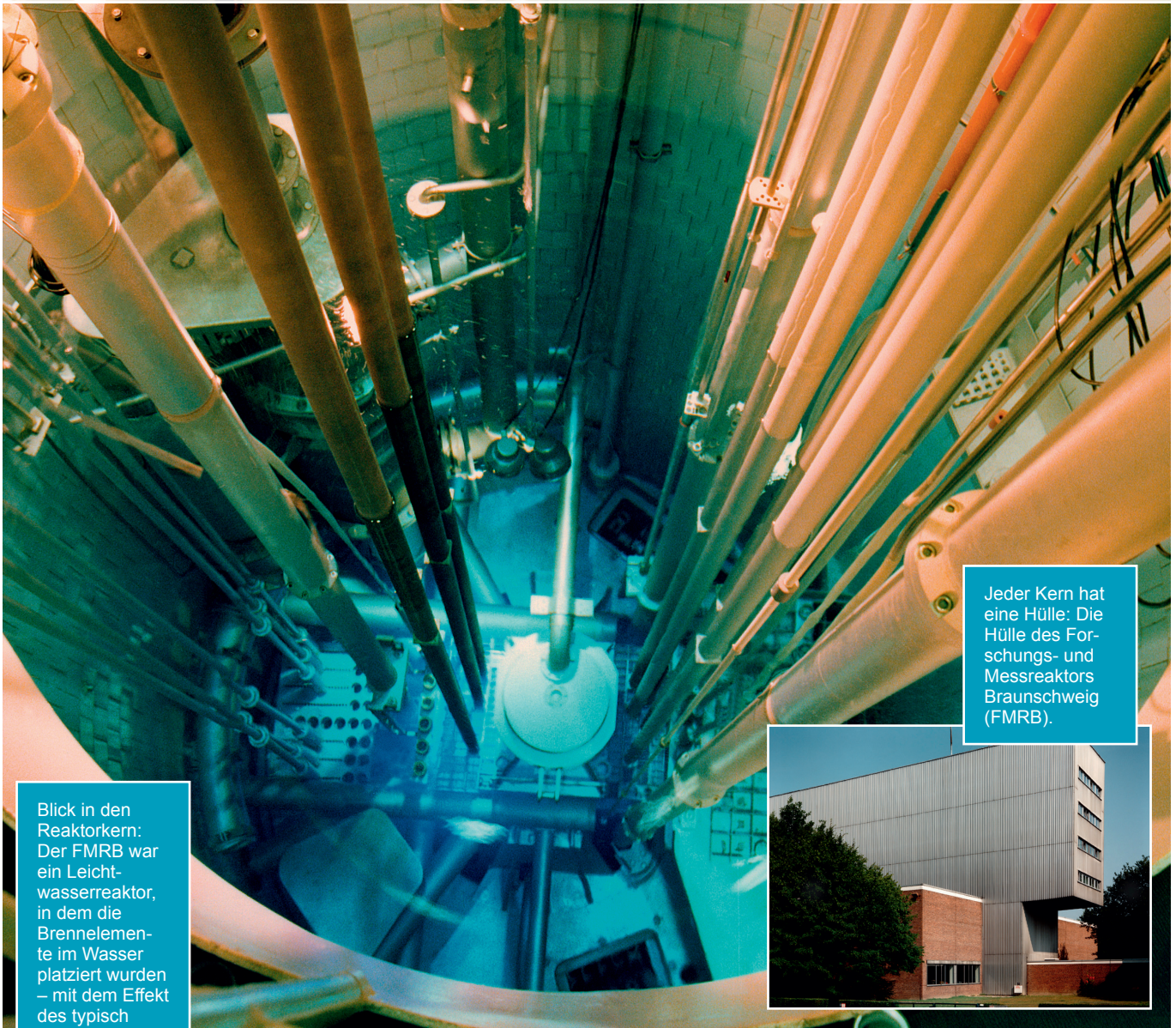
Der Autor bedankt sich bei den Herren Dr. Horst Klein und Dr. Dankwart Schmidt für hilfreiche Beiträge zum Thema Messung von Neutronen-Wirkungsquerschnitten, bei Herrn Prof. Dr. Dieter Kind für seine freundliche Unterstützung und bei den Herren Dr. Ralf Nolte und Dr. Andreas Zimbal für die kritische Durchsicht des Entwurfs dieser Arbeit.

Literaturhinweise

- [1] *Krüger, E., Nistler, W., Weirauch, W.*: Bestimmung der Feinstrukturkonstanten durch Messung des Quotienten aus Planck-Konstante und Neutronenmasse. In: PTB-Mitteilungen 106 (1996), S. 393–401
- [2] *Krüger, E., Nistler, W., Weirauch, W.*: Determination of the fine-structure constant by a precise measurement of h/m_n . In: Metrologia 32 (1995), S. 117–128
- [3] Horst Kuchling: Taschenbuch der Physik, 20. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag
- [4] *Brede, H.J., Cosack, M., Dietze, G., Gumpert, H., Guldbakke, S., Jahr, R., Kutscha, M., Schlegel-Bickmann, D. Schölermann, H.*: The Braunschweig Accelerator Facility for Fast Neutron Research, I. Building and Accelerators. In Nucl. Instr. a. Methods 169 (1980), S. 349–358
- [5] *Böttger, R., Brede, H.J., Cosack, M., Dietze, G., Jahr, R., Klein, H., Schölermann, H., Siebert, B.R.L.*: A Multi-Angle Time-of-Flight Spectrometer for Fast Neutron Scattering Experiments. In: International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, 6. – 10. Sept. 1982, Antwerp/Belgium, ed. K.H. Böckhoff, Reidel Publishing Co., Dordrecht, 1983, S. 836
- [6] *Schmidt, D.*: Determination of Neutron Scattering Cross Section with High Precision at PTB in the Energy Region 8 to 14 MeV. , Nucl. Sci. Eng. 160, 349–362 (2008)
- [7] *Schmidt, D., Klein, H.*: Precise Time-of-Flight Spectrometry of Fast Neutrons – Principles, Methods and Results, PTB-Bericht PTB-N-35, Braunschweig 1998
- [8] *Schmidt, D., Siebert; B.R.L.*: Fast Neutron Spectrometry and Monte Carlo Simulation – the codes SINENA and STREUER. PTB-Bericht PTB-N-40
- [9] *Mannhart, W., Schmidt, D.*: Bericht PTB-N-53, Braunschweig 2007, Measurement of Neutron Activation Cross Sections in the Energy Range from 8 MeV to 15 MeV
- [10] *Jahr, R.*: Neutronenphysik in der PTB – ein Rückblick. PTB-Bericht PTB-N-30 (1997)

Ehemaliger Forschungsreaktor der PTB

Jens Simon



Jeder Kern hat eine Hülle: Die Hülle des Forschungs- und Messreaktors Braunschweig (FMRB).

Blick in den Reaktorkern: Der FMRB war ein Leichtwasserreaktor, in dem die Brennelemente im Wasser platziert wurden – mit dem Effekt des typisch blauen Leuchtens (Cerenkov-Strahlung). Die erste sich selbst erhaltende Kettenreaktion im FMRB wurde am 3. Oktober 1967 erzeugt.

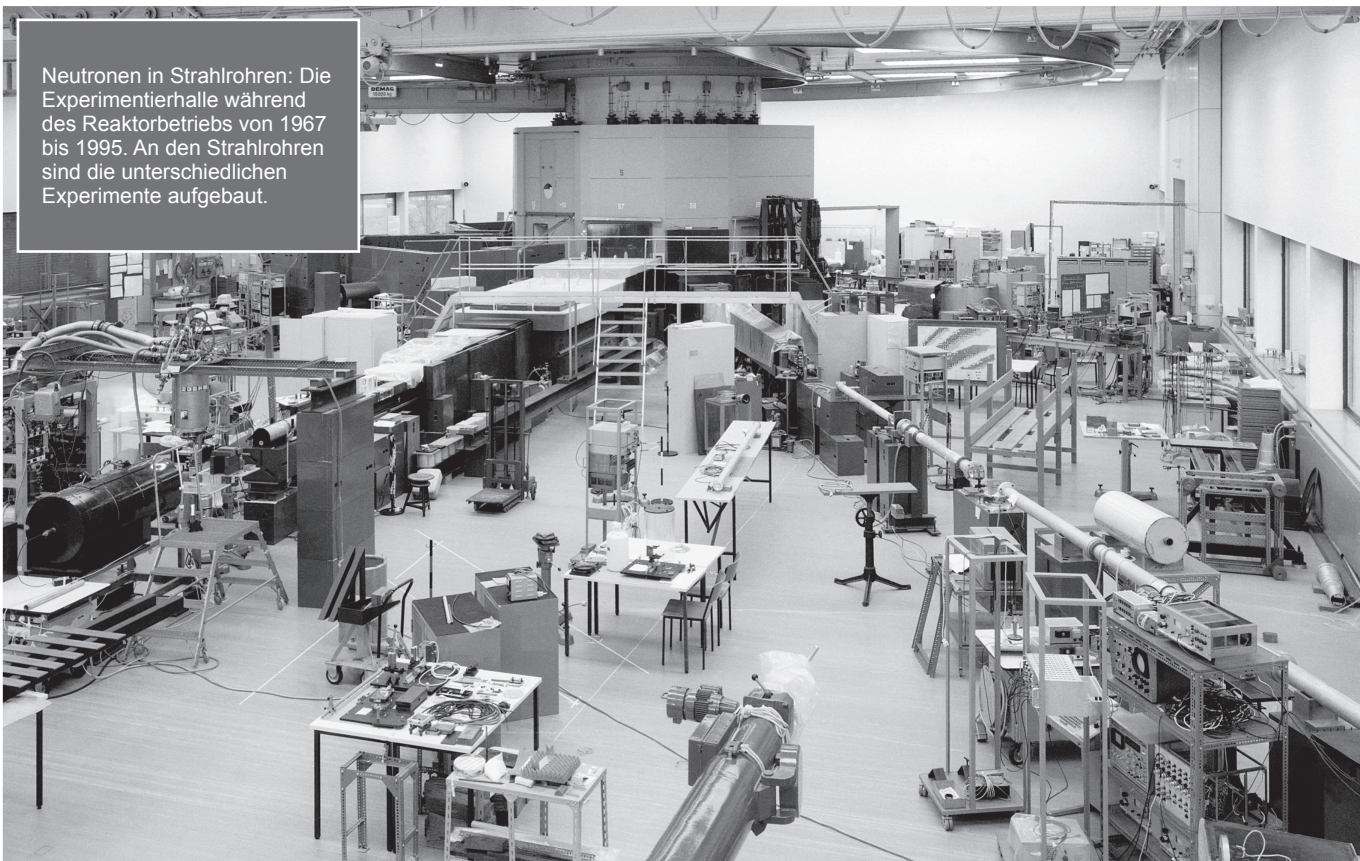
Mehr als zwanzig Jahre ist es her, dass der Forschungs- und Messreaktor der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig (sein Akronym: FMRB) letztmalig seine Aufgabe

erfüllte: Neutronen für die Forschung zu produzieren. Von 1967 bis 1995 war der Reaktor ein wichtiges Werkzeug für die messtechnischen Aufgaben der PTB. Am Reaktor wurde Grund-

lagenforschung zur Neutronen- und Festkörperphysik betrieben, wurden Messinstrumente geprüft und kalibriert sowie neue Messverfahren für die Dosimetrie entwickelt.



Noch ist kein Neutron erzeugt worden: Die leere Experimentierhalle während der Bauphase des Reaktors.

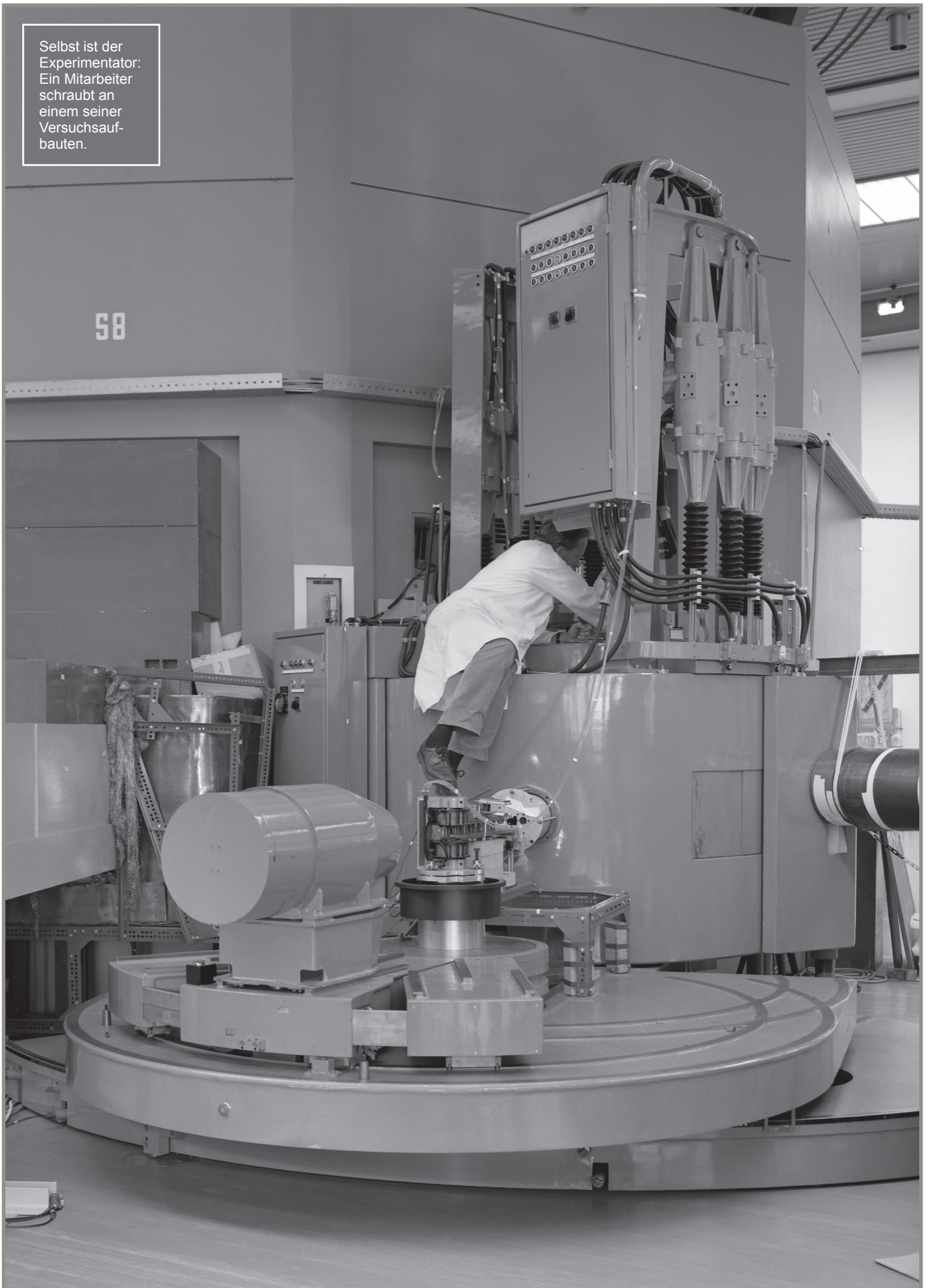


Neutronen in Strahlrohren: Die Experimentierhalle während des Reaktorbetriebs von 1967 bis 1995. An den Strahlrohren sind die unterschiedlichen Experimente aufgebaut.

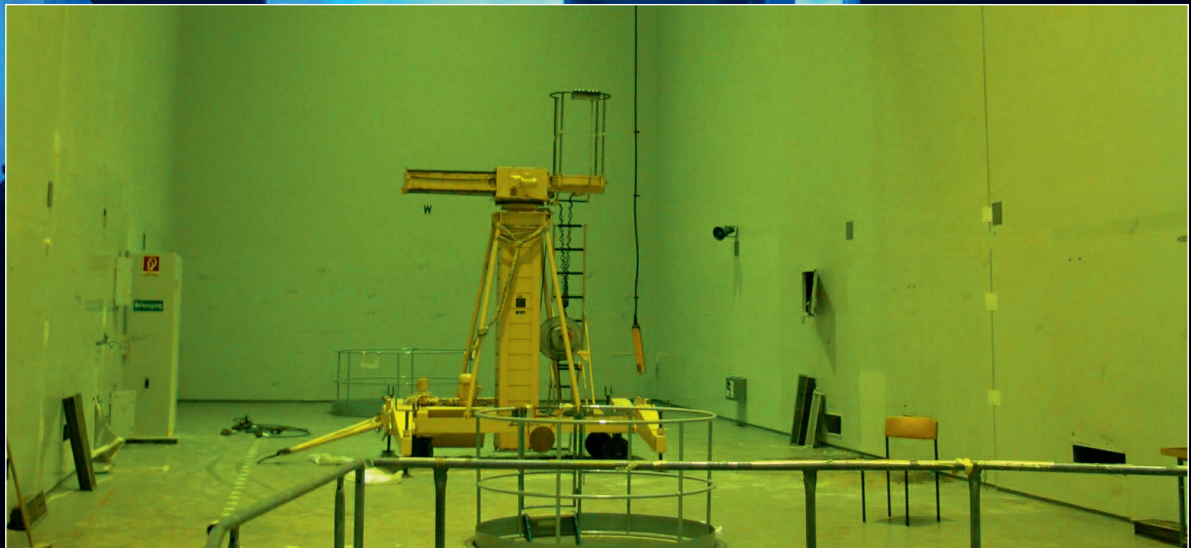


Vom Brückenraum aus (oberhalb der Experimentierhalle) wurde der Reaktorkern mit den Brennelementen überwacht.

Selbst ist der
Experimentator:
Ein Mitarbeiter
schraubt an
einem seiner
Versuchsauf-
bauten.







Die Entscheidung, den Reaktor stillzulegen, folgte rein wirtschaftlichen Überlegungen. Die verbleibenden Arbeiten konnten die Wissenschaftler am PTB-eigenen Teilchenbeschleuniger oder auch an anderen externen Neutronenquellen, etwa am Forschungs-

reaktor in Geesthacht oder am Institut Laue-Langevin in Grenoble, durchführen. Der Reaktor wurde dann im Laufe mehrerer Jahre nach allen Regeln der Kunst und vor allem allen Regeln des Atomgesetzes rückgebaut, bis er schließlich im Jahr 2005 – zehn Jahre nach

seiner Abschaltung – aus der atomrechtlichen Aufsicht des Niedersächsischen Umweltministeriums entlassen wurde. Heute sind in der Gebäudehülle des ehemaligen Reaktors die Werkstätten, Labore und Büros des Wissenschaftlichen Gerätebaus der PTB untergebracht.

Sicherung der Qualität von Verbrauchszählern für zukünftige Zeiträume

Katy Klauenberg* und Clemens Elster**

Abstract

Im OIML Guide 20 [1] ist aufgeführt, dass die zwei Schlüsselemente der metrologischen Qualitätskontrolle für Verbrauchsmessgeräte deren Überprüfung vor Inbetriebnahme sowie Überprüfungen in regelmäßigen Zeitabständen während des Betriebs sind.

Für die regelmäßige Überprüfung nach Inbetriebnahme hat die PTB ein Verfahren entwickelt, welches mit hoher Sicherheit garantiert, dass 95 % der Messgeräte die wesentlichen Anforderungen zu jedem Zeitpunkt einhalten. Dieses Verfahren geht über den Rahmen des OIML Guide 20, derzeitige Praxis und bisherige deutsche Vorschriften hinaus, die lediglich garantieren, dass Messinstrumente die Anforderungen zum Zeitpunkt der Prüfung einhalten.

Das an der PTB entwickelte Verfahren besteht aus zwei sich ergänzenden statistischen Methoden, die Standardverfahren für Stichproben mit der Annahme einer zeitlich linearen Abnahme der Anzahl konformer Zähler kombiniert. Ohne weitere Kenntnisse müssen Standardstichprobenpläne [2] auf Zuverlässigkeitsstufen angewendet werden, die aufgrund der linearen Transformation über 95 % liegen. Die zweite der beiden statistischen Methoden ermöglicht die Anwendung der effizienteren Stichprobenpläne im OIML Guide 20 (die eine Zuverlässigkeit von 92 % garantieren), wenn strengere Bedingungen getestet und zusätzliche Kriterien erfüllt werden.

Dieses Verfahren wird Anfang 2019 in Deutschland in Kraft treten. Dadurch wird der Verbraucherschutz bei Gas-, Wasser-, Wärme- und Stromrechnungen erhöht.

1 Einleitung

1.1 Rechtlicher Hintergrund und derzeitige Praxis

Die metrologische Qualitätskontrolle für Verbrauchszähler ist in vielen Ländern gesetzlich geregelt. In Europa ist für viele Messgeräte die Konformitätsbewertung vor Inbetriebnahme in der Messgeräte-Richtlinie [3] harmonisiert. Diese Richtlinie legt Anforderungen fest, die Verbrauchszähler erfüllen müssen, wenn sie in der EU in Verkehr gebracht oder in Betrieb genommen werden; Module F und F1 dieser Richtlinie beschreiben Konformitätsbewertungsverfahren, die auch statistische Verfahren enthalten können (und durch WELMEC Guide 8.10 [4] unterstützt werden).

Die regelmäßige Überprüfung von Verbrauchszählern nach Inbetriebnahme ist in der EU nicht harmonisiert (siehe Abschnitt 1.3). Typischerweise wird eine Teilmenge sämtlicher Zähler nach statistischen Grundsätzen ausgewählt. Basierend auf den Ergebnissen einer solchen Stichprobe muss das gesamte Los entfernt oder kann weiter betrieben werden. In Deutschland wird die Überprüfung zur Verlängerung der Eichfrist in der Mess- und Eichverordnung [5] geregelt. Diese Verordnung wurde 2014 überarbeitet und führt nun Folgendes in Paragraph 35 an:

(V) Die Eichfrist wird verlängert, sofern nach anerkannten statistischen Grundsätzen davon auszugehen ist, dass mindestens 95 Prozent der Messgeräte des Loses die wesentlichen Anforderungen [...] während dieses Zeitraums jederzeit eingehalten werden.

Eine Besonderheit dieser Verordnung ist das Ziel, die Qualität von Zählern auch in der Zukunft

* Dr. Katy Klauenberg, "Datenanalyse und Messunsicherheit", E-Mail: katy.klauenberg@ptb.de

** Dr. Clemens Elster, "Datenanalyse und Messunsicherheit", E-Mail: clemens.elster@ptb.de

zu gewährleisten. Im Gegensatz dazu hatte die bisherige deutsche Verordnung (Paragraph 14 in [6]) lediglich das Ziel, die Korrektheit von Verbrauchszählern zum Zeitpunkt ihrer Prüfung nachzuweisen. Dasselbe gilt auch für OIML G 20. Endnutzer erwarten jedoch, dass die Verbrauchszähler und die auf deren Nutzung basierenden Rechnungen zu jedem Zeitpunkt korrekt sind – und nicht nur in der Vergangenheit korrekt waren. Die neue deutsche Verordnung berücksichtigt diese Erwartung.

Eine weitere Besonderheit ist die Tatsache, dass die Verordnung konkrete Qualitätsanforderungen beziffert. Die bisherige Verordnung bezog sich stattdessen auf nachgeordnete Vorschriften, die die Stichprobenpläne direkt benannten. Diese Stichprobenpläne wiederum garantieren eine Konformität von 92 % der Verbrauchszähler zum Zeitpunkt der Prüfung.

Diese zwei neuen Aspekte bei der Verlängerung der Eichfrist haben klare Vorteile: sie erhöhen im Falle der Umsetzung den Verbraucherschutz sowie die Transparenz und Flexibilität, wenn die Stichprobenverfahren neuen Marktanforderungen angepasst werden. Solche Anforderungen können sich aus der Energiewende, der Digitalisierung oder aus technischen Entwicklungen ergeben.

Jedoch erhöht die Verordnung (V) auch die Anforderungen an die Zählerqualität, was dazu führen kann, dass die Zählerüberwachung zusätzliche Kosten und Aufwand mit sich bringt. Dies kann sich als kritisch erweisen, da der Austausch von verbauten Verbrauchszählern kostspielig ist (Einführung in [1], [7, 8, 9, 10]). Darüber hinaus war nach Inkrafttreten bisher kein Verfahren zur Umsetzung der Verordnung verfügbar.

1.2 Neue Entwicklungen

Die PTB hat zwei statistische Methoden zur Umsetzung von Paragraph 35 der Mess- und Eichverordnung [5] entwickelt. Die erste Methode [11] kann als Defaultmethode angewendet werden, wenn wenig über die Verbrauchszähler bekannt ist. Die zweite Methode [8] verwendet die effizienteren Stichprobenpläne in [1]. Für diese Stichprobenpläne müssen allerdings strengere Spezifikationen erfüllt werden und es müssen Nachweise für bestimmte Qualitätseigenschaften erbracht werden.

Dieser Artikel fasst zusammen, wie auf Grundlage dieser beiden statistischen Methoden die zukünftige Qualität von Verbrauchszählern gesichert werden kann. Abschnitt 2 wiederholt den Hintergrund dieser Methoden, erklärt die einzelnen Voraussetzungen und beschreibt Beispiele für ihre Umsetzung. Nachschlagetabellen im Anhang vereinfachen die Anwendung. Vor kurzem haben die Eichbehörden Verfahrensanweisungen [12]

basierend auf der Forschung und Beratung der PTB entwickelt. Ab 2019 wird diese Verfahrensanweisung in Kraft treten, sodass die Verordnung (V) in Deutschland durchgesetzt werden kann. Abschnitt 3 gibt einen Ausblick darüber, wie Nachweise zur Unterstützung der zweiten Methode erbracht werden können, sowie über denkbare alternative Methoden.

Künftig können auch europäische und andere Länder von diesen Entwicklungen in Deutschland profitieren. Abschnitt 1.3 beschreibt einige internationale Aspekte der gesetzlichen Qualitätskontrolle. Die statistischen Ansätze selbst können auch außerhalb des gesetzlichen Messwesens von Interesse sein – insbesondere für Stichprobenprüfungen zur Sicherung zukünftiger oder hoher Zuverlässigkeitsstufen.

1.3 Internationaler Kontext

Die vorliegende Arbeit beschreibt, wie die Qualität von im Betrieb befindlichen Verbrauchszählern in Deutschland überwacht wird. Andere Länder haben andere oder teilweise keine Regelungen für regelmäßige Überprüfungen nach Inbetriebnahme. In Österreich, Schweden, dem Vereinigten Königreich und Kanada zum Beispiel sind Stichprobenprüfungen möglich oder vorgeschrieben, um nachzuweisen, dass Zähler auch weiterhin die Anforderungen einhalten [13, 14, 15, 16]. Ein umfassender Überblick stellt aufgrund der Sprachbarrieren und Änderungen an Gesetzen, Vorschriften und in der Praxis eine Herausforderung dar.

Österreichs Maß- und Eichgesetz für die Verlängerung der Nacheichfrist (Paragraph 18 in [13]) ist vergleichbar mit der deutschen Verordnung und fordert, dass Richtigkeit und Zuverlässigkeit der Messgeräte für den gesamten Zeitraum der Verlängerung gewährleistet sind. Allerdings beziehen sich nachgeordnete Vorschriften in Österreich [17, 18, 19] nur auf die Konformität zum Zeitpunkt der Prüfung. Hierzu werden die Stichprobenpläne [1] für Elektrizitätszähler direkt angewendet und für Gas- und Elektrizitätszähler auf irgendwie verschärfte Fehlergrenzen.

In kleineren Ländern befinden sich normalerweise weniger Verbrauchszähler im Betrieb, und homogene Lose sind tendenziell kleiner. Somit sind in diesen Ländern effiziente Stichprobenpläne noch wichtiger.

OIML G 20 [1] führt an, dass es „ein allgemein akzeptiertes Ziel des gesetzlichen Messwesens ist, dass ein hoher Prozentsatz der Verbrauchszähler, die in Versorgungsnetzen installiert sind, die Verkehrsfehlergrenzen (MPE) während ihres Betriebs einhalten“. Mit Ausnahme der deutschen und österreichischen Verordnungen kennen die Autoren keine Vorschriften aus anderen Ländern, die genau auf diese Absicht abzielen.

2 Das Verfahren

Mit Standardstichprobenmethoden [20, 2, 21] wird die Konformität von Messgeräten zum Zeitpunkt der Überprüfung verifiziert, aber nicht für die Dauer der Eichfristverlängerung (wie in der Einleitung zu [1] bestätigt). Um auf Grundlage einer Gerätestichprobe auch die zukünftige Konformität vorauszusagen, muss eine sogenannte Zuverlässigkeitsfunktion vorausgesetzt werden. Abschnitt 2.1 beschreibt die lineare Zuverlässigkeitsfunktion, welche die Anforderung von 95 % für die Zukunft in eine höhere Anforderung für den Zeitpunkt der Überprüfung transformiert.

Basierend auf dieser Transformation verwendet die Methode in Abschnitt 2.2 (hier Defaultmethode genannt) Standardmethoden für attributive Stichprobenprüfungen [2]. Die Anwendung dieser Methode setzt minimale Annahmen voraus. Abschnitt 2.3 beruht ebenfalls auf der linearen Transformation, verwendet jedoch eine effizientere Methode für Zähler, deren Messabweichungen nachweislich eine bestimmte Form annehmen und bei denen die Messabweichung der einzige Ausfallgrund ist. Ein Theorem [8] hat gezeigt, dass der Nachweis engerer Fehlergrenzen für die Messabweichung dann der Verordnung (V) folgt, wenn die bekannten Stichprobenpläne in [1] angewendet werden.

Diese beiden alternativen Methoden werden in Abschnitt 2.4 kombiniert.

2.1 Die Grundlage: Lineare Zuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeitsfunktion für ein Los ist linear, wenn der Anteil der funktionierenden Geräte mit der Zeit linear abnimmt. Da höchstens alle Geräte zu Beginn ihres Lebenszyklus konform sind, kann die in der Zukunft geforderte Konformität von 95 % in eine geforderte Konformität von höchstens p_i zum Zeitpunkt der Prüfung i transformiert werden, wobei

$$p_i = 1 - 0,05 \left(1 + \frac{T}{t_i} \right)^{-1} \tag{1}$$

für eine Eichverlängerungsfrist T und ein Alter zum Zeitpunkt der Prüfung t_i . Diese Transformation wird schematisch in Abbildung 1 veranschaulicht.

Die lineare Zuverlässigkeitsfunktion ist die einfachste Funktion und entspricht etwa dem exponentiellen Zuverlässigkeitsmodell, welches eine konstante Ausfallrate hat (siehe [11] für eine detaillierte Begründung und Voraussetzungen).

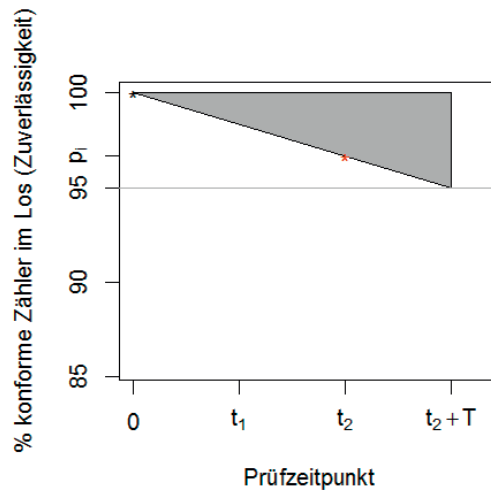


Abbildung 1: Transformation der Zuverlässigkeit von 95 %, die zum Zeitpunkt der nächsten Prüfung t_2+T gefordert ist, in eine Zuverlässigkeit p_i zum Zeitpunkt der derzeitigen Prüfung t_2 für eine linear abnehmende Anzahl an funktionierenden Zählern in einem Los (siehe Gleichung (1)).

Wenn die Zeiträume T und t_i nicht genau bekannt sind, verallgemeinert [11] die lineare Transformation (1) auch. Wenn zum Beispiel den Behörden der genaue Termin der nächsten Prüfung nicht bekannt ist, sondern lediglich das Kalenderjahr, und wenn das Los aus Zählern unterschiedlichen Alters besteht (wobei d der maximale Altersunterschied in einem Los ist und sich $t_i=t_1+T(i-1)$ aus der Eichfrist t_1 und $(i-1)$ Verlängerungsfristen T zusammensetzt), dann wächst der geforderte Anteil der konformen Zähler auf

$$p_i = 1 - 0,05 \left(1 + \frac{T + 1}{t_1 + T(i - 1) - d} \right)^{-1} \tag{2}$$

Zusammenfassend gelten die folgenden Annahmen bei der Anwendung der Transformation (2):

Annahmen 1: Linearität

- die Anzahl der funktionierenden Geräte nimmt mit der Zeit linear ab,
 - anstelle von genauen Zeiten sind nur Kalenderjahre bekannt, wobei
 - Zähler aus d unterschiedlichen Jahrgängen des Inverkehrbringens in einem Los zusammengefasst sind,
 - die Eichfrist t_1 Jahre beträgt,
 - Inspektionen $1, \dots, i$ die Gültigkeitsdauer um T Jahre verlängert haben (bzw. verlängern).
-

Verfahren zur Überprüfung der Annahmen (1) werden derzeit entwickelt (siehe Abschnitt 3). Wie in [11] erörtert, können Verbrauchszähler, die ein bestimmtes nichtlineares Verhalten zeigen, im Rahmen des linearen Ansatzes konservativ betrachtet werden. Für kurze Verlängerungsfristen gelten die Annahmen (1) näherungsweise auch nach der Prüfung. Beispielsweise wird in Deutschland davon ausgegangen, dass die Zuverlässigkeit

von Verbrauchszählern weiterhin linear ist, wenn die Verlängerung nur zwei Jahre beträgt.

Beispiel 1: Linearität

Wenn die Zähler eines Loses in dem Kalenderjahr geprüft werden, in dem die Eichfrist von 6 Jahren abläuft ($t_i=t_1=6$, z. B. Kaltwasserzähler in Deutschland), wenn die Zähler alle in demselben Kalenderjahr in Betrieb genommen wurden (z. B. im Jahr 2001, sodass $d=1$) und wenn die Zähler in dem Kalenderjahr geprüft werden, in dem die zweijährige Eichverlängerungsfrist abläuft ($T=2$), dann gewährleistet der Nachweis der Zuverlässigkeit

$$p_1 = 1 - 0,05 \left(1 + \frac{2+1}{6-1} \right)^{-1} = 0,969$$

zum Zeitpunkt der Überprüfung gemäß der Transformation (2) die Verordnung (V).

2.2 Die Defaultmethode

Verordnung (V) kann gewährleistet werden, indem durch Standardstichprobenverfahren die transformierte Zuverlässigkeit p_i nachgewiesen wird. Für die Überwachung von Verbrauchszählern werden normalerweise die attributiven Stichprobenpläne in [2] angewendet (z. B. [1, 17, 18, 19, 22] sowie die bisher in Deutschland geltenden Bestimmungen); diese Stichprobenpläne wurden auf Zwischenstufen der Zuverlässigkeit erweitert (siehe Tabelle A1 in [11]), um die Effizienz zu erhöhen. Diese Pläne beruhen auf den folgenden Annahmen:¹

Annahmen 2: Stichprobe

- das Los ist hinsichtlich der Faktoren homogen, die die Zuverlässigkeit beeinflussen,
- das Los hat eine begrenzte Größe und die Stichprobe wird ohne Zurücklegen daraus entnommen,
- die Bewertung der Zähler in der Stichprobe als konform bzw. nichtkonform ist fehlerfrei, und
- die statistischen Testeigenschaften sind festgelegt.¹

Die benötigten Stichprobenpläne können mithilfe von Software effizient berechnet oder in Nachschlagetabellen abgelesen werden. Um die Anwendung zu vereinfachen, enthält Tabelle 1 im Anhang einen Auszug typischer Pläne. Das Standardverfahren zur Sicherung der Verordnung (V) wird wie folgt zusammengefasst:

Verfahren 1: Defaultmethode

- erbringe Nachweise zur Überprüfung der Annahmen (1) und (2),
- berechne p_i gemäß Gleichung (2),
- wähle in Tabelle 1 die Zeile entsprechend der Losgröße und die Spalte, sodass $1 - p_i \leq LQ/100$
- überprüfe n zufällig ausgewählte Verbrauchszähler, und
- akzeptiere das Los, wenn c oder weniger Geräte nicht konform sind, anderenfalls wird das Los nicht akzeptiert.

Beispiel 2: Defaultmethode

Das Beispiel (1) wird mit 1201 bis 3200 Zählern im Los betrachtet. Die Zuverlässigkeit $p_i=0,969$ zum Zeitpunkt der Überprüfung wird durch den Stichprobenplan in der Spalte $LQ=2,7$ aus Tabelle 1 – also $(n,c)=(141,1)$ – nachgewiesen. Das heißt, das Los hält die Verordnung (V) mit hoher Sicherheit ein, wenn nicht mehr als einer der 141 zufällig ausgewählten Zähler nicht konform ist.

Die Stichprobenumfänge in Tabelle 1 sind größer als die in [1], da die Anforderungen deutlich höher sind ($p_i > 0,92$). Folglich sind Verbraucher besser gegen defekte Zähler und inkorrekte Abrechnungen geschützt, insbesondere zwischen den Prüfungen.

Der Hauptvorteil dieser Standardstichprobenpläne ist ihre Einfachheit: Nachschlagetabellen können verwendet werden und wenige Annahmen sind erforderlich. Das Vorgehen für das Verfahren 1 ähnelt der Vorgehensweise, die bisher in Deutschland angewandt wurde, und der Vorgehensweise in [1]. Letztlich ist diese Defaultmethode sicherer für Verbraucher als jede Methode ohne Vorhersage.

2.3 Die effiziente Methode

Wenn zusätzlich zu den minimalen Annahmen der Defaultmethode noch Wissen über die Qualität der Verbrauchszähler vorhanden ist, sind effizientere Stichprobenpläne möglich. Die hohen Kosten, die mit dem Austausch von eingebauten Verbrauchszählern einhergehen, können reduziert werden, und stattdessen kann in die Verbesserung spezifischer Qualitätsmerkmale von Zählern sowie in den Nachweis dieser Eigenschaften investiert werden.

Ein Qualitätsmerkmal, dessen quantitativer Einfluss in [8] nachgewiesen wurde, ist die Messabweichung. Insbesondere ist nun bekannt, dass mindestens $100p_i\%$ einer Gerätepopulation die

¹ Die Festlegung der Testeigenschaften ist eine subjektive Entscheidung. Typischerweise wird ein Fehler erster Art von 10 % – oder äquivalent eine Sicherheit von 90 % – bei der erforderlichen Zuverlässigkeit p_i gewählt (d. h., nicht mehr als jedes 10. Los mit unbefriedigender Qualität wird fälschlicherweise akzeptiert), und ein Fehler zweiter Art von 5 % wird für die Zuverlässigkeitsstufe $q_i > p_i$ gewählt (d. h., nicht mehr als jedes 20. Los zufriedenstellender Qualität wird fälschlicherweise zurückgewiesen).

Spezifikation Δ erfüllen, wenn die folgenden Annahmen zutreffen:

Annahmen 3: Messabweichung

Die Messabweichung (oder ihr Maximalwert in einem Bereich)

- ist das einzige Kriterium zur Beurteilung des Loses,
- folgt nachweislich einer Normalverteilung (mit beliebigen Parametern),
- ist kleiner als die Spezifikation Δ/γ für mindestens 92 % des Loses, wobei

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{\Phi^{-1}\left(\frac{0,92 + 1}{2}\right)}{\Phi^{-1}\left(\frac{p_i + 1}{2}\right)} \quad (\text{mit } p_i > 0,92 \text{ und } \gamma > 1). \tag{3}$$

Das heißt, es muss keine große Stichprobe mehr für den Nachweis der hohen Zuverlässigkeit p_i gezogen werden, sondern es reicht eine kleinere Stichprobe für den Nachweis der Zuverlässigkeit von 92 % bei engeren Fehlergrenzen. Abbildung 2 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

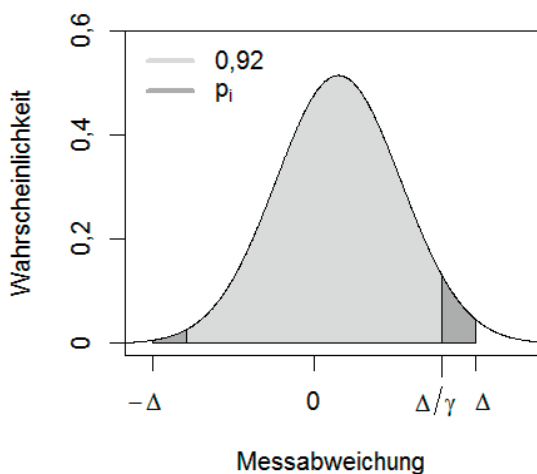


Abbildung 2: Darstellung des Verhältnisses zwischen den Zuverlässigkeiten p_i und 92 % für eine bestimmte Normalverteilung.

Um diese engeren Fehlergrenzen nachzuweisen, werden ebenfalls Standardstichprobenverfahren wie in [2] angewendet. Folglich sichern die effizienteren Stichprobenpläne in [1] (die auch bisher in Deutschland verwendet wurden) die Verordnung (V), wenn die Annahmen (3) gelten. Diese Stichprobenpläne sind effizienter als die Defaultmethode und bieten gleichzeitig ein höheres Maß an Verbraucherschutz gegen defekte Zähler und inkorrekte Abrechnungen als die bisherige Praxis. Das heißt, nur mit dem mathematischen Beweis in [8] und nur durch den Nachweis der obenstehenden Annahmen garantiert die Anwendung

der Stichprobenpläne in [1] eine Konformität von 95 % auch in der Zukunft.

Zur einfacheren Anwendung sind die Einfach- und Doppelstichprobenpläne aus [1, 2] in den Tabellen 3 und 4 im Anhang angeführt.

Das Effiziente Verfahren zur Sicherung der Verordnung (V) wird wie folgt zusammengefasst:

Verfahren 2: Effiziente Methode

- erbringe Nachweise zur Überprüfung der Annahmen (1), (2) und (3),
- schlage $1/\gamma$ in Tabelle 2 nach (oder verwende die Gleichungen (2) und (3)),
- wähle das Einfach- oder Doppelstichprobenverfahren,
- wähle in Tabelle 3 oder 4 die Spalte entsprechend der Losgröße,
- überprüfe n zufällig ausgewählte Verbrauchszähler,
- akzeptiere das Los, wenn
 - sämtliche Zähler alle Kriterien einhalten, bis auf die Messabweichung und
 - nicht mehr als c Geräte eine Messabweichung von mehr als Δ/γ aufweisen;
 anderenfalls wird das Los nicht akzeptiert.

Verfahren zum Nachweis der zusätzlichen Annahmen (3) – sogenannte Qualifikationsverfahren – werden derzeit ausgearbeitet. Einige wesentliche Aspekte sind in Abschnitt 3 genannt.

Beispiel 3: Effiziente Methode

Der Nachweis der Zuverlässigkeit $p_i=0,969$ in Beispiel (1) reduziert sich auf den Nachweis der Zuverlässigkeit von 92 %, wenn die Annahmen (3) gelten. Die Bewertung der Konformität des Loses besteht dann aus dem Nachweis, dass die Messabweichungen kleiner als $\Delta/\gamma=0,812 \Delta$ sind (gemäß Gleichung (3)). Mit 1201 bis 3200 Zählern im Los setzt somit der Stichprobenplan $(n,c)=(80,3)$ (siehe Tabelle 3) die Verordnung (V) um. Das heißt, es dürfen nicht mehr als 3 von 80 zufällig ausgewählten Zählern nicht konform sein; darüber hinaus muss die Nichtkonformität dieser Geräte ausschließlich auf Messabweichungen zurückzuführen sein, die größer als $0,812 \Delta$ sind.

Verglichen mit dem Stichprobenplan (141,1) in Beispiel (2) reduziert die effiziente Methode die Anzahl der zu untersuchenden Geräte erheblich und erlaubt mehr Ausfälle – wenngleich unter strengeren Bedingungen.

Die Hauptvorteile dieser Stichprobenpläne sind ihre Effizienz und die Tatsache, dass sie die derzeitige Praxis weiterführen. Es werden weniger Stichproben als für die Defaultmethode benötigt. Die bisher in Deutschland und in [1] verwendeten Stichprobenpläne werden beibehalten. Die Verfahrensweise ist ebenfalls ähnlich, Nachschlagetabellen können weiterhin verwendet werden. Letztlich ist die Effiziente Methode für Verbraucher sicherer als jede Methode ohne Vorhersage.

2.4 Kombination beider Methoden

Es ist offensichtlich, dass sich die Defaultmethode und die Effiziente Methode ergänzen. Wenn die Qualität eines Loses durch Nachweis der Annahmen (3) belegt werden kann, darf die Methode in Abschnitt 2.3 angewendet werden. Das heißt, es reichen kleinere Stichprobenumfänge und größere Annahmezahlen aus, um Verordnung (V) zu gewährleisten, jedoch müssen auch strengere Spezifikationen eingehalten werden. Sind keine Nachweise dieser Annahmen verfügbar, so kann die Methode in Abschnitt 2.2 angewendet werden. Das heißt, Standardstichprobenverfahren für höhere Zuverlässigkeitsstufen gewährleisten die Verordnung (V).

Beide Methoden setzen Paragraph 35 aus [5] um und bilden die Grundlage für Verfahrensanweisungen [12]. Diese Anweisungen, die von Eichbehörden herausgegeben wurden, werden den Paragraphen 35 aus [5] ab 2019 durchsetzen. Folglich werden Nutzer besser vor nichtkonformen Zählern geschützt. Die Autoren vertreten die Meinung, dass qualitativ hochwertigere Zähler in der Zukunft den deutschen Markt dominieren werden. Falls notwendig, könnten andere Qualitätsmerkmale der Zähler ebenfalls effiziente Stichprobenpläne ermöglichen (Ausblick siehe Abschnitt 3).

3 Zukünftige Entwicklungen

Um von der Effizienten Methode (Abschnitt 2.3) profitieren zu können, werden Nachweise gebraucht, dass die Zuverlässigkeit linear abnimmt und dass Messabweichungen (oder ihr Maximalwert in einem Bereich) Normalverteilt sind. Für diesen Zweck entwickeln Verbände, die den deutschen Zählermarkt vertreten, zurzeit gemeinsam Qualifikationsverfahren. Die Norm in [23] (und in Zukunft [24]) kann eine Grundlage für den Test auf Abweichungen von der Normalverteilung sein, und parametrische oder nichtparametrische Schätzer (wie beispielsweise [25]) können zum Test auf Abweichungen von der Linearität verwendet werden. Im Allgemeinen werden durch kleine Stichproben selten nicht-Normale Verteilungen oder nichtlineare Zuverlässigkeiten erkannt, während durch große

Stichproben auch sehr kleine Abweichungen von der angenommenen Normalität oder Linearität detektiert werden.

Darüber hinaus wird ein Nachweis benötigt, dass die Messabweichungen die einzige Ursache für Nichtkonformität sind. In der Praxis wird diese Annahme durch jede Stichprobenprüfung unterstützt. Zähler, die offensichtlich nichtkonform sind, werden in guten Qualitätsmanagementsystemen sofort (d.h. vor Bildung der Stichprobe) aus dem Betrieb entfernt.

Die deutsche Verordnung für eine Verlängerung der Eichfrist gibt nicht vor, dass die beiden oben eingeführten Stichprobenverfahren angewendet werden müssen, sondern lässt Raum für alternative oder zusätzliche Methoden in der Zukunft. Beispielsweise könnten effizientere Stichproben in kürzeren Zeitabständen durchgeführt werden. Eine Reihe kleinerer Stichproben könnte so (eventuell zu einem früheren Zeitpunkt) mehr Informationen über eine künftige unzureichende Zuverlässigkeit enthalten. Zu diesem Zweck könnten flexiblere Zuverlässigkeitsmodelle nötig sein, die gleichzeitig das Risiko für Verbraucher senken, das von einer nichtlinear alternden Zählerpopulation ausgeht. Bayes'sche Methoden und Stichprobenmethoden basierend auf Variablenprüfungen können wertvolle zusätzliche Informationen liefern. Künftige Forschung könnte diese Ansätze untersuchen, ihren Nutzen beurteilen und sie gegen praktische Möglichkeiten abwägen.

Derzeit berücksichtigt die Verordnung (V) nicht den wirtschaftlichen Wert der falsch gemessenen Ware. Falls erwünscht, könnte zukünftige Forschung auch Stichprobenverfahren entwickeln, die die Kosten des Austausches eines Zählers gegen die Kosten von fehlerhaften Messungen aufwiegt (z. B. wie in [9, 26]).

4 Fazit

Für die metrologische Qualitätskontrolle von im Betrieb befindlichen Verbrauchsmessgeräten haben wir zwei Methoden beschrieben, die mit hoher Sicherheit gewährleisten, dass 95 % der Messgeräte zu jedem Zeitpunkt die wesentlichen Anforderungen einhalten. Beide Methoden sind einfach und werden von Nachschlagetabellen unterstützt; die allgemeine Verfahrensweise ähnelt der derzeit verwendeten. Die beiden Methoden stellen eine Auswahl zwischen minimalen Annahmen und maximaler Stichprobeneffizienz dar.

Die PTB hat somit gezeigt, wie „ein allgemein akzeptiertes Ziel des gesetzlichen Messwesens“ (gemäß OIML G 20 [1]), „dass ein hoher Prozentsatz der Verbrauchszähler, die in Versorgungsnetzen installiert sind, die Verkehrsfehlergrenzen (MPE) während ihres Betriebs einhalten“ nachweislich umgesetzt werden kann. Die hier

dargestellte Forschung und Beratung von deutschen Behörden durch die PTB löst ein wichtiges Problem im gesetzlichen Messwesen und ermöglicht die Umsetzung der neuen Verordnung für die Verlängerung der Eichfrist von Verbrauchsmessgeräten in Deutschland. Die Stichprobenverfahren können als Vorlage für höheren Verbraucherschutz in anderen Ländern dienen.

Danksagung

Der Dank der Autoren gilt Dr. Stephan Mieke (PTB) für seine vorbereitende Arbeit für Abschnitt 1.3 sowie den Mitgliedern des AGME-Arbeitsausschusses "Prüfstellen und Stichprobenverfahren", und dem PTB-Arbeitskreis "Statistik für das Mess- und Eichrecht" für ihr wertvolles Feedback zur Verwendbarkeit dieser Forschung. Dieser Artikel ist eine Übersetzung aus dem Englischen [27].

Literaturverweise

- [1] OIML TC 3/SC 4, „Surveillance of utility meters in service on the basis of sampling inspections,“ *OIML G 20*, 2017.
- [2] ISO/TC 69/SC 5, „Sampling procedures for inspection by attributes - Part 2: Sampling plans indexed by limiting quality (LQ) for isolated lot inspection,“ *ISO 2859-2:1985*, 1985.
- [3] European Parliament and Council, „Directive 2014/32/EC MID on the harmonisation of the laws of the Member States relating to the making available on the market of measuring instruments (recast),“ *Official Journal of the European Union*, Bd. 96, 2014.
- [4] WELMEC European cooperation in legal metrology: Working Group 8, „Measuring Instruments Directive (2004/22/EC): Guide for generating sampling plans for statistical verification according to Annex F and F1 of MID 2004/22/EC,“ Bd. WELMEC 8.10, Nr. 1, 2011.
- [5] „Bundesgesetzblatt,“ *Bundesanzeiger Verlag*, Bd. 1, S. 2010–2073, 2014.
- [6] „Bundesgesetzblatt,“ *Bundesanzeiger Verlag*, Bd. Letzte Änderung 2011, S. 1657–1684, 1988.
- [7] H. Schonlau und H. Rubach, „Wasserzähler auf dem Prüfstand – Sind die vorgeschriebenen Eichfristen noch zeitgemäß?,“ *wf – Wasser|Abwasser*, Bd. 155, S. 504–509, 2014.
- [8] K. Klauenberg, R. Kramer, C. Kroner, J. Rose und C. Elster, „Reducing Sample Size by Tightening Test Conditions,“ *Quality & Reliability Engineering International*, 2018.
- [9] H. Karlsson, Å. A. F. Olsen und L. Pendrill, „Conformance assessment of electrical energy meters investigated by risk analysis – a case study,“ *OIML Bulletin*, Bd. LVII, S. 5–20, 2016.
- [10] G. Wendt, H. Schonlau, T. Oldörp, D. Schumann und T. Jahn, „Investigation of domestic water meters with regard to their measuring stability during installation in communal water supply networks,“ *OIML Bulletin*, Bd. LVIII, S. 10–16, 2017.
- [11] K. Klauenberg und C. Elster, „Sampling for assurance of future reliability,“ *Metrologia*, Bd. 54, S. 59–68, 2017.
- [12] Deutsche Akademie für Metrologie DAM, „Gesetzliches Messwesen – Verfahrensanweisung für Stichprobenverfahren zur Verlängerung der Eichfrist (GM-VA SPV),“ 2018.
- [13] „Bundesgesetz vom 5. Juli 1950 über das Maß- und Eichwesen (Maß- und Eichgesetz - MEG),“ *Rechtsinformationssystem des Bundes*, 2016.
- [14] Swedac, „Styrelsens för ackreditering och teknisk kontroll (Swedac) föreskrifter och allmänna råd (STAFS 2009:9) om återkommande kontroll av mätare för aktiv elenergi,“ Bd. Ändring införd: t.o.m. STAFS 2015:3, 2015.
- [15] Office for Product Safety & Standards, *In-service testing handbook version 3.2*, 2018.
- [16] Minister of Justice of Canada, „Electricity and Gas Inspection Regulations,“ *SOR/86-131*, Section 19, 2014.
- [17] „Verordnung des Bundesministers für Wirtschaft, Familie und Jugend über die Verlängerung der Nacheichfrist für Balgengaszähler,“ *Rechtsinformationssystem des Bundes*, 2009.
- [18] „Verordnung des Bundesministers für wirtschaftliche Angelegenheiten über die Verlängerung der Nacheichfrist für Elektrizitätszähler und elektrische Tarifgeräte,“ *Rechtsinformationssystem des Bundes*, 2009.
- [19] „Verordnung des Bundesministers für Wirtschaft und Arbeit über die Verlängerung der Nacheichfrist für Wärmezähler,“ *Rechtsinformationssystem des Bundes*, 2009.
- [20] ISO/TC 69/SC 5, „Sampling procedures for inspection by attributes – Part 1: Sampling schemes indexed by acceptance quality limit (AQL) for lot-by-lot inspection,“ *ISO 2859-1:1999*, 1999.
- [21] ISO/TC 69/SC 5, „Sampling procedures for inspection by variables - Part 1: Specification for single sampling plans indexed by acceptance quality limit (AQL) for lot-by-lot inspection for a single quality characteristic and a single AQL,“ *ISO 3951-1:2013*, 2013.
- [22] Measurement Canada, „Sampling Plans for the Inspection of Isolated Lots of Meters in Service,“ S-S-06, 2010.
- [23] ISO/TC 69/SC 6, „Statistical interpretation of data – Tests for departure from the normal distribution,“ *ISO 5479:1997*, 1997.
- [24] ISO/TC 69, „Statistical interpretation of data – Part 3: Tests for departure from the normal distribution,“ *ISO/DIS 16269-3*, under development.

- [25] E. L. Kaplan und P. Meier, „Nonparametric Estimation from Incomplete Observations,“ *Journal of the American Statistical Association*, Bd. 53, Nr. 282, S. 457–481, 1958.
- [26] L. R. Pendrill, „Operating ‚cost‘ characteristics in sampling by variable and attribute,“ *Accreditation and Quality Assurance*, Bd. 13, pp. 619-631, 2008.
- [27] K. Klauenberg und C. Elster, „How to ensure the future quality of utility meters,“ *OIML Bulletin*, Bd. LIX, Nr. 3, S. 16–23, 2018.

Anhang

Losumfang	LQ = 1,69		LQ = 2,0		LQ = 2,31		LQ = 2,7		LQ = 3,15		LQ = 3,64		LQ = 4,17	
	<i>n</i>	<i>c</i>	<i>n</i>	<i>c</i>	<i>n</i>	<i>c</i>	<i>n</i>	<i>c</i>	<i>n</i>	<i>c</i>	<i>n</i>	<i>c</i>	<i>n</i>	<i>c</i>
53 bis 90	52	0	50	0	50	0	47	0	44	0	38	0	37	0
91 bis 150	81	0	80	0	70	0	65	0	55	0	48	0	46	0
151 bis 280	103	0	95	0	83	0	72	0	65	0	56	0	49	0
281 bis 500	118	0	105	0	88	0	80	0	80	0	59	0	52	0
501 bis 1200	128	0	125	0	110	0	95	0	125	1	103	1	90	1
1201 bis 3200	150	0	200	1	164	1	141	1	125	1	125	1	125	2
3201 bis 10000	227	1	200	1	200	1	200	2	200	3	200	3	200	4
10001 bis 35000	315	2	315	3	315	3	315	4	315	5	315	7	315	8
35001 bis 150000	500	4	500	5	500	7	500	8	500	10	500	13	500	15

Tabelle 1:

Stichprobenpläne (*n, c*) für verschiedene Stufen der geforderten Zuverlässigkeit p_i , mit $1 - p_i \leq LQ/100$ für die Standardstichprobenmethode (siehe Abschnitt 2.2) zur Sicherung der Verordnung (V). Der Stichprobenumfang wird mit *n*, das Annahmekriterium des Loses mit *c* bezeichnet. Die Werte wurden selektiv der Tabelle A1 in [11] entnommen.

Eichfrist t_1	Anzahl unterschiedlicher Jahrgänge der Inbetriebnahme <i>d</i>	Eichverlängerungsfrist <i>T</i>	1/γ für die 1. Verlängerung	1/γ für die 2. Verlängerung	1/γ für die 3. Verlängerung	1/γ für die 4. Verlängerung	1/γ für die 5. Verlängerung
8	2	8	0,753	0,809	0,833	0,846	0,854
8	1	8	0,764	0,813	0,835	0,847	0,855
8	2	4	0,793	0,823	0,839	0,849	0,856
8	1	4	0,803	0,827	0,842	0,851	0,857
6	2	6	0,741	0,804	0,829	0,843	0,852
6	1	6	0,758	0,809	0,832	0,845	0,854
6	2	3	0,781	0,816	0,834	0,845	0,852
6	1	3	0,796	0,823	0,838	0,848	0,854
5	2	5	0,731	0,800	0,827	0,842	0,851
5	1	5	0,753	0,807	0,830	0,844	0,852
5	2	3	0,761	0,807	0,829	0,842	0,850
5	1	3	0,781	0,816	0,834	0,845	0,852

Tabelle 2:

Für typische Szenarien werden Werte des Faktors $1/\gamma$ aufgeführt, um die strengere Spezifikation Δ/γ in der effizienten Stichprobenmethode zu prüfen (siehe Abschnitt 2.3), die die Verordnung (V) sichert. Die Werte wurden selektiv der Tabelle 2 in [8] entnommen.

Losumfang	Stichprobenumfang	Anzahl der nichtkonformen Zähler	
		Kriterium für die Annahme des Loses	Kriterium für die Ablehnung des Loses
bis zu 90	24	0	1
91 bis 150	26	0	1
151 bis 280	28	0	1
281 bis 500	32	0	1
501 bis 1200	50	1	2
1201 bis 3200	80	3	4
3201 bis 10000	125	5	6
10001 bis 35000	200	10	11
35001 bis 150000	315	18	19

Tabelle 3: Einfachstichprobenpläne für die effiziente Stichprobenmethode (siehe Abschnitt 2.3) zur Sicherung der Verordnung (V). Die Werte wurden selektiv der Tabelle 2 in [1] und Tabelle A in [2] entnommen.

Losumfang	Stichprobe	Stichprobenumfang	Anzahl der nichtkonformen Zähler		
			Annahme des Loses*	Ablehnung des Loses*	erforderliche 2. Stichprobe
501 bis 1200	Erste	32	0	2	1
	Zweite	64	1	2	
1201 bis 3200	Erste	50	1	4	2 bis 3
	Zweite	100	4	5	
3201 bis 10000	Erste	80	2	5	3 bis 4
	Zweite	160	6	7	
10001 bis 35000	Erste	125	5	9	6 bis 8
	Zweite	250	12	13	
35001 bis 150000	Erste	200	9	14	10 bis 13
	Zweite	400	23	24	

* In jeder Zeile, die einer zweiten Stichprobe entspricht, beziehen sich Stichprobenumfang und Anzahl nichtkonformer Zähler auf die kumulativen Werte.

Tabelle 4: Doppelstichprobenpläne für die effiziente Stichprobenmethode (siehe Abschnitt 2.3) zur Sicherung der Verordnung (V). Die Werte wurden selektiv der Tabelle 4 in [1] entnommen und aus den Tabellen D3 und D4 in [2] zusammengestellt.

Ein Kraft-Hebel-System zur genauen Messung von Drehmomenten unter Mehrkomponentenbelastung

Die rückführbare Messung von Drehmomenten größer $2\text{MN}\cdot\text{m}$ ist z. B. für die Windenergiebranche von enormer Bedeutung. Die neue PTB-Erfindung ermöglicht die Rückführung durch eine Zerlegung des Drehmoments in mehrere Kraftsignale, die über eine definierte Hebellänge gemessen werden. Außerdem ist der Drehmomentsensor in der Lage, die meisten Störkomponenten zu entkoppeln. Daraus ergibt sich eine genaue Methode mit einer Messunsicherheit von höchstens 1 %.

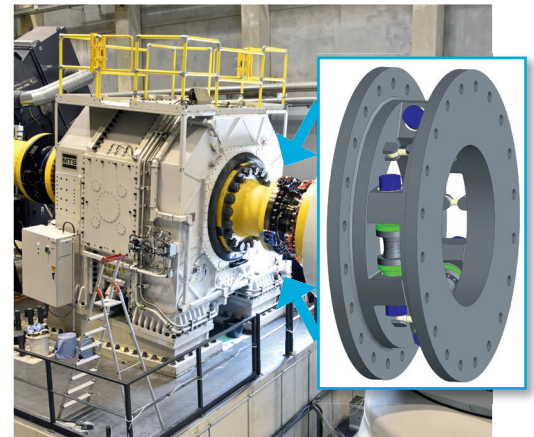
International wurden bereits Gondelteststände realisiert, die jedoch für ihre Drehmomentmessung im $\text{MN}\cdot\text{m}$ -Bereich keine Rückführung besitzen, was zu einer nachteiligen Messunsicherheit von über 5 % führt. Diesem Handikap nimmt sich die PTB-Erfindung an, indem das Drehmoment in seine Bestandteile Kraft und Länge zerlegt wird. Die Kraftsensoren sind an beiden Seiten in einem bestimmten Abstand auf einem Widerlager befestigt und die Widerlager einer Seite sind über einen Flansch verbunden (s. rechts im Bild). Hierüber kann der Gesamtaufnehmer auch als Transfornormal in einen Teststand aufgenommen werden. Zur Stabilisierung und zum Verringern der Störkomponenten sind beide Flanschseiten zusätzlich mit Verstrebungen verbunden. Der spezielle Aufbau verhindert die Wirkung von Querkräften oder Biegemomenten, wie sie in Gondeltestständen auftreten, und präzisiert so die Messung. Optionale Kraftmessungen an den Verstrebungen und Mehrkomponentenmessungen an den Hauptkraftaufnehmern ermöglichen die Bestimmung weiterer mechanischer Belastungen auf das System.

Wirtschaftliche Bedeutung

Die Verbesserung der Drehmomentmessung führt zur Verbesserung der Effizienzbestimmung (Wirkungsgrad) und besseren Testbedingungen durch eine genauere Regelung, was die Entwicklung von Windkraftgondeln und großen Antriebssträngen vorantreibt. Möglich wäre auch die Installation der Erfindung in Drehmomentmesseinrichtungen für Prüflabore weltweit.

Entwicklungsstand

Die Entwicklung entstand im Rahmen eines europäischen EMPIR-Projektes und ist abgeschlossen. Eine deutsche Patentanmeldung ist anhängig. Bei Interesse bieten wir Ihnen an, in gemeinsamer Zusammenarbeit diese Erfindung zu einem Funktionsmuster weiterzuentwickeln oder direkt zu lizenzieren.



Flansch mit Widerlagern zur Aufnahme von Kraftsensoren. Im Hintergrund ist ein typischer Gondelteststand zu sehen. Hier kann das neue PTB-Kraft-Hebel-System eingebaut werden.

Vorteile:

- Entkoppelter Aufbau verhindert Störung durch Querkräfte oder Biegemomente
- Verbesserte Messunsicherheit von maximal 1 %
- Rückführbare Messkette

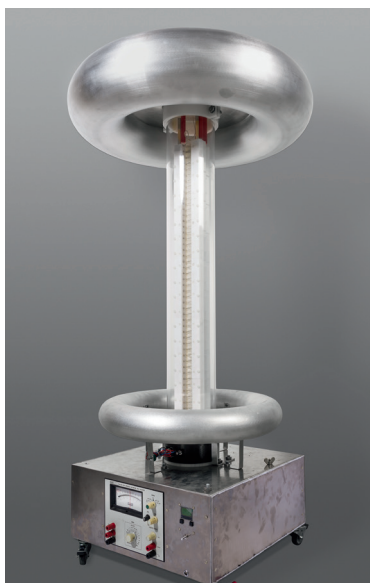
Ansprechpartner:

Andreas Barthel
Innovationsmanager
Telefon: +49 531 592-8307
Telefax: +49 531 592-69-8307
E-Mail: andreas.barthel@ptb.de

Dr. Gisa Foyer
Arbeitsgruppe
Darstellung Drehmoment

www.technologietransfer.ptb.de

PTB-Nummer 0470



Spannungsteiler: Im Plexiglasrohr befinden sich 99 Präzisionswiderstände, die wahlweise in Reihe oder parallel geschaltet werden können

Vorteile:

- Direkte Überprüfung des Teilungsfaktors eines Hochspannungsteilers
- Verringerung des Zeitaufwands: Rückführung innerhalb einer Stunde
- Bessere Messunsicherheit durch kurze Rückführung

Ansprechpartner:

Andreas Barthel
 Technologietransfer
 Telefon: +49 531 592-8307
 Telefax: +49 531 592-69-8307
 E-Mail: technologietransfer@ptb.de

Stephan Passon
 Hochspannungsmesstechnik

Spannungsteiler mit eigener Rückführung spart Zeit

Zur Messung von hohen Spannungen im Bereich von 200 kV müssen Spannungsteiler verwendet werden. Sie teilen große Spannungen in kleinere auf, die erst dann vermessen werden können. Dabei bestimmt der Teilungsfaktor die Signalgröße und muss durch regelmäßiges Kalibrieren an nationalen Normalen präzise bestimmt werden. Forschern der PTB ist es gelungen, einen sich selbst rückführbaren Spannungsteiler zu entwerfen, der flexibel in Prüflaboratorien einsetzbar ist. So wird der operative und zeitliche Aufwand einer Kalibrierung eingespart.

Wie gewöhnliche Spannungsteiler auch besteht der neue Teiler aus einem Hochspannungs- und einem Niederspannungsteil. Das wesentliche Prinzip basiert darauf, dass die normalerweise in Reihe geschalteten Hochspannungswiderstände mit Metallstäben parallel verschaltet werden können. Zusätzlich ist ein weiterer Spannungsteiler mit dem bekannten Maßstabsfaktor von 2:1 zum Abgleich verbaut. Der Teilungsfaktor von $(n^2+1):1$ ist nur von der Anzahl n der Widerstände abhängig und ist somit gut kontrollierbar. Zum Abgleich wird ein Nullvoltmeter genutzt. Für diese präzisen Messungen erzeugt eine Temperatursteuerung konstante Wärme im Plexiglasrohr. Außerdem wird mit zwei Koronaringen, ober- und unterhalb der Widerstandsreihe, ein homogenes elektrisches Feld erreicht.

Wirtschaftliche Bedeutung

Kalibrierlaboratorien und Forschungseinrichtungen können die Überprüfung der Teilungsfaktoren ihrer Normalspannungsteiler vor jeder Messung selbst vornehmen und sparen dadurch Kosten und Aufwand. Transporte zu nationalen Metrologieinstituten fallen durch das neue Verfahren weg.

Entwicklungsstand

Das Verfahren befindet sich im Entwicklungsstand einer Idee. Eine deutsche Patentanmeldung ist anhängig. Bei Interesse bieten wir Ihnen an, in gemeinsamen Projekten diese Erfindung zu einem Funktionsmuster weiterzuentwickeln oder direkt zu lizenzieren.

www.technologietransfer.ptb.de

PTB-Nummer 484

Einbau vermischte Fluide auf kurzer Strecke

Herkömmliche Mischvorgänge aerosoler oder fluider Medien z. B. in der Abgasmesstechnik werden derzeit durch eine seitlich zur Strömungsstrecke eingespeisten Einströmung erreicht. Dabei wird eine homogene Vermischung erst durch lange Wegstrecken im Strömungskanal erreicht. Durch den neuen PTB-Einbau reduziert sich diese Vermischungsstrecke, wodurch Materialkosten und Platz gespart werden. Außerdem wird jetzt eine vollständige Durchmischung zweier Ströme ohne Bildung von Grenzschichten ermöglicht.

In dem zentral angeordneten Strömungskanal wird über mehrere kleinere radial angeordnete Einströmstutzen in unterschiedlichen Winkeln ein Verdünnungsgas zur optimierten Vermischung eingeleitet. Die Vermischung zweier Aerosole beruht auf einer erzwungenen Turbulenz des dezentralen Aerosols. Zunächst vermischt sich das äußere Aerosol, durch die in zentrale Richtung angewinkelten Bohrungen, mit dem Inneren. Durch die nach außen schräg verlaufenden Röhren, prallt die äußere Strömung von der Leitungswand ab und vermischt sich kurz nach dem Einleitungspunkt erneut mit der ersten Mischung. Diese zweifache Durchmischung des Aerosols wird ohne strömungsbrechende Einbauten realisiert.

Durch das Prinzip der sich kreuzenden Röhren werden Totstellen in der Durchmischung vermieden. Die neue PTB Mischvorrichtung kann nicht nur Aerosole, sondern auch Gase und Fluide schnell homogenisieren.

Wirtschaftliche Bedeutung

Das Verfahren ist auf dem Gebiet Aerosol- und Partikelmesstechnik, aber auch in allen weiteren fluidmechanischen Prozessen verwertbar. Außerdem leistet der Einbau einen direkten Beitrag zur Kalibrierung von Partikelzählern, und Prüfstände können dadurch viel platzsparender realisiert werden.

Entwicklungsstand

Das Verfahren wurde ausführlich auf Laborebene getestet. Ein Funktionsmuster ist vorhanden. Eine deutsche Patentanmeldung ist anhängig.



Darstellung der Mischvorrichtung in einem T-Rohrstück (in rot)

Vorteile:

- Vermischung ohne Strömungsbrecher
- Kürzere Wegstrecken
- Vollständige Durchmischung ohne Grenzschichten

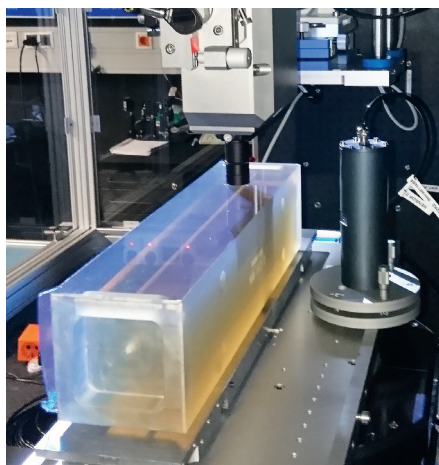
Ansprechpartner:

Andreas Barthel
 Innovationsmanager
 Telefon: +49 531 592-8307
 Telefax: +49 531 592-69-8307
 E-Mail: andreas.barthel@ptb.de

Dipl.-Ing. Johannes Rosahl
 Arbeitsgruppe
 Aerosole und Partikelmesstechnik

www.technologietransfer.ptb.de

PTB-Nummer 0472



Das Scannen der Oberfläche erfolgt bei ruhender Probe mit einem Neigungsmesser bzw. Tiltmeter, welches dabei nicht verschoben wird (s. rechts)

Vorteile:

- Schnelle und hochauflösende Messergebnisse
- Preiswerte Ebenheitsmessung
- Nachteile durch die Erdkrümmung werden vermieden

Effizientere Ebenheitsmessung durch das Tiltmeter-EADS

Derzeit werden Ebenheitsmessungen hauptsächlich mit teuren Autokollimatoren oder Interferometern realisiert. Die PTB-Erfindung „Tiltmeter-EADS“ (Exact Autocollimation Deflectometric Scanning) ermöglicht die Vermessung der Oberflächentopografie großer Flächen ohne solche komplexen optischen Systeme. Der vereinfachte Aufbau der PTB-Technologie verwendet einen Autokollimator lediglich als Nullinstrument, während die eigentliche Messung bzw. die Neigungsbestimmung des Probestisches über ein Tiltmeter ausgeführt wird. Damit greifen die Forscher auf einfachere Komponenten zurück, um schnellere und präzisere Messergebnisse zu erhalten. Der neue Aufbau ermöglicht zudem eine Kostenreduktion gegenüber herkömmlichen Systemen.

Das Tiltmeter wird beim Scannen einer Oberflächentopografie nicht verschoben (s. Bild). Während der Messung wird der Prüfling mit einem Piezoaktor so gekippt, dass das Nullinstrument den Nullwinkel anzeigt. Das Tiltmeter misst dann die Steigung des Prüflings. Durch anschließende Integration dieser Steigungen wird die Prüflingstopografie bestimmt. Bei dieser Anordnung ist der Autokollimator preiswert realisierbar, da er nur als Nullinstrument arbeitet. Das Tiltmeter hat eine hochgenaue Empfindlichkeit bis zu 50 arcsec / Volt und liefert im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren deutlich schneller die erforderlichen Ergebnisse.

Denkbar wäre die Installation weiterer Tiltmeter um leichte Verkippungen und Deformationen der gesamten Messapparatur messen zu können.

Wirtschaftliche Bedeutung

Das Verfahren ist im Bereich der referenzfreien Ebenheitsmessung neu und damit von Interesse bei der Vermessung planer oder nahezu planer Flächen, beispielsweise EUV-Optiken.

Entwicklungsstand

Eine deutsche Patentanmeldung ist anhängig. Bei Interesse bieten wir Ihnen an, in gemeinsamen Projekten diese Erfindung zu einem Funktionsmuster weiterzuentwickeln oder direkt zu lizenzieren.

Ansprechpartner:

Dr. Bernhard Smandek
 Technologietransfer
 Telefon: +49 531 592-8303
 Telefax: +49 531 592-69-8303
 E-Mail: technologietransfer@ptb.de

Dr. Gerd Ehret
 Arbeitsgruppe
 Ebenheitsmetrologie

www.technologietransfer.ptb.de

PTB-Nummer 0438

3D-AFM: Verbesserte 3D-Empfindlichkeit

Die heutige Rasterkraftmikroskopie beziehungsweise *atomic force microscopy*, kurz AFM, steht vor der Herausforderung dreidimensionale Strukturen zuverlässig zu messen. Bisher funktioniert das nicht ganz fehlerfrei: handelsübliche Kantilever, das ist die Messnadel eines AFM, reagieren unausgeglichen, wenn sie Kräften der drei Raumdimensionen ausgesetzt sind. Forscher der PTB lösen dieses Problem mit neuen Kantilevern: Diese reagieren dank ihrer neuen Struktur sensitiver bei dreidimensionalen Einflüssen und rutschen nicht beim Rastern von Schrägen unterschiedlicher Steigungen.

Die Rasterkraftmikroskopie ermöglicht uns, die Welt der Atome, DNA-Stränge & Viren sichtbar zu machen. Mit zunehmendem Innovationsdruck besteht heute der Wunsch, immer kleiner werdende Strukturen und Bauelemente sehr präzise zu erfassen. Beispielsweise in der Halbleiterindustrie müssen die Fertigungsprozesse von neuartigen dreidimensional komplexen Chipstrukturen kontrolliert werden können. Dabei verwendete Kantilever zeigen eine Anisotropie bezüglich ihrer Steifigkeit, was zu unkontrollierbarem Rutschen auf dem angetasteten Objekt führen kann. Weiterhin zeigen derzeitige Kantilever für dünne Spitzen durch die Kombination einer biegeweichen Spitze und eines torsionssteifen Kantilevers eine geringe Empfindlichkeit.

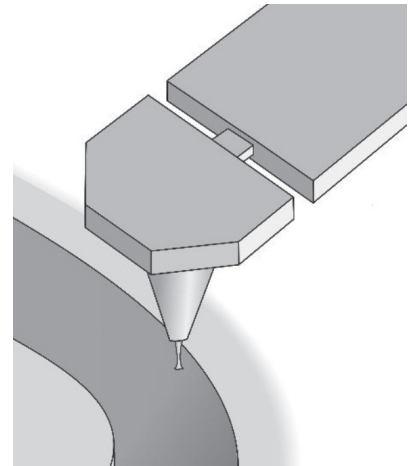
Um 3D-Strukturen genau und zerstörungsfrei zu vermessen, braucht es dreidimensionale AFM. Der hierfür entwickelte Kantilever der PTB wurde durch Festkörpergelenke erweitert. Dabei stehen unterschiedliche Ausprägungen zur Verfügung. Eine davon ist im Bild zu sehen. Diese Bereiche erlauben eine ausgewogene Torsion oder Biegung mit verbesserter Sensitivität. Fährt die Spitze bei der Messung über eine Stufe, oder eine Schräge, gibt der neu entwickelte Schaft nach und die Kontur des Objektes kann richtig vom Messgerät interpretiert werden. Dieses neue Design kann mit geringem Entwicklungsaufwand künftig in handelsübliche Geräte installiert werden.

Wirtschaftliche Bedeutung

Der neue Kantilever kann zur allgemeinen zerstörungsfreien Prüfung von komplexen Nanostrukturen, Lithographiemasken, Oberflächenporositäten oder biologischen Proben verwendet werden.

Entwicklungsstand

Das Prinzip eines Kantilevers mit Festkörpergelenken wurde realisiert. Eine deutsche Patentanmeldung ist anhängig. Bei Interesse bieten wir Ihnen an, in gemeinsamen Projekten diese Erfindung zu einem Funktionsmuster weiterzuentwickeln oder direkt zu lizenzieren.



Ein modifizierter Kantilever mit Aussparungen im Schaft. Das ist eines der neuen Designs, die für ein ausgeglichenes Verhältnis der Steifigkeiten sorgen.

Vorteile:

- Größere Empfindlichkeit bei gleichzeitig annähernd isotroper Steifigkeit
- Echte 3D-Antastung durch Festkörpergelenke
- Integrierbar in bestehende Rasterkraftmikroskope

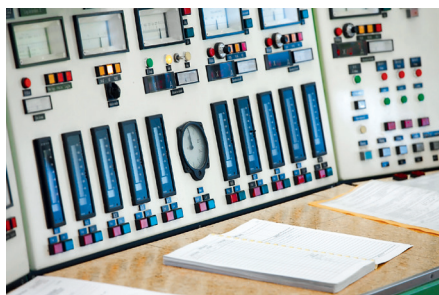
Ansprechpartner:

Andreas Barthel
 Innovationsmanager
 Telefon: +49 531 592-8307
 Telefax: +49 531 592-69-8307
 E-Mail: andreas.barthel@ptb.de

Dr. Gaoliang Dai
 AFM
 Strukturweiten-Metrologie

www.technologietransfer.ptb.de

PTB-Nummer 0476



Mit dem PTB-Set kann die Umrüstung der Potentiometer alter Schaltwarten auf digitalen Betrieb mühelos erreicht werden

Vorteile:

- Umrüstung von analogen Drehpotentiometern auf digitale Ansteuerung
- Alle Schaltwarten geeignet
- Direkt über USB-Schnittstelle oder an SPS anzuschließen

Ansprechpartner:

Dr. Bernhard Smandek
 Technologietransfer
 Telefon: +49 531 592-8303
 Telefax: +49 531 592-69-8303
 E-Mail: technologietransfer@ptb.de

Dipl.-Ing. Silvin Khurana
 Arbeitsgruppe Ionenbeschleuniger

www.technologietransfer.ptb.de

PTB-Nummer 0392

Interface für inkrementale Drehgeber

In Kraftwerkswarten, Anlagensteuerungen und vielen Kontrollräumen finden sich noch tausende von analogen Drehregelungen. Um hier eine digitale Umrüstung zu ermöglichen, dabei aber die Vorteile eines feinfühligem Drehpotentiometers zu erhalten, hat die PTB ein Umrüst-Set entwickelt, das mit vielen digitalen Ansteuerungen kompatibel ist.

Zunehmend werden an verschiedensten Leistungsnetzteilen oder Beschaltungen analoge durch digitale Eingänge ersetzt. Die Steuerung über PC und Maus oder Touchpad wird vielen Anforderungen jedoch nicht gerecht. Gerade bei komplexen Anlagen ist oft eine Feinabstimmung mehrerer Parameter gefordert, für die Drehknöpfe die geeignetste Mensch-Maschine-Schnittstelle darstellen.

Für die digitale Umrüstung ihrer Beschleunigeranlagen hat die PTB deshalb ein Umrüst-Set entwickelt, das sich via USB-Eingang mit einem PC oder direkt über die industrietübliche SPS-Steuerung verbinden lässt.

Anwendung

Die Bedienung mittels dieses digitalen Drehgebers ist deutlich ergonomischer als über einen handelsüblichen Bildschirm und insbesondere dann besser, wenn kontinuierlich sehr kleine Parameter nachgeregelt werden müssen.

Wirtschaftliche Bedeutung

Software, Stücklisten und Unterlagen zum Gesamtkonzept stehen für einen Technologietransfer zur Verfügung. Die IC-Komponenten sind so ausgewählt, dass auch kleinere Stückzahlen beschafft werden können, sodass die Markteintrittsschwelle gering gehalten ist.

Entwicklungsstand

Das System wird systematisch zur Umrüstung von PTB-eigenen Beschleunigerwarten in zweistelliger Stückzahl eingesetzt. Es hat sich im laufenden Beschleunigerbetrieb in vielen hundert Einsatzstunden bewährt. Lizenzen für die Nutzung der neuen Technologie sind verfügbar.

Kalte Kabel für „trockene“ Kryostate

In modernen Tieftemperatursystemen werden zunehmend „trockene“ Kryostate verwendet, die im Vakuum, allein durch direkten thermischen Kontakt, kühlen. Kabel und elektrische Leitungen können dabei den Kühlprozess behindern, wenn sie nicht an geeigneten Stellen von der Raumtemperatur auf die Betriebstemperatur abgekühlt werden. PTB-Forscher entwickelten deshalb zwei neue Konstruktionen zur thermischen Kontaktierung von Rund- und Flachbandkabeln. Wärmeflüsse, die über die Zuleitungen zu einem Sensor gelangen, können mit der neuen Technologie minimiert werden. Das ist besonders hilfreich bei einer Temperatur unter 4 Kelvin.

Bei sehr großen Wärmeeinträgen durch Leitungen kann im Zweifel die Betriebstemperatur angehoben werden. Dies soll die einfache Idee der PTB-Forscher verhindern: durch große Kontaktflächen und hohen, aber für die Kabelisolation unkritischen Anpressdruck wird eine gute thermische Kontaktierung erreicht. So kann der Wärmefluss abgeleitet werden, bevor er einen Sensor erreicht. Möglich machen das zwei unterschiedliche Verfahren zur Kabelklemmung. Die Klemmung für Flachbandkabel besteht aus zwei identischen Andruckplatten, die durch Verschiebung in ihrer Kanalhöhe angepasst werden können (s. Bild 1). Rundkabel werden in ein Führungsprofil eingelassen und durch ein darüber liegendes Federelement eingespannt (s. Bild 2). Beide Systeme entleeren sich jeglicher Zwischenräume und garantieren dadurch eine geringe thermische Impedanz. Sie sind kompakt gebaut und können sicher im Vakuum betrieben werden. Außerdem sind Sie leicht über Schrauben zu lösen und können mehrfach wiederverwendet werden.

Wirtschaftliche Bedeutung

Die beiden Verfahren verbessern und vereinfachen die thermische Ankopplung von Kabeln im Vakuum und werden insbesondere in „trockenen“ Kryostaten benötigt. Die Bedeutung dieser Kryostaten, die einen Temperaturbereich von einigen Kelvin bis zu wenigen Millikelvin abdecken, wird in Zukunft weiter steigen, da sie nicht nur herkömmliche Systeme mit flüssigem Helium ersetzen, sondern auch neue Anwendungsgebiete erschließen werden.

Entwicklungsstand

Beide Verfahren befinden sich auf dem Entwicklungsstand eines fertigen Funktionsmusters. Eine deutsche Patentanmeldung ist anhängig. Bei Interesse bieten wir Ihnen an, in gemeinsamen Projekten diese Erfindung weiterzuentwickeln oder direkt zu lizenzieren.

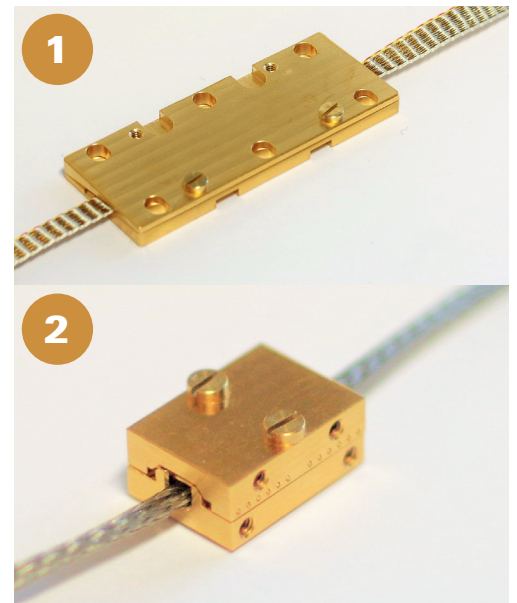


Bild 1: Die Klemmvorrichtung für Flachbandkabel wird durch Schraubverbindungen aufeinandergepresst und ist auch stapelbar.
Bild 2: Rundkabel werden im Inneren der Kabelklemmung durch mehrere Federelemente fixiert.

Vorteile:

- Geringe thermische Impedanz für variierende Kabelgrößen
- Leicht integrierbar in bestehende Kryostate
- Einfach lösbare Verbindungen

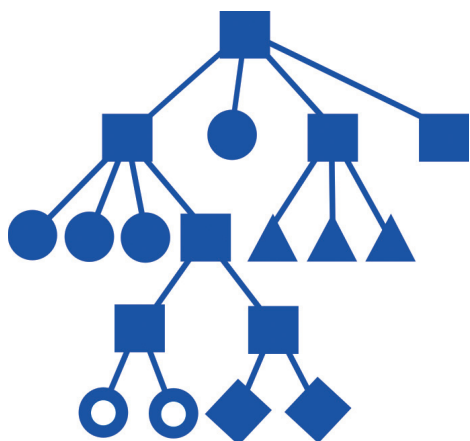
Ansprechpartner:

Dr. Bernhard Smandek
Technologietransfer
Telefon: +49 531 592-8303
Telefax: +49 531 592-69-8303
E-Mail: andreas.barthel@ptb.de

Dr. Alexander Kirste
Kryotechnik
und Temperaturmessung

www.technologietransfer.ptb.de

PTB-Nummer 0473 / 0483



Prinzip der Kodierstruktur von FLOUDS, die eine Erweiterung auf beliebige Arten von Objekten ermöglicht und platzsparender im Vergleich zu pointerbasierten Verzweigungs-bäumen ist. Die Symbole stellen reale oder virtuelle Geräte dar.

Vorteile:

- Sicherheit vor Manipulationen intelligenter Schadsoftware
- Platzsparende Integritätsprüfung
- Cloudbasierte Übertragung der Prüfergebnisse abgesichert

Ansprechpartner:

Dr. Bernhard Smandek
 Technologietransfer
 Telefon: +49 531 592-8303
 Telefax: +49 531 592-69-8303
 E-Mail: technologietransfer@ptb.de

Dr. Daniel Peters
 Arbeitsgruppe
 Eingebettete
 metrologische Systeme

www.technologietransfer.ptb.de

PTB-Nummer 0424

Mehr Sicherheit für Messgeräte durch Hash-basierte Prüfung

Nach dem neuen Mess- und Eichgesetz muss die Software in einem Messgerät regelmäßig auf Datenintegrität überprüft werden. PTB-Forscher entwickelten für diese Überprüfung ein sicheres Verfahren. Genutzt wird dabei anstatt der herkömmlichen Checksummen-Berechnung eine robustere Hash-Überprüfung mittels Separationskernen. Das garantiert mehr Sicherheit gegen Manipulationen durch intelligente Schadsoftware und spart Platz für das Speichern der Dateisystemstruktur. Für die geplante Überprüfung von Messgeräten über riskante, offene Netzwerke, z. B. über Cloud-Systeme, gewährleistet das neue PTB-Verfahren eine ausreichende Daten-Sicherheit. Umständliche Vorort-Prüfungen könnten somit völlig entfallen.

Intelligente Schadsoftware kann sich während herkömmlicher Dateiintegritätsprüfungen verstecken und vorgenommene Änderungen an z. B. Messdaten verbergen. Vor allem bei Messgeräten, die im gesetzlichen Messwesen behandelt werden, ist die Sicherheit der Daten zu gewährleisten. Voraussetzung für die neue PTB-Prüfung ist die Installation eines sicheren Mikrokerns (oft auch Separationskern genannt) innerhalb des Messgerätes. Dieser kann über virtuelle Maschinen jede ausgelagerte Datei aus realen oder virtuellen Geräten kryptografisch sichern und verhindert damit ungewollte Manipulationen. Da die Speicherkapazität von eingebetteten Systemen wie Messgeräten oft begrenzt ist, werden Datenreduktionsalgorithmen, wie das von der PTB entwickelte FLOUDS (*Filesystem Level Order Unary Degree Sequence*), angewendet (s. Bild).

Wirtschaftliche Bedeutung

Potenziell können alle Messgeräte, bei denen gesetzliche Anforderungen zur sicheren Auswertung und Archivierung der Messdaten erforderlich sind, mit dem neuen Prüfverfahren ausgestattet werden. So können z. B. Vorort-Prüfungen durch komfortablere Server-Cloud-Lösungen ersetzt werden.

Entwicklungsstand

Das Verfahren wurde ausführlich getestet. Das deutsche Patent ist unter der Nummer DE 10 2016 110 479 A1 offengelegt. Bei Interesse bieten wir Ihnen an, dieses Verfahren in gemeinsamen Projekten weiterzuentwickeln oder direkt zu lizenzieren.

Impressum

Die PTB-Mitteilungen sind metrologisches Fachjournal der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. Als Fachjournal veröffentlichen die PTB-Mitteilungen wissenschaftliche Fachaufsätze zu metrologischen Themen aus den Arbeitsgebieten der PTB. Die PTB-Mitteilungen stehen in einer langen Tradition, die bis zu den Anfängen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (gegründet 1887) zurückreicht.

Herausgeber

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)

ISNI: 0000 0001 2186 1887

Postanschrift:

Postfach 33 45,
38023 Braunschweig

Lieferanschrift:

Bundesallee 100,
38116 Braunschweig

Redaktion/Layout

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, PTB

Sabine Siems

Dr. Dr. Jens Simon (verantwortlich)

Telefon: (05 31) 592-82 02

Telefax: (05 31) 592-30 08

E-Mail: sabine.siems@ptb.de

Erscheinungsweise und Copyright

Die PTB-Mitteilungen erscheinen viermal jährlich. Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieser Zeitschrift darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages vervielfältigt oder verbreitet werden. Unter dieses Verbot fällt insbesondere die gewerbliche Vervielfältigung per Kopie, die Aufnahme in elektronische Datenbanken und die Vervielfältigung auf CD-ROM und in allen anderen elektronischen Datenträgern.

Printed in Germany ISSN 0030-834X

Die fachlichen Aufsätze aus dieser Ausgabe der PTB-Mitteilungen sind auch online verfügbar unter:
doi: 10.7795/310.20180299



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, das nationale Metrologieinstitut, ist eine wissenschaftlich-technische Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, das nationale Metrologieinstitut, ist eine wissenschaftlich-technische Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.



Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin
Nationales Metrologieinstitut

Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

Telefon: 0531 592-3006
Fax: 0531 592-3008
E-Mail: presse@ptb.de
www.ptb.de