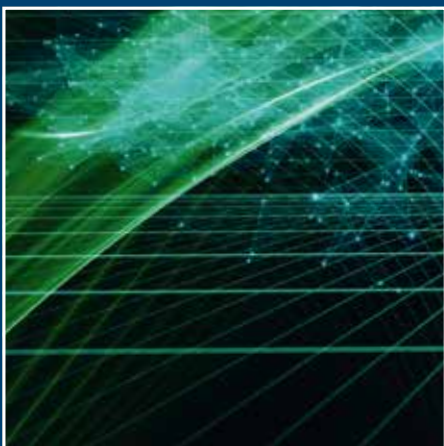


Metrologische IT

Teil II





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

127. Jahrgang, Heft 1, März 2017

**Metrologische IT
Teil II**

Inhalt

Metrologische IT, Teil II

- Recent Software Developments – The view of the weighing industry 03
Ian Turner
- CECOD vision of “new Big Data World” with metrology constraints 07
Philippe Cloutier, Josef Meurer
- Software-Aktualisierung im Rahmen der Novellierung des gesetzlichen Messwesens 09
Florian Thiel, Marco Elfroth
- Softwarekonfigurationsmanagement – Grundregeln für das gesetzliche Messwesen 19
Norbert Greif
- Ermittlung von Gasbeschaffenheitskenngrößen für Erdgas im geschäftlichen Verkehr
mittels Gasnetz-Zustandsrekonstruktion 23
Stefan M. Sarge
- Entwicklungen in der Fertigungsmesstechnik für die Industrie 4.0 33
*Karin Kniel, Matthias Franke, Klaus Wendt, Frank Härtig, Daniel Hagedorn, Stephan Metschke,
Frank Schmaljohann, Frank Löffler, Uwe Brand, Ludger Koenders, Dorothee Hüser, Harald Bosse*
- Validierung von Softwareprodukten für die Berechnung von Messunsicherheiten 43
Norbert Greif, Heike Schrepf
- Sicherheitsaspekte bei Geldspielgeräten: Auswirkungen der neuen SpielV auf den Zulassungsprozess 61
Gervin Thomas, Kerstin Thiele, Reiner Kuschfeldt

Recent Software Developments – The view of the weighing industry

Ian Turner*

1. Introduction

Daily life for both citizens and businesses is at a point of transition in the early part of the 21st Century. We have all become used to the great changes brought by the Internet, but now this is developing to new levels with the influence of cloud technologies and the “internet of things” and the increasing focus on “big data” It appears to be almost a daily occurrence that new technologies and products are brought onto the market that will affect us all in yet undiscovered ways.

Weighing and measuring technologies are just one aspect of these developments, perhaps most obviously being seen in the development of smart utility meters, but affect all type of weighing and measuring equipment. This essay expounds the view of CECIP, the European Association of Manufacturers and Suppliers of weighing instruments. It looks to consider these potential changes in technology and how they could be addressed in the context of European Legal metrology.

2. The economic driver and the effect of software developments

One of the most important notions to understand is that the developing technologies such as the cloud and the growth of big data are facilitating the rapid changes that we see in the weighing instrument market. They are not necessarily driving the changes. This is being done by the increasingly globalised market place, ever-increasing drive for efficiency and rapidly developing consumer demand; products are being loaded on to ships in India and the transaction take place in the Netherlands, automatic weighing instruments in Indonesia are monitored and controlled from the UK.

The significance of this is that the changes and developments are likely to continue independently of any legal metrology frameworks. External forces are driving them. The frameworks we develop must recognise this and must not seek to halt or prevent the changes instead they must regulate the development for the benefit of all stakeholders.

Historically trade took place in the local environment with simple equipment, people would buy and sell at the local market place and later on in local shops and stores. The effect of this that the legislative requirements that regulated this trade reflected not only the technology but also the economic and political environment in which it operated. The earliest known uniform systems of weights and measures have been created at some time in the 4th and 3rd millennia BC in Egypt, Mesopotamia and the Indus Valley [1].

As the geographical spread of trade increased from local to regional and eventually national levels the pressure to have more consistent legal requirements became more and more urgent. The Magna Carta in Britain (1216) stipulated that “there shall be one unit of measure throughout the realm”. The French Revolution recognized the need for a national weights and measures system [2] and it was also about the same time that Thomas Jefferson presented a “Plan for Establishing Uniformity in the Coinage, Weights, and Measures of the United States” [3].

The next major challenge in the development of legal metrology has been caused by the development of international trade; it has become increasingly important that there is not just consistent measure across but also between nations states. This has perhaps reached the greatest challenge with the European Single market in which 28 separate nations are trying to harmonize their requirements in a whole range of areas, not just legal metrology.

* Ian Turner (BA)
(Hons.) DTS. MTSI,
Vice President Legal
Metrology Group,
E-Mail: technical2@
ukwf.org.uk

One of the effects of the increasing international trade and the advancing software technologies is the development of new type of weighing and instruments that have different elements in different geographical locations as demanded by the customer and the market place. Instruments that use the cloud for data storage and running applications and others that make use of smart phones for weighing indicators are just some of the products that are available today.

The challenge that all stakeholders in the market place now face is how to regulate these new software environments. The legislation for weighing instruments has historically been based on the notion of a single item, a shop scale or a weigh-bridge for example, that was in one location and could be easily regulated. Future regulation must be based around that fact that different elements of a weighing instrument can easily be based in different member states and outside the EU. Future legal frameworks must reconcile this, the rapidly changing technology and the powerful economic drivers that combine to create this challenge.

3. The present legal framework

The present legal system for non-automatic weighing instruments is the Directive 2014/31 [4] and for automatic weighing instruments 2014/32 [5]. These offer some limited and general regulatory requirements for software.

The essential requirements relating to software for the purposes of the Directive 2014/32 are:

7.6 *When a measuring instrument has associated software, which provides other functions besides the measuring function, the software that is critical for the metrological characteristics shall be identifiable and shall not be inadmissibly influenced by the associated software.*

8.1 *The metrological characteristics of a measuring instrument shall not be influenced in any inadmissible way by the connection to it of another device, by any feature of the connected device itself or by any remote device that communicates with the measuring instrument.*

8.3 *Software that is critical for metrological characteristics shall be identified as such and shall be secured. The measuring instrument shall easily provide software identification. Evidence of an intervention shall be available for a reasonable period of time.*

8.4 *Measurement data, software that is critical for measurement characteristics and metrologically important parameters stored or transmitted shall be adequately protected against accidental or intentional corruption*

10.1 *Indication of the result shall be by means of a display or hard copy.*

The essential requirements relating to software for the purposes of the Directive 2014/31 are:

8.3 *Digital electronic devices shall always exercise adequate control of the correct operation of the measuring process, of the indicating device, and of all data storage and data transfer.*

8.4 *When external equipment is connected to an electronic instrument through an appropriate interface the metrological qualities of the instrument shall not be adversely influenced.*

8.5 *The instruments shall have no characteristics likely to facilitate fraudulent use, whereas possibilities for unintentional misuse shall be minimal. Components that may not be dismantled or adjusted by the user shall be secured against such actions.*

These gaps have been filled in by some of the relevant guides produced by WELMEC. The Guide 2.3 (3) [6] relates to the examination of software for non-automatic weighing instruments and the Guide 7.2 (6) [7] applies to software used in those instruments covered by the Directive 2014/32

The present legal requirements and guides have their roots in previous technologies when the majority of software on weighing instruments would have been embedded. These regulations do not easily manage instruments when different elements may be in disparate locations and the onerous legal difficulties that arise when the different elements of an instrument may not all be in one country.

4. Risk assessment and the role of WELMEC WG7

What we must consider is how can this matter be addressed for the future. CECIP have been actively involved in all of the work of WELMEC WG7 on software and the present project that is being undertaken at on risk assessment. This proposal is based on the concepts of ISO 27005 [8] and ISO 15408 [9]. These standards define risk as a “combination of the consequences that would follow from the occurrence of an unwanted event and the likelihood of the occurrence of the event”. The standard also creates the risk evaluation criteria as “legal and regulatory requirements, and contractual obligations”.

4.1 The defining of assets

The risk assessment process behind the standard can be divided into three separate stages. The first is to identify the assets and security properties of the software. The assets are those tangible elements of the software that will ensure the essential requirements of the Directive are met.

If we look for example at the essential requirement 7.6 of the Directive 2014/32.

When a measuring instrument has associated software, which provides other functions besides the measuring function, the software that is critical for the metrological characteristics shall be identifiable and shall not be inadmissibly influenced by the associated software.

The assets would be such things as the identification of the legally relevant software and the inadmissibility of that software to be influenced by other software. Associated with the assets would be the security properties that would enable the asset to be realised. In the example above these would be the availability and integrity of the software identifier and the prevention of the ability to influence legally relevant software.

4.2 *The defining of attack vectors*

Once the assets have been defined, the next part of the process is to define those things that could be threats to the assets and the consequences of such threats. These are what are referred to as attack vectors, in one example considered this would be an attacker retrieving the administration pass word by trying all of the 6 digit combinations, or the attacker retrieving the administration password and replacing all of the legally relevant software.

4.3 *Vulnerability analysis*

The third stage is to affect a “vulnerability analysis” once the attack vectors have been defined. This would be estimated in relation to each attack vector. In the project being by considered by WG7 there are five categories to which points can be assigned to each attack vector.

- Elapsed time in which the attack could take place (1–19points)
- Expertise (0–8 points)
- Knowledge of the Target of Evaluation (0–11 points)
- Window of Opportunity (0–10 points)
- Equipment (0–9points)

When the attack probabilities are then added for each attack vector a total value as to the probability of the software of the instrument being attacked can be calculated.

5. **The view of CECIP**

5.1 *Advantages*

It is the view of CECIP that this system has many advantages to all stakeholders involved in the production and analysis of software for legal metrology.

It would be a reproducible and transparent evaluation scheme that would tend to be independent of the actual evaluator. This is very important for manufacturers of weighing software, as it would begin the process of creating a consistency between different notified bodies. There would move towards producing the same risk evaluation for the same piece of software regardless of which notified body was use.

It is likely that a manufacturer would only need to define common attack vectors for a particular instrument once only. This would be advantageous in producing an effective and efficient system for gaining appropriate approvals across Europe and bring benefits not only to manufacturers and notified bodies, but also the market surveillance authorities and ultimately consumers.

5.1 *Concerns*

Whilst being supportive of the development of the risk assessment being developed by WG7 and enthusiastic about reaching a successful conclusion CECIP has one major concern regarding potential evaluations. The vulnerability analysis must include some element of attacker motivation. The present analysis appears sufficiently sophisticated to analyse an appropriate risk once an attacker has decided to attack the instrument but does not attempt to analyse the likelihood of the instrument being attacked in the first place.

There would be concern the attack vectors are based on theoretical analysis only and the risk analysis must consider actual attacks that have occurred in the market place. This would give a much clearer view of attacker motivation.

Under certain circumstances it could be acceptable to consider risks that have not been revealed in the market place and would therefore be consider as theoretical. The analysis of such risks must not be based on technical possibility alone but must consider the potential advantages to an attacker, financial or otherwise. This will enable a more accurate risk of attacker motivation to be defined and much more sophisticated analysis of risk to be achieved for different types of instruments. The output of the analysis must be sufficiently subtle to distinguish between the motivation to attack, for example electricity meter and the motivation to attack a weighbridge. The motivations to attack these instruments are not the same.

If these matters can be resolved it is likely that an agreed, consistent and transparent risk assessment can take be developed which would enable manufacturers, notified bodies and market surveillance authorities to work together much more consistently not only for their own benefit but also for the benefit of consumers in the European Market.

6. Conclusion

The increasing globalization of world trade will lead to an inevitable increase in the use of software technologies to increase the efficiency of transactions and meet consumer demands.

The present legal framework is based on previous technologies and is not compatible with the technologies demanded by the present market place.

Risk assessment is seen by CECIP as a practical and sensible way to introduce consistency and transparency into the approval of software used in weighing and measuring instruments.

The present project being undertaken by WELMEC WG7 may offer a potential solution for the risk assessment of the software used in weighing and measuring instruments.

The risk assessment process must consider the risk of an attack-taking place if it is to be accepted by CECIP

References

- [1] Baber, Zaheer: *The science of empire: scientific knowledge, civilization, and colonial rule in India*, Albany, NY, State University of New York, 23, ISBN 0-7914-2919-9, 1996
- [2] *La loi du 18 Germinal an 3 (The law of 18 Germanial year 3)*. Le CIV (Centre d'Instruction de Vilgénis) - Forum des Anciens. <http://aviatechno.net/unites/nouveausys.php> (retrieved: 2017-02-20)
- [3] Andro Linklater: *Measuring America: How the United States Was Shaped by the Greatest Land Sale in History*, Plume, 103–142, ISBN 978-0-452-28459-3, 2003, (retrieved 2012-05-14)
- [4] <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0031&from=DE> (retrieved: 2017-02-20)
- [5] <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0032&from=DE> (retrieved: 2017-02-20)
- [6] <http://www.welmec.org/2/latest/guides/23/> (retrieved: 2017-02-20)
- [7] <http://www.welmec.org/2/latest/guides/72/> (retrieved: 2017-02-20)
- [8] http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=56742 (retrieved: 2017-02-20)
- [9] http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=50341 (retrieved: 2017-02-20)

CECOD vision of new Big “Data World” with metrology constraints

Philippe Cloutier*, Josef Meurer**

While everyone has dozens of computers, laptops, pads and smartphones, with probably ten times more running applications and applets, no one really realizes that all these very helpful tools constantly secure their work by uploading and downloading secured data, and updating new software revisions to correct bugs or improve service and provide more options to owner.

In the petrol station world and in the MID world, these very helpful background tasks are needed, but need to comply with all safety and fair trading rules. More, some actions, even if deemed acceptable/approvable when equipment is designed and submitted to a NOBO (Notified Body), might reveal their hidden administrative flaws versus national legislation.

There is a need in our industry to extend the software guide 7.2 for new technologies and to simplify the work of the market surveillance authorities in the field of legal metrology. CECOD supports the WELMEC working groups to harmonize and coordinate software-related metrology services in Europe and the implementation of conformity assessment capabilities and verification procedures in regulated market sector.

Two examples are quite easy to understand:

Subject 1: CLOUD – the most versatile and flexible tool available on market, to secure everything. Two general examples from the Petrol station business are legal data or even legal software in the cloud.

While WELMEC WG7 is defining specific approaches if Cloud contains “legally relevant” recorded data, country specific legislation might put a brutal stop to the improvement. MID Annex I clause 7.6 will be the trouble.

As some country will try to roll out their obligation with 2008/765/EC, and others will try to setup rules for Subsequent verification of such legal functions, questions will be:

- How can enforcer verify the hardware in use versus certificates if hardware is not on site of use on instruments?
- How can enforcer verify that seals and software running on such platform are in conformity with certificates?
- Is split ownership (server on Cloud not owned by same owner as instrument it belongs to) allowed? What process for claims and liability?

EU harmonization on above three question will for sure become crucial in the coming months. Cloud for instruments will enter the “new big data world” or will fail modernization.

Subject 2: SOFTWARE DOWNLOADING – the most versatile and flexible tool available on market, adapt and adjust every day.

While WELMEC WG7 has already worked on this concept, reality of “in service” life is biting back. Software downloading is never for new instruments. If instrument is new, it is placed on market with the CE marking and the EU DoC as per 2008/768/EC, and manufacturer is loading latest software in his factory. If any software change BEFORE equipment is duly placed on market, it is part of the CE marking and EU DoC (manufacturer’s choice).

Trouble really starts when instrument is already on market. Software downloading is then bound to national legislation, and there is virtually 28

* Philippe Cloutier, CECOD technical committee chairman and leader of SG1 workgroup (MID), E-Mail: philippe.cloutier@tokheimglobal.com

** Josef Meurer, CECOD leader of SG8 workgroup for protocols and software, E-Mail: meurer.josef@scheidt-bachmann.de

different intellectual approaches for this (as we are 28 EU countries).

Approach 1: modification by downloading not allowed. Software update only allowed with a physical support (such as a PROM or a CDROM).

- This approach might seem outdated, but allows national authorities to seize the physical support for future inspections or verifications.
- The treatment of the software change is then bound to national legislation. Is it a repair or a modification? What level of check after such? Who is allowed to execute such change? Who is allowed to re-seal?

Approach 2: modification by downloading is allowed but only if “executor” on site. Software update only allowed with the physical presence of the person triggering such change. Will need to break a seal, tilt a switch, execute change, re-tilt the switch and re-seal.

- This approach might seem restrictive, but allows national authorities to verify execution, and audit operators on site. It is also only possible if owner of site gives access to the person in charge of such action.
- The treatment of the software change is then bound to national legislation. Is it a repair or a modification? What level of check after such? Who is allowed to execute such change? Who is allowed to re-seal?

Approach 3: modification by automatic downloading is allowed. Software update is either triggered by the instrument itself (detecting the availability of such on a secured server, downloading it and upgrading on its own between two transactions)

- This approach is very versatile, but does not allow national authorities to verify execution. Audit of operators is difficult (remove, maybe in a different country). It is also not requiring presence of owner on site (no physical presence).
- The treatment of the software change is then bound to national legislation. Is it a repair or a modification? What level of check after such? Who is allowed to execute such change? Who is allowed to re-seal?

In all cases, the very first step is to get EU harmonization and accepted a jump between two approved versions of software in same certificate to be considered as a repair (with no need for immediately verification, only by the next scheduled verification). This might require a lot of work at WELMEC level, but a safeguard could be to impose checksum (signature / encryption) to all software (and not only version/revision) identification.

Conclusion: For both subjects, CECOD is willing to contribute with WELMEC and find acceptable solutions, so the Petrol Dispenser and Measuring Instruments will confirm they are entering the modern world. For such, CECOD supports PTB in their modern approach on these subjects.

Software-Aktualisierung im Rahmen der Novellierung des gesetzlichen Messwesens

Florian Thiel*, Marco Elfroth**

1. Einleitung

Marktteilnehmer müssen sich auf die Richtigkeit von Messergebnissen verlassen können, ohne sie selbst überprüfen zu können. Erst durch einen breiten, gesetzlich gestützten Konsens über „richtiges Messen“ in der Gesellschaft können auf Messungen beruhende Geschäftsvorgänge – nicht zuletzt auch im internationalen Warenverkehr – problemlos abgewickelt werden. Deshalb sind gesetzliche Regelungen im Messwesen auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene wirtschaftspolitisch notwendig. Entsprechende Organisationen bemühen sich auf den verschiedenen Ebenen um die Harmonisierung des Vorgehens. International ist die OIML und auf europäischer Ebene die WELMEC dahingehend aktiv.

Das gesetzliche Messwesen trägt maßgeblich zum Funktionieren der deutschen Wirtschaft bei. Der Gebrauch von Messergebnissen gehört ganz selbstverständlich zu unserem Alltag. Mit dem neuen Mess- und Eichgesetz (MessEG) wurde eine langjährige Diskussion zur Neugestaltung des gesetzlichen Messwesens in Deutschland zum erfolgreichen Abschluss gebracht. Damit wurde für alle Beteiligten Planungssicherheit durch einen klaren Rechtsrahmen geschaffen. Das hohe Schutzniveau des Messwesens in Deutschland wird mit dem Gesetz fortgeschrieben und ein ausgewogenes System geschaffen, das sinnvolle Vereinfachungen und Liberalisierungen mit effektiven Regelungen der Überwachung kombiniert. Das neue MessEG trat am 1. Januar 2015 in Kraft [1].

Im Rahmen der Novellierung des gesetzlichen Messwesens wurde auch technologischen Entwicklungen Rechnung getragen. So haben die sogenannten intelligenten Messsysteme [2] unter anderem als Innovationstreiber fungiert. Intelligente Messsysteme sind eine Teilmenge der unter

den Begriff *Smart Meter* fallenden Messgeräte, die sich durch zusätzliche, über die Messfunktion hinausgehende Eigenschaften auszeichnen. Sie sind u. a. Wegbereiter für ans Internet angebundene Messgeräte. Messgeräte, die über offene Netze, wie das Internet, kommunizieren, unterliegen im Rahmen ihrer Funktionalität vergleichbaren Bedrohungen wie andere netzgebundene IT-Systeme und sind auf entsprechend angemessenem Niveau zu schützen [3]. Auch die Herausforderung der Aktualisierung der Software auf Messgeräten – direkt oder über offene Netze – war in diesem Zusammenhang zu klären. Im bisherigen Eichrecht war diese Möglichkeit schlicht ausgeschlossen und konnte nur durch einen Siegelbruch vollzogen werden, was folglich eine kostenpflichtige Nacheichung einschloss. Für Insellösungen und Feldversuche wurden Ausnahmen geschaffen, was jedoch die Einbindung einer zentralen, übergeordneten Instanz forderte, die zur Garantie der Authentizität und Integrität der Software entsprechende Signaturen vergab (z. B. bei taktischen Lastgangzählern, sogenannten SyM²-Zählern¹).

In dieser Arbeit sollen das Verfahren der Software-Aktualisierung für Messgeräte die dem neuen Mess- und Eichgesetz unterliegen in seinen zwei Spielarten als Standardverfahren und Eilverfahren dargestellt und die notwendigen Prozeduren erläutert werden.

2. Grundsätzliches zum neuen Mess- und Eichgesetz (MessEG)

Das MessEG erfasst Messgeräte nur, wenn sie für bestimmte Zwecke eingesetzt werden sollen. Dies ist nun in der gesetzlichen Definition des Begriffs des „Messgeräts“ klargestellt. Danach gehört zum gesetzlichen Begriff neben einer Messfunktion eben auch, dass das Gerät „zur Verwendung im

* Dr. habil. Florian Thiel, Fachbereich 8.5 „Metrologische Informationstechnik“, E-Mail: florian.thiel@ptb.de

** Marco Elfroth, Arbeitsgruppe 8.51 „Metrologische Software“, E-Mail: marco.elfroth@ptb.de

geschäftlichen oder amtlichen Verkehr oder zur Durchführung von Messungen im öffentlichen Interesse bestimmt“ ist. Für Geräte, die anderen Zwecken dienen, besteht keine Notwendigkeit zur Regelung. So fallen beispielsweise Personenwaagen für den privaten Bereich nicht unter den Begriff. Auch bedarf es nicht für alle Arten von Messgeräten oder alle Verwendungen des gesetzlichen Schutzes. Das Gesetz sieht deshalb vor, dass die schutzbedürftigen Messgeräte durch eine Rechtsverordnung näher bestimmt werden [4] und dass einzelne Verwendungen, bei denen kein Schutzbedürfnis besteht, von der Anwendung des Gesetzes ausgenommen werden können.

Bislang haben Hersteller, Importeure, Händler und Verwender von Messgeräten unterschiedliche Regelungen zu beachten, je nachdem, ob es sich um ein europäisch harmonisiertes oder ein national geregeltes Messgerät handelt. Zukünftig gibt es diese Unterschiede nicht mehr. Die Bauartzulassung und Ersteichung von Messgeräten für national geregelte Messgeräte entfällt mit dem neuen Gesetz. Einheitlich für alle Gerätearten wird das europäische Modell der Konformitätsbewertung gelten [5], das bereits seit vielen Jahren in unterschiedlichen Produktbereichen zum Einsatz kommt und auch im Messwesen seit mehreren Jahren für wichtige Gerätearten gilt [6]. Das europäische System ist gekennzeichnet durch einen Verzicht auf staatliche Genehmigungsverfahren, verpflichtet die Hersteller aber in vielen Fällen, vor dem Inverkehrbringen eine Bewertung der Übereinstimmung ihrer Produkte mit den gesetzlichen Anforderungen (§ 6 Absatz 2 MessEG und Anlage 2 zu § 7 Absatz 1 Satz 3 MessEV [4]) durch eine unabhängige Drittstelle durchführen zu lassen. Zudem sind die konformen Produkte mit einer Kennzeichnung (europäisch: CE-Kennzeichnung) zu versehen, mit der der Hersteller die Übereinstimmung des Produkts mit den gesetzlichen Anforderungen zum Ausdruck bringt. Die Bereitstellung nur eines Verfahrens vereinfacht die Rechtsanwendung für die Betroffenen und erleichtert damit den Marktzutritt. Verbunden mit dem einheitlichen Weg des Inverkehrbringens können neue Märkte für private Konformitätsbewertungsstellen entstehen. Die vormals ca. 240.000 Geräte, die jährlich einer behördlichen Ersteichung unterlagen, können nun auch von privaten Stellen bewertet werden [1].

Die Kompetenz dieser Stellen ist wichtig und muss im Zuge eines Akkreditierungsverfahrens nachgewiesen werden. Die Akkreditierung ist ein europaweit angelegtes System zum Nachweis der Kompetenz von Konformitätsbewertungsstellen. Die Akkreditierung ist in Deutschland durch das Akkreditierungsstellengesetz geregelt. Akkreditierungen werden in Deutschland ausschließlich durch die Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH

(DakkS) erteilt. Die Kompetenz und Integrität der Konformitätsbewertungsstellen wird durch ein umfassendes Sicherungssystem fortlaufend gewährleistet, das unter anderem die Möglichkeit einschließt, einer Stelle im Fall des Versagens das Recht zur Vornahme von Konformitätsbewertungen zu entziehen.

Traditioneller Teil der gesetzlichen Regelungen im Messgerätebereich sind auch Vorschriften, die die Nutzungsphase von Messgeräten betreffen. Der notwendige Schutz endet nicht mit dem Inverkehrbringen von Messgeräten, sondern erfordert auch, deren spätere richtige Handhabung zu gewährleisten. Dazu gehören insbesondere auch Vorschriften über die Überprüfung der Geräte – die Eichung.

Die bisherigen Regelungen über die Nacheichung von Messgeräten, also die behördliche Überprüfung von Geräten in periodischen Abständen oder nach Defekten oder Eingriffen, wurden weitgehend aus dem bisherigen Recht übernommen, die bisherigen Zuständigkeiten nicht verändert.

Fest steht nun auch, dass bei der Eichung auf vorgelegte aktuelle Prüf- und Untersuchungsergebnisse zurückgegriffen werden kann. Möglich ist es zudem, Anträge für mehrere Eichungen in einem Akt zu stellen, auch über die Grenzen eines Bundeslandes hinaus. Diese Maßnahmen werden zu einer Kostenoptimierung für die Betroffenen bei der Eichung beitragen.

3. Anlage der Software-Aktualisierung in internationalen und europäischen Handlungsempfehlungen der Metrologie

Handlungsempfehlungen, die die Aktualisierung der Software in Messgeräten behandeln, existieren bereits auf internationaler Ebene und für den europäischen Binnenmarkt.

3.1 Internationale Regelempfehlungen

Die Organisation Internationale de Métrologie Légale (OIML) (dt.: Internationale Organisation für das gesetzliche Messwesen) ist eine 1955 in Paris gegründete internationale Organisation zur Regelung der messtechnischen Belange im gesetzlichen Messwesen.

Die OIML gibt Empfehlungen heraus, die in vielen Ländern anerkannt werden und in nationale Normen einfließen und von der europäischen Kommission als normative Dokumente anerkannt werden.

Im OIML-Dokument D-31 [7] werden generelle Anforderungen an softwaregesteuerte Messgeräte gebündelt. In Bezug auf die Aktualisierung von Software werden hier zwei Vorgehensweisen unterschieden: die verifizierte Aktualisierung, *Verified Update*, und die nachverfolgte Aktualisierung, das *Traced Update*.

Der wichtigste Unterschied dieser beiden Verfahren liegt darin, dass beim Verified Update ein Vertreter einer Verifikationsbehörde beim Messgerät anwesend ist. Dieser verifiziert und bestätigt den Erhalt des geforderten Sicherheitslevels nach vollendeter Aktualisierung. Diese Verifikation entspricht im deutschen Fall der Nacheichung, die auch im neuen Rechtsrahmen erhalten bleibt.

Wichtige Schritte beim lokalen oder über ein Netzwerk durchgeführtes Verified Update sind das automatische Laden der Software, die Überprüfung, ob das Update erfolgreich war, und die Durchführung einer nachgelagerten Verifikation (Eichung) durch einen anwesenden Vertreter der Verifikationsbehörden.

Im Gegensatz dazu ist beim Aktualisierungsvorgang des Traced Update keine personengebundene Überwachung vorgesehen. Dafür werden informationstechnische Mittel eingesetzt, die die Integrität und Authentizität der aktualisierenden Software garantieren. Hinzu kommt die Überwachung über ein elektronisches Logbuch, um den sogenannten *Audit Trail* nachvollziehbar zu gestalten.

Wichtige Schritte beim lokalen oder über ein Netzwerk durchgeführten Verified Update sind automatisches Laden der Software, Prüfung der Integrität und Authentizität, automatische Installation, Aufzeichnung in einem Logbuch (*Audit Trail*) und die abschließende Aktivierung der Software. All dies soll automatisch ablaufen und die eigentliche Messfunktion des Messgerätes während der Aktualisierung nicht beeinflussen.

Das Sicherheitslevel wird durch den Zulassungsbeleg vorgegeben und soll durch den Vorgang konserviert bleiben.

Die Authentizität, also die Sicherung, dass die Software aus einer autorisierten Quelle stammt, wird beispielsweise über den Einsatz von Kryptografie bewerkstelligt. So wird unter Verwendung eines privaten Schlüssels eine elektronische Signatur erstellt und mit einem öffentlichen Schlüssel verifiziert (gespeichert z. B. im festen SW-Teil). Die Integrität, d. h. die Sicherung der Unveränderbarkeit bzw. des Nachweises einer Änderung der geladenen Software, wird z. B. über die Verwendung einer Checksumme oder eines Hash-Algorithmus bewerkstelligt. Die Verifikation erfolgt dann automatisch während der Ladeprozedur.

Der *Audit Trail* soll die adäquate Nachvollziehbarkeit für Eichung, Überwachung oder Inspektion garantieren. Dazu sollte dieser mindestens den folgenden Informationsumfang bieten:

- Prozedur war erfolgreich / nicht erfolgreich,
- Identifikator der installierten Software,
- Identifikator der zuvor installierten Software,
- Zeitmarke,
- Identifikator der aktualisierenden Partei.

Jeder Aktualisierungsversuch wird aufgezeichnet, unabhängig ob dieser erfolgreich war oder nicht.

3.2 Europäische Regelempfehlungen

Im europäischen Binnenmarkt unterliegen insbesondere Messgeräte der Europäischen Messgeräte-Richtlinie 2014/32/EG (*Measurement Instruments Directive*, MID) in ihrer jüngst überarbeiteten Form [6], die bis April 2016 in nationales Recht umzusetzen ist.

Der Charakter als Richtlinie eröffnet einen gewissen Umsetzungsspielraum in die nationale Rechtssetzung. Daher hat sich die Europäische Kooperation im gesetzlichen Messwesen (WELMEC) als grundsätzliches Ziel gesetzt, die Etablierung eines harmonisierten und konsistenten Ansatzes für das gesetzliche Messwesen in Europa zu erarbeiten. Das ist ein andauernder Prozess.

Die Arbeitsgruppe 7 „Software“ der WELMEC entwickelt unter Leitung der PTB europäisch abgestimmte Vorgehensweisen und akzeptable technische Lösungen zu Software- und IT-bezogenen Fragestellungen, die von den Mitgliedern der europäischen Nationalen Metrologieinstituten (NMIs), den Marktaufsichtsbehörden oder den Wirtschaftsverbänden aufgeworfen werden.

Diese technischen Handlungshilfen und Vorgehensweisen für Hersteller und Prüfstellen, die eine „Vermutungswirkung“ auslösen, werden in dem Harmonisierungsdokument WELMEC Software Guide 7.2:2015 verschriftet und veröffentlicht [8].

Der Software Guide 7.2 ist von der Europäischen Kommission als ein den „Stand der Technik“ repräsentierendes Dokument anerkannt [9].

Der WELMEC Software Guide 7.2:2015 unterscheidet entsprechend der MID prinzipiell in rechtlich relevante und rechtlich nicht relevante, bzw. andere Software und unterstützt das Prinzip der Softwaretrennung, das im Jargon des Software-Engineering als Modularisierung bezeichnet wird.

Diese Softwaretrennung, also die strikte Trennung der Messgerätesoftware in einen Bereich der keine metrologischen Funktionen trägt und einen in dem die messtechnischen Eigenschaften untergebracht sind, bietet dem Hersteller größere Freiheiten. Beide Kompartimente kommunizieren über eine gesicherte Schnittstelle. Im Rahmen des Bewertungsverfahrens Modul B muss die Rückwirkungsfreiheit dieser Softwareschnittstelle nachgewiesen bzw. bewertet werden und explizit in der Baumusterprüfbescheinigung als rückwirkungsfrei bestätigt werden.

Die Anforderungen der MID und damit folgerichtig des WG 7.2:2105 legen Anforderungen an die metrologisch relevanten Softwaremodule fest.

Dabei sind die im Guide verschrifteten technischen Umsetzungsformen als akzeptable Lösungen

zu verstehen. Der Hersteller ist frei, eigene Lösungen mit gleichem Schutzniveau zu implementieren. Damit ist garantiert, dass keine Innovationshemmnisse aufgebaut werden und der Guide auch für neue Technologien nutzbar ist.

Im Folgenden sollen die Anforderungen des WG 7.2:2015 an die rechtlich relevante Software bei der Aktualisierung von Software (Extension D: Download of Legally Relevant Software) zusammengefasst dargestellt werden:

A.) Der Download-Mechanismus

Der Download und die anschließende Installation der Software erfolgen automatisch und stellen sicher, dass der Schutz der Software-Umgebung auf dem zugelassenen Niveau ausgeführt wird.

B.) Authentifizierung der heruntergeladenen Software

Es sollen geeignete technische Mittel zur Gewährleistung eingesetzt werden, dass die heruntergeladene Software authentisch ist, also von einer autorisierten Quelle stammt.

C.) Integrität heruntergeladener Software

Es sollen geeignete technische Mittel zur Gewährleistung eingesetzt werden, dass die heruntergeladene Software während des Downloads nicht unzulässig verändert wurde.

D.) Rückverfolgbarkeit des Downloads rechtlich relevanter Software

Mithilfe geeigneter technischer Hilfsmittel soll gewährleistet werden, dass Downloads rechtlich relevanter Software für nachgelagerte Kontrollen im Gerät angemessen zurückverfolgt werden können (Logbücher).

E.) Zustimmung zum Download

Es wird davon ausgegangen, dass der Hersteller des Messgeräts seine Kunden bezüglich Updates der Software – insbesondere des rechtlich relevanten Teils – gut informiert und dass der Kunde ein Software-Update nicht ablehnt.

Hier, genauso wie bei den internationalen Anforderungen der OIML, werden wieder die folgenden Kriterien gefordert: automatisch ablaufende Prozesse, Integrität, Authentizität und Rückverfolgbarkeit mittels eines Logbuchs.

Diese Anforderungen haben auch Eingang in das nationale Recht gefunden. Der Rechtsrahmen der Messgeräte-Richtlinie lässt im Zuge von Bewertungsverfahren die Aktualisierung der Software ohne Erlöschen der Eichgültigkeit nicht zu. Hier gelten die jeweils nationalen Anforderungen der einzelnen Länder.

4. Anlagen der Software-Aktualisierung im Mess- und Eichgesetz

4.1 Anlage im MessEG

Im bis Ende 2014 ausgelaufenen Eichgesetz war eine Aktualisierung der Software immer mit dem Brechen eines Siegels verbunden, was zwangsläufig zum vorzeitigen Erlöschen der Eichung führte und eine Nacheichung nötig machte. Eichung und Eichfristen werden im MessEG neu geregelt. So endet auch im MessEG die Eichfrist vorzeitig, wenn ein Eingriff vorgenommen wird, der Einfluss auf die messtechnischen Eigenschaften des Messgeräts haben kann oder dessen Verwendungsbereich erweitert oder beschränkt (§ 37 Absatz 2 Nr. 2 MessEG). Jedoch dürfen in den genannten

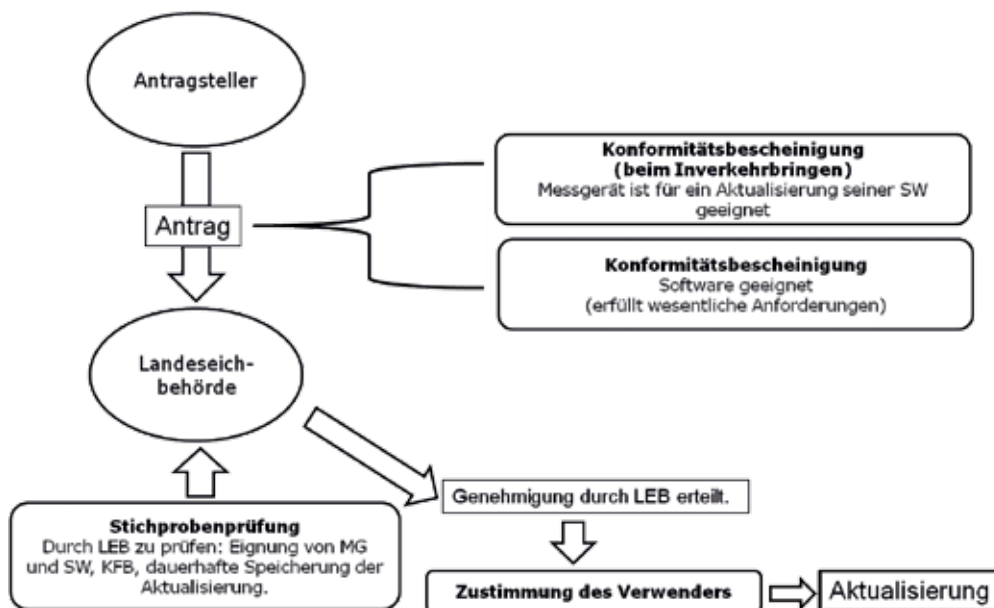


Bild 1:
Ablaufschema
gemäß § 37 Absatz
6 MessEG

Fällen des Absatz 2 Nr. 2 Messgeräte wieder verwendet werden, deren Software durch einen näher zu beschreibenden technischen Vorgang aktualisiert wurden. Mit dem neu geschaffenen Absatz 6 des § 37 MessEG werden Aktualisierungsvorgänge geregelt (s. Bild 1).

Dabei gilt es zu beachten, dass Schutzziele des Eichrechts nicht über Gebühr beeinträchtigt werden. Um die Aktualisierungsvorgänge einheitlich zu regeln, wurden die nachfolgenden Bedingungen festgelegt, die als Voraussetzung einer Genehmigung durch die Behörde erfüllt sein müssen.

Als erste Bedingung muss sowohl das Messgerät für Aktualisierungsvorgänge der Software geeignet sein, als auch die Software für sich die wesentlichen Anforderungen erfüllen (§ 6 Absatz 2 MessEG und Anlage 2 zu § 7 Absatz 1 Satz 3 MessEV). Diese Bedingungen sind durch eine Konformitätsbewertung zu bestätigen. Zweitens muss das Messgerät über eine elektronische Logbuchfunktion verfügen, die den Aktualisierungsvorgang dauerhaft aufzeichnet. Alle Bedingungen sollten hinsichtlich der erfolgreichen Umsetzung in der Praxis durch eine Eichbehörde mittels geeigneter Stichprobe überprüft werden. Dabei gilt es festzustellen, ob die Messgeräte nach der Aktualisierung noch ordnungsgemäß funktionieren, die vorher vorhandenen und gesicherten Parameter erhalten geblieben sind und die messtechnischen Eigenschaften weiter den Anforderungen genügen. Der im § 37 Absatz 6 MessEG benannte „technische Vorgang“ bezieht sich dabei nicht auf den Weg, wie eine Software zum Messgerät gelangt (Internet, CD oder USB-Stick etc.). Dieser bezieht sich auf den technischen Vorgang, der erst dazu führt, dass die Eichfrist unberührt bleibt und dessen Inhalte zum Teil in § 37 Absatz 6 MessEG angelegt und im § 40 MessEV weiter ausdifferenziert werden (läuft selbstständig ab, Authentifizierungs- und Integritätsprüfung, dauerhafte Aufzeichnung, etc.).

Werden diese Bedingungen erfüllt, kann das Messgerät weiter betrieben werden, ohne dass die Eichfrist davon berührt wird. Weiter ausdifferenziert werden das Verfahren und die Anforderungen in der entsprechenden Verordnung zur Neuregelung des gesetzlichen Messwesens und zur Anpassung an europäische Rechtsprechung, der Mess- und Eichverordnung (MessEV).

Das schon im alten Eichrecht etablierte Verfahren der Instandsetzung nach § 37 Absatz 5 i. v. m § 6 Absatz 2 MessEG mit nachgelagerter Eichung ist weiterhin nutzbar. Durch das Vorhandensein beider Verfahren, werden Handelshemmnisse im europäischen Binnenmarkt vermieden.

4.2 Anlage des Standardverfahrens nach § 40 MessEV

Die in § 40 MessEG festgelegte Regelung beschreibt das Genehmigungsverfahren zur Aktualisierung von Software in Messgeräten näher, das in § 37 Absatz 6 MessEG bereits grundsätzlich angelegt ist (s. Bild 1). Ziel ist die Vereinfachung des Verfahrens und die Vereinheitlichung des Aktualisierungsvorgangs im Sinne der Prüfbarkeit. Bei Verzicht auf eine derartige Vorschrift würde wegen der Rechtsfolge des § 37 Absatz 2 Nummer 2 MessEG andernfalls jedes Messgerät, dessen Software in metrologisch relevanter Weise geändert wurde, einer neuen Eichung bedürfen. Dies ist in zukünftigen Massengeschäften von netzangeordneten Messgeräten, wie den intelligenten Messsystemen, aber auch bei vielen anderen Messanwendungen, nicht darstellbar. Die Aktualisierung kann vor Ort sowie über Netzwerke erfolgen. Die Genehmigung zum Verwenden von Messgeräten mit aktualisierter Software nach § 37 Absatz 6 MessEG wird auf Antrag von den zuständigen Eichbehörden erteilt (s. Bild 2). Antragsteller können Wirtschaftsakteure oder Verwender von Messgeräten sein. Der Verwender kann natürlich weitere Personen bevollmächtigen, die dies in seinem Auftrag durchführen. Dem Hersteller kommt bei der Möglichkeit ein Software-Update zu beantragen grundsätzlich keine Sonderrolle zu. Da jedoch an die Software Integritäts- und Authentizitätsanforderungen gestellt werden, die direkt mit dem Messgerät und dem Hersteller verbunden sind, wird dieser zumindestens immer eingebunden sein. Das Verfahren der Aktualisierung von Software ist ausdrücklich für ein einzelnes oder für mehrere Messgeräte offen. Die Regelungen des Mess- und Eichgesetzes über die örtliche Zuständigkeit bei Eichungen gelten hier ebenfalls.

Die Voraussetzungen für die Erteilung der Genehmigung sind folgendermaßen geregelt: Das Messgerät muss derart konkret bezeichnet sein, dass es unzweideutig im Marktgeschehen von den Marktaufsichtsbehörden identifizierbar ist. Dies ist notwendig, um einem bestimmten Messgerät die beabsichtigte Rechtsfolge zuzuordnen zu können. Dies gestattet, dass Messgeräte einer Bauart flächendeckend überprüfbar mit unterschiedlichen gültigen Softwareversionen ausgestattet sein können. Die Erteilung der Genehmigung zur Aktualisierung der Software ist auf solche Messgeräte beschränkt, bei denen im Rahmen der Konformitätsbewertung festgestellt wurde, dass deren technische Voraussetzungen eine Software-Aktualisierung erlauben. Bestandteil der notwendigen Befähigung des Messgeräts sind auch die im Folgenden genannten Voraussetzungen. Hierzu muss das Messgerät über die folgenden Eigenschaften verfügen:

Damit eine Aktualisierung auf einfache Weise vor Ort oder über Netzwerke durchgeführt werden kann, muss die Prozedur der Aktualisierung nach deren einfacher Initialisierung **selbsttätig ablaufen**. Das verringert Bedienfehler und erlaubt auch technisch nicht geschultem Personal die Aktualisierung durchzuführen.

Das Messgerät muss in der Lage sein, informationstechnische Verfahren zu verarbeiten, mit denen die **Authentizität** und die **Integrität** der aufzuspielenden Software gewährleistet werden. Das informationstechnische Nachweisverfahren der Authentizität stellt sicher, dass nur Software einer autorisierten, vertrauenswürdigen Quelle zur Aktualisierung verwendet wird. Das Messgerät muss also in der Lage sein, Software, die aus sonstigen Quellen stammt, abzulehnen. Das informationstechnische Nachweisverfahren der Integrität gewährleistet, dass die Aktualisierungssoftware auf dem Transportweg von der Quelle zum Messgerät nicht verändert wurde. Alle Aktualisierungsvorgänge und Aktualisierungsversuche sind gesichert aufzuzeichnen, um mögliche Eingriffe im Nachhinein nachvollziehbar zu gestalten. Die Frist zur Speicherung ist auf sechs Monate nach Ablauf der anhängigen Eichfrist zu beschränken. Dieser Zeitraum ist notwendig, aber auch ausreichend, um die Überprüfung durch die Behörden auch noch im Zusammenhang mit der nachfolgenden Eichung zu gewährleisten.

Das aktualisierte Messgerät muss wiederum die grundlegenden Anforderungen nach § 6 Absatz 2 MessEG erfüllen. Dies wird durch eine entsprechende Konformitätserklärung bestätigt. Die zuständige Behörde hat die Pflicht, anhand von Stichproben die Richtigkeit der aktualisierten Messgeräte nach der Aktualisierung zu prüfen. Zuletzt muss für die Durchführung der Aktualisierung die Zustimmung des Verwenders vorliegen.

4.3 Anlage des Eilverfahrens in der MessEV

§ 40 Absatz 4 MessEV regelt ein spezielles Eilverfahren für die Software-Aktualisierung, welches bei Erfüllung der vorhergenannten Bedingungen parallel zum Genehmigungsverfahren für den Standardvorgang initiiert werden kann. Es schließt das Anstoßen des Standardverfahrens mit ein.

Ein über ein offenes Netzwerk, wie das Internet, angebundenes Messgerät, unterliegt einem vergleichbaren Bedrohungspotenzial wie andere, netzangebundene IT-Systeme [3]. IT-Sicherheitslücken bieten die Möglichkeit des unerlaubten oder versehentlichen Zugriffs auf diese Systeme. Ein zeitnahes Schließen dieser Lücken mit geeigneten Softwarelösungen ist in Fällen mit hohem Bedrohungspotenzial dringend geraten. Solche Sicherheitslücken werden beispielsweise vom Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) veröffentlicht. Sicherheitslücken mit geringem Bedrohungspotenzial können hingegen gesammelt und im Rahmen regelmäßiger Updates auf das System aufgespielt werden. Dieses Vorgehensweise ist in der IT-Sicherheit etabliert. Messgeräte, die über öffentliche Netzwerke angebunden sind, sollen in Anlehnung an dieses Vorgehen im Bereich der IT-Sicherheit bei hoher Bedrohungslage in gleicher Weise auf Antrag kurzfristig mit einer Software-Aktualisierung abgesichert werden. Die Software zum Schließen der IT-Sicherheitslücke darf jedoch die Messsicherheit, Messbeständigkeit und Prüfbarkeit des Messgeräts, wie sie durch die in der Konformitätserklärung benannten Software garantiert wird, nicht beeinflussen.

Besondere Bedeutung hat dieses Eilverfahren im Hinblick auf die im Energiewirtschaftsgesetz geregelten intelligenten Messsysteme. Für diese Systeme sind besondere Anforderungen an die IT-Sicherheit vorgesehen und vom BSI in

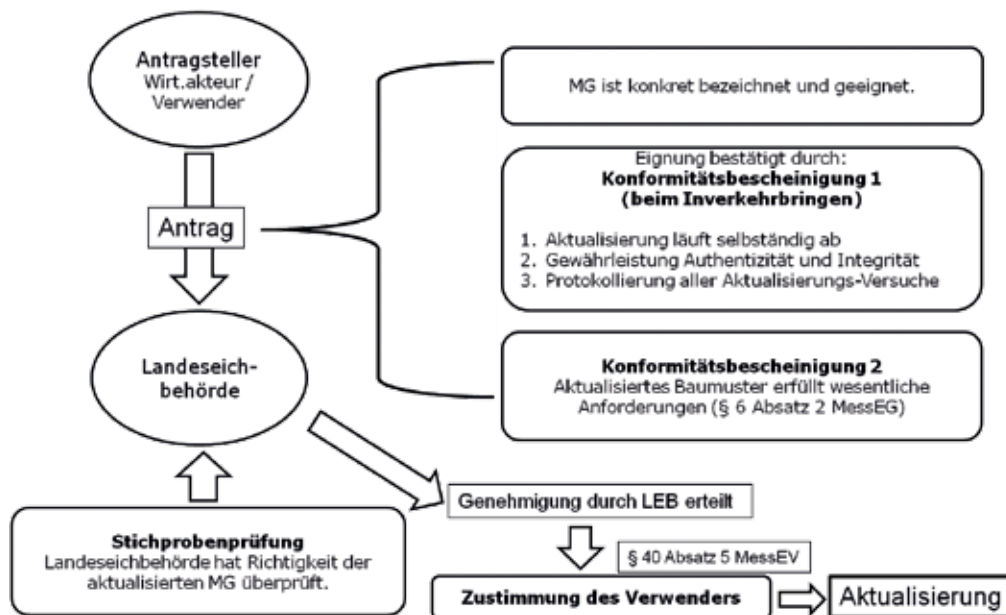


Bild 2: Standardverfahren der Software-Aktualisierung gemäß § 40 Absatz 3 MessEG

Zusammenarbeit mit der PTB entsprechend in sogenannten technischen Richtlinien und Schutzprofilen umgesetzt worden [2, 10]. Im § 26 des Entwurfs eines Gesetzes zur Digitalisierung der Energiewende [11] ist geregelt, dass das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik im Einvernehmen mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt und der Bundesnetzagentur soweit erforderlich Maßnahmen zur Sicherstellung und Aufrechterhaltung eines bundesweit einheitlichen Sicherheitsniveaus für den Betrieb von zertifizierten *Smart Meter Gateways* durchführt. Dazu gehören insbesondere die Analyse, Priorisierung und Bewertung von Schwachstellen von *Smart Meter Gateways* sowie die Entscheidung über Software-Updates zu deren Behebung. Bei Gefahr im Verzug tritt jedoch anstelle des Einvernehmens eine nachträgliche Informationspflicht des Bundesamts für Sicherheit in der Informationstechnik gegenüber der PTB und der Bundesnetzagentur (BNetzA).

Für Eilmaßnahmen im Sinne der IT-Sicherheit wird es allerdings eines daneben stehenden Eilverfahrens nach den Vorschriften der MessEV jeweils dann nicht bedürfen, wenn die Software-Änderung nicht geeignet ist, einen Eingriff in den metrologisch relevanten Bereich des Messgeräts zu bewirken. Der Grundsatz der Softwaretrennung [12], also der Unterscheidung von metrologisch relevanten und sonstigen Software-Elementen, ist in den technischen Regeln über die Messsysteme des Energiewirtschaftsgesetzes berücksichtigt. All jene Software-Aktualisierungen, die die Softwaretrennung beachten und sich schon deshalb ausschließlich im nicht metrologisch relevanten Bereich bewegen, unterliegen nicht den Regelungen des § 37 Absatz 2 Nummer 2 MessEG und bedürfen daher auch keiner Genehmigung der Software-Aktualisierung nach § 37 Absatz 6 MessEG.

Ist der Antragsteller unsicher, ob seine Sicherheitsmaßnahmen den gesetzlich relevanten Bereich seiner Software berühren, ist er im Sinne der eigenen Verantwortung gut beraten, seiner Konformitätsbewertungsstelle die Software zur Begutachtung vorzulegen.

Auch bei einem Eilverfahren muss das betroffene Messgerät über die für eine Aktualisierung notwendigen technischen Voraussetzungen verfügen – wie sie schon für das Standardverfahren gefordert wird.

Das Eilverfahren durchläuft zwei Stufen (s. Bild 3). Voraussetzung für die Durchführung und damit Stufe 1 des Eilverfahrens ist, dass das Vorliegen einer gravierenden IT-Sicherheitslücke, deren hohe Dringlichkeit sowie die sicherheitstechnische Eignung der neuen Software durch eine geeignete Stelle bestätigt wurde. Diese Bestätigung kann von der nach § 3 Absatz 1 Nummer 5 des

Gesetzes zur Stärkung der Sicherheit in der Informationstechnik des Bundes (BSISStG) beauftragten, von einer nach § 9 BSISStG zertifizierten oder einer vergleichbaren Stelle erteilt werden.

Anerkannte Stellen für Sicherheitsgutachten können Stellen sein, die vom Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik eine Anerkennung als Prüfstelle nach *Common Criteria* (CC, ISO/IEC 15408) vorweisen oder als geeignet nach den *Information Technology Security Evaluation Criteria* (ITSEC) festgestellt sind. Weiterhin kommen auch Stellen in Betracht, die von der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS) eine Akkreditierung als Prüfstelle nach ITSEC, *Information Technology Security Evaluation Manual* (ITSEM), CC bzw. ISO 15408 oder *Common Methodology for Information Technology Security Evaluation* (CEM) besitzen.

Internationale Stellen für Sicherheitsgutachten sind anerkannte Stellen solcher anderen europäischen Länder, die Unterzeichner des *Senior-Officials-Group-Information-System-Security* (SOGIS)-Abkommens sind, oder die als europäische oder sonstige Länder Unterzeichner des *Common-Criteria-Recognition-Arrangement* (CCRA)-Abkommens sind. Nachweise über die entsprechende nationale Anerkennung sind vorzulegen.

Die Gleichwertigkeit weiterer Stellen wird von der zulassenden Behörde festgestellt. Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt legt zusammen mit den zulassenden Behörden entsprechende Kriterien für die Gleichwertigkeit fest.

Nach der Bestätigung des Vorliegens einer gravierenden IT-Sicherheitslücke, deren hoher Dringlichkeit sowie der Feststellung der sicherheitstechnischen Eignung der neuen Software durch eine geeignete Stelle folgt in der zweiten Stufe die Beantragung des Eilverfahrens bei der zuständigen Behörde.

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt unterstützt die Bewertung der metrologischen Unbedenklichkeit dieser Software fachlich und stellt hierzu bei positivem Befund eine vorläufige Konformitätsbewertung aus.

Entsprechend der Vorgabe des § 37 Absatz 6 Nummer 4 MessEG ist auch bei einer vorläufigen Genehmigung eine Stichprobenprüfung erforderlich. Sie ist in ihrem Umfang allerdings an dem nur vorläufigen Charakter der Genehmigung auszurichten. Das Genehmigungsverfahren nach § 40 Absatz 3, d. h. das Standardverfahren, muss parallel zum Verfahren der vorläufigen Genehmigung beantragt werden. Erst dann erfolgt die vorläufige Genehmigung zur Software-Aktualisierung.

Auch in den Fällen, in denen nicht der Verwender das Genehmigungsverfahren beantragt hatte, darf eine Aktualisierung des jeweiligen Messgeräts gleichwohl nur mit seiner Zustimmung erfolgen.

Dies trägt der Tatsache Rechnung, dass grundsätzlich der Verwender für die in seiner Obhut stehenden Messgeräte verantwortlich ist. Die vorläufige Genehmigung ist innerhalb von vier Werktagen nach Eingang der vollständigen Unterlagen zu erteilen (§40 (4) MessEV i.V.m. §42a VwVfG).

Details zum Verfahren, den benötigten Unterlagen und der Prüftiefe der Landeseichbehörden werden in [13] beschrieben.

5. Ausblick

Die bisherige nationale Regelung schloss eine Software-Aktualisierung ohne das Brechen eines Eichsiegels aus. Es existierten zwar von den Landeseichbehörden geduldete Insellösungen im Rahmen von Versuchen, die angewendeten Verfahren der Aktualisierung in diesen Sonderfällen waren jedoch nicht ländereinheitlich geregelt.

Mit dem im neuen Mess- und Eichgesetz festgelegten Verfahren, das sich an in Europa abgestimmten Regelwerken orientiert, vereinheitlicht sich die Vorgehensweise jetzt. Die Zahl der zu erwartenden jährlichen Software-Aktualisierungsverfahren ist schwerlich abschätzbar. Die Zahl der jeweils von einer Genehmigung erfassten Messgeräte wird voraussichtlich stark variieren. Sie dürfte von wenigen Produkten (kleinere Serien) bis hin zu Aktualisierungen für Massenprodukte reichen. Mit einer zunehmenden Bedeutung des Verfahrens parallel zur Zunahme digitaler und vernetzter Messtechnologien ist zu rechnen. Bei der zu erwartenden breiten Einführung intelligenter Messsysteme, wird die Bedeutung des Verfahrens drastisch zunehmen und die Grundgesamtheiten der im einzelnen Verfahren betroffenen Geräte deutlich ansteigen.

Referenzen

- [1] Gesetz zur Neuregelung des gesetzlichen Messwesens (MessEG), Fundstelle BGBl. I S. 2722, 25.07.2013
- [2] Smart Metering Systems, Bundesamt für die Sicherheit in der Informationstechnik (BSI), verfügbar unter: https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/DigitaleGesellschaft/SmartMeter/smartmeter_node.html (Letzter Zugriff am 30.01.2017)
- [3] ENISA Threat Landscape 2013 Overview of current and emerging cyber-threats, www.enisa.europa.eu (Letzter Zugriff am 30.01.2017)
- [4] Mess- und Eichverordnung vom 11. Dezember 2014 (BGBl. I S. 2010, 2011)
- [5] Decision No 768/2008/EC of the European Parliament and of the Council of 9 July 2008 on a common framework for the marketing of products
- [6] Directive 2014/32/EU of the European Parliament and of the Council from 26 February 2014 on the harmonisation of the laws of the Member States relating to the making available on the market of measuring instruments (2014)
- [7] Organisation Internationale de Métrologie Légale (OIML), General requirements for software controlled measuring instruments, OIML D-31, 2008
- [8] WELMEC Guide 7.2:2015 Software Guide, Measuring Instruments Directive 2014/32/EU, www.welmec.org (Letzter Zugriff am 30.01.2017)
- [9] European Commission, Measuring instruments - Guidance documents, http://ec.europa.eu/growth/single-market/goods/building-blocks/legal-metrology/measuring-instruments/guidance-standards/index_en.htm (Letzter Zugriff am 30.01.2017)
- [10] PTB-A50.8 Smart Meter Gateway (2014), https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_q/q.3_gesetzliches_messwesen/q.31_ptb-a/PTB-A_50-08.pdf (Letzter Zugriff am 30.01.2017)

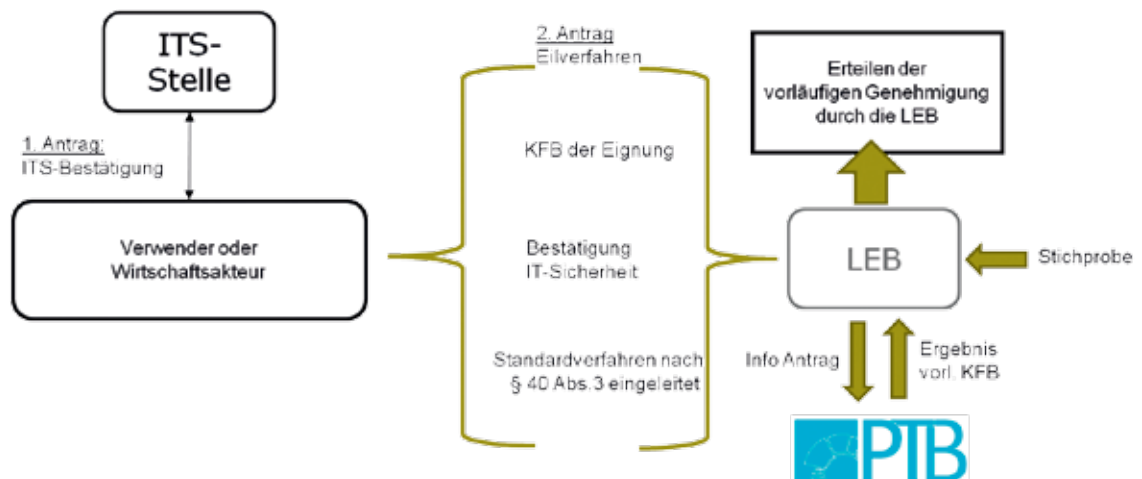


Bild 3: Zweistufiges Eilverfahren nach § 40 Absatz 4. Stelle der Informationssicherheit (IST-Stelle), Landeseichbehörde (LEB)

- [11] *Entwurf eines Gesetzes zur Digitalisierung der Energiewende*, Deutscher Bundestag Drucksache 18/7555 (17.02.2016), <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/18/075/1807555.pdf>
(Letzter Zugriff am 30.01.2017)
- [12] D. Peters and F.Thiel: *Software in Measuring Systems: Ways of Constructing Secure Systems*, 18. GMA/ITG Fachtagung, Sensoren und Messsysteme 2016, Nürnberg, 10.–11. Mai, 2016
- [13] PTB, Merkblatt zum Antragsverfahren nach § 40 Absatz 4 MessEV, (2015) https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/dienstleistungen/zertifizierungsstelle/150903_Merkblatt_fuer_Antragsteller_SW_Eilverfahren_Abt.8.5.pdf
(Letzter Zugriff am 30.01.2017)

ATEMBERAUBEND.

Ultrapräzise Positioniersysteme
auch für den Einsatz in Vakuum und Tieftemperatur.



PI

MOTION CONTROL
www.pi.ws

NEUERSCHEINUNGEN der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt

Elektrizität

E-108: Th. Schrader, J. Melcher (Hrsg.)

Aktuelle Fortschritte von Kalibrierverfahren im Nieder- und Hochfrequenzbereich 2016 –

Vorträge des 297. PTB-Seminars am 11. Mai 2016

CD-ROM, ISBN 978-3-95606-279-7, 2016, € 15,00*

Elektrische Messgeräte und Messverfahren haben besonders kurze Innovationszyklen, weil sie mit der allgemeinen Entwicklung elektronischer Geräte Schritt halten müssen. Das stellt die akkreditierten Laboratorien vor die Aufgabe, ihr Angebot an Kalibrierungen und den erreichten Messunsicherheiten ständig den Erfordernissen anzupassen und damit selbst neue Messverfahren zu entwickeln oder den Frequenzbereich der Messungen zu erweitern. Aber auch die immer effizientere Kalibrierung bei gleichbleibender Qualität ist eine Frage, der sich moderne Kalibrierlaboratorien inzwischen stellen müssen. Das eintägige PTB-Seminar hat dazu einen Beitrag geleistet, indem es an ausgewählten Themen die speziellen messtechnischen Probleme und Entwicklungen aufgezeigt hat.

Fertigungstechnik

F-57: Chr. Weichert

Implementierung von Geradheitsmessungen am Nanometerkomparator der PTB

136 S., 53 Abb., 12 Tab., ISBN 978-3-95606-297-1, 2016, € 19,00*

Fehlerseparationsverfahren werden eingesetzt, um die Geradheitsabweichung von Maßstäben, Topographien von Spiegeln und systematische Sensorfehler zu kalibrieren. Mit dem erweiterten „Traceable Multi-Sensor“ (TMS) Verfahren können all diese Aufgaben, unter der Voraussetzung einer stabilen, rückführbaren Winkelmessung, bewältigt werden. Daher wurde es am Nanometerkomparator zur Geradheitsmessung angewendet. Dieser wurde für die Realisierung von Geradheitsmessungen mit drei Y-Interferometern, einer neuen Messbrücke und einem neuen, aus Zerodur gefertigten Maßstabträger in Form einer monolithischen Wanne mit einem direkt aufgetragenen Y-Spiegel erweitert.

Mechanik und Akustik

MA-93: L. Klaus

Entwicklung eines primären Verfahrens zur Kalibrierung von Drehmomentaufnehmern mit dynamischer Anregung

172 S., 62 Abb., 30 Tab., ISBN 978-3-95606-263-6, 2016, € 20,50*

Der Bericht beschreibt erstmals einen modellbasierten Ansatz zur dynamischen Drehmomentkalibrierung. Die mechanischen Eigenschaften des Aufnehmers, die das dynamische Verhalten beeinflussen, werden durch ein Modell und dessen Modellparameter beschrieben. Die Modellparameter sind charakteristische Kenngrößen für den Aufnehmer. Sie werden experimentell bestimmt. Die mechanischen Eigenschaften des Aufnehmers sind deshalb so wichtig, da Drehmomentaufnehmer immer an beiden Enden einspannt sind. Die im Wellenstrang mechanisch gekoppelten Komponenten können das dynamische Verhalten des Aufnehmers beeinflussen und umgekehrt.

Optik

Opt-77: M. Kehrt

Entwicklung, Realisierung und Charakterisierung eines TES-Bolometers für die THz-Metrologie

126 S., 62 Abb., 4 Tab., ISBN 978-3-95606-280-3, 2016, € 18,50*

Es wird die Entwicklung, Realisierung und Charakterisierung eines vollständigen lithographisch hergestellten TES-Bolometers für den Spektralbereich von 0,1 THz bis 3 THz beschrieben. Bei der Realisierung kamen Si_3N_4 -Membrantechnologie, mikrostrukturierte Metallabsorber und SQUID-basierte Ausleselektronik zum Einsatz. Ziel der Entwicklung war die Herstellung eines Prototypen mit hohen Anforderungen an dessen spektral homogene Absorption und lineares Antwortverhalten über einen hohen Dynamikbereich.

Opt-78: J. Keller

Spectroscopic characterization of ion motion for an optical clock based on Coulomb crystals

Engl., 128 S., 67 Abb., 5 Tab., ISBN 978-3-95606-272-8, 2016, € 18,50*

This thesis contributes toward the realization of an optical clock based on Coulomb crystals, which will benefit from the low systematic uncertainties achievable in spectroscopy with trapped ions, but require shorter averaging times than the currently employed single-ion approach. $^{115}\text{In}^+$ ions will be used as the frequency reference, while $^{172}\text{Yb}^+$ ions will provide sympathetic cooling. The setup of a two ultra-stable reference and spectroscopic determination of the ion motion are described.

Thermodynamik

Th-8: St. Krenek

Dynamische Emissionsgradmessung im Hochtemperaturbereich

286 S., 56 Abb., 14 Tab., ISBN 978-3-95606-287-2, 2016, € 26,50*

Der spektral gerichtete Emissionsgrad hat besonders bei hohen Temperaturen über 1000°C eine hohe Relevanz für Industrie und Forschung. Zum einen wird für die berührungslose Temperaturmessung mit einem Strahlungsthermometer, die in diesem Temperaturbereich weiter verbreitet ist, der Emissionsgrad des Messobjektes für eine korrekte Messung benötigt. Zum anderen ist der Emissionsgrad des Messobjektes ein wesentlicher Parameter bei der Simulation und dem Design von Anwendungen im Hochtemperaturbereich, da hier der Strahlungsaustausch ein wesentlicher Wärmetransportmechanismus ist. Im Rahmen dieser Arbeit sollte eine neue Messmethode für den spektralen gerichteten Emissionsgrad basierend auf dem Laser-Flash-Verfahren realisiert werden.

*alle hier genannten Preise jeweils zzgl. Versandkosten

Bestellung bitte direkt an:



Carl Schünemann Verlag GmbH

Zweite Schlachtpforte 7 | 28195 Bremen | Tel. +49(0)4 21/3 69 03-56 | Fax +49(0)4 21/3 69 03-63

Internet: www.schuenemann-verlag.de | E-Mail: buchverlag@schuenemann-verlag.de

Softwarekonfigurationsmanagement – Grundregeln für das gesetzliche Messwesen

Norbert Greif*

1. Einführung

Die Einhaltung von grundsätzlichen, dem Stand der Technik entsprechenden Regeln des Softwarekonfigurationsmanagements ist Voraussetzung für die Überprüfbarkeit von Messgeräten bzw. Messsystemen mit eingebetteter Software, insbesondere für Überprüfungen im Rahmen der Marktüberwachung.

Das vorliegende Papier beschreibt die Minimalanforderungen an das Softwarekonfigurationsmanagement, die von den Herstellern der Messgeräte zu beachten sind, und auf die sich die Marktüberwachungsbehörden verlassen können müssen.

Die Pflicht zur Erfüllung dieser Anforderungen durch die Messgerätehersteller ist durch europäische Rechtsvorschriften [1, 2] gedeckt. Die dort geforderten Identifizierungsverfahren unterstützen die Erfüllung einer wesentlichen Anforderung an alle Wirtschaftsakteure: die Forderung nach Rückverfolgbarkeit der Produkte über die gesamte Lieferkette.

Einleitend wird im Abschnitt 2 der Bezug der vorgeschlagenen Verfahrensweise zum Softwarekonfigurationsmanagement zu den relevanten europäischen Rechtsvorschriften [1, 2] hergestellt. In Abschnitt 3 werden dann die wesentlichen Basisregeln (Minimalanforderungen) für das Softwarekonfigurationsmanagement dargestellt, deren Befolgung für die Marktüberwachungen im gesetzlichen Messwesen als erforderlich angesehen wird. Diese Regeln sind im gesamten Softwareentwicklungsprozess durch die Hersteller von Messgeräten bzw. Messsystemen umzusetzen. Einige Anwendungsempfehlungen werden in Abschnitt 4 aufgelistet.

Die entwickelten Basisregeln sind aus den einschlägigen europäischen Rechtsvorschriften [1, 2] und aus den den Normen [3, 4, 5, 6, 7] abgeleitet, die den Stand der Softwaretechnik auf dem Gebiet

Softwarekonfigurationsmanagement charakterisieren. Sie sind auf die Spezifik des gesetzlichen Messwesens zugeschnitten worden. Die Regeln sind zwar auf Software zugeschnitten, aber grundsätzlich auch auf Hardwareeinheiten anwendbar. Sie sind elementarer Art und stellen für Hersteller, die Standardregeln des Softwareengineering beachten, keine zusätzliche Hürde dar. Die zu implementierenden Softwarekonfigurationseinheiten können dabei sowohl zeitliche Versionen, inhaltliche Varianten oder Änderungsversionen darstellen. Bei der in Abschnitt 3 folgenden Ableitung der Basisregeln werden anstelle der häufig verwendeten Begriffe Versionsmanagement und Versionseinheiten die allgemeineren Begriffe Konfigurationsmanagement und Konfigurationseinheiten verwendet.

2. Rechtlicher Bezug

Die Verordnung (EG) Nr. 765/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates [1] und der Beschluss Nr. 768/2008/EG des Europäischen Parlaments und des Rates [2] regeln im Rahmen der Harmonisierungsvorschriften für Produkte insbesondere die Pflichten der Produkthersteller.

Die für die Ableitung der Basisregeln für das Softwarekonfigurationsmanagement relevanten Anforderungen an die Hersteller sind die Folgenden:

A1: Die Hersteller müssen die eindeutige Identifizierung aller Produkte gewährleisten (vgl. [2], Anhang 1, R2, Absatz 5).

A2: Zur Erleichterung der Marktüberwachung müssen die Wirtschaftsakteure (die Hersteller in ihrem Wirkungsbereich) die Rückverfolgbarkeit der Produkte über die gesamte Lieferkette hinweg gewährleisten (vgl. [2], Präambel, Absatz 28).

* Dr. Norbert Greif, AG 8.54 "Validierung metrologischer Software", E-Mail: norbert.greif@ptb.de

A3: Die Hersteller müssen durch geeignete Verfahren die Änderungen an Produktentwürfen und an den Produkten (Varianten, Versionen) berücksichtigen (vgl. [2], Anhang 1, R2, Absatz 4).

A4: Die Hersteller müssen durch geeignete Verfahren gewährleisten, dass stets die Konformität bei Serienfertigung sichergestellt ist (vgl. [2], Anhang 1, R2, Absatz 4).

Bei der Herstellung von softwaregesteuerten Messgeräten und Messsystemen können diese Forderungen durch die Realisierung der hier vorgestellten Basisregeln für das Konfigurationsmanagement durch die Hersteller erfüllt werden.

3. Basisregeln für das Softwarekonfigurationsmanagement

Im Folgenden werden vier Basisregeln beschrieben, die besondere Bedeutung für das Softwarekonfigurationsmanagement im Bereich „Gesetzliches Messwesen“ haben. Grundlegende Voraussetzung eines angemessenen Konfigurationsmanagements ist die Strukturierung der Software in Softwareeinheiten (Konfigurationseinheiten) sowie die eindeutige Identifizierung der Softwareeinheiten (Basisregel 1, vgl. **A1**). Wesentlicher Bestandteil des Konfigurationsmanagements ist die Aufzeichnung relevanter Statusinformationen über die zu verwaltenden Softwareeinheiten und ihrer Veränderungen (Basisregel 2, vgl. **A2, A3, A4**). Schließlich sollen für die softwarebezogenen Prozesse in der Entwicklungsphase (Basisregel 3, vgl. **A2, A4**) sowie in der Phase von Archivierung, Auslieferung, Installation und nachträglicher Veränderung (Basisregel 4, vgl. **A2, A3, A4**) die jeweiligen Abläufe festgelegt und befolgt werden.

3.1 Definition und Identifizierung von Softwarekonfigurationseinheiten

Basisregel 1:

Sämtliche Softwarekonfigurationseinheiten müssen definiert und eindeutig identifiziert werden.

Zur Umsetzung dieser Regel gehören:

- Definition von Softwareeinheiten, wie sie als kleinste Einheit verwaltet, ausgeliefert oder ausgetauscht werden (Extremfall: Gesamte Software ist eine Einheit);
- Berücksichtigung von zeitlichen Versionen (Versionen des Gesamtprodukts, Versionen von Teilprodukten, Änderungsversionen) und inhaltlichen Varianten;

- Beschreibung der Beziehungen zwischen den Softwareeinheiten (inhaltliche Beziehungen, Beziehungen im Rahmen der Softwarestruktur, ggf. zeitliche Beziehungen);
- Strategie und Namenskonventionen zur eindeutigen Identifizierung der definierten Softwareeinheiten (Umsetzung des Prinzips, dass verschiedene Softwareeinheiten unterschiedliche Identifikationen und weiterentwickelte Versionen neue Identifikationen verlangen; Unterscheidung zwischen ausgelieferten und nicht ausgelieferten Versionen, zwischen gesetzlich relevanten und gesetzlich nicht relevanten Softwareeinheiten);
- Identifizierung der gesetzlich relevanten Softwareteile und Beschreibung der Schnittstelle zu den gesetzlich nicht relevanten Softwareteilen.

3.2 Aufzeichnung von Statusinformationen

Basisregel 2:

Die Statusinformationen der definierten Softwarekonfigurationseinheiten müssen von Beginn an und mit der Entstehung weiterentwickelter Versionen kontinuierlich aufgezeichnet werden.

Zu den Statusinformationen gehören:

- Identifikatoren;
- Erstellungsdatum der Softwareeinheit und jeder weiterentwickelten Version;
- Freigabedatum der Softwareeinheit und jeder weiterentwickelten Version;
- Datum von Auslieferungen;
- Datum nachträglicher Änderungen;
- Verweis auf die jeweils zugehörige Dokumentation (z. B. Gebrauchsanleitung und Sicherheitsinformation gemäß [2], Anhang 1, R2, Absatz 7);
- ggf. Darstellung von veränderten Beziehungen zu anderen Versionseinheiten bei weiterentwickelten Versionen;
- Bezeichnung der zugelassenen Softwareteile und deren Versionen (Einfrieren zugelassener Versionen);
- Beziehungen zu anderen Softwarekonfigurationseinheiten.

Aus den Statusinformationen können bei Bedarf entsprechende Berichte generiert werden.

3.3 Rückverfolgbarkeit von Softwarekonfigurationseinheiten im Entwicklungsprozess

Basisregel 3:

Entwicklungsprozesse müssen so organisiert werden, dass wichtige Abläufe wie Erstellung, Freigabe, Veränderung oder Löschung von Softwarekonfigurationseinheiten nachvollziehbar und somit die (Änderungszustände der) Softwareeinheiten rückverfolgbar sind.

Zur Umsetzung dieser Regel gehören:

- Festlegung von Rechten und Verantwortlichkeiten;
- Etablierung geregelter Verfahren zur Erstellung, Speicherung, Veränderung und Löschung von Softwarekonfigurationseinheiten;
- Umsetzung der festgelegten Regeln, Richtlinien, Spezifikationen und Konventionen (z. B. Namenskonventionen);
- Umsetzung der besonderen Anforderungen des gesetzlichen Messwesens (z. B. keine Änderung der Software bzw. des eichpflichtigen Softwareteils bei Softwaretrennung nach Erteilung der Konformitätsbescheinigung bzw. erneuter Auftrag zur Konformitätsprüfung).

3.4 Rückverfolgbarkeit von Softwarekonfigurationseinheiten in bezüglich der Entwicklung nachgelagerter Prozessen

Basisregel 4:

Wichtige nachgelagerte Prozesse wie Archivierung, Auslieferung, Installation, Wartung und insbesondere nachträgliche Änderungen der Software müssen nachvollziehbar organisiert werden, damit die Rückverfolgbarkeit von Softwarekonfigurationseinheiten gewährleistet ist.

Zur Umsetzung dieser Regel gehören:

- Festlegung von Rechten und Verantwortlichkeiten; es muss insbesondere ein Verantwortlicher für die eichrechtlich relevante Software benannt werden (z. B. bei Konformitätsbewertungsmodul D nach MID);
- Einführung geregelter Verfahren für die

Archivierung, Auslieferung, Installation und Wartung;

- Etablierung geregelter Verfahren für Softwareänderungen ausgelieferter Software, insbesondere unter Berücksichtigung der Vorschriften des gesetzlichen Messwesens.

4. Anwendungsempfehlungen

Die Umsetzung der vier Basisregeln soll beim Hersteller der Messsysteme auf der Basis einer festgelegten und dokumentierten Strategie (Konfigurationsmanagementstrategie) erfolgen. Die Dokumentation kann in einfacher Art und Weise in Form von kurzen Niederschriften erfolgen. Sie kann aber auch systematisch mithilfe eines Konfigurationsmanagement-Plans realisiert werden [6, 7]. Wichtige Bestandteile des Plans sind die Strategie zur Produktstrukturierung, die Identifizierungsstrategie, Namenskonventionen (vgl. 3.1), die Festlegung der Informationsarten für die Statusinformation (vgl. 3.2) und die Festlegung einfacher Realisierungen der Lenkungsmaßnahmen (vgl. 3.3 und 3.4). Eine einfache rechnergestützte Implementierung des geplanten Konfigurationsmanagements kann mithilfe der üblicherweise von Rechnerbetriebssystemen bereitgestellten Dateisystemen bzw. Verzeichnisstrukturen im Rahmen von Softwareentwicklungs- und Archivierungsmitteln durchgeführt werden. Dabei werden die Konfigurationseinheiten und die zugehörigen Informationseinheiten als Dateien mit entsprechenden Dateinamen gemäß der Identifizierungsstrategie abgespeichert. Für interessierte Hersteller steht aber auch ein großes Spektrum von Softwarewerkzeugen zur Realisierung eines anspruchsvollen Softwarekonfigurationsmanagements bereit.

Referenzen

- [1] Verordnung (EG) Nr. 765/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. Juli 2008 über die Vorschriften für die Akkreditierung und Marktüberwachung im Zusammenhang mit der Vermarktung von Produkten und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 339/93 des Rates
- [2] Beschluss Nr. 768/2008/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. Juli 2008 über einen gemeinsamen Rechtsrahmen für die Vermarktung von Produkten und zur Aufhebung des Beschlusses 93/465/EWG des Rates
- [3] ISO/IEC 12207:2007, *Systems and Software Engineering – Software Life Cycle Processes*
- [4] ISO/IEC 15288:2007, *Systems Engineering – System Life Cycle Processes*

- [5] ISO 10007:2003, *Guidelines for Configuration Management*
- [6] IEEE 828:2012, *Configuration Management in Systems and Software Engineering*
- [7] SWEBOK 3.0, *The Guide to the Software Engineering Body of Knowledge*, IEEE, 2014

Ermittlung von Gasbeschaffenheitskenngrößen für Erdgas im geschäftlichen Verkehr mittels Gasnetz-Zustandsrekonstruktion

Stefan M. Sarge*

Zusammenfassung

Erdgas ist ein wesentlicher Bestandteil der Energieversorgung Deutschlands. Sein Energiegehalt ist variabel und ermittelt sich aus dem Produkt von Gasmenge und Brennwert. Neben einer direkten Messung kann eine Brennwertbestimmung auch durch konformitätsbewertete und geeichte Zustands-Rekonstruktionssysteme durchgeführt werden, ein Verfahren, was insbesondere in Transportnetzen zum Einsatz kommt. In Regionalverteilnetzen, in denen bisher das Mittelwertverfahren zur Bestimmung von Abrechnungsbrennwerten Anwendung fand, liefern Brennwert-Zuordnungsverfahren genauere und richtigere Ergebnisse. Für den Einsatz im geschäftlichen Verkehr müssen diese Systeme die Anforderungen des Mess- und Eichgesetzes erfüllen.

Einleitung

Erdgas ist ein wesentlicher Baustein im Energiekonzept der Bundesregierung. Im Jahr 2015 betrug der Anteil von Erdgas am Primärenergieverbrauch Deutschlands 21,4 % (88,6 Mrd. $\text{m}^3 \triangleq 866$ Mrd. kWh) mit steigender Tendenz. Wesentliche Bezugsquellen sind Russland (40 %), die Niederlande (29 %) und Norwegen (21 %); ein Anteil des Erdgases stammt auch aus heimischer Produktion (7 %) [1]. Ende 2015 speisten zusätzlich 190 Biogasanlagen 774 Mio. $\text{m}^3 \triangleq 8364$ Mio. kWh $\triangleq 1$ % sogenanntes Biomethan in das Erdgasnetz ein [2, S. 272]. Als weitere Quellen sind Wasserstoffeinspeiseanlagen zu nennen, von denen Ende 2016 8 Prototypanlagen existierten [3]. Zur Diversifizierung der Quellen wird auch der zunehmende Einsatz von Flüssigerdgas (*Liquefied Natural Gas*, LNG) beitragen. Deutschland ist auch Transitland für Erdgas, wesentliche Exportländer sind Tschechien, Schweiz und die Niederlande.

Erdgas wird im Wesentlichen zur Erzeugung von Wärme genutzt, wobei 42 % im Industriesektor zur Erzeugung von Prozesswärme und 38 % im Haushaltsbereich zur Beheizung und zur Warmwassererzeugung verwendet werden. Die durchschnittlichen Kosten belaufen sich dabei für einen typischen Industriekunden auf 2,77 ct/kWh [2, S. 399], für einen typischen Haushaltskunden auf 6,54 ct/kWh [2, S. 343].

Aufgrund seiner natürlichen Herkunft schwankt Erdgas in seiner Zusammensetzung. Grundsätzlich wird in Deutschland zwischen H-Gas und L-Gas unterschieden, wobei die Unterscheidung anhand der oberen Wobbe-Zahl W_s erfolgt (*high calorific value*: $13,6 \text{ kWh/m}^3 \leq W_s \leq 15,7 \text{ kWh/m}^3$ bzw. *low calorific value*: $11,0 \text{ kWh/m}^3 \leq W_s \leq 13,0 \text{ kWh/m}^3$). Der Brennwert H_s beider Erdgas-Qualitäten liegt im Bereich von $8,4 \text{ kWh/m}^3 \leq H_s \leq 13,1 \text{ kWh/m}^3$. Typische Zusammensetzungen und Eigenschaften von in Deutschland handelsfähigen Brenngasen sind in dem DVGW-Arbeitsblatt G 260 [4] aufgeführt und in Tabelle 1 wiedergegeben, zusammen mit einigen in Europa gehandelten LNG-Qualitäten [5]. Entsprechend dem Brennwert des Gases schwankt auch der Energiegehalt einer gegebenen Menge Erdgas. Daher wird in Deutschland Erdgas grundsätzlich entsprechend seinem Energiegehalt abgerechnet, der durch Multiplikation des spezifischen Energiegehalts, des Brennwertes, mit der Menge, ausgedrückt als Masse in Kilogramm oder Volumen im Normzustand in Kubikmetern, berechnet wird. Die dafür verwendeten Messgeräte und Rechenverfahren unterliegen dem gesetzlichen Messwesen (Mess- und Eichgesetz (MessEG) [6] sowie Mess- und Eichverordnung (MessEV) [7]). Als Besonderheit für den Bereich Brenngase ist zu erwähnen, dass entsprechend § 25 Abs. 4 der MessEV bei der Bestimmung des Energiegehalts einer Erdgasmenge auf die Messung verzichtet werden kann,

* Dr. Stefan M. Sarge, Arbeitsgruppe 3.31 "Kalorische Größen", E-Mail: stefan.sarge@ptb.de

Tabelle 1:
Zusammensetzung
und Eigenschaften
verschiedener Erd-
gase in Deutschland
und Europa [4, 5]

Bezeichnung	Symbol	Einheit	Russland Erdgas H	Nordsee- Erdgas H	Dänemark Erdgas H	Holland Erdgas L
Methan	$x(\text{CH}_4)$	% (mol/mol)	96,96	88,71	90,07	83,64
Stickstoff	$x(\text{N}_2)$	% (mol/mol)	0,86	0,82	0,28	10,21
Kohlenstoffdioxid	$x(\text{CO}_2)$	% (mol/mol)	0,18	1,94	0,6	1,68
Ethan	$x(\text{C}_2\text{H}_6)$	% (mol/mol)	1,37	6,93	5,68	3,56
Propan	$x(\text{C}_3\text{H}_8)$	% (mol/mol)	0,45	1,25	2,19	0,61
Butane	$x(\text{C}_4\text{H}_{10})$	% (mol/mol)	0,15	0,28	0,9	0,19
Pentane	$x(\text{C}_5\text{H}_{12})$	% (mol/mol)	0,02	0,05	0,22	0,04
Hexane	$x(\text{C}_6\text{H}_{14})$	% (mol/mol)	0,01	0,02	0,06	0,07
Sauerstoff	$x(\text{O}_2)$	% (mol/mol)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Gesamtschwefel	$w(\text{S})$	mg/m ³	<3	<5	<3	<3
Brennwert	H_s	kWh/m ³	11,2	11,6	12,1	10,2
Normdichte	ρ_n	kg/m ³	0,74	0,81	0,81	0,83
Wobbeindex	W_s	kWh/m ³	14,8	14,7	15,3	12,8
Methanzahl	N_{MZ}	1	90	79	72	88

wenn der Energiegehalt auf der Basis anerkannter Regeln der Technik berechnet wird. Diese Erweiterung trägt dem Umstand Rechnung, dass der Brennwert eines Gases aus Kostengründen in aller Regel nicht beim Endverbraucher gemessen wird, sondern an repräsentativen Stellen innerhalb eines Verteilnetzes, und der Abrechnungsbrennwert durch mengengewichtete Mittelung oder durch Zuordnung bestimmt wird [8].

Klassische Verfahren der Brennwertbestimmung

Klassische Messgeräte zur Bestimmung des Brennwertes von Erdgasen sind Gaskalorimeter [9] und Gaschromatographen [10]. Andere Messgeräte beruhen auf dem ungefähr linearen Zusammenhang des Brennwertes eines Erdgases mit der für die Verbrennung notwendigen Sauerstoffmenge, sogenannte stöchiometrische Brennwertmessgeräte [11] oder nutzen zur Brennwertbestimmung sonstige Korrelationen zwischen dem Brennwert des Erdgases und seinen thermophysikalischen Eigenschaften, sogenannte korrelative Brennwertmessgeräte [12]. Die Eichfehlergrenze für Brennwertmessgeräte

beträgt 0,8 % vom Messbereichsendwert, die Verkehrsfehlergrenze 1,6 %; bezogen auf die üblicherweise gehandelten Gasqualitäten entspricht dies ca. 1 % bzw. 2 % vom Messwert. Die Eichgültigkeitsdauer dieser Geräte beträgt ein Jahr. Moderne Brennwertmessgeräte wie beispielsweise Gaschromatographen bestimmen neben dem Brennwert weitere Kenngrößen des Gases, z. B. die Dichte im Normzustand oder die Zusammensetzung. Auch diese Größen unterliegen der Eichpflicht [13]. In diesem Fall spricht man generell von Gasbeschaffenheitsmessgeräten. Die folgenden Darlegungen gelten für Gasbeschaffenheitsmessgeräte im Allgemeinen und Brennwertmessgeräte im Besonderen.

Werden in ein Versorgungsgebiet Brenngase eingespeist, die sich im Mittel im Brennwert nur wenig unterscheiden (Abweichung des mengengewichteten mittleren Brennwertes von den mittleren Einspeisebrennwertes < 2 % während der Abrechnungszeitspanne), kann zur Bestimmung des Brennwertes an einem beliebigen Ausspeisepunkt das Mittelwertverfahren nach DVGW-Arbeitsblatt G 685 [8] angewendet werden.

	Deutschland Erdgas L	Biomethan H	Biomethan H + LPG	Libyen LNG (reich)	Nigeria LNG (mittel)	Ägypten LNG (mager)
	86,46	96,15	90,94	81,57	91,28	97,7
	10,24	0,75	0,69	0,69	0,08	0,08
	2,08	2,9	2,68			
	1,06			13,38	4,62	1,8
	0,11		5	3,67	2,62	0,22
	0,03		0,5	0,69	1,4	0,2
	0,01					
	0,01					
	<0,001	0,2	0,19			
	<3	<3	<3			
	9,8	10,6	11,6	12,9	12,2	11,3
	0,81	0,76	0,83	0,86	0,81	0,83
	12,4	13,9	14,5	15,8	15,5	15
	97	102	76	65	71	92

Brennwertbestimmung mittels Gasnetz-Zustandsrekonstruktion

Aufgrund der zunehmenden Einspeisung von Biogas und anderen Erdgasen in Transport- und Regionalverteilnetze ist die bereits genannte Voraussetzung immer seltener gegeben. In diesen Fällen muss entweder der Brennwert des zugepeisten Gases durch Zumischung von Flüssiggas oder Luft angepasst oder der Brennwert für jeden Ausspeisepunkt bestimmt werden. Um den gerätetechnischen und damit finanziellen Aufwand zu minimieren, werden zur Brennwertbestimmung zunehmend mathematische Verfahren eingesetzt, die auf der Basis einer Zustandsrekonstruktion des Gasnetzes die Berechnung des Brennwertes einer Gasportion für jeden Ausspeisepunkt und jeden Zeitpunkt erlauben. Hierbei unterscheidet man zwischen Brennwert-Rekonstruktionsverfahren und Brennwert-Zuordnungsverfahren bzw., als konkrete Ausgestaltung, den entsprechenden Systemen.

Zuordnungssysteme stellen eine Variante von Abrechnungsverfahren nach DVGW-Arbeitsblatt G 685 [8] dar. Sie werden vorzugsweise in Regi-

onalverteilnetzen angewandt, insbesondere in Verbindung mit Biogaseinspeiseanlagen, um die aufwendige und teure Konditionierung des Biogases auf den mittleren Brennwert des Versorgungsgebietes zu reduzieren oder zu vermeiden.

Bei beiden Verfahren werden an den Einspeisestationen die Volumenströme und die zu ermittelnden Gasbeschaffenheiten, insbesondere Brennwert, Dichte im Normzustand und Stoffmengenanteil Kohlendioxid, grundsätzlich geeicht gemessen. Innerhalb jedes hydraulisch abgeschlossenen Netzabschnittes wird zusätzlich mindestens an einer Stelle der Gasdruck gemessen. Weiterhin werden die Ausspeisemengen bestimmt, dies geschieht bei Rekonstruktionssystemen grundsätzlich über eine geeichte Volumenstrommessung, bei Zuordnungsverfahren auch über Standardlastprofile der angeschlossenen Verbraucher [14]. Die Geometrie und Topologie des Gasnetzes wird durch Leitungslängen, Rohrrinnendurchmesser, Rohrrauhigkeiten, geodätische Höhen, Schieberstellungen, Druckregler, Kompressorstationen etc. beschrieben. Mit diesen Daten und einem mathematischen Modell des Rohrleitungsnetzes wird durch Lösung des resultierenden Systems von

Differentialgleichungen der Gasfluss innerhalb des Netzes berechnet [15]. Selbstverständlich müssen die Erhaltungssätze für Masse, Energie und Impuls sowie das Zustandsverhalten des Gases Berücksichtigung finden.

Aufgrund der relativ geringen Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb des Gasnetzes lassen sich die Gasströmungen im Allgemeinen quasistationär berechnen, was zu einer erheblichen Vereinfachung des Differentialgleichungssystems führt und für große Gasnetze überhaupt erst eine Zustandsrekonstruktion ermöglicht.

Die Eingangsdaten sind im Allgemeinen mit Unsicherheiten oder Fehlern behaftet, insbesondere ist die Rohrrauigkeit oft nur mit großer Unsicherheit bekannt. Auch treten aufgrund der endlichen Genauigkeit der für die Mengemessung verwendeten Messgeräte Abweichungen in der Mengenbilanz des Gasnetzes auf oder sind bei der Verwendung von Standardlastprofilen zur Ermittlung der Verbrauchsmengen sogar unvermeidlich. Durch Anpassung der berechneten an die gemessenen Drücke werden die unbekannt Parameter eliminiert bzw. die Fehlmengen ermittelt.

Um mit den berechneten Strömungsdaten Gasbeschaffenheiten berechnen zu können, wird bei einem weitverbreiteten System [16–18] ein sogenanntes „Gasstangenmodell“ angewandt. Dabei wird einer Gasportion beim Durchströmen der Einspeisestelle der gemessene Brennwert und ggf. weitere Gasbeschaffenheiten zugeordnet. Ändert sich nun diese Gasbeschaffenheit um eine vorgegebene Größenordnung, wird dies als Ende der einen und Beginn einer neuen „Gasstange“ interpretiert. Diese Gasstangen werden nun entsprechend der bekannten Strömungsgeschwindigkeiten im Netz verschoben. Treffen an einem Knoten verschiedene Gasstangen aufeinander und mischen sich miteinander, entstehen neue „Gasstangen“, die in gleicher Weise weiterfließen.

In einem anderen System [19–21] werden nach der Berechnung des Strömungszustandes für jede Ausspeisestelle die ausgespeisten Gasportionen rückwärts durch das Netz bis zu den Einspeisestellen verfolgt. Dadurch kann für jede Ausspeisestelle der jeweilige Anteil der eingespeisten Gase bestimmt werden und somit dem ausgespeisten Gas in einem Rechenschritt jede an den Einspeisestellen gemessene Gasbeschaffenheit zugeordnet werden.

Andere Realisierungen der Strömungsberechnung zur Zustandsrekonstruktion und der Gasbeschaffenheitsermittlung, z. B. SIMONE [22–24], *Synergi Pipeline Simulator* (früher bekannt als *Stoner SPS*) [25], STANET [26] oder MYNTS [27–28] haben – mit Ausnahme von SIMONE – in Deutschland im Bereich des gesetzlichen Messwesens bisher keine Anwendung erfahren.

Anforderungen des gesetzlichen Messwesens

Der erste Einsatz eines Brennwert-Rekonstruktionssystems im geschäftlichen Verkehr erfolgte 1987 bei der damaligen Ferngas Salzgitter GmbH auf der Basis einer Genehmigung des Systems als „Überwachungspflichtige Datenverarbeitungsanlage“ durch die niedersächsische Eichbehörde unter maßgeblicher Beteiligung der PTB [29].

Mess- und Eichgesetz bzw. Mess- und Eichverordnung geben heute den grundsätzlichen Rahmen für die Behandlung von Zustands-Rekonstruktionssystemen vor. Da für derartige Systeme keine harmonisierten Normen oder sonstige normative Dokumente existieren, hat der Regelermittlungsausschuss (§46 MessEG) die PTB-Anforderungen 7.64 [30], die PTB-Prüfregel Bd. 28 [31] sowie das DVGW-Arbeitsblatt G 685 [8] als geeignet identifiziert, um die wesentlichen Anforderungen an Rekonstruktionssysteme zu konkretisieren, zu ergänzen und zu prüfen und die Pflichten von Personen näher zu bestimmen, die derartige Systeme oder davon gelieferte Messergebnisse verwenden.

Rekonstruktionssysteme werden als Messgeräte im Sinne des Mess- und Eichgesetzes aufgefasst und unterliegen folglich seinen Anforderungen, d. h. diese Rekonstruktionssysteme werden vor dem Inverkehrbringen einer Konformitätsbewertung unterzogen und unterliegen der permanenten Überwachung durch die Eichbehörden. Bei der Konformitätsbewertung werden diese Rekonstruktionssysteme auf Einhaltung der wesentlichen Anforderungen des Mess- und Eichgesetzes geprüft (§7 MessEV):

- Einhaltung der Fehlergrenzen
- Eignung, Zuverlässigkeit und Messbeständigkeit
- Schutz gegen Verfälschungen von Messergebnissen
- geeignete Darstellung und sichere Verarbeitung der Messergebnisse
- Prüfbarkeit

Die PTB-Anforderungen 7.64 [30] interpretieren und detaillieren diese grundsätzlichen Anforderungen und bilden die Basis für alle in Deutschland im geschäftlichen Verkehr eingesetzten Brennwert- oder Gasbeschaffenheits-Rekonstruktionssysteme.

Die Konformitätsbewertung eines Zustands-Rekonstruktionssystems ist immer an das konkrete Netz des jeweiligen Gastransport-Unternehmens gebunden, eine allgemein übertragbare Konformi-

tätsbewertung eines Zustands-Rekonstruktionsverfahrens ist aufgrund der fehlenden Prüfbarkeit nicht möglich.

Die grundsätzlichen metrologisch relevanten Bestandteile jedes Rekonstruktionssystems lassen sich in drei Kategorien einteilen: Messinfrastruktur, Rohrnetz und Programmsystem. Im Einzelnen sind dies:

- Messinfrastruktur
 - ▷ geeichte Messgeräte zur Ermittlung der Volumenströme an den Ein- und den Ausspeisestellen des Netzes
 - ▷ geeichte Messgeräte zur Ermittlung der Gasbeschaffenheit an den Einspeisestellen
 - ▷ geeichte Messgeräte (Referenzmessgeräte) oder anerkannte Probenehmer zur Richtigkeitsprüfung an rechentechnisch kritischen Stellen des Netzes (Misch- oder Pendelzonen)
 - ▷ geeichte oder rückführbar kalibrierte Messgeräte zur Ermittlung von Drücken, Temperaturen oder Volumenströmen innerhalb des Netzes
 - ▷ Messwertregistriergeräte zur Zwischenspeicherung der Messwerte in einer Messstation
 - ▷ sichere und richtige Datenübertragungswege für die Übertragung der Messwerte von der Station in die Zentrale
- Geometrie und Topologie des Rohrnetzes
 - ▷ Leitungslängen
 - ▷ Rohrinneindurchmesser
 - ▷ Rohrrauigkeiten
 - ▷ geodätische Höhen
 - ▷ Schieberstellungen
 - ▷ Ventilstellungen
 - ▷ Druckregler
 - ▷ Kompressorstationen
- Programmsystem mit den Modulen
 - ▷ Übertragung eichtechnisch relevanter Daten
 - ▷ Ver- und Entschlüsselung

- ▷ Speicherung eichtechnisch relevanter Daten
- ▷ Berechnung von eichtechnischen Prüfzahlen oder Signaturen
- ▷ Ersatzwertbildung zur Eliminierung fehlender oder offensichtlich falscher Werte
- ▷ Zustandsrekonstruktion
- ▷ Gasbeschaffenheitsermittlung
- ▷ Darstellung eichtechnisch relevanter Daten
- ▷ Speicherung und Übertragung von abrechnungsrelevanten Daten
- ▷ Interaktion und Kommunikation mit nicht eichpflichtiger Software

Die Computer-Hardware ist kein metrologisch relevanter Bestandteil eines Rekonstruktionssystems. Aufgrund der Anforderungen der EU an sicherheitskritische Infrastrukturbetriebe kann davon ausgegangen werden, dass die üblichen Verfahren für einen sicheren IT-Betrieb [32], und dies schließt das Dispatching und damit die Messinfrastruktur des Gasnetzes ein, eingehalten werden.

Durch den Einsatz geeichter Messtechnik sind im Allgemeinen die notwendigen Anforderungen an die Messinfrastruktur – mit Ausnahme der Datenübertragung – erfüllt. Für eine sichere und richtige Datenübertragung ist eine kryptografische Sicherung nach modernen Verfahren die Methode der Wahl. Eine weitere, allerdings nur theoretische Möglichkeit ist die Eichung des vollständigen Datenpfades, d. h. einschließlich aller Übertragungsendgeräte und Leitungen. Alternativ zu diesen zwei bevorzugten Verfahren kommen in der Praxis auch Verfahren zum Einsatz, bei denen durch eine doppelte Datenübertragung entweder auf zwei physikalisch getrennten Wegen oder zeitlich getrennt eine vergleichbare Sicherheit wie im ersten Fall erreicht wird.

Die Anforderungen an die Software entsprechen dem damals (1999) im Entwurf vorliegenden WELMEC-Guide 7.2 [33]. Sie aber auch heute noch aktuell sind und betreffen

- Trennung von eichpflichtiger und nicht-eichpflichtiger Software
- Rückwirkungsfreiheit der Schnittstellen
- Vollständigkeit und Identifikation gespeicherter oder übertragener Daten
- Schutz der Programme und Daten gegen unzulässige Beeinflussung

- Software-Modifikationen
- Sicherung gegen Austausch von Programmen nach der Eichung
- Kennzeichnung der eichtechnisch relevanten Präsentation
- Überprüfung der Konformität mit dem Baumuster

Software-Modifikationen sind erlaubt, solange die Dokumentation der zugelassenen Software ihre Gültigkeit behält.

Zuordnungssysteme werden nicht als Messgeräte im Sinne des Mess- und Eichgesetzes aufgefasst und unterliegen somit nicht der Konformitätsbewertung und Eichung, jedoch der Markt- und Verwendungsüberwachung durch die Eichbehörden. Zur Sicherung der Einheitlichkeit des gesetzlichen Messwesens (§45 MessEG) unterstützt die PTB die Eichbehörden während der Einrichtung und Inbetriebnahme derartiger Systeme.

Tabelle 2 listet die wesentlichen Unterschiede zwischen Rekonstruktionsverfahren und Zuordnungsverfahren auf.

Sicherstellung der Messrichtigkeit

Die Messrichtigkeit eines jeden Zustands-Rekonstruktions- oder Gasbeschaffenheits-Zuordnungssystems ist ausschlaggebend für die Akzeptanz dieser Verfahren durch die Konformitätsbewertungsstellen und insbesondere die Verbraucher. Dies wird abweichend von gewöhnlichen geeichten Messgeräten hier durch eine permanente Überwachung mittels Referenzmessgeräten sichergestellt. Während des Konformitätsbewertungsprozesses werden kritische Stellen des Netzes identifiziert, wo sich aufgrund der zu erwartenden Gasflüsse Misch- oder Pendelzonen ausbilden, und Messungen mit geeichten Gasbeschaffenheitsmessgeräten oder Probenahmen mit anschließender Laboranalyse durchgeführt. Im Regelbetrieb dienen diese Messstellen, eventuell in der Anzahl verringert, der per-

Tabelle 2: Wesentliche Unterschiede zwischen Rekonstruktions- und Zuordnungsverfahren

	Rekonstruktionsverfahren	Zuordnungsverfahren
gesetzliche Grundlage	MessEG und MessEV	MessEG und §25 MessEV in Verb. mit DVGW Arbeitsblatt G 685
Prüfung	Konformitätsbewertung nach MessEG, MessEV und PTB-A 7.64	Prüfung auf Einhaltung der wesentlichen Anforderungen
Überwachung	jährlich durch Eichung auf Basis PTB-Prüfregel Bd. 28	im Rahmen der Markt- und Verwendungsüberwachung
Fehlergrenze (für Brennwert)	Eichfehlergrenze entsprechend MessEV (0,8 % v.E.), Verkehrsfehlergrenze 1,6 % v.E.	1 % während der Prüfung, 2 % im Betrieb
Fehlergrenze (für sonstige Messgrößen)	entsprechend MessEV	entsprechend Anwendungsfall individuelle Unsicherheitsbetrachtung
zeitliche Auflösung der Eingangsgroßen	3 bis 60 Minuten	
zeitliche Auflösung der Ausgangsgroßen	1 Tag	1 Monat
Datenversorgung	grundsätzlich geeichte Messgeräte	geeichte Messgeräte, ggf. werden Volumina über Standardlastprofile (SLP) nachgebildet
Manipulationsschutz (gegen beabsichtigte und unbeabsichtigte Manipulationen)	anerkannte Verfahren zur sicheren und richtigen Datenübertragung und Datenhaltung	bei manuell gesteuerter Datenübertragung und -haltung durch organisatorische Maßnahmen (Arbeitsanweisungen)
Richtigkeitsprüfung	kontinuierlich durch Referenzmessgeräte, ggf. Probenahmen	diskontinuierlich durch Probenahmen und mathematische Verfahren der Unsicherheitsermittlung oder kontinuierlich durch Referenzmessgeräte
Kaskadierung	nein	nein, jedoch als Eingangsgroßen auch Ergebnisse aus Rekonstruktionssystemen zulässig

manenten Überwachung. Referenzmessgeräte sind nach PTB-Anforderung 7.64 Messgeräte, deren Ergebnisse nicht in die Rekonstruktion einfließen dürfen. Die Praxis mancher Gastransport-Unternehmen, einen offline-Vergleich zwischen Rekonstruktionsergebnissen und Ergebnissen der Referenzmessungen durchzuführen und unter Variation von Eingangsparametern die Rekonstruktion so oft zu wiederholen, bis Übereinstimmung erzielt wird, ist daher kritisch und als geeignet zu sehen, das Vertrauen in diese nun seit 30 Jahren bewährte Technik zu erschüttern. Die Konformitätsbewertungsstellen begegnen diesem Trend durch zusätzliche Auflagen für Probenahmen oder den Einsatz eines mobilen Gasbeschaffenheitsmessgerätes ohne Datenanbindung an die Zentrale, wobei die Wahl der Probenahme- bzw. Mess-Orte und -zeiten im alleinigen Ermessen der Eichbehörde liegt. Dies erlaubt zudem eine flexible und zeitnahe Anpassung von Referenzmessorten an geänderte Fließzustände im Gasnetz, welche zum Zeitpunkt der Konformitätsbewertung nicht abzusehen waren. Moderne Verfahren der Unsicherheitsermittlung auf der Basis von Monte-Carlo-Simulationen, die in die entsprechenden Rekonstruktions- bzw. Zuordnungssysteme implementiert sind [21], unterstützen die Konformitätsbewertungsstellen und Eichbehörden bei dieser Wahl.

Ausblick

Brennwert- und Gasbeschaffenheits-Rekonstruktionsverfahren sind etablierte Verfahren in der Gaswirtschaft. Nachdem über viele Jahre der Entwicklungsfokus auf inkrementellen Verbesserungen der Anwendbarkeit und Leistungsfähigkeit lag, werden seit wenigen Jahren verstärkte Forschungsanstrengungen durchgeführt, um den Einsatz dieser Systeme auch in Regionalverteilnetzen – insbesondere in Verbindung mit einer Biogaseinspeisung – zu ermöglichen und das Mittelwertverfahren nach DVGW-Arbeitsblatt G 685 [8] durch Brennwert-Zuordnungsverfahren ersetzen zu können. Die Herausforderung liegt hierbei in dem Umstand begründet, dass die messtechnische Ausstattung auf der Regionalverteilnetzebene im Allgemeinen nicht vollständig ist, also unter-instrumentierte Netze vorliegen. Insbesondere sind nicht alle Ausspeisestellen mit geeichten (oder ungeeichten) Volumensmessanlagen ausgerüstet. In diesem Fall werden die Abnahmemengen aus Standardlastprofilen gebildet, wobei das Verbrauchsverhalten der angeschlossenen Verbraucher aus dem Vorjahresverbrauch, den aktuell herrschenden Temperaturen und einer typischen Verbrauchskennlinie ermittelt wird [14]. Abweichungen in der Mengenbilanz werden über die Druckmessungen ausgeglichen, wobei in Abhängigkeit von der Konstruktion des Zuordnungssystems eine Aufteilung auf die verschiedenen

Ausspeisestellen auf der Basis der Unsicherheit und proportional zu den SLP-Mengen der jeweiligen Ausspeisestellen erfolgt [19] oder die Fehlmenge durch Einsatz eines Knotenlastbeobachters gleichmäßig auf alle Ausspeisestellen verteilt wird [34, 35]. In seiner erweiterten Form nutzt der Knotenlastbeobachter das Vorzeichen der Druckabweichung, um einzelnen Ausspeisestellen positive oder negative Fehlmengen bzw. keine Fehlmenge aufzuprägen, wenn die Druckabweichung innerhalb der Messunsicherheit des Drucksensors liegt [36, 37].

Das dem Eichrecht bisher eher fernliegende Konzept der Messunsicherheit, das in der Metrologie längst anerkannt ist [38], findet zunehmend auch im Bereich der Gasnetz-Zustandsrekonstruktion Anwendung. Aufgrund der Komplexität der Systeme ist eine analytische Messunsicherheitsabschätzung in aller Regel nicht möglich, daher wird hier das Verfahren der Monte-Carlo-Simulation [39] bevorzugt. Voraussetzung ist dennoch ein leistungsfähiger Rechenalgorithmus zur Lösung des Differentialgleichungssystems, um in endlichen Zeiten eine große Anzahl von Rekonstruktionsläufen unter Variation der Eingangsparameter durchführen zu können. Damit wird die Unsicherheit der berechneten Brennwerte bzw. der weiteren Gasbeschaffenheitsgrößen an jeder Ausspeisestelle relativ zu einem Referenzszenario berechnet. Erhöhte Unsicherheiten treten in den Netzbereichen auf, in denen die Strömungsgeschwindigkeiten besonders gering sind, intensive Misch- und Pendelzonen existieren oder Topologiedaten, z. B. Schieberstellungen, fehlerhaft sind [21, 40]. Der Modellfehler, d. h. die Richtigkeit der Zustandsrekonstruktion, lässt sich durch eine derartige Monte-Carlo-Simulation nicht quantifizieren, die Richtigkeit ist weiterhin im Rahmen der Konformitätsbewertung und im Regelbetrieb durch Referenzmessungen nachzuweisen. Jedoch liefern die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation den Konformitätsbewertungsstellen und den Eichbehörden Hinweise auf kritische Stellen innerhalb des Gasnetzes und ermöglichen damit eine zielgerichtete Probenahme bzw. Referenzmessung an aussagekräftigen Orten.

Mittelfristig werden die zur Zeit verwendeten Verfahren zur Sicherstellung einer sicheren und richtigen Datenübertragung, die teilweise auf jahrzehntealten Konzepten beruhen, durch moderne kryptografische Verfahren für Datensicherheit und Datenschutz abgelöst werden. Entscheidend dafür sind die Vorgaben des Gesetzgebers zur „Digitalisierung der Energiewende“ [41], der für SLP-Kunden ab 2017 und für RLM-Kunden (Großabnehmer, die eine registrierende Leistungsmessung (RLM) vorhalten müssen) ab 2025 Kommunikationswege mit dem Smart-Meter-Gateway unter Berücksichtigung der Anforderungen des Bundesamtes für Sicherheit in der Informationstechnik [42] vorsieht.

Der künftige Einsatz von kommunikativen Zählern auch bei SLP-Kunden wird eine Verringerung der Unsicherheit der SLP-Mengen nach sich ziehen und den Einsatz von Rekonstruktions- und Zuordnungsverfahren in Regionalverteilnetzen befördern und ihre Unsicherheit verringern. Ortsverteilnetze werden sich trotz dieser Entwicklungen in der näheren Zukunft einer Zustandsrekonstruktion entziehen. Ursache dafür sind die hier vorliegenden extrem stark vermaschten Netze, die niedrigen Druckunterschiede und die geringen Fließgeschwindigkeiten in Kombination mit ungenauen oder fehlenden Daten für die Netztopologie und -geometrie. Daher werden viele Haushaltskunden auch in Zukunft über das Mittelwertverfahren abgerechnet werden und in Abhängigkeit von ihrem Verbrauchsverhalten, ihrer Lage im Ortsnetz, den zeitlichen Schwankungen der eingespeisten Gasqualitäten und den an unterschiedlichen Stellen des Ortsnetzes eingespeisten Gasqualitäten Unsicherheiten bei der Bestimmung ihres Energieverbrauchs hinnehmen müssen.

Die bisherige Praxis der Konformitätsbewertung von Gasbeschaffheits-Rekonstruktionssystemen als integrale Einheit eines Programmsystems und einer bestimmten Netztopologie ist im Zeitalter der Liberalisierung der Energiemärkte und immer schneller aufeinander folgender Innovationen an ihre Grenzen gestoßen. Als Antwort auf diese Herausforderungen entwickelt die PTB zur Unterstützung ihrer Konformitätsbewertungsstelle zurzeit Strategien und Werkzeuge, die eine Übertragung der Prüfergebnisse von einem Gasnetz auf ein anderes erlauben sollen. Wesentliche Bausteine dafür werden eine Referenzimplementierung eines vollständig validierten Rekonstruktionsalgorithmus sowie ein Referenzdatensatz zur Beschreibung eines messtechnisch vollständig ausgerüsteten Gasnetzes mit typischen Strömungsszenarien sein.

Referenzen

- [1] *Versorgungssicherheit bei Erdgas*. Monitoring-Bericht nach § 51 EnWG, Hrsg.: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), S. 8–11, Berlin, 2016
- [2] *Monitoringbericht 2016*, Hrsg.: Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, Bonn, 2016
- [3] *Potenzialatlas Power to Gas*, Hrsg.: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), S. 96–103, Berlin, 2016
- [4] Technische Regel – *Arbeitsblatt DVGW G 260 (A) (03/2013) Gasbeschaffheit*, Bonn, DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.
- [5] Klaus Altfeld, Peter Schley: *Development of natural gas qualities in Europe*, gwf international (2/2011), 2–8
- [6] *Gesetz über das Inverkehrbringen und die Bereitstellung von Messgeräten auf dem Markt, ihre Verwendung und Eichung sowie über Fertigpackungen* (Mess- und Eichgesetz – MessEG) vom 25. Juli 2013 (Bundesgesetzblatt 2013 Teil I Nr. 43, S. 2722)
- [7] *Verordnung über das Inverkehrbringen und die Bereitstellung von Messgeräten auf dem Markt sowie über ihre Verwendung und Eichung* (Mess- und Eichverordnung – MessEV) vom 11. Dezember 2014 (Bundesgesetzblatt 2014 Teil I Nr. 58, S. 2010)
- [8] Technische Regel – *Arbeitsblatt DVGW G 685 (11/2008) Gasabrechnung*, Bonn: DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.
- [9] C. G. Hyde, M. W. Jones: *Gas Calorimetry*, 2nd ed., London: Ernest Benn, 1960
- [10] Bert Anders: *15 Jahre Brennwert- und Normdichtebestimmung mittels Gaschromatographie im gesetzlichen Messwesen*, gwf Gas Erdgas 147 (2006) 663–672
- [11] William H. Vander Heyden: *Energy measurement is reaching for real-time performance*, Pipe Line Industry, 76 (1993) 31–36
- [12] Peter Schley, Martin Uhrig, Klaus Altfeld: *Moderne Gasmesssysteme – Innovative Gasbeschaffheitsmessung*, gwf Gas Erdgas 144 (2003) 616–620
- [13] *Anforderungen an Geräte zur Bestimmung der Gasbeschaffheit*, PTB-Mitt. 118 (2008) 19–20
- [14] Mark Hellwig: *Entwicklung und Anwendung parametrisierter Standard-Lastprofile*, Dissertation, Technische Universität München, 2003
- [15] Hans-Burckhard Horlacher, Horst-Joachim Lüdecke: *Strömungsberechnung für Rohrsysteme*, 3. Auflage, Renningen: expert Verlag, 2012
- [16] Andreas Weimann: *Modellierung und Simulation der Dynamik von Gasverteilnetzen im Hinblick auf Gasnetzführung und Gasnetzüberwachung*, Dissertation, Technische Universität München, 1978
- [17] Gerhard Lappus: *Analyse und Synthese eines Zustandsbeobachtersystems für große Gasverteilnetze*, Dissertation, Technische Universität München, 1983
- [18] Eckart Herr, Dietmar Scheibe, Peter Schröder, Karl-Friedrich Voss, Andreas Weimann: *Rechnergestützte Zuordnung von an den Einspeisepunkten eines Ferngasnetzes vorgenommenen Brennwertmessungen zu den an Übergabestationen entnommenen Gasmengen*, gwf Gas Erdgas 124 (1983) 157–164
- [19] Peter Schley, Joachim Schenk, Andreas Hielscher: *Brennwertverfolgung in Verteilnetzen. Teil 1 – Entwicklung und Validierung des Verfahrens*, gwf Gas Erdgas 152 (2011) 552–556
- [20] Joachim Schenk, Peter Schley, Andreas Hielscher, Cesareo Fernandez, Stephan Mäurer: *Brennwertverfolgung in Verteilnetzen. Teil 2 – Auswertung Feldversuch und Implementierung*, gwf Gas Erdgas 152 (2011) 676–683
- [21] Andreas Hielscher, Christian Fiebig, Peter Schley, Roland Span, Joachim Schenk: *Brennwertverfolgung mit SmartSim – ein neuer Rechenkern zur Strömungssimulation*, gwf Gas Erdgas 155 (2014) 736–743

- [22] Jaroslav Králík, Petr Stiegler, Zdeněk Vostrý, Jiří Závorka: *Modeling the Dynamics of Flow in Gas Pipelines*, IEEE Trans. Systems, Man, Cybernetics 14 (1984) 586–596
- [23] Jaroslav Králík, Petr Stiegler, Zdeněk Vostrý, Jiří Závorka: *A Universal Dynamic Simulation Model of Gas Pipeline Networks*, IEEE Trans. Systems, Man, Cybernetics 14 (1984) 597–606
- [24] www.liwacom.de (Letzter Zugriff am 17.02.2017)
- [25] <https://www.dnvgl.com/services/analyse-pipeline-design-and-performance-synergi-pipeline-simulator-5376> (Letzter Zugriff am 17.02.2017)
- [26] www.stafu.de (Letzter Zugriff am 17.02.2017)
- [27] Tanja Clees: *MYNTS – ein neuer multi physikalischer Simulator für Gas, Wasser und elektrische Netze*, Energie-Wasser Praxis (09/2012) 174–175
- [28] <https://www.scai.fraunhofer.de/en/business-research-areas/high-performance-analytics/products/mynts.html> (Letzter Zugriff am 17.02.2017)
- [29] Wolfgang Struck: *Betriebserfahrungen mit dem GANPRODA-System zur Ermittlung von Abrechnungs-Brennwerten*, gwf Gas Erdgas 134 (1993) 133–140
- [30] PTB-Anforderungen 7.64 (12/99), *Messgeräte für Gas. Brennwertmessgeräte. Ermittlung von Abrechnungsbrennwerten und weiteren Gasbeschaffenheitsdaten mittels Zustandsrekonstruktion*, Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt
- [31] PTB Prüfregeln Band 28, *Messgeräte für Gas – Brennwertmessgeräte – Ermittlung von Abrechnungsbrennwerten und weiteren Gasbeschaffenheitsdaten mittels Zustandsrekonstruktion*, Braunschweig und Berlin: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 2000
- [32] IT-Sicherheitskatalog gemäß § 11 Absatz 1a Energiewirtschaftsgesetz, Berlin: Bundesnetzagentur, 2015
- [33] WELMEC Guide 7.2, *Software Guide (Measuring Instruments Directive 2004/22/EC)*, Hrsg.: WELMEC Sekretariat, Wien, 2005
- [34] Cathrin Schröder: *Prozessbegleitende Simulation von regionalen Gasverteilnetzen mit unvollständiger Messinfrastruktur durch Einsatz eines Knotenlastbeobachters*, Dissertation, Technische Universität Clausthal, 2009
- [35] Torsten Hermann Hager: *Prozessbegleitende Erdgasverteilnetzsimulation mit vorgesteuertem Knotenlastbeobachter bei unvollständiger Messinfrastruktur (ProGasSim)*, Dissertation, Technische Universität Clausthal, 2013
- [36] H. P. Beck, E.-A. Wehrmann, A. Bentaleb, R. Kessel: *Fehlerfortpflanzung bei nacheinander geschalteten Netzen, Weiterentwicklung und metrologische Validierung von Messnetzen und Rekonstruktionssystemen für die Gasversorgung (MetroGas)*, Bonn: DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., 2014
- [37] Hans Peter Beck, Ernst-August Wehrmann, Abdelhamid Bentaleb: *Untersuchung zur Brennwertverfolgung in Gasverteilnetzen mit unvollständiger Messinfrastruktur*, DVGW energie wasser-praxis (04/2015) 50–53
- [38] JCGM 100:2008, *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement*, Paris: Bureau International des Poids et Mesures
- [39] JCGM 101:2008, *Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Propagation of distributions using a Monte Carlo method*, Paris: Bureau international des poids et mesures
- [40] R. Kessel, K. D. Sommer: *Uncertainty Evaluation for Quality Tracking in Natural Gas Grids*, in: Measurement 2013, Proceedings of the 9th International Conference on Measurement, Smolenice, Slovakia, 27–30 May 2013, Hrsg.: Ján Maňka, Viktor Witkovský, Milan Tyšler, Ivan Frollo, Bratislava: Institute of Measurement Science, Slovak Academy of Sciences, 2013, S. 3–8
- [41] *Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende vom 29. August 2016* (Bundesgesetzblatt 2016, Teil I, Nr. 43., S. 2034)
- [42] BSI TR-03109:2015, *Technische Vorgaben für intelligente Messsysteme und deren sicherer Betrieb Version 1.0.1*, Berlin: Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik

Entwicklungen in der Fertigungsmesstechnik für die Industrie 4.0

Karin Kniel¹, Matthias Franke¹, Klaus Wendt¹, Frank Härtig², Daniel Hagedorn³, Stephan Metschke³, Frank Schmaljohann³, Frank Löffler³, Uwe Brand⁴, Ludger Koenders⁴, Dorothee Hüser⁵, Harald Bosse⁵

1. Einleitung

Die Bundesregierung hat das Thema „Industrie 4.0“ als wesentlichen Schwerpunkt in einer der sechs priorisierten Zukunftsaufgaben „Digitale Wirtschaft und Gesellschaft“ in ihrer Hightech-Strategie von 2014 identifiziert [1]. Gemäß BMBF ist das „Zukunftsprojekt Industrie 4.0“ gekennzeichnet durch eine starke Individualisierung der Produkte unter den Bedingungen einer hochflexibilisierten (Großserien-)Produktion. Eine grundlegende Voraussetzung zur Steuerung, Regelung und Beurteilung von solch selbstständigen, intelligenten und vernetzten Fertigungsprozessen ist die Kommunikation zwischen Sensor und Aktuator bzw. Messgerät und Bearbeitungsmaschine. Alle diese Prozesse müssen den Austausch und die Interpretation von Messergebnissen und deren einheitliche und zuverlässige Weitergabe garantieren. Zum einen sind also fachliche Innovationen notwendig, die im Bereich der Metrologie eine funktionierende, aussagekräftige Kommunikation und Vernetzung ermöglichen, zum anderen müssen aber auch Grundlagen dieser Kommunikation normativ verankert werden. Im Folgenden wird ein Überblick gegeben, wie sich das Thema Industrie 4.0 aus Sicht der Fertigungsmesstechnik entwickelt und einige Beiträge der PTB zu diesem Thema werden aufgezeigt.

2. Übersicht über Aktivitäten des VDI zu Industrie 4.0

Der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) beschreibt die „Digitale Transformation“ als sein Schwerpunktthema für 2016: „In den sieben Bereichen Industrie 4.0, Stadt und Mobilität, *Additive Manufacturing*, Arbeit der Zukunft, *Big Data*, *Building Information Modeling* (BIM) und IT-Security wird umfassend dargestellt, welche Veränderungen die

Digitale Transformation bedeutet“. Die VDI/VDE-Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) bearbeitet Themen zu Industrie 4.0 in ihren 8 Fachbereichen mit unterschiedlichen Schwerpunkten und trägt so zur Weiterentwicklung und Meinungsbildung bei. Dabei ist ein Fokus der Arbeiten der GMA zu Industrie 4.0 dem Fachbeirat 7 „Anwendungsfelder der Automation“ zugeordnet [2]. Die folgenden Fachausschüsse sind hierbei besonders anzuführen: 7.20 „Cyber Physical Systems“, 7.21 „Industrie 4.0“, 7.22 „Arbeitswelt Industrie 4.0“, 7.23 „Geschäftsmodelle mit Industrie 4.0“, 7.24 „Big Data“, 7.25 „Testen vernetzter Systeme für Industrie 4.0“, aber auch 6.12 „Durchgängiges Engineering von Leitsystemen“. Von der GMA wurden bereits einige Statusreports mit Bezug zu Industrie 4.0 herausgegeben, u. a. zu dem Thema „Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0“ (RAMI 4.0) sowie mehrere große Veranstaltungen durchgeführt. In den VDI/VDE-GMA Fachausschüssen sind zurzeit insgesamt 33 PTB-Mitarbeiter aktiv, u. a. auch in denen, die einen stärkeren Bezug zu Industrie 4.0 haben, wie 1.11 „Messunsicherheit“, 3.61 „Messen an Zahnrädern und Getrieben“ und 3.63 „Mess- und Prüfverfahren für die Schraubtechnik“.

3. Entwicklungstrends in der Fertigungsmesstechnik

Im Jahr 2011 wurde unter dem Namen „Fertigungsmesstechnik 2020“ eine Roadmap von der VDI/VDE-GMA veröffentlicht, in der zukünftige Entwicklungen der Messtechnik in der industriellen Produktion beleuchtet werden [3, 4]. In dieser Roadmap wurden die Herausforderungen und Trends in der Fertigungsmesstechnik [5] durch vier Themenbereiche mit den Attributen „Schneller“, „Genauer“, „Sicherer“, und „Flexibler“ beschrieben. Bei einem kürzlich durchgeführten

¹ Dr. Karin Kniel, E-Mail: karin.kniel@ptb.de, Matthias Franke, E-Mail: matthias.franke@ptb.de, Dr. Klaus Wendt, E-Mail: klaus.wendt@ptb.de, Fachbereich „Koordinatenmesstechnik“

² Prof. Dr. Frank Härtig, Abteilung „Mechanik und Akustik“, E-Mail: frank.haertig@ptb.de

³ Dr. Daniel Hagedorn, E-Mail: daniel.hagedorn@ptb.de, Stephan Metschke, E-Mail: stephan.metschke@ptb.de, Dr. Frank Schmaljohann, E-Mail: frank.schmaljohann@ptb.de, Dr. Frank Löffler, E-Mail: frank.loeffler@ptb.de, Fachbereich „Wissenschaftlicher Gerätebau“

⁴ Dr. Uwe Brand, E-Mail: uwe.brand@ptb.de, Dr. Ludger Koenders, E-Mail: ludger.koenders@ptb.de, Fachbereich „Oberflächenmesstechnik“

⁵ Dr. Dorothee Hüser, E-Mail: dorothee.hueser@ptb.de, Dr. Harald Bosse, E-Mail: harald.bosse@ptb.de, Abteilung „Fertigungsmesstechnik“

Review der Roadmap wurden diese Überschriften zur Beschreibung der zukünftigen Entwicklung bestätigt und durch eine fünfte Überschrift „Ganzheitlich“ ergänzt [6]. Hiermit wird dem Trend der ganzheitlichen Erfassung aller relevanten Produktmerkmale für eine Qualitätseinschätzung Rechnung getragen. Mit Blick auf Industrie 4.0 werden die Anforderungen „Schneller“, „Genauer“, „Sicherer“, „Flexibler“ und „Ganzheitlich“ deutlich verschärft, da eine zunehmende Nutzung von Mess- und Sensortechnik in der Produktion bereits eingesetzt hat.

Schnelligkeit spielt in der Produktion eine wichtige Rolle, die Messtechnik sollte die Geschwindigkeit der Produktionsprozesse deshalb möglichst nicht verringern. Durch schnellere messtechnische Verfahren sowie die Integration von Messtechnik in Produktionsabläufe können Messergebnisse schneller bereitgestellt werden. Über informationstechnische Verknüpfungen zwischen den Messsystemen und den Produktionssystemen lässt sich dann eine zuverlässige Prozessregelung realisieren.

Die steigenden Anforderungen an die Qualität von Produkten sind unmittelbar mit der Reduzierung der Toleranzen von Qualitätsmerkmalen und -parametern und damit mit einer höheren Genauigkeit in der Produktion und der dazugehörigen Messtechnik verbunden. Ein bekanntes Beispiel hierfür ist die Halbleiterproduktion mit steigenden Anforderungen an die Fertigungskontrolle aufgrund der Miniaturisierung der zu fertigen Strukturen. Es ist eine große Herausforderung an die Messtechnik, den steigenden Genauigkeitsanforderungen unter Industrie 4.0 zukünftig gerecht zu werden. Die Online-Erfassung und -Verarbeitung aktueller Messergebnisse mit zugeordneten Messunsicherheiten einschließlich deren Korrekturen bzw. Verbesserungen durch Informationsfusion und angeschlossene Regelkreise treten in den Vordergrund.

Sicherheit in der Bestimmung der Messunsicherheit ist für die Metrologie in Hinblick auf Industrie 4.0 von besonderer Bedeutung. Es gilt, je genauer die Messunsicherheit bestimmt ist, desto besser kann ihre Information genutzt werden, um sie beispielsweise für automatisierte Fertigungsregelkreise einzusetzen. Dies kann sowohl die Nachbearbeitung bei nicht erreichter Toleranz beinhalten, als auch die Paarung passender Bauteile aufgrund überprüfter Geometrieigenschaften.

Die Vielfalt der in der Produktion eingesetzten Messsysteme und damit einhergehend auch ihre Flexibilität sich an verschiedene Messaufgaben unter unterschiedlichen Bedingungen anzupassen, nimmt unter Industrie 4.0 weiter zu. Auch durch Kombination von Messsystemen in sogenannten „Multisensor-Messsystemen“ wird die Anpassungsfähigkeit der Messtechnik gesteigert.

Die ganzheitliche Prüfung von Produkten bedeutet: Alle wesentlichen Produktmerkmale zusammen zu betrachten, wenn eine Qualitätsaussage getroffen wird. Basierend auf Modellen für das Produkt, die Produktion und die dort herrschenden Wirkmechanismen sowie für den Messprozess können Messergebnisse in einen gemeinsamen Kontext mit den relevanten Produkteigenschaften gebracht werden. Ein typisches Beispiel für ein Messverfahren, das Produkte ganzheitlich beschreiben kann, ist die industrielle Computertomographie (CT), die bereits von ihrem Messprinzip her die gesamte äußere Geometrie, aber auch innere Strukturen sowie Materialien aufgrund ihrer Dichte erfasst [7]. Am Beispiel eines Mikroverzahnungsnormal werden in Bild 1 drei Prüfungs- bzw. Auswertestrategien vorgestellt, die alle auf einer CT-Messung basieren.

4. Fertigungsintegrierte Messtechnik

Voraussetzung für eine effektive Datennutzung in der Fertigung ist eine zeitnahe Erfassung von Zustandsgrößen, zu denen neben den organisato-

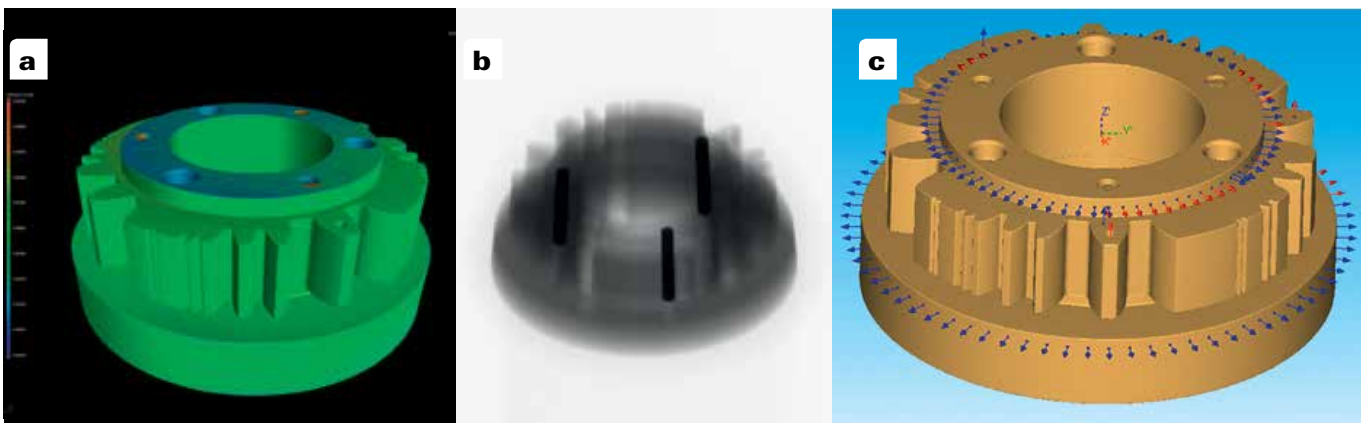
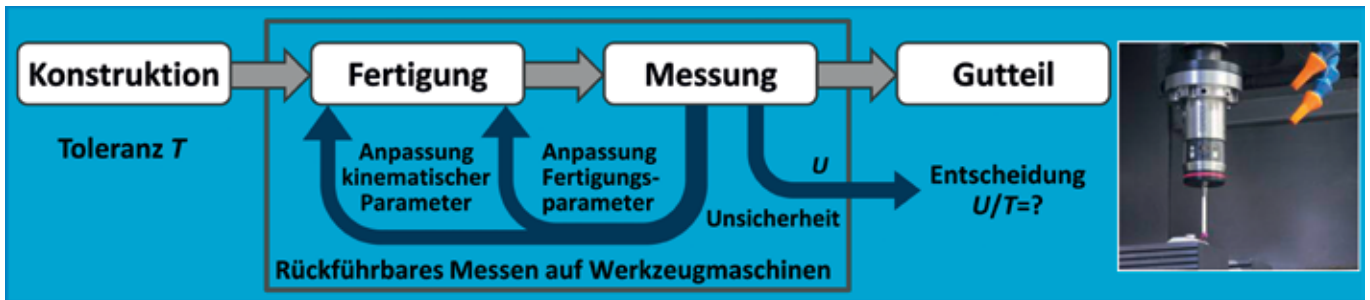


Bild 1:
Drei Auswertestrategien an einem Mikroverzahnungsnormal basierend auf einer CT-Messung:
(a) Soll-Ist-Vergleich, (b) Untersuchung der internen Beschaffenheit, (c) Auswertung der Verzahnungsparameter



rischen Angaben auch die Fertigungsparameter (Eingangswerte) und die Fertigungsergebnisse (Ausgangsdaten) zählen. Letztere werden häufig nach der Fertigung durch geeignete Messverfahren ermittelt. Damit die Messergebnisse aber auch noch auf den weiteren Fertigungsablauf Einfluss nehmen können, müssen sie fertigungsnah oder sogar innerhalb der Fertigungseinheit (in-situ) z. B. in einer Werkzeugmaschine ermittelt werden.

Im Folgenden werden Beispiele vorgestellt, die eine Ermittlung der Bauteilgeometrie und weiterer Zustandsgrößen orts- und zeitnah sowie möglichst genau innerhalb der WZM ermöglichen.

4.1 Kompensation der temperaturbedingten Geometrieabweichungen von Werkzeugmaschinen

Numerisch gesteuerte (NC)-Werkzeugmaschinen können heute nicht nur fertigen, d. h. Fräsen, Bohren, Honen, Schleifen und Drehen, sondern – über die in den Bewegungsachsen integrierten Messsysteme hinaus – oftmals auch zusätzliche Messungen während des Bearbeitungsprozesses ausführen. Diese Eigenschaft führt im Hinblick auf Industrie 4.0 zu der Assoziation, dass die Fertigungsmaschine in Zukunft selbst befähigt sein sollte, die Güte der gefertigten Bauteile zu überprüfen und ggf. nachzubearbeiten – so lange – bis es passt.

Bei sehr hohen Genauigkeitsanforderungen wird dies allerdings nur eingeschränkt zu realisieren sein. Zum einen sind die klimatischen Umgebungsbedingungen der Fertigungsmaschine oftmals viel zu rau für Präzisionsmessungen, die für den Nachweis heute gängiger Toleranzen bis in den Sub-Mikrometerbereich notwendig sind. Zum anderen werden für die Messung die gleichen Achsbewegungen vollführt wie für die Fertigung. Vorhandene Achsabweichungen bleiben damit unerkannt. Dennoch nimmt das Messen in der Werkzeugmaschine (WZM) eine bedeutende Rolle in Hinblick auf Industrie 4.0 ein, insbesondere wenn es darum geht, kritische Fertigungstoleranzen auf Maßhaltigkeit in ersten Schritten zu prüfen, wie in Bild 2 gezeigt wird. Anhand von fünf Beispielen wird im Folgenden auf Möglichkeiten fertigungsintegrierter Messtechnik eingegangen.

Das präzise Fertigen und Messen hängt u. a. stark von dem thermomechanischen Verhalten der WZM in der Fertigungsumgebung ab. Thermisch bedingte Änderungen der Maschinengeometrie können einen Anteil von mehr als 70 % an den Fertigungsfehlern, also den Abweichungen von Maß, Lage und Form, haben. Darum hat die PTB innerhalb des europäischen Verbundforschungsprojektes „Traceable in-process dimensional measurement“ (TIM) sich dieser Herausforderung angenommen, um zukünftig kritische und fertigungsrelevante Maße am Werkstück im Anschluss an die Fertigung direkt auf der WZM zuverlässig und rückführbar messen zu können. Hierfür wurden mittels einer eigens entwickelten mobilen Klimasimulationskammer wechselnde Temperaturbedingungen zwischen 15 °C und 45 °C definiert generiert, um die resultierenden thermomechanischen Maschinenabweichungen erfassen sowie kompensieren zu können. Dazu wurden die Veränderungen der geometrischen Maschinenfehler relativ zu einer Ausgangssituation mithilfe eines selbstnachführenden Laserinterferometers (*LaserTracer*) [8, 9] bestimmt (Bild 3).

Bild 2: Fertigungssteuerung innerhalb der WZM



Bild 3: Geometriefehleraufnahme in der WZM mit dem LaserTracer

Durch Wiederholung dieses Vorgangs bei wechselnden Umgebungsbedingungen konnten die Änderungen der Maschinengeometrie ermittelt werden. Die ermittelten Geometrieabweichungen der WZM konnten numerisch durch die Steuerung der WZM kompensiert werden. Auf diese Weise wurde sowohl für die Fertigung als auch für die Messung eine höhere Genauigkeit erreicht. Bild 4 zeigt beispielhaft die hierdurch erreichte Verbesserung bei den Geometrieabweichungen einer WZM.

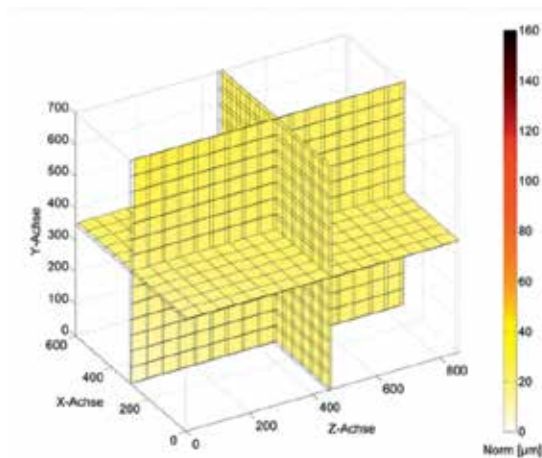
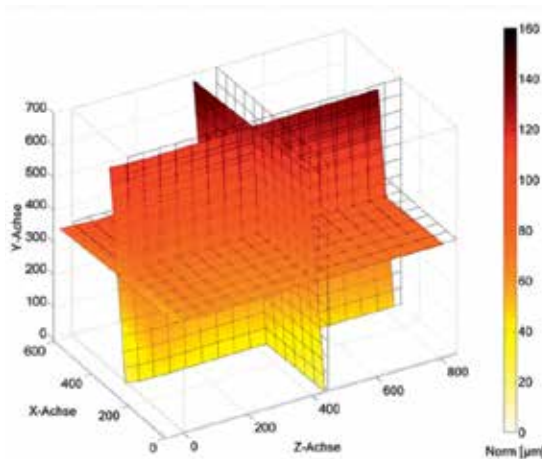


Bild 4: Geometrieabweichungen einer kompensierten Werkzeugmaschine bei 20 °C. Durch die Kompensation konnten die maximalen Abweichungen in den dargestellten Schnittebenen um 80 % reduziert werden.

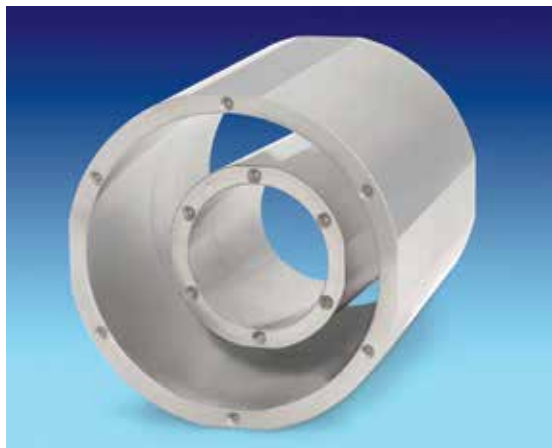


Bild 5: Fotomontage zweier Prototypen der äußeren und der inneren Testmasse, wie sie im differentiellen Accelerometer angeordnet sind

4.2 Einsatz integrierter taktiler Messtaster zur Fertigung hochpräziser Werkstücke am Beispiel der MICROSCOPE Testmassen

Im Rahmen des Satelliten-Projektes MICROSCOPE (*Micro-Satellite à traînée Compensée pour l'Observation du Principe d'Equivalence*) wurden hochpräzise Testmassen für weltraumgestützte, differenzielle Accelerometer zur Verifikation des Äquivalenzprinzips entwickelt und gefertigt. Die Testmassen besitzen die Form von Hohlzylindern mit je vier symmetrischen Abflachungen auf dem Außenmantel und sechs Senkungen auf den jeweiligen Stirnflächen der Körper (Bild 5). Zwei äußere Testmassen aus PtRh10 bzw. TiAl6V4 besitzen einen Außendurchmesser von 69,395 mm, einen Innendurchmesser von 60,800 mm und eine Länge von 79,830 mm. Die Toleranzen betragen für alle Dimensionen und Bezugsflächen weniger als 3 µm. Zwei innere Testmassen aus PtRh10 besitzen einen Außendurchmesser von 34,400 mm, einen Innendurchmesser von 30,800 mm sowie eine Länge von 43,332 mm. Die Toleranzen betragen auch hier weniger als 3 µm.

Die spanende Fertigung erfolgte in zwei Schritten. Zuerst wurden in einer Aufspannung gefertigt: der Außenmantel, der Innenmantel, die symmetrischen Abflachungen in einem Abstand von 90 ° sowie die Senkungen der ersten Stirnseite auf einem Teilkreis von 60°. Hiernach wurden die Werkstücke umgespannt, um die Länge und die Senkungen der zweiten Stirnseite zu fertigen.

Es ist offensichtlich, dass bei geforderten Toleranzen im Bereich eines Mikrometers eine Entnahme des Werkstücks aus der Präzisionsbearbeitungsstation zwecks einer Messung auf einem Präzisionskoordinatenmessgerät keinen nachhaltigen Gewinn für die Fertigung bedeutet. Zwar können Form und Dimensionen des Körpers ex-situ mit hoher Präzision bestimmt werden, doch bleibt der limitierende Faktor der Wiedereinbau des Werkstücks in die Bearbeitungsstation. Hier bestimmt die Genauigkeit der Re-Positionierung die Toleranzen des Werkstücks. Folglich ist die in-situ-Messung des Werkstücks mittels eines in die Steuerung der Bearbeitungsstation eingebundenen Präzisionstasters die optimale Herangehensweise (Bild 6). Ein optimiertes Regime aus Wiederholungsmessungen und Messstrategie (Einmessung des Tastsystems an einem Kalibriernormal, angepasste Antastgeschwindigkeit und Wartezeit zwischen den Wiederholungsmessungen, Material und Konditionierung der Antastkugel) sowie servergestützter Auswertung zum jeweiligen Fertigungsschritt erlaubt es, im Zusammenspiel mit externen Präzisionsmessungen an Kalibriernormalen eine Messunsicherheit im Bereich der erforderlichen Toleranzen zu erreichen.

Die Integration der taktilen Messtechnik und der Einsatz eines Präzisions-3D-Tasters erlaubt eine Fehlerkorrektur nach jedem Arbeitsschritt. Veränderungen der temperaturbedingten Ausdehnung des Werkstücks können somit ebenso zielgerichtet kompensiert werden, wie bearbeitungsbedingter Verschleiß des polykristallinen Diamant-Schneidwerkzeuges [10–12].

4.3 *Optisches Sensorsystem für in-Prozess-Formmessungen an rotierenden Bauteilen in Werkzeugmaschinen*

Neben der taktilen Messung bieten sich auch optische Verfahren für eine in-situ-Messung an. Von besonderem Interesse ist hierbei ein neuartiger sogenannter phasenauswertender Laser-Doppler-Distanzsensor (P-LDDS), der das Potenzial für eine automatisierte 100-%-Kontrolle der gefertigten Bauteile besitzt [13]. Er wurde an der TU Dresden entwickelt und basiert auf der Bestimmung der Phasendifferenz zweier verkippter Interferenzstreifensysteme (Bild 7).

Die neuartige symmetrische Detektion des Streulichtes erlaubt die Reduzierung der Distanzmessunsicherheit um mehr als eine Größenordnung, prinzipiell bis in den Nanometerbereich. Ein wichtiger Vorteil ist, dass die Distanzmessunsicherheit des P-LDDS von der lateralen Geschwindigkeit näherungsweise unabhängig ist [14]. In der PTB wurde der Sensor an schnell rotierenden Objekten in einer Präzisionsbearbeitungsmaschine erprobt (Bild 8). Unter Einbezug von taktiler Referenzmesstechnik wurden die Messeigenschaften des P-LDDS grundlegend untersucht, bewertet und auf die SI-Einheiten rückgeführt. Hierzu wurden verschiedene Werkstücke mit unterschiedlicher Geometrie und Oberflächengüte hergestellt und gemessen.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Messunsicherheit des P-LDDS nahezu unabhängig von der Oberflächengüte und dem verwendeten Material ist. Für die Messreihen wurde eine Standardabweichung der Distanz von $0,28 \mu\text{m}$, der Geschwindigkeit von $0,3 \%$ und eine Messunsicherheit für Form und Position von $0,3 \mu\text{m}$ ermittelt [15].

Die sehr guten Ergebnisse waren Basis für einen weiteren Projektantrag zur Fortführung des Projektes zwischen der TU Dresden, der Fernuniversität Hagen und der PTB. Schwerpunkt des Vorhabens ist die Validierung der erforderlichen Präzision und die Zuverlässigkeit des Sensors für in-situ-Formmessungen. Das Ziel ist schließlich, den erarbeiteten Demonstrator im Wissenschaftlichen Gerätebau der PTB zu erproben und die in-situ-Formmessung erstmals für eine 100-%-Qualitätskontrolle sowie für eine in-Prozess-Regelung zwecks Erreichens einer Null-Fehler-Fertigung zu validieren [13].

4.4 *Dünnschichtsensoren für zukünftige Anwendungen im Bereich der Fertigungstechnik*

Eine weitere Möglichkeit, relevante Daten aus der Fertigungsumgebung zu generieren, bietet die Dünnschichtsensorik. Auf einer Gesamtschichtdicke von wenigen Mikrometern lassen sich unterschiedliche Schichten aus variierenden Werkstoffen und auf den Anwendungsfall zugeschnittene Strukturen erzeugen. Die Verwendung einer elektrisch isolierenden Zwischenschicht erlaubt dabei auch die Applikation der Sensoren auf elektrisch leitenden Materialien. Vorteile ergeben sich auch aus der grundsätzlichen Eignung für eine Serienproduktion und aus den kleinen Abmessungen, wodurch die Messung ortsnahe erfolgen kann.



Bild 6: Antastende Messung der Testmasse zwischen den einzelnen Bearbeitungsschritten

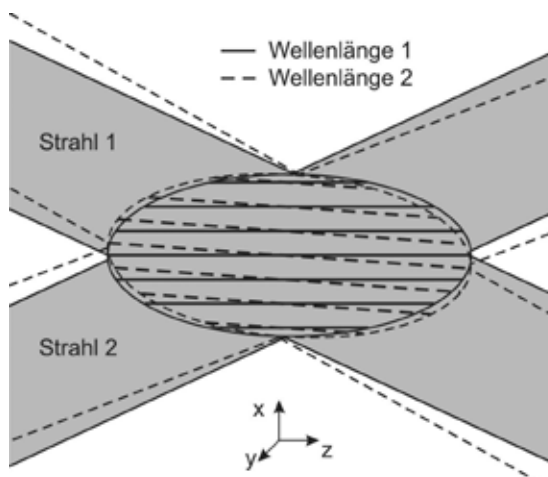


Bild 7: Zwei verkippte Interferenzstreifensysteme bilden das Messvolumen

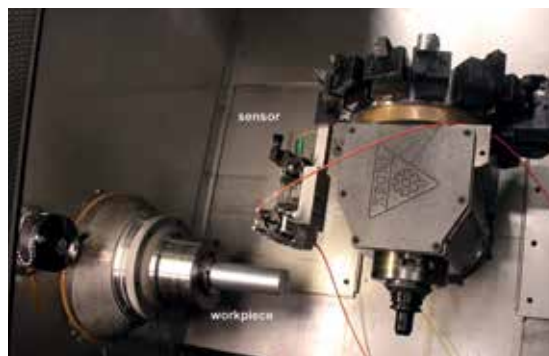


Bild 8: Versuchsaufbau in einer CNC-Drehmaschine

So können in der Fertigung beispielsweise Temperatur- oder Dehnungsmessungen an verschiedensten Bereichen der Werkzeugmaschine durchgeführt werden, an denen bisher keine direkte sensorische Messung möglich gewesen ist. Somit kann ein direkter Rückschluss auf die Belastung der Maschine, die aktuellen Verformungen oder die erreichbaren Genauigkeiten getroffen werden. Ein weiterer Ansatz ist die direkte Temperatur- und Verschleißmessung an Bohrern, Fräsern und Wendeschneidplatten. Ein erster Ansatz dazu ist in Bild 9 dargestellt. Hierbei wurde auf der Freifläche einer Wendeschneidplatte eine resistive Sensorstruktur aufgebracht. Bei fortschreitendem Verschleiß der Schneidkante wird dies durch mehrere sprunghafte Widerstandsänderungen detektiert.

Bild 9:
Verschleißsensorik auf der Freifläche einer Wendeschneidplatte

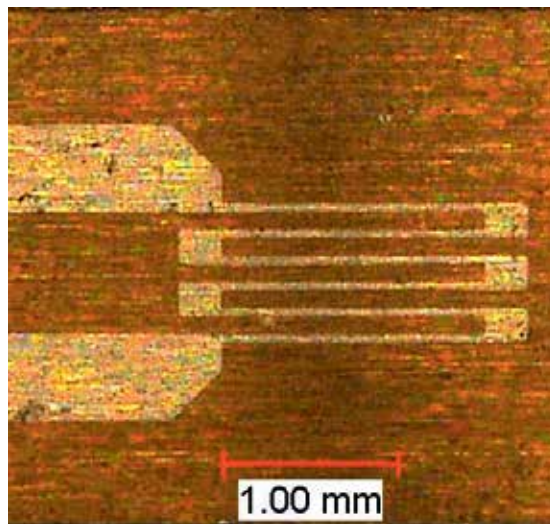
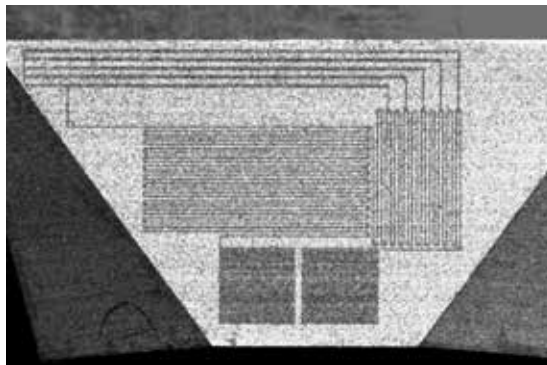


Bild 10:
Dünnschichtsensor zur Dehnungsmessung aufgebracht auf einer Metalloberfläche

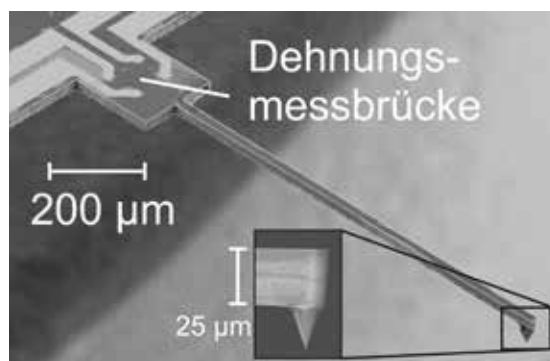


Bild 11:
Mikrotaster für Messungen in kleinen Bohrungen

Ebenfalls untersucht wurden aufgebrachte Strukturen zur Messung der Dehnung einer Bauteiloberfläche. Die in Bild 10 dargestellte Struktur wurde für eine Kraftmessung im Bereich von bis zu 1 N entwickelt und getestet. Nur die kompakten Abmessungen des Sensors ermöglichten die Applikation auf den für diesen Kraftbereich zwingend sehr kleinen Flächen der Verformungsbereiche [16–19].

Die Verwendung von Dünnschichtsensoren für die zukünftige Fertigungstechnik ist eine Sensortechnologie, welche durch ihre charakteristischen Eigenschaften wie die geringe Größe und die Messwerterfassung in-situ vor allem für die präzise und umfassende Ermittlung prozessrelevanter Daten große Vorteile gegenüber herkömmlichen Sensoren bieten kann.

4.5 Mikrotaster für Kontur- und Rauheitsmessungen in kleinen Bohrungen

Die Bestimmung funktionsrelevanter Form- und Rauheits-Kenngrößen an den Oberflächen in kleinen Bohrungen stellt eine besondere messtechnische Herausforderung dar. Die PTB hat hierzu in Kooperation mit Projektpartnern einen Mikrotaster entwickelt und in ein Messgerät integriert, mit dem schnelle taktile Messungen in Bohrungen mit Durchmessern deutlich unter 100 µm sowie Tiefen von einigen Millimetern möglich sind [20, 21] (Abb. 11). Der bislang kleinste Mikrotaster weist folgende Charakteristika auf: Länge 1,5 mm, Höhe 25 µm, Breite 30 µm sowie Integration einer Tastspitze mit 2 µm Tastradius für Rauheitsmessungen. Insbesondere die hohen Scangeschwindigkeiten von bis zu 15 mm/s machen diesen taktilen Mikrotaster für die Integration in Mess- aber auch Fertigungsmaschinen interessant.

5. Validierung von Auswertesoftware in der Fertigungsmesstechnik

Aufgrund des steigenden Anteils von Software bei der Realisierung von Messsystemen gewinnt das Thema der Softwaresicherheit im Zusammenhang mit der Sicherheit von Messergebnissen zunehmend an Bedeutung. Ein Aspekt dabei ist die Überprüfung der implementierten mathematischen Softwarealgorithmen, was beispielsweise bei der Bestimmung von geometrischen Kenngrößen einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis hat. Hierzu gibt es inzwischen Angebote für eine internetbasierte Validierung von Auswertesoftware [22, 23]. Mögliche Fehlerursachen bei komplexer Auswertesoftware können die falsche Auswahl von Algorithmen, die fehlerhafte Implementierung, unzureichende Näherungen oder einfache Vorzeichenfehler sein. Um die Richtigkeit von Auswertelgorithmen zu prüfen, werden Testdaten bereitgestellt. Diese sind

von der zu validierenden Software auszuwerten. Die berechneten Testergebnisse werden mit zugehörigen Referenzergebnissen verglichen.

Das Kommunikationsmedium für den Austausch von Testdaten und Testergebnissen ist das Internet. Dazu wurde eine Client-Server-Architektur mit definierten Schnittstellen entwickelt, die sich einfach in existierende Messsoftware integrieren lassen. Damit ist ein für den Anwender sehr einfacher, automatischer Validierungsprozess möglich (Bild 12). Die PTB bietet über ihren TraCIM-Service derzeit drei Tests zur Prüfung von Auswertelgorithmen aus dem Bereich der Koordinatenmesstechnik an:

- Besteinpassung nach Gauß: Datensätze für den Test von Minimierungsalgorithmen nach Methode der kleinsten Quadrate für die Formelemente Gerade, Ebene, Kreis, Zylinder, Kegel und Kugel;
- Besteinpassung nach Chebyshev: Datensätze für den Test von Minimum-Zone-Algorithmen für die Formelemente 2D-Gerade, 2D-Kreis, Ebene, Kugel und Zylinder;
- Validierung von Algorithmen zur Auswertung von Vergleichsmessungen.

Mehrere Metrologieinstitute haben sich im Verein TraCIM e. V. [22] organisiert. Ziel ist die Förderung der wissenschaftlichen Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Rückführung mathematischer Auswertelgorithmen in der Metrologie. Wesentliche Aufgabe des Vereins ist es, die Entwicklung neuer Tests in allen interessierten Bereichen der Metrologie zu begleiten und einheitliche Qualitätsstandards für Softwaretests festzulegen.

Neben der Validierung von Auswertesoftware für die Anwendung in der Koordinatenmesstechnik bietet die PTB auch einen Service zum Test von Auswertesoftware im Bereich der Oberflächenmesstechnik an [24]. Hierbei erfolgt die Prüfung

der Messdatenauswertung zur Bestimmung von 2D-Rauheitskennwerten sowie Rillentiefen aus Schnittmessungen auf Basis einer in der PTB entwickelten Referenz-Software sowie Software-Normalen. Die Weiterentwicklung der Software soll auch die Bestimmung von 3D-Kennwerten und flächenhafte Rillenauswertungen ermöglichen.

6. Messdaten-Kommunikation im Fertigungsumfeld

Eine grundlegende Voraussetzung zur Steuerung, Regelung und Beurteilung von Fertigungsprozessen ist die Kommunikation zwischen Sensor und Aktuator bzw. Messgerät und Bearbeitungsmaschine. Allen diesen Prozessen gemeinsam sind der Austausch und die Interpretation von Messergebnissen und deren einheitliche und zuverlässige Weitergabe. Zum einen sind also fachliche Ansätze notwendig, die im Bereich der Metrologie eine funktionierende Kommunikation und Vernetzung ermöglichen, zum anderen müssen aber auch Grundlagen dieser Kommunikation normativ verankert werden. Die seit Jahrzehnten international anerkannten Festlegungen der Metrologie sollten für die messwertbezogenen Kommunikationswege von Industrie 4.0 zielgerichtet übernommen werden. Die wirtschaftliche, einfach interpretierbare und sichere Weitergabe der Messergebnisse sollte sich dabei im Sinne der internationalen Meterkonvention (CIPM MRA [25]) an den SI-Einheiten orientieren. Imperiale Einheiten wie Inch, Fahrenheit, Pond, PS u. a. sind im Interesse des europäischen Wirtschaftsraumes und der weltweiten Vernetzung der Produktion zu vermeiden, da sie zu hohen Kosten führen und eine eindeutige Dateninterpretation enorm schädigen können. Künftige Datenprotokolle sollten darüber hinaus den vollständigen Austausch von Messergebnissen ermöglichen. Hierzu gehören nach internationalen Vereinbarungen die drei wichtigen Bestandteile: der Messwert, die Einheit und die Messunsicherheit.

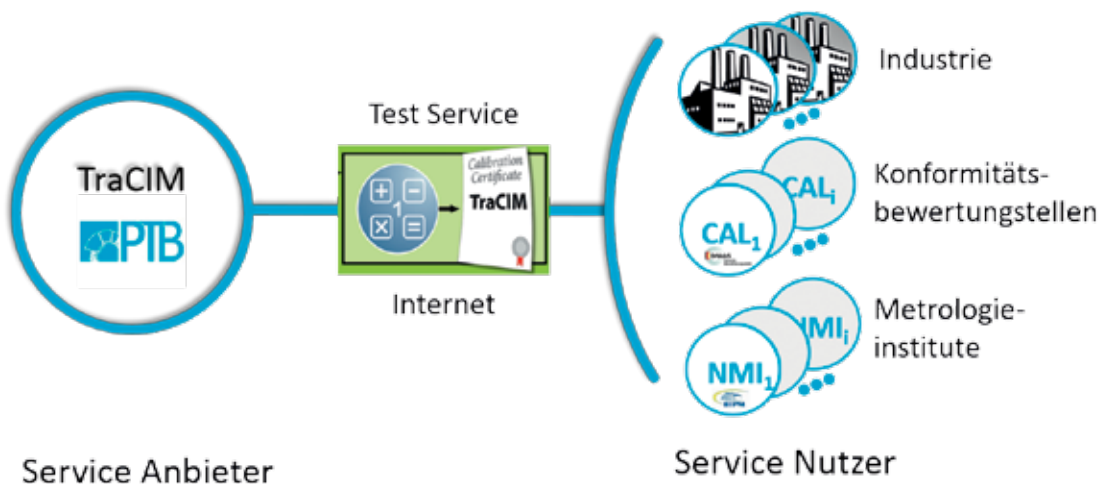


Bild 12:
Schema des
TraCIM-Service zur
Validierung von
Auswertesoftware

Da die Messunsicherheit also wesentlicher Bestandteil der Messdatenkommunikation ist, setzt dies voraus, sie aufgabenspezifisch und automatisch ermitteln zu können. Eine Möglichkeit bietet das so genannte VCMM (*Virtual Coordinate Measurement Machine*). Die Grundlage des VCMM ist die Nachbildung des Messprozesses durch statistische Simulationen [26]. Das Modell des Messprozesses und die auf den Messprozess einwirkenden Einflussgrößen bilden gemäß ISO/TC 155304:2008 [27] wie bei einer klassischen Unsicherheitsbilanz die Basis für die Ermittlung der Messunsicherheit. Das Verfahren erfüllt somit die Anforderungen internationaler Richtlinien und Normen (z. B. DIN ISO 10012 [28], JCGM 100:2008 (GUM) [29]). Die Auswertung erfolgt jedoch nicht über die Lösung von partiellen Ableitungen und Summierung von Unsicherheitsbeiträgen, sondern mithilfe eines im Rechner durchgeführten „numerischen Experimentes“. Die Simulation entspricht einem realen Experiment, in dem an einem Werkstück eine statistisch ausreichende Anzahl von Messungen unter sich ändernden Messbedingungen durchgeführt wird.

Voraussetzung ist, dass seitens des Messgeräteherstellers ein Virtueller Treiber in die Mess- und Auswertesoftware des Messgerätes integriert wird. Der Virtuelle Treiber kommuniziert über definierte Schnittstellen mit der Messgeräteherstellersoftware (siehe Bild 13). Über diese werden die Koordinaten jedes Messpunktes an den Virtuellen Treiber übergeben. Die Messpunkte werden mittels Monte-Carlo-Simulation mehrfach verrauscht. Grundlage hierfür ist ein Fehlermodell des Messprozesses, das

in Abhängigkeit der signifikanten Einflussgrößen die Messpunkte systematisch und zufällig verändert. Bislang sind Einflüsse der Geometriefehler, der Langzeit-Stabilität, der Umgebungsbedingungen, der Werkstückeigenschaften, des Drehtisches, des Scannings und durch die Antastung modelliert und berücksichtigt. Nachdem die Messpunkte verrauscht wurden, werden diese durch die Messgerätesoftware in gleicher Weise wie die eigentlichen Messpunkte ausgewertet. Das Ergebnis ist eine Liste von simulierten Messergebnissen, die statistisch ausgewertet wird, um aus zufälligen und systematischen Abweichungen der Ergebnisse der Simulation die Messunsicherheit des Messprozesses zu ermitteln.

Prinzipiell kann jede Software von Koordinatenmessgeräteherstellern genutzt werden. Voraussetzung ist die Unterstützung der Schnittstellen zum Virtuellen Treiber der PTB sowie die statistische Auswertung der Simulationsläufe. Das Konzept des virtuellen Messgerätes wurde inzwischen auch auf andere Messgeräteklassen übertragen.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Industrie 4.0 bedeutet die zunehmende automatisierte Vernetzung von Fertigungsabläufen in einer verteilten Fertigungsinfrastruktur. Ohne einen metrologischen Informationsaustausch über die Qualität der gefertigten Komponenten ist dies nicht umsetzbar. Das bedeutet, die Fertigungsmesstechnik spielt eine zentrale Rolle bei der Umsetzung dieser vierten industriellen Revolution. Natürlich werden hierdurch auch neue Herausforderungen an die Fertigungsmesstechnik gestellt, die in der überarbeiteten Roadmap für die Fertigungsmesstechnik dargestellt werden [4]. Einige in diesem Beitrag angesprochene Entwicklungen für das fertigungsintegrierte Messen, das Validieren von Auswertelgorithmen und die automatisierte Messunsicherheitsermittlung werden die messtechnische Kommunikation im Sinne von Industrie 4.0 unterstützen und müssen weiter ausgebaut werden. Der Bereich der Validierung metrologischer Auswertelgorithmen beispielsweise wird fortwährend um weitere Algorithmen wie die Einpassung von Kurbelwellen, Auswertung von Verzahnungsalgorithmen und die Einpassung von Lochbildern erweitert. Ebenso wird die PTB die Anstrengungen im Bereich der Normung weiter vorantreiben, metrologische Grundprinzipien im Sinne der internationalen Meterkonvention [25] zu verankern.

Referenzen

- [1] *Die neue Hightech-Strategie – Innovationen für Deutschland*, BMBF, August 2014, https://www.bmbf.de/pub_hts/HTS_Broschure_Web.pdf (Letzter Zugriff am 30.01.2017)

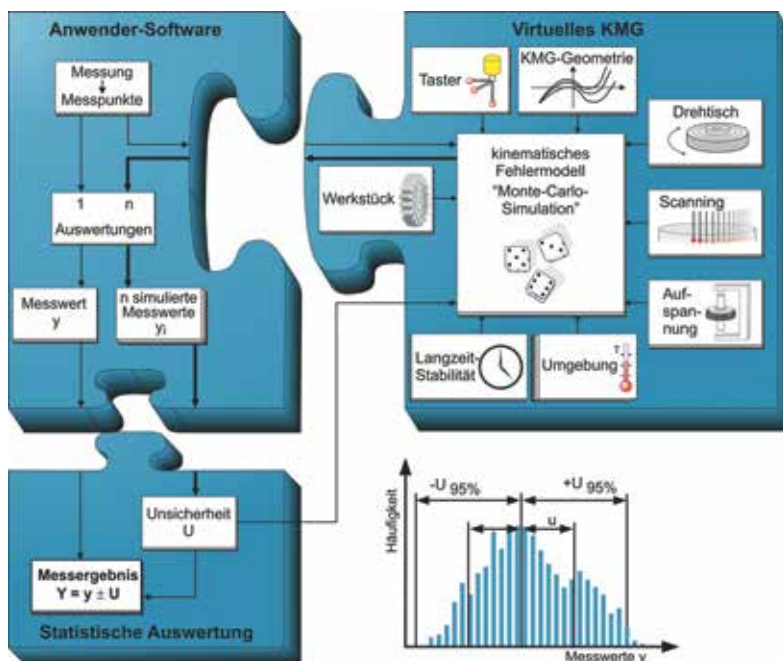


Bild 13: Anbindung des VCMM an die kommerzielle Anwender-Software

- [2] <https://www.vdi.de/technik/fachthemen/digitale-transformation/industrie-40/> (Letzter Zugriff am 30.01.2017)
- [3] VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA): Fertigungsmesstechnik 2020, *Technologie-Roadmap für die Messtechnik in der industriellen Produktion*, VDI Verein Deutscher Ingenieure e. V., Düsseldorf, April 2011, ISBN 978-3-00-034706-1
- [4] D. Imkamp, R. Schmitt, J. Berthold: *Blick in die Zukunft der Fertigungsmesstechnik*, tm – Technisches Messen, Vol. 79, No. 10, 2012, 433–439 (Letzter Zugriff am 30.01.2017)
- [5] T. Pfeifer, R. Schmitt: *Fertigungsmesstechnik*, Oldenbourg Verlag, München, 2010
- [6] D. Imkamp, J. Berthold, M. Heizmann, K. Kniel, M. Peterek, R. Schmitt, J. Seidler, K.-D. Sommer: *Herausforderungen und Trends in der Fertigungsmesstechnik – Industrie 4.0*, tm – Technisches Messen, noch nicht veröffentlicht
- [7] J. P. Kruth et al.: *Computed tomography for dimensional metrology*, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 60, 2011, 821–842
- [8] K. Kniel: *Ein Beitrag zur Entwicklung eines laserinterferometrischen Trackingssystems für die Genauigkeitssteigerung in der Koordinatenmesstechnik*, PTB-Bericht PTB-F-53, Dissertation, 2007, ISBN: 978-3-86509-676-0; ISSN 0179-0609
- [9] H. Schwenke, M. Franke, C. T. Schneider, J. Hannaford: *Calibration of CMMs and machine tools by parametric multilateration*, 8th International Symposium on Measurement and Quality Control in Production, Symposium Erlangen, VDI-Berichte: 1860, 2004, 333 – 338, ISBN: 3-18-091860-8; ISSN 0083-5560
- [10] D. Hagedorn, H.-P. Heyne, S. Metschke, U. Langner, S. Grüner, F. Löffler, V. Lebat, M. Rodrigues, P. Touboul: *MICROSCOPE – fabrication test masses for an in-orbit test of the equivalence principle*, Ann. Phys. (Berlin), 1–8 (2013)
- [11] D. Hagedorn, H.-P. Heyne, S. Metschke, U. Langner, F. Löffler: *Development of High Precision Test Masses for the MicroSCOPE Space Mission*, Proceedings of the 11th ISMTII – Aachen & Braunschweig, Germany 2013
- [12] D. Hagedorn, H.-P. Heyne, H. Reimann, M. Neugebauer, S. Grüner, F. Löffler: *Fabrication and Measurement Development for Precise Test Masses for the MICROSCOPE Space Project*, Proceedings of the 9th euspen International Conference – San Sebastian, 2009
- [13] Projektantrag Kurzdarstellung VIP, *Optisches Sensorsystem für in-Prozess-Formmessungen an rotierenden Bauteilen in Werkzeugmaschinen (SENSYTIF)*, TU Dresden, PTB Braunschweig, Fernuniversität Hagen
- [14] Antrag Teil A, *Neuartige dreidimensionale Formmesstechnik für schnell rotierende Objekte*, Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Czarske, TU Dresden (PMP)
- [15] R. Kuschmierz, A. Davids, S. Metschke, F. Löffler, H. Bosse, J. Czarske, A. Fischer: *Optical, in-situ, three dimensional, absolute shape measurements in CNC metal working lathes*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, June 2016, Volume 84, Issue 9, pp 2739-2749
- [16] D. Hagedorn, R. Meeß, F. Löffler: *Fabrication of Sputtered Resistance Strain Gauges on Curved Surfaces*, Proc. of the 7th euspen International Conference, Bremen, May 2007
- [17] F. Schmaljohann, D. Hagedorn, A. Buß, R. Kumme, F. Löffler: *Thin-film sensors with small structure size on flat and curved surfaces*, Measurement Science and Technology, 23 (June 2012), 074019.
- [18] F. Schmaljohann, D. Hagedorn, F. Löffler: *Thin film sensors for measuring small forces*, Journal of Sensors and Sensor Systems, 4 (2015), pp. 91–95.
- [19] F. Schmaljohann: *Gesputterte, elektrisch isolierende Schichten für Dünnschichtsensoren auf metallischen Grundkörpern*, PTB-Bericht PTB-F-56, Fachverlag NW, 2016
- [20] E. Peiner, L. Doering: *Characterization of Diesel Injectors using Piezoresistive Sensors*, IEEE Sensors J. 13 (2013) 701–708
- [21] M. Xu, J. Kirchhoff, U. Brand: *Development of a traceable profilometer for high-aspect-ratio microstructures metrology*, Surface Topography: Metrology and Properties: 2 (2014), 2 [online only], 024002-1-024002-6
- [22] <http://www.ptb.de/emrp/tcim.html> (Letzter Zugriff am 30.01.2017)
- [23] http://www.ptb.de/de/org/5/53/533/thread/ThreadEA10_10.htm (Letzter Zugriff am 30.01.2017)
- [24] RPTB Version 2.05, *Software to Analyse Roughness of Profiles*, <https://www.ptb.de/rptb> (Letzter Zugriff am 30.01.2017)
- [25] CIPM MRA: *International equivalence of measurements*, <http://www.bipm.org/en/cipm-mra> (Letzter Zugriff am 30.01.2017)
- [26] E. Trapet, M. Franke, F. Härtig et al.: *Traceability of coordinate measurements according to the method of the virtual measuring machine*, Final report project MAT1-CT94-0076, PTB-Bericht PTB-F-35, 1999
- [27] ISO/TS 15530-4:2008-06: *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Koordinatenmessmaschinen (CMM): Technik für die Bestimmung der Messunsicherheit – Teil 4: Auswertung von aufgabenspezifischen Messunsicherheiten mithilfe von Simulationen*
- [28] DIN EN ISO 10012:2004-03: *Messmanagementsysteme – Anforderungen an Messprozesse und Messmittel*
- [29] JCGM 100:2008: *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement*

Validierung von Softwareprodukten für die Berechnung von Messunsicherheiten

Norbert Greif*, Heike Schrepf**

1. Einführung

Der „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (GUM) [1] ist ein messtechnisch-mathematisches Regelwerk für die Ermittlung und Angabe von Messunsicherheiten. Aufgrund seines Umfangs und seiner Komplexität, aber auch seiner breiten Anwendbarkeit sind in den Jahren seit seiner Verabschiedung zahlreiche Softwareprodukte entstanden, die Messtechnikern bzw. Metrologen bei der GUM-konformen Ermittlung der Unsicherheit ihrer gemessenen physikalischen Größen unterstützen. Gegenwärtig sind schon bei oberflächlicher Suche etwa ein Dutzend Programme im deutschsprachigen Markt ermittelbar, und keines dieser Programme wirbt damit, systematisch validiert bzw. unabhängig überprüft zu sein.

Die seit Ende der 1990er-Jahre entstandenen Softwareprodukte für die Berechnung von Messunsicherheiten werden, obwohl selten überprüft oder unabhängig getestet, in vielen Kalibrier- und Prüflaboratorien eingesetzt. Auch die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), das nationale Metrologieinstitut Deutschlands, setzt in seinen Kalibrier- und Prüflaboratorien und den Laboratorien der metrologischen Grundlagenforschung solche Programme ein, sofern deren Konformität mit dem GUM nachgewiesen wurde. Da die PTB sich als oberste nationale Instanz des richtigen und zuverlässigen Messens in hohem Maße der korrekten Anwendung des GUM verpflichtet fühlt, wurden Kompetenz und Prüftechnik für eine unabhängige, systematische und vergleichende Validierung dieser GUM-Programme aufgebaut. Die Prüfung von unterschiedlichen Programmen in den letzten Jahren hat gezeigt, dass diese Programme Mängel aufweisen können, die schwer zu identifizieren sind, die Berechnungsergebnisse unsystematisch, unauffällig oder nur sporadisch

verfälschen und die bei kurzen Tests vor dem Kauf nicht ohne Weiteres entdeckt werden können. Aus diesem Ergebnis lässt sich die Empfehlung ableiten, dass eine systematische Validierung der GUM-Programme vor ihrer Inbetriebnahme dringend anzuraten ist, falls die Ergebnisse im Rahmen z. B. des Gesetzlichen Messwesens oder in vergleichbarem rechtlichen Rahmen verwendet werden sollen.

Die PTB hat mehrere der verfügbaren bzw. auf dem Markt befindlichen GUM-Programme umfangreichen und vergleichenden Tests unterzogen und hat so in den vergangenen Jahren diesbezügliche Erfahrungen sammeln können. Die Tests haben zwei grundsätzlich unterschiedliche Arten von Problemen aufgezeigt: Probleme mit der Interpretation des GUM und Probleme bei der Umsetzung des GUM in Softwareprogrammen. Die Interpretationsprobleme sind von den Autoren in der Vergangenheit bereits diskutiert worden [2, 3, 4]. Auch über Implementierungsprobleme wurde in der Vergangenheit von einigen Autoren bereits berichtet [5, 6, 7, 8]. Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich nach der Erörterung einiger grundlegender Fragestellungen zur GUM-Konformität von Softwareprodukten hauptsächlich mit der Beschreibung der in der PTB entwickelten Testumgebung für GUM-Konformitätstests (vgl. auch [10]) und den bei der Durchführung der Softwarevalidierung gewonnenen Erfahrungen.

2. Grundlegende Fragestellungen zur GUM-Konformität

In diesem Abschnitt werden einige Fragen diskutiert, die sich stellen, wenn ein Softwareprodukt auf Konformität mit dem GUM geprüft werden soll. Diese Fragestellungen betreffen u. a. die Testbarkeit und die Eindeutigkeit von GUM-Aussagen.

* Dr. Norbert Greif, Arbeitsgruppe 8.54 "Validierung metrologischer Software", E-Mail: norbert.greif@ptb.de

** Heike Schrepf, Arbeitsgruppe 8.51 „Metrologische Software“, E-Mail: heike.schrepf@ptb.de

2.1 Testbarkeit der Aussagen des GUM

Der GUM enthält eine ganze Reihe von Aussagen, die nicht ohne Weiteres testbar sind. Zu diesen gehört zum Beispiel die Forderung, dass Beobachtungswerte nur verarbeitet werden dürfen, wenn sie unter Wiederholbedingungen erfasst wurden (GUM 4.2.1, GUM 4.2.3). Ein anderes Beispiel ist die Forderung, dass systematische Abweichungen in Form von Korrekturgliedern in die Modellgleichung eingearbeitet sein sollten (GUM 3.2.3, GUM 3.2.4, GUM 8.1).

Ob Wiederholbedingungen vorliegen oder ob die Modellgleichung die Korrekturglieder auf eine angemessene Weise enthält, kann ein Softwareprogramm nicht ohne Weiteres prüfen oder entscheiden. Hier ergibt sich also ein Testbarkeitsproblem.

In der Praxis stehen dem Anwender, der für seine Messungen eine Unsicherheitsanalyse erstellen möchte, neben den reinen, aktuell erhobenen Messdaten und den Kalibrierscheinen weitere Angaben zur Verfügung, wie z. B. Erfahrungen über die Wiederholbarkeit seiner Messung oder über die zufälligen oder möglicherweise systematischen Abweichungen einer Messanlage. Er kann aufgrund des vorhandenen Hintergrundwissens einschätzen, ob und wie weit die vom GUM hier geforderten Bedingungen zutreffen.

Für den Test von Softwareprogrammen lässt sich daraus der Schluss ziehen, dass das beim Messtechniker oder Benutzer des Programms vorhandene Kontextwissen in die Messunsicherheitsanalyse einbezogen werden muss, entweder in Form einer Abfrage oder (je nach Fall) auch in Form einer Diskussion im Handbuch des betreffenden Programms.

2.2 Fehlende Aussagen des GUM

Der GUM enthält gelegentlich eine Sammlung von in der Praxis sehr nützlichen Beispielen und Fällen, die aber nicht unbedingt ein systematisch aufgebautes Ganzes ergeben. So ist im Abschnitt über die Typ-B-Eingangsgrößen (GUM 4.3) beschrieben, wie die Angaben Wert und Standardmessunsicherheit aus anderen vorliegenden Angaben, z. B. aus dem Wert, der erweiterten Messunsicherheit und dem Erweiterungsfaktor, gewonnen werden können. Hier sind einige Fälle im Hauptteil des GUM erläutert, weitere Beispiele finden sich in Anmerkungen (Notes) oder in den Anhängen (Annexes), es gibt jedoch keine systematische Abhandlung des Themas. Der GUM selbst spricht in Abschnitt 4.3.11 davon, dass diese Diskussion nur beispielhaft sei.

Für den Test von GUM-Programmen stellt sich bei dieser Situation die Frage, ob ein einfacher Testfall eingeplant werden darf, bei dem Wert und Standardmessunsicherheit einer Typ-B-Eingangs-

größe direkt eingegeben werden, ohne aus anderen Angaben berechnet werden zu müssen. Dies stellt zwar den einfachsten Fall der Verarbeitung von Typ-B-Angaben dar – er wird aber vom GUM nur im Anhang H erwähnt. Damit ist unklar, ob ein Programm diese Möglichkeit vorsehen muss, um GUM-konform zu sein oder nicht.

2.3 Mehrdeutige Aussagen des GUM

Der GUM enthält Aussagen wie „Die Ergebnisgröße ist näherungsweise normalverteilt, wenn ihre Varianz sehr viel größer ist als ...“, (sinngemäß GUM G.2.1). Hier kann ein Messtechniker oder erfahrener Anwender Abschätzungen vornehmen, inwiefern „näherungsweise“ und „sehr viel größer“ in seinem Falle zutreffen. Ein Softwareprogramm, das den GUM implementiert, darf und kann solche Abschätzungen ohne vorliegendes Hintergrundwissen nicht vornehmen.

Bei einem Test solcher Aspekte muss mindestens ein positiver Testfall konstruiert werden, in dem die genannte Bedingung sicher eingehalten ist sowie mindestens ein negativer Testfall, in dem die Bedingung sicher nicht eingehalten ist (vgl. auch Abschnitt 3.3). Für den Bereich dazwischen, in dem die Bedingung kontextabhängig eingehalten oder nicht eingehalten ist, ist kein (objektiver) Test möglich.

Ähnlich liegt der Fall bei Aussagen wie «höhere Glieder müssen vernachlässigbar sein» (GUM 5.1.2, GUM 5.1.5) oder „die Korrelation von Eingangsgrößen darf vernachlässigt werden, wenn ...“ (GUM F.1.2.1 c).

In solchen und ähnlichen Fällen kann teilweise auf eine Abschätzung der Wirkungen der Störeinflüsse (Nichtlinearität, Korrelationen) auf die Messunsicherheit der Ergebnisgröße Bezug genommen werden. Sofern sich der fragliche, unscharf formulierte Störeinfluss auf das GUM-konform gerundete Ergebnis auswirkt, darf er nicht vernachlässigt werden.

3. Testumgebung für GUM-Konformitätstests

Die Testumgebung, die für die Durchführung von GUM-Konformitätstests aufgebaut wurde, soll helfen, den Testprozess zu formalisieren, vergleichbar zu machen, und somit die Bewertungen von GUM-Programmen zu konsolidieren.

Welchen Anforderungen die Testumgebung im Einzelnen genügen muss, wird im Abschnitt 3.1 diskutiert. Abschnitt 3.2 beschreibt den Aufbau der Testumgebung und Abschnitt 3.3 beschäftigt sich mit der Klassifikation der Testfälle. Abschließend wird in Abschnitt 3.4 die Validierung der Testumgebung behandelt.

3.1 Anforderungen an die Testumgebung

Die Testumgebung sollte wie jedes Softwareprodukt vor allem korrekt und funktional so umfassend wie möglich sein. Für den Fall, dass die Ergebnisse der Validierung gerichtsfest sein müssen (z. B. im Zusammenhang mit Ausschreibungen) wurde beim Aufbau der Testumgebung aber besonders auch auf Vergleichbarkeit und Nachvollziehbarkeit geachtet. Vergleichbarkeit bedeutet in diesem Zusammenhang, dass gesichert sein muss, dass alle Programme mit den gleichen Tests versorgt werden können und dass die Bewertung der Ergebnisse als *OK* oder *NICHT OK* anhand derselben Maßstäbe erfolgt.

Die Testumgebung sollte also die folgenden generellen Anforderungen erfüllen:

Richtigkeit: Die Testumgebung selbst muss vor dem Einsatz angemessen validiert werden. Ein nicht ausreichend validiertes Testwerkzeug kann nicht für die Validierung anderer Programme verwendet werden.

Vollständigkeit: Sämtliche testbaren Aussagen des GUM müssen berücksichtigt werden.

Rückführbarkeit: Für jeden Testfall und für jedes damit erzeugte Testergebnis muss dokumentiert sein, auf welchen Paragraphen bzw. welche testbare Aussage des GUM er/es sich bezieht.

Vergleichbarkeit der Ergebnisse: Die in der Testumgebung enthaltenen Testfälle müssen so gestaltet sein, dass sie für jedes GUM-Programm prinzipiell geeignet sind. Ein Testfall, der nur für ein Programm funktioniert, für ein anderes Programm aber verändert oder abgewandelt werden muss, bringt Probleme für die Vergleichbarkeit der Validierungen mit sich.

Dokumentation: Die Testfälle, Testschritte und Testergebnisse müssen dokumentiert werden bzw. dokumentierbar sein. Dazu gehören auch Angaben zum Testzweck. Der Testzweck besteht in der Regel aus dem GUM-Paragraphen, der Gegenstand des Testfalls ist.

Automatisierbarkeit: Ein hoher Grad an Automatisierung kann die Sicherung der anderen Qualitätsmerkmale, insbesondere der Richtigkeit und Vergleichbarkeit, unterstützen.

Nachhaltigkeit: Um die Testumgebung längerfristig nutzen zu können, sollte sie in möglichst geringem Umfang auf proprietärer Software oder proprietären Formaten aufbauen.

Die Anforderung *Vergleichbarkeit der Ergebnisse* stellt durchaus ein schwerwiegendes Problem dar. Um zu erläutern, was dies im Einzelnen für die Testumgebung bedeuten kann, soll hier genauer darauf eingegangen werden, welchen unterschiedlichen Aspekten der zu validierenden Programme die Testumgebung gerecht werden muss:

- Die Programme können den gesamten Umfang des GUM abdecken, aber auch nur Teile des GUM realisieren. Es kann z. B. Programme geben, die die Standardmessunsicherheit des Ergebnisses ermitteln, nicht aber die erweiterte Messunsicherheit (für deren Ermittlung mehr Wissen erforderlich ist). Es kann Programme geben, die bei Eingangsgrößen vom Typ B alle im GUM beschriebenen Ermittlungsmethoden berücksichtigen, andere mögen nur die häufigsten Fälle enthalten. Es gibt Programme, die Eingaben von Standardabweichungen nur als Dezimalzahl gestatten, andere erlauben auch die e-Darstellung oder die Eingabe in Prozent. Viele andere Unterschiede sind denkbar.
- Die Programme können unter verschiedenen Betriebssystemen laufen, verschiedene Grafikpakete für die Gestaltung der Benutzungsoberfläche sowie verschiedene mathematische Bibliotheken einbinden. Dies hat folgende Auswirkungen:
 - ▷ Die numerische Auflösung bzw. numerisch erreichbare Genauigkeit kann unterschiedlich sein.
 - ▷ Die Implementierungen der Standardfunktionen wie Sinus, Logarithmus usw. können sich unterscheiden. Der Umfang nutzbarer Standardfunktionen kann sich ebenfalls unterscheiden.
 - ▷ Das Fehlermanagement kann sich unterscheiden. Einige Programme nutzen das Fehlermanagement des Betriebssystems, andere nicht. Programme können sich auch darin unterscheiden, ob sich die Sprache der Fehlermeldungen einstellen lässt oder nicht.
 - ▷ Betriebssystem und Benutzungsoberfläche beeinflussen in starkem Maße die Auswahl bei den einsetzbaren Capture-Replay-Testwerkzeugen (vgl. Abschnitt 3.2). Diese Werkzeuge imitieren beim dynamischen Programmtest den Benutzer. Sie versorgen das Programm mit den Eingaben, fragen die Berechnungsergebnisse ab und vergleichen diese mit vorher festgelegten Soll-Ergebnissen. Capture-Replay-Werkzeuge müssen unter dem gleichen Betriebssystem laufen wie das zu prüfende Programm und sie müssen dessen Benutzungsoberfläche interpretieren können.

- Die Programme können sich in gewissem Rahmen hinsichtlich der Formate, Stellenanzahl und Rundungsregeln von Ausgaben unterscheiden. Hier gibt es zwar einige Vorgaben durch den GUM, aber diese betreffen nicht die Zwischen- und nicht alle Endergebnisse.

Die im Folgenden beschriebene Testumgebung erfüllt die oben formulierten Anforderungen und ist für die verschiedensten zu prüfenden GUM-Programme einsetzbar.

3.2 Aufbau der Testumgebung

Überblick

Die Testumgebung besteht aus folgenden Bausteinen:

- einem Datenmodell,
- einem Satz sogenannter universeller Testfälle, die keinerlei spezifische Programmeigenschaften, Betriebssysteme, Zahlenformate oder ähnliches berücksichtigen,

- einem Testfall-Konverter, der aus den universellen Testfällen programmspezifische Testfälle macht, nachdem der Benutzer die Randbedingungen wie zu prüfendes Programm, seine numerischen Eigenschaften, Zahlenformate usw. eingegeben hat,
- mehreren Sätzen spezifischer Testfälle, wobei jeder Satz zu einem zu prüfenden Programm und seinem Capture-Replay-Werkzeug gehört,
- mehreren Capture-Replay-Werkzeugen und den für ihren Betrieb nötigen Scripten (Anweisungsfolgen).

Einen groben Überblick des Aufbaus der Testumgebung gibt Bild 1.

Datenmodell

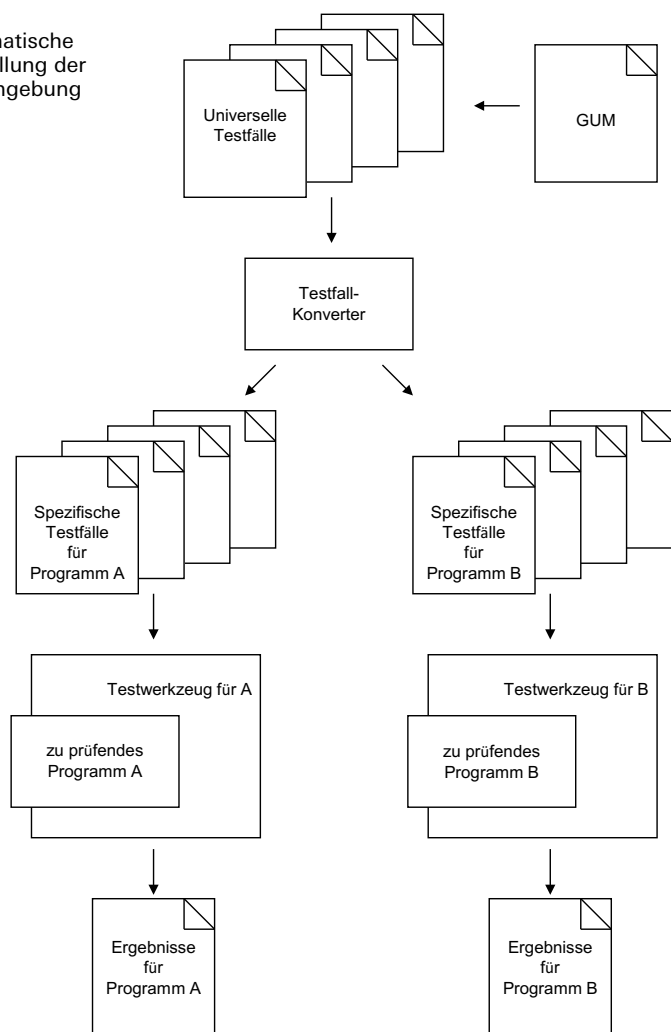
Erster Schritt bei der Etablierung der Testumgebung war der Entwurf eines Datenmodells, das sämtliche für Messunsicherheitsberechnungen erforderlichen Daten und Angaben umfasst. Dabei wurden auch bereits alle Angaben berücksichtigt, die für Berechnungen nach dem Supplement 1 des GUM (GUM S1) [9], also für Berechnungen nach dem Bayes-Ansatz und für Monte-Carlo-Simulationen, benötigt werden. Erweitert wurde das Datenmodell um technische Angaben, die speziell für das Testen erforderlich sind.

Wurzelement des Datenmodells ist der Knoten *TestCase* (vgl. Bild 2). Seine Hauptbestandteile sind:

- die Identifikation des Testfalls,
- der Testzweck,
- die Eingaben in das zu prüfende Programm,
- die Soll-Ausgaben, mit denen die Ist-Ausgaben des zu prüfenden Programms verglichen werden und
- die ggf. erforderlichen vor- und nachbereitenden Testschritte.

Ebenfalls bereits im Datenmodell wurde festgelegt, dass zu jeder Zahl begleitende Informationen hinterlegt werden. Dabei handelt es sich um den Typ der Zahl (integer, real), die Art der Darstellung (dezimal, wissenschaftlich, dezimal als Prozent), die Zahl der signifikanten Stellen und die numerische Toleranz. Wie diese begleitenden Informationen genutzt werden, ist im nächsten Abschnitt beschrieben. Für den Entwurf des Datenmodells wurde das Werkzeug „Liquid XML Studio“ der Firma Liquid Technologies Ltd. verwendet. Bild 2 zeigt vereinfacht die oberen Ebenen des Datenmodells.

Bild 1: Schematische Darstellung der Testumgebung



Universelle Testdaten

Für die Schaffung des Depots mit den universellen Testfällen wurden folgende Entwurfsentscheidungen getroffen:

- Jeder Testfall ist ein File. Hauptidentifikationsmerkmal ist eine eindeutige Testfallnummer.
- Das Fileformat ist XML. Der Aufbau der XML-Files richtet sich nach einer Grammatik, die automatisch aus dem Datenmodell gewonnen wird. Für die Generierung des Grammatikfiles wird ebenfalls das oben erwähnte Werkzeug „Liquid XML Studio“ verwendet.
- Die Soll-Ergebnisse werden mit dem Algebra-Programm „Mathematica“ der Firma Wolfram Research berechnet. Mathematica ist ein mit einstellbarer oder beliebiger Genauigkeit rechnendes Programm.

Der Aufbau der universellen Testfiles folgt dem oben beschriebenen Datenmodell. Die Hauptbestandteile sind:

Identification: Der Block Identifikation besteht aus der eindeutigen Testfallnummer, einer Versionsnummer und einer Liste von Variantennamen.

Purpose: Der Block Testzweck besteht, um den Anforderungen Nachvollziehbarkeit und Dokumentation gerecht zu werden, aus zwei Teilen: einem Referenz- und einem Klassifikationsteil.

Purpose / Reference: Der Referenzteil dient der Referenzierung auf die betroffenen Abschnitte des GUM bzw. GUM S1, d. h. er enthält die Bezeichnung des Dokuments und die Nummern der Abschnitte, die durch den vorliegenden Testfall überprüft werden. Parallel ist festgehalten, ob sich der Testfall auf den GUM oder den GUM S1, auf die Hauptteile des betreffenden Guides oder die informativen Teile (Anhänge, Bemerkungen, Beispiele) bezieht und ob es sich um einen positiven oder negativen Testfall handelt. Positive Testfälle prüfen, ob ein Berechnungsschritt bei Vorliegen aller Voraussetzungen richtig implementiert ist. Negative Testfälle prüfen, ob das Programm die Berechnung unterbindet, wenn die Voraussetzungen nicht gegeben sind.

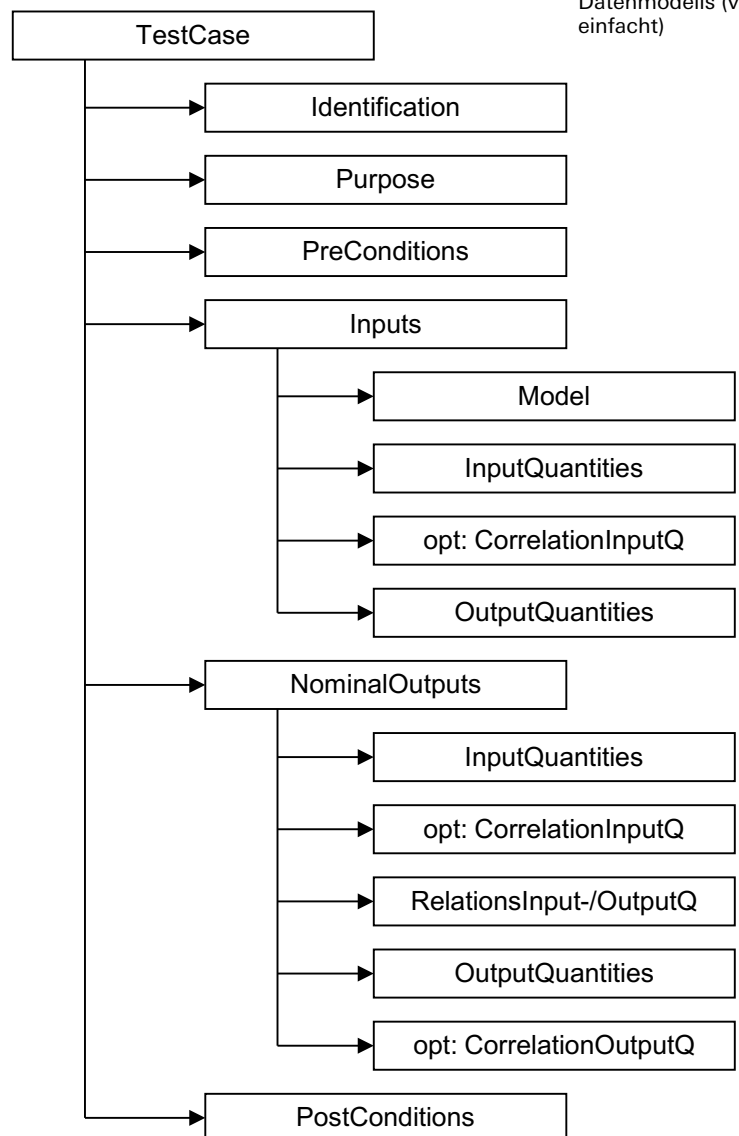
Purpose / Classification: Der Klassifikationsteil beschreibt den Testzweck mit festgelegten Begriffen, die im Ganzen ein hierarchisch aufgebautes System bilden. Dabei wird das GUM-Berechnungsverfahren in mehrere grobe Schritte wie Verarbeitung von Eingaben zu Typ-A- sowie Typ-B-Eingangsgößen, Berechnung der Emp-

findlichkeitskoeffizienten, Berechnung des Werts der Ergebnisgrößen usw. unterteilt. Genaueres zur Klassifikation der Testfälle ist im entsprechenden Abschnitt weiter unten beschrieben.

Klassifikations- und Referenzteil dienen neben der Dokumentation des Testzwecks auch und vor allem der Filterung von Testfällen bei der Konvertierung. Dabei kann vorgegeben werden, ob und welche Testfälle überhaupt konvertiert und damit für die Validierung vorbereitet werden sollen. Die Filterung kann sich auf bestimmte Berechnungsschritte, bestimmte Abschnitte des GUM oder bestimmte Qualitätsmerkmale beziehen. Die Filterung ist ebenfalls weiter unten genauer erläutert.

Inputs: Der Block mit den Eingaben umfasst alle Angaben, mit denen das zu prüfende Programm versorgt werden soll. Das können sein:

Bild 2:
Obere Ebenen des Datenmodells (vereinfacht)



- Angaben zu den Modellgleichungen (Liste von Gleichungen, Beschreibungen),
- Angaben zu jeder Eingangsgröße (Identifikation, Symbol, Beschreibung, Einheit, Typ, Beobachtungswerte oder Schätzwert, Standardabweichung, ...),
- Angaben zu jeder Ergebnisgröße (Identifikation, Symbol, Beschreibung, Einheit, Überdeckungswahrscheinlichkeit, ...),
- ggf. Angaben zu Korrelationen zwischen den Eingangsgrößen, wenn diese nicht durch das Programm selbst ermittelt werden sollen,
- ggf. Angaben zu den zu verwendenden Monte-Carlo-Parametern.

NominalOutputs: Der Block mit den Soll-Ausgaben umfasst bei negativen Testfällen eine oder mehrere erwartete (Fehler-)Meldungen. Bei positiven Testfällen sind enthalten:

- Die Ergebnisse der Berechnungen für jede Eingangsgröße (Schätzwert, Standardmessunsicherheit, Freiheitsgrad, ggf. relative Standardmessunsicherheit),
- Die Korrelationen zwischen den Eingangsgrößen, falls das Programm diese ermitteln soll,
- Die Empfindlichkeitskoeffizienten (die partiellen Ableitungen der Ergebnisgrößen nach den Eingangsgrößen) und die Unsicherheitsbeiträge der Eingangsgrößen zu den einzelnen Ergebnisgrößen,
- Die Ergebnisse der Berechnungen für jede Ergebnisgröße (Schätzwert, Standardmessunsicherheit, relative Standardmessunsicherheit, ggf. Erweiterungsfaktor, erweiterte Messunsicherheit, ...),
- Korrelationen zwischen Ergebnisgrößen, falls diese getestet werden sollen.

Die Blöcke mit den vor- und nachbereitenden Testschritten können z. B. Programmoptionen enthalten, die vor der Durchführung des Testfalls ein- und nach Durchführung des Testfalls wieder ausgeschaltet werden sollen. Häufig ist z. B. die Anzeige der relativen Standardmessunsicherheit bei den Programmen standardmäßig abgeschaltet und muss, wenn die relative Standardmessunsicherheit geprüft werden soll, vor Durchführung des Testfalls erst eingeschaltet werden. Ein anderes Beispiel wäre die Sprache der Benutzungsoberfläche, die für einzelne Testfälle umgeschaltet und nach dem Testfall wieder auf den Standardwert gesetzt werden kann.

Alle Zahlenwerte, die zu den Eingaben zählen, werden mit begrenzter Stellenanzahl festgelegt (meist 2 bis 8 dezimale Stellen). Alle Zahlenwerte, die zu den Soll-Ausgaben zählen, werden durch Mathematica mit beliebiger Stellenanzahl berechnet (soweit möglich) und mit 20 Dezimalstellen in das universelle Testfile übernommen. Die Anzahl der Dezimalstellen für Soll-Ausgaben ist bei den universellen Testfiles aus zwei Gründen bewusst hoch gewählt. Zum einen verlieren die Zahlen Dezimalstellen bei den Anpassungen im GUM-Testfall-Konverter (Formatänderungen, Runden, Kürzen). Zum anderen kommen in bestimmten Bereichen der Physik (Zeitmessung) relative Unsicherheiten im Bereich 10^{-15} und darunter vor, d. h. ein der Standardmessunsicherheit angepasster Wert könnte theoretisch 15 oder mehr signifikante Stellen haben. Alle Zahlenwerte werden mit begleitender Information – Typ der Zahl (integer, real) und Format (dezimal, wissenschaftlich, dezimal als Prozentangabe) – im Testfile abgelegt.

Mathematica wird außerdem verwendet, um zu jeder Zahl einen Toleranzbereich zu berechnen, der sich aus der begrenzten numerischen Auflösung eines auf PC-Technik basierenden Programms ergibt. Ausgangspunkt ist dabei jede Zahl, die später als Eingabe dient. Wird diese Zahl in das zu prüfende Programm eingegeben, wird sie dort in eine Maschinenzahl umgewandelt, die auf einer Exponentialdarstellung und einer Mantisse zur Basis 2 beruht. Die Länge der Mantisse kann dabei, eine entsprechende normkonforme (IEEE 754 [18]) Implementierung der Zahlen vorausgesetzt, 23 oder 52 (einfach oder doppelt genaue Zahlen) betragen. Mit dieser begrenzten Mantissenlänge geht eine entsprechende numerische Auflösung einher. Jede eingegebene Zahl wird also schon durch die Umwandlung in eine Maschinenzahl mit einem Fehler von etwa ± 2 Mantissenlänge / 2 beaufschlagt. Dieser Fehler kann berechnet werden und vergrößert sich mit jedem Schritt, bei dem die Maschinenzahl weiterverarbeitet wird. Der numerische Fehler lässt sich über die Fehlerschrankenmethode bis zu den Soll-Ergebnissen weiterverfolgen. Am Ende dieser Berechnung steht ein Toleranzbereich für jedes Zwischen- und Endergebnis, der sich allein aus der begrenzten numerischen Auflösung eines auf PC-Technik basierenden Rechenprogramms ergibt.

Die Berechnung dieses Toleranzbereichs dient der Kontrolle der Testfälle. Enthält ein Testfall ein hochkomplexes Modell mit vielen korrelierten Eingangsgrößen, kann der numerische Fehler soweit anwachsen, dass er sich sogar auf das auf eine GUM-konforme Stellenanzahl gerundete Endergebnis auswirkt. Hier würde dann bei der Auswertung des Testfalles, wenn das vom zu prüfenden Programm produzierte (numerisch ungenaue) Ist-Ergebnis mit dem (exakt berechneten)

Soll-Ergebnis verglichen wird, der Toleranzbereich mit herangezogen werden. Tatsächlich tritt dieser Fall bei Verwendung doppelt genauer Zahlen nicht auf, d. h. die Testfälle sind so gestaltet, dass sich bei doppelt genaueren Zahlen die begrenzte numerische Auflösung eines Rechners nicht auf die Ergebnisse auswirkt.

Um die numerischen Effekte zu berücksichtigen, gibt es jeden Testfall in zwei Varianten: eine für einfach genaue, eine für doppelt genaue Zahlendarstellung. Praktisch verwendet wurde bisher nur die zweite Variante, da alle bisher zu validierenden Programme mit doppelter Genauigkeit arbeiteten.

Der Toleranzbereich wird im Übrigen auch verwendet, um die gelegentlich etwas ungenau berechneten oder gerundeten Ergebnisse aus den Beispielen im Anhang H des GUM in Testfälle umwandeln zu können. Der im GUM H zitierte Ergebniswert wird in den Testfall als Soll-Ergebnis übernommen, aber der Toleranzbereich des Soll-Werts wird so groß gewählt, dass ein korrekt berechneter Wert als ebenfalls gültig betrachtet wird.

Als Zufallszahlengeneratoren für die Erzeugung zufallsbasierter Eingangsgrößen wurden der Pseudozufallszahlengenerator nach Marsaglia-Zaman und der Mersenne Twister verwendet. Zufallsbasierte Eingangsgrößen mit bestimmter Verteilung wurden vor ihrer Verwendung mit verschiedenen statistischen Tests, u. a. Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov und/oder WatsonU2, auf die Einhaltung der gewünschten Verteilung geprüft. Diese Tests sind aber im Allgemeinen bei Negativfällen nicht sehr zuverlässig.

Erweiterungsfaktoren für verschiedene Verteilungen wurden für p-symmetrische und kürzeste Überdeckungsintervalle über die p-Quantile berechnet, soweit möglich. Ersatzweise wurden verschiedene Näherungen verwendet.

Der Grad der Linearität der für die Testfälle verwendeten Modellgleichungen wird kontrolliert, in dem die Taylorentwicklung bis zur Ordnung 5 berechnet wird. Zusammenfassend ist die Entwicklung der universellen Testfälle auf der Grundlage des vorgestellten Datenmodells schematisch in Bild 3 dargestellt.

GUM-Testfall-Konverter

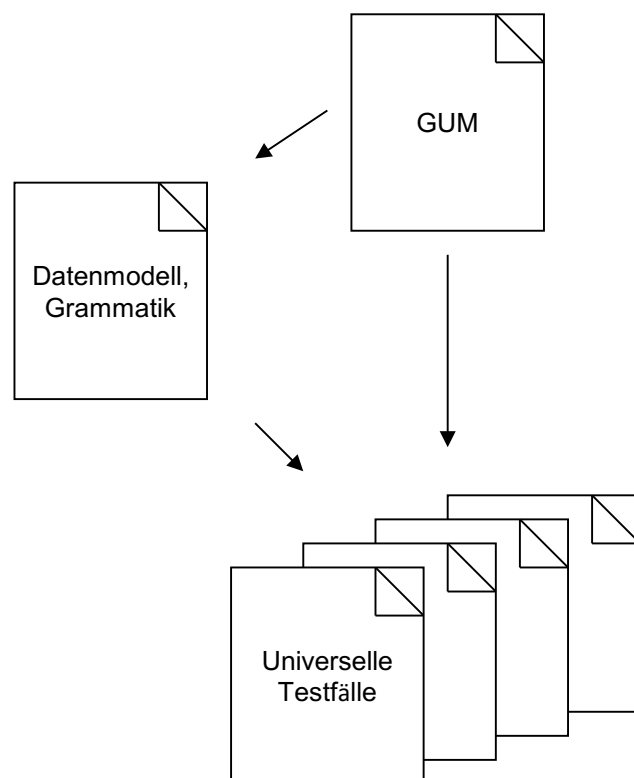
Der GUM-Testfall-Konverter konvertiert die universellen Testfälle in spezifische Testfälle. Der Konverter besteht aus einem Lese-Block, der die universellen Testfälle einliest und im Speicher vorhält, sowie aus je einem Ausgabe-Block für jedes zu prüfende Programm. Der Ausgabe-Block gibt die konvertierten Testfälle wieder in Form von XML-Files aus. Die spezifischen Testfälle berücksichtigen alle Besonderheiten des zu prüfenden Programms, des bei der Prüfung benutzten

Capture-Replay-Werkzeugs und ggf. des darunter liegenden Betriebssystems. Den schematischen Aufbau des Konverters zeigt Bild 4. Wenn nur die Konformität der universellen Testfälle mit der Grammatik überprüft werden soll, kann der Konverter auch ohne Ausgabe betrieben werden.

Der GUM-Testfall-Konverter ist objektorientiert (OO) programmiert. Die OO-Paradigmen wurden dazu benutzt, die Erfüllung der Anforderung *Vergleichbarkeit* abzusichern. Durch die gemeinsame Nutzung der (validierten) Konvertierungsfunktionen und durch die Nutzung der Vererbung wurde der Code, der sich in den einzelnen Ausgabe-Blöcken befindet und tatsächlich für jedes zu prüfende Programm unterschiedlich ist, stark minimiert.

Der Lese-Block nutzt im Kern den Open Source Parser Xerces (Apache Software Foundation) und versorgt diesen mit XML-Testfile und Grammatikfile. Der Xerces-Parser parst das File, meldet Verstöße gegen die Grammatik und stellt die eingelesenen Daten zu einem Baum zusammen. Dieser wird anschließend weiteren Überprüfungen unterzogen, die nicht in Form von Regeln in der Grammatik abgelegt werden können. Dazu gehört z. B. die Regel, dass für jede physikalische Größe, die in den Modellgleichungen genannt ist, ein Block mit Eingaben und ein Block mit Soll-Ausgaben vorhanden sein muss. Die intern aufgebaute Datenstruktur wird anschließend gefiltert sowie konvertiert durch den Ausgabe-Block wieder ausgegeben. Filterung und Konvertierung sind in den nächsten beiden Punkten genauer beschrieben.

Bild 3: Entwicklung universeller Testfälle auf der Grundlage von GUM und Datenmodell



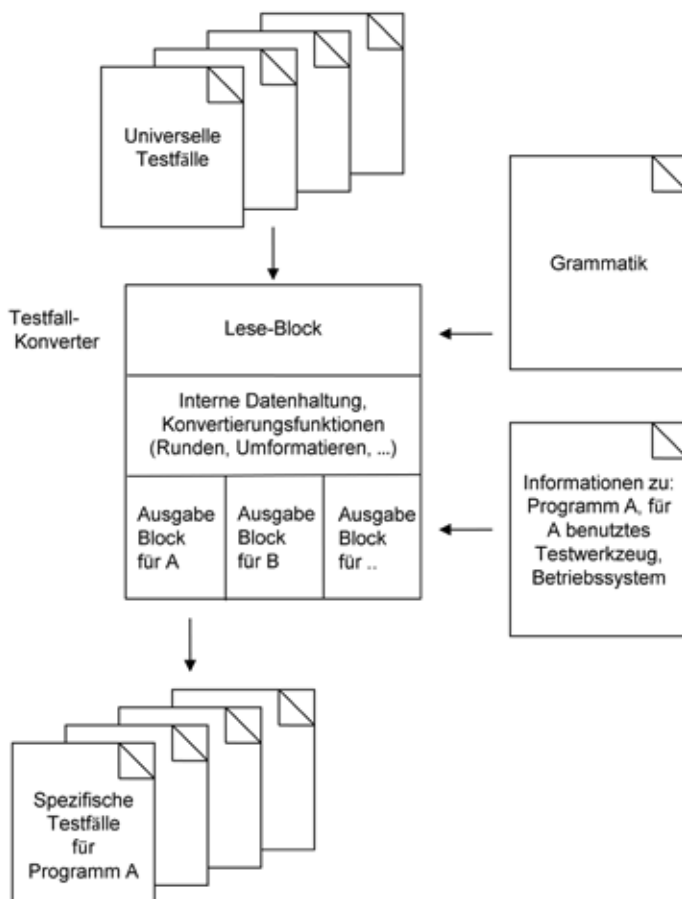
Filterung

Ein wichtiger Zweck des GUM-Testfall-Konverters ist die Filterung. Dabei werden die Testfälle von der Konvertierung ausgenommen, die das zu prüfende Programm nicht verarbeiten kann oder die aus anderen Gründen im vorliegenden Fall nicht benutzt werden sollen.

Möglich ist z. B. eine Konvertierung nur der Testfälle, die sich auf die Funktionalität der Programme beziehen. Dann werden die Testfälle, die sich auf andere Qualitätsmerkmale (z. B. Benutzbarkeit oder Zuverlässigkeit) beziehen, von der Konvertierung ausgenommen. Genauso ist eine Berücksichtigung nur der Testfälle möglich, die sich auf einen bestimmten Berechnungsschritt des GUM beziehen (z. B. Ermittlung der partiellen Ableitungen) oder solcher, die sich auf einen bestimmten Abschnitt des GUM beziehen.

Weiterhin ist es möglich, die Prüfung auf die Hauptteile des GUM zu beschränken, wenn etwa die informativen Teile wie Anhänge und Beispiele als nicht verbindlich angesehen werden sollen. Letztlich ist es auch möglich, die Testfälle auszunehmen, von denen bekannt ist, dass das zu prüfende Programm die dafür benötigten Funktionen nicht enthält. Für die endgültige Bewertung eines Programms oder vielleicht den Vergleich mehrerer Programme ist dies eine wichtige Qualitätsaussage, die speziell dokumentiert wird.

Bild 4:
Erzeugung spezifischer Testfälle durch den GUM-Testfall-Konverter



Konvertierung

Die Konvertierung der universellen in die spezifischen Testfälle bezieht sich auf die folgenden Aspekte:

- Änderung der Reihenfolge von Eingaben, falls nötig. In den universellen Testfällen sind die Eingaben in fachlich sinnvoller Reihenfolge angeordnet. Werden die Eingaben für die zu validierenden Programme vorbereitet, ist gelegentlich eine Änderung der Reihenfolge nötig, um die Daten für den nächsten Schritt (das eigentliche Testen des zu prüfenden Programms) optimal vorzuhalten.
- Änderung von Standardfunktionsnamen und Symbolnamen, falls nötig. Die in den universellen Testfällen verwendeten Namen von Standardfunktionen müssen ggf. in die Namen umgewandelt werden, die das zu prüfende Programm versteht (z. B. „asin“, „ASin“, „ArcSin“). Symbolnamen und Einheitenbezeichner mit z. B. griechischen Buchstaben müssen ggf. konvertiert oder ersetzt werden, wenn das zu prüfende Programm diese nicht akzeptiert oder speziell codiert.
- Änderung von Datenformaten, Stellenzahlen und Rundungsregeln. GUM und GUM S1 schreiben für einige entscheidende Größen (Standard- und erweiterte Messunsicherheit sowie Wert der Ergebnisgröße, Korrelationskoeffizienten) die Anzahl der signifikanten Stellen oder der Stellen, auf die zu runden ist, vor. Für die restlichen Größen und alle Zwischenergebnisse ist die Stellenanzahl nicht vorgegeben. Auch die Datenformate (e- oder dezimale Darstellung, Prozent) und die Rundungsregeln sind im GUM und GUM S1 nicht festgelegt. Hier müssen die Soll-Ausgaben, damit sie mit den tatsächlichen Ausgaben der Programme verglichen werden können, bezüglich Format, Stellenzahl und Rundung diesen angepasst werden. Wohlgedenkt trifft dies nur für Werte zu, für die keine Vorschriften in GUM und GUM S1 existieren.
- Umsetzung der vor- und nachbereitenden Testschritte in Bedienanweisungen für das Programm. Soll z. B. die relative Messunsicherheit getestet werden, dann werden in den spezifischen Testfall die Bedienschritte für das Einschalten der entsprechenden Programmoption abgelegt.

Spezifische Testdaten

Die spezifischen Testfälle liegen wie die universellen Testfälle als XML-Files mit einem Testfall pro File vor. Identifikation und Testzweck werden ohne Änderung aus den universellen Testfällen übernommen. Der restliche Inhalt stellt im Prinzip eine Anweisung für die Bedienung des zu prüfenden Programms dar, einschließlich der einzugebenden Werte, der zu drückenden Buttons, der zu wählenden Menüpunkte und der zu kontrollierenden Programmausgaben. Die spezifischen Testfälle können im Einzelfall auch als Arbeitsanweisung für die manuelle Durchführung des Testfalls dienen. Die im Testfall enthaltenen Zahlenangaben (Eingaben und Soll-Ausgaben) entsprechen in ihren Formaten, Stellenzahlen und Rundungsregeln den Spezifika des zu prüfenden Programms, sofern sie nicht durch den GUM oder GUM S1 vorgegeben sind.

Capture-Replay-Testwerkzeuge

Für den eigentlichen dynamischen Programmtest werden sogenannte Capture-Replay-Testwerkzeuge eingesetzt (vgl. Bild 5). Diese imitieren einen Benutzer. Im Allgemeinen wird das zu prüfende Programm von einem Benutzer erst- und einmalig bedient, während im Hintergrund das Capture-Replay-Werkzeug den Vorgang aufzeichnet und in Form eines Scripts (häufig in gängigen Sprachen wie Basic oder C) ablegt. Dieses Script kann dann manuell so verändert werden, dass die Aufzeichnung viele Male abläuft und die Eingaben, statt von einem Benutzer hart vorgegeben zu werden, für jeden Durchlauf aus einem Repository entnommen werden. Desgleichen wird festgelegt, welche Ausgaben des Programms mit welchen Soll-Ergebnissen aus dem Repository verglichen werden sollen. Im Script können auch Zeitpunkte oder Bedingungen festgelegt werden, an denen ein Screenshot des zu prüfenden Programms gezogen und abgelegt werden soll, um z. B. die manuelle Auswertung von Grafiken vorzunehmen.

Für die Auswahl eines passenden Capture-Replay-Werkzeugs ist nicht nur entscheidend, dass es unter demselben Betriebssystem wie das zu prüfende Programm lauffähig sein muss, sondern vor allem, dass es die Oberflächenelemente des Programms kennen muss. Je strikter sich ein zu prüfendes Programm dabei an einen gewissen Standard hält (z. B. Win32 API, MFC, Java AWT/SWT/Swing, .NET Windows Forms), desto größer ist die Auswahl möglicher Testwerkzeuge.

Häufig können gute Capture-Replay-Werkzeuge für mehrere zu prüfende Programme eingesetzt werden, für jedes werden jedoch separate Scripte benötigt. Diese basieren zwar auf einem gleichen Grundschema für den Testablauf, sind aber auf

die Oberfläche und die Eingabereihenfolge, sowie weitere Eigenschaften der zu prüfenden Programme abgestimmt.

Das Repository für die Durchführung der Testfälle besteht aus den spezifischen XML-Testfällen. Für diese wird ein Inhaltsverzeichnis in Form einer Arbeitsliste, die automatisch erzeugt und manuell bearbeitet werden kann, hinterlegt. Diese Arbeitsliste wird vom eingesetzten Capture-Replay-Werkzeug eingelesen, das so die Anzahl, Reihenfolge und den Speicherort der automatisch abzuarbeitenden Testfälle kennt.

In der Regel müssen die Scripte um einige spezielle Vergleichsfunktionen erweitert werden. Beim Vergleich der von den Programmen ausgegebenen Ist-Werte mit den aus dem Repository stammenden Soll-Werten wird nicht nur die Übereinstimmung der Beträge, sondern auch die Übereinstimmung der Anzahl der ausgegebenen Stellen überprüft. So ist im Rahmen einer GUM-Prüfung u. U. ein ausgegebener Wert von 5,0 nicht gleichwertig zu dem Soll-Wert 5,000 oder der ausgegebene Wert 0,005 nicht identisch zum Soll-Wert 5,00e-3.

Die Capture-Replay-Werkzeuge bieten umfangreiche Protokollierungsmöglichkeiten. Protokolliert werden nicht nur die eingegebenen Werte und ob die Eingabe erfolgreich war, sondern auch die ausgelesenen Werte, das Vergleichsergebnis mit den Soll-Werten und die im Einzelnen am Programm vollzogenen Bedienschritte.

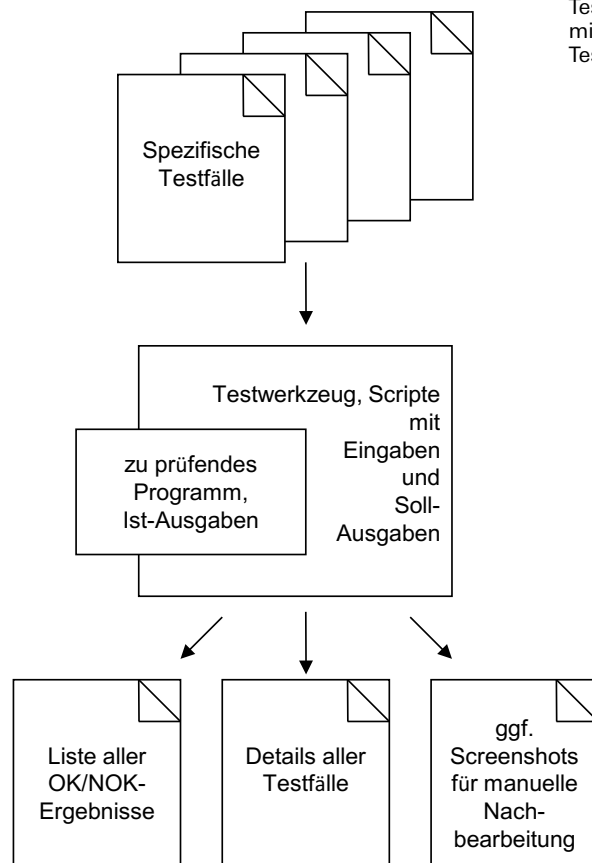


Bild 5: Testdurchführung mit automatisiertem Testwerkzeug

3.3 Klassifikation der Testfälle

Alle universellen Testfälle folgen einem Klassifikationsschema. Die jeweilige Ausprägung (Position im Schema) ist im Testzweck niedergelegt. Der Testzweck wird unverändert in die spezifischen Testfälle übernommen. Das Klassifikationsschema ist so aufgebaut, dass sämtliche Testfälle erfasst werden können und dass eine gewisse Kontrolle über die Vollständigkeit der Testfälle möglich ist.

Ausgangspunkt für das Schema ist der Gedanke, dass die Testfälle letztendlich dem Test eines Softwareprogramms dienen. Deswegen wurden als oberste Ebene des Klassifikationsschemas die Software-Qualitätsmerkmale aus dem internationalen Software-Standard ISO/IEC 25010 [19] gewählt. Von den hier definierten Software-Qualitätsmerkmalen Funktionalität, Effizienz, Kompatibilität, Benutzbarkeit, Zuverlässigkeit, Sicherheit, Wartbarkeit und Portabilität sind aber nur die Merkmale Funktionalität, Zuverlässigkeit und Benutzbarkeit wirklich entscheidend, um die Konformität einer Software mit dem GUM zu bewerten. Möglicherweise könnte auch das Qualitätsmerkmal Effizienz in Zukunft noch berücksichtigt werden. Das würde es gestatten, bei Monte-Carlo-Simulationen Prüfungen der Antwortzeiten einzubeziehen. Dies ist aber bisher nicht der Fall.

Funktionalität

Zum Qualitätsmerkmal Funktionalität gehören alle Testfälle, die nachweisen, dass der GUM korrekt und vollständig umgesetzt wurde. Die Testfälle werden in positive und negative Testfälle unterteilt, also in solche, die nachweisen, dass GUM bzw. GUM S1 korrekt umgesetzt sind und solche, die nachweisen, dass bei fehlender Anwendbarkeit von GUM bzw. GUM S1 keine Berechnung erfolgt.

Die zweite Ebene detailliert die Berechnungsschritte, die für den Nachweis der Funktionalität erforderlich sind. Die Berechnungsschritte werden (willkürlich) wie folgt gewählt:

- Berechnungen zur Verarbeitung der Eingaben zu einer Typ-A-Eingangsgröße (ohne Korrelation der Eingangsgrößen),
 - Berechnungen zur Verarbeitung der Eingaben zu einer Typ-B-Eingangsgröße (ohne Korrelation der Eingangsgrößen),
 - Interpretation der Modellgleichungen und Berechnung der Empfindlichkeitskoeffizienten,
 - Berechnung der Schätzwerte, Standardmessunsicherheiten und Überdeckungsintervalle der Ergebnisgrößen ohne Korrelation der Eingangsgrößen,
 - Berechnung der Schätzwerte, Standardmessunsicherheiten und Überdeckungsintervalle der Ergebnisgrößen mit Korrelation der Eingangsgrößen,
 - Berechnung der Korrelation der Ergebnisgrößen,
 - Nachberechnung der Beispiele aus GUM und GUM S1. Da die Beispiele stets komplette Berechnungen umfassen, werden sie keinem der anderen Schritte zugeordnet.
- Für jeden dieser Berechnungsschritte folgen weitere Klassifikationsebenen, und zwar umso mehr, je komplexer der Berechnungsschritt ist. Insgesamt ergeben sich zwischen fünf und neun Ebenen.
- Auf die weiteren Details des Klassifikationsschemas soll hier nur am Beispiel der Auswertung von Typ-A-Eingangsgrößen eingegangen werden. Bei diesem Schritt können verschiedene Fälle vorliegen:
- Die Messung kann unter Wiederholbedingungen erfolgt sein oder nicht (GUM 4.2.1, GUM 4.2.3). Dieser Aspekt kann nur mit zusätzlichem Input (Kontextwissen) getestet werden.
 - Die Messwerte können unabhängig sein oder nicht (GUM 4.2.1, GUM 4.2.3, GUM C.3.1). Diese Aussage ist teilweise testbar. Ein Programm könnte automatisch Korrelations- und Autokorrelationsmaße ermitteln und mit Grenzwerten vergleichen, sofern der Benutzer solche Grenzwerte vorgibt. Universell gültige Grenzwerte gibt es allerdings nicht. Bei den Testfällen müssen Beobachtungsreihen mit und ohne Autokorrelation (z. B. Drift) sowie unkorrelierte und korrelierte Beobachtungsreihen vorgesehen werden.
 - Die Beobachtungswerte können normal- oder nicht normalverteilt sein. Auch wenn dies für die Berechnungen nach GUM an sich keine Rolle spielt, könnte es sich auf die Berechnung von Mittelwert und Standardabweichung im zu prüfenden Programm auswirken.
 - Es kann Vorwissen in Form einer apriori-Standardabweichung vorliegen oder auch nicht (GUM 4.2.4). Die Testfälle müssen beides berücksichtigen.
 - Die Beobachtungswerte können vor der Verarbeitung nach GUM 4.2 vorbehandelt werden (z. B. indem ein Untergrund abgezogen wird) oder nicht. Solche Vorverarbeitungen (wie z. B. in den GUM Beispielen H.2, H.4, H.5) müssen ebenfalls bei den Testfällen berücksichtigt werden.

- Die Verarbeitung der Beobachtungswerte kann nach frequentiellem Ansatz (GUM 4.2) oder nach Bayes erfolgen (GUM S1 6.4.9).
- Beobachtungsreihen können unterschiedlich viele Beobachtungswerte enthalten. Die Anzahl kann im mathematischen Sinne zu gering sein (keine oder nur ein Wert, bei Anwendung des Bayes-Ansatzes auch zwei oder drei Werte), im statistischen Sinn zu gering sein oder im mathematischen und statistischen Sinne ausreichend sein. Die Testfälle mit weniger als zwei bzw. vier Beobachtungswerten gehören zu den negativen Testfällen – solche Reihen müssen von den zu prüfenden Programmen auf jeden Fall abgelehnt werden.
- Im Standardfall bestimmen sich Mittelwert, Standardabweichung der Einzelwerte und Standardabweichung des Mittelwerts nach vorgegebenen Formeln des GUM (GUM 4.2). Für das Testen werden Testfälle nach dem Äquivalenzklassenprinzip gewonnen [11–17]. Erläutert wird dies hier anhand der Bestimmung der experimentellen Standardabweichung (GUM 4.2.2):
Das Ergebnis der Berechnung wird durch folgende Größen bestimmt: Anzahl der Messwerte, die einzelnen Messwerte selbst und ihr Mittelwert. Werden für diesen Sachverhalt Testfälle generiert, dann werden diese Einflüsse systematisch variiert.

Zuverlässigkeit

Zum Qualitätsmerkmal Zuverlässigkeit gehören Testfälle, die nachweisen, dass das Fehlermanagement funktioniert. Zwar schreibt der GUM selbstverständlich nichts über ein Fehlermanagement vor, jedoch muss gesichert sein, dass durch auftretende Fehler Berechnungen nicht verfälscht werden (z. B. indem ein Term aus der Modellgleichung, der zu einer Division durch Null führen würde, einfach ignoriert wird).

Benutzbarkeit

Zum Qualitätsmerkmal Benutzbarkeit gehören verschiedene Fragestellungen:

- Ist ein eindeutiges (d. h. Irrtümer möglichst vermeidendes) Arbeiten mit dem Programm möglich?
- Ist die Eingabe von Zahlen in wissenschaftlicher Notation möglich?
- Können passende Werte auch als Prozentangabe eingegeben werden?

- Können Symbole, die für physikalische Größen und für Einheiten (griechische Buchstaben, Sub- und Superscripte) stehen, direkt eingegeben werden oder müssen sie umcodiert werden?
- Ist der Zahlenbereich, der für Zahlen allgemein oder für Argumente von Standardfunktionen ausgeschöpft werden kann, ausreichend?
- Gibt es bei jeder Eingabe eine Plausibilitätskontrolle?
- Kann ein komplexes Modell in mehrere Gleichungen oder in Modelle und Hilfsfunktionen zerlegt werden?

Die Testfälle zum Merkmal Benutzbarkeit werden ebenfalls in positive und negative Testfälle unterteilt. Die positiven Testfälle dienen der Prüfung der Akzeptanz von zulässigen Eingaben in verschiedenen Formaten und mit verschiedenen Werten. Die negativen Testfälle dienen dem Nachweis, dass unzulässige Formate und Werte abgelehnt werden und zu keinen Problemen bei der Korrektur der Werte und der Fortsetzung der Arbeit führen.

3.4 Validierung der Testumgebung

Wie oben bereits ausgeführt, kann für die Validierung von Softwareprogrammen kein Produkt verwendet werden, das selbst unzureichend validiert ist. Der Einsatz und die Entwicklung der Testumgebung ist allerdings in dieser Hinsicht ein sich selbst regulierender Prozess: Wird festgestellt, dass ein Testfall gar nicht oder nicht mit OK beendet wurde, erfolgt zwangsweise die systematische Analyse, worin die Ursache dieses Abbruchs oder dieser Abweichung besteht. Sie muss nicht beim zu prüfenden Programm liegen, sondern kann auch in der Testumgebung liegen, die dann entsprechend korrigiert werden muss. In diesem Sinne führt jeder Fehler und jede Abweichung in der Testumgebung dazu, das höchstens ein „falsch negatives“ Ergebnis erzielt wird, d. h. ein Testfall wird mit NOT OK oder gar nicht beendet, obwohl das zu prüfende Programm korrekt gearbeitet hat.

Ungeachtet dieses regulierenden Umstands wurden folgende Aspekte der Testumgebung einer Validierung unterzogen:

- das Datenmodell,
- die Grammatik,
- der GUM-Testfall-Konverter mit Lese-Block 1 (Standard-Parser Xerces), Lese-Block 2 (weitere Testfunktionen), den Ausgabe-Blöcken (Konvertierungsfunktionen) und der Stringbehandlung.

Das Programm Mathematica ist, da es die Soll-Ergebnisse berechnet, ein zentraler Bestandteil der Testumgebung. Es ist ein betriebsbewährtes, seit mehr als zwanzig Jahren vertriebenes und stetig gepflegtes Produkt mit einer großen, aktiven Anhängerschaft und einem umfangreichen Archiv. Angesichts des Umfangs von Mathematica scheint eine Validierung - selbst reduziert auf die hier benötigte Funktionalität - schlicht aussichtslos.

Die Capture-Replay-Testwerkzeuge sind kommerziell erhältliche Tools, deren Betriebsbewährtheit weitgehend offen ist. Zwecks Überprüfung der Testwerkzeuge bzw. der zu ihrem Betrieb erstellten Scripte wurde jede Abweichung und jeder Abbruch eines Testfalls systematisch bezüglich bestimmter Punkte untersucht. Dabei wurden die umfangreichen Protokollierungsmöglichkeiten der Werkzeuge genutzt. So konnten schrittweise alle Mängel der Scripte behoben werden.

Validierung des Datenmodells

Die Vollständigkeit des Datenmodells wurde während seiner Entwicklung unter Heranziehung des GUM permanent geprüft. Die Ergebnisse flossen unmittelbar in das Modell ein. Bei dem Versuch, alle Aspekte des GUM in Testfälle umzusetzen (dabei wurden alle testbaren Aussagen markiert), machten sich überdies einzelne fehlende Größen oder Beziehungen sofort bemerkbar. Eine Prüfung auf Korrektheit des Datenmodells ist nicht möglich, da eine Spezifikation (ein „richtiges“ Modell) nicht verfügbar ist. Es sind auch andere Modelle als das gewählte möglich.

Validierung der Grammatik

Die Grammatik wurde aus dem Datenmodell automatisch generiert. Da das dafür verwendete Werkzeug nicht validiert ist, wurde nach der Generierung ein manueller Vergleich zwischen Datenmodell und Grammatik vorgenommen. Dabei wurden nicht nur Knotenbezeichner, sondern auch Typen und Kardinalitäten berücksichtigt. Es gab keine Abweichungen.

Validierung des GUM-Testfall-Konverters

Wie oben beschrieben, besteht der Konverter aus einem Lese- und mehreren Ausgabe-Blöcken, wobei der Lese-Block aus einem Standard-Parser Xerces und weiteren Lese- und Testfunktionen besteht.

Validierung des Lese-Blocks 1 (Standard-Parser Xerces)

Der eingesetzte Parser Xerces ist bereits betriebsbewährt. Vor dem Einbau in die Testumgebung

wurde die Problem Datenbank dieses Parsers im Web analysiert. Es stellte sich heraus, dass die Problem Datenbank systematisch geführt/gepflegt wird und dass die letzten etwa einhundert eingetragenen bekannten Probleme (Bugs) für den Einsatz irrelevant sind. Auf eine gründliche Validierung des Parsers wurde deshalb verzichtet, es wurden nur wenige dynamische Programmtests durchgeführt. Dafür wurden universelle XML-Testfiles vorbereitet, wobei das erste ein korrektes (der Grammatik entsprechendes) File war, die weiteren jedoch gezielt jeweils eine Grammatik-Regel verletzen. Es wurde erwartet, dass der Xerces-Parser mit einer Erfolgsmeldung (erstes File) bzw. einer passenden Fehlermeldung (die restlichen Files) reagiert.

Bei den negativen Testfällen wurden verschiedene Regeln getestet:

- Knoten mit bestimmter Kardinalität sind gar nicht oder mit falscher Kardinalität vorhanden (zu häufig, zu selten).
- Attribute fehlen oder sind zusätzlich vorhanden.
- Öffnende oder schließende Syntaxelemente fehlen.
- Erforderliche Taginhalte fehlen oder haben das falsche Format.

Validierung des Lese-Blocks 2 (weitere Testfunktionen)

Die durch den Parser eingelesenen und anhand der Grammatik überprüften XML-Daten werden schrittweise durch die weiteren Funktionen im Lese-Block abgefragt und in ein umfassendes internes Objekt überführt. Die schrittweise Abfrage bietet dabei die Möglichkeit, Kontrollen vorzunehmen bzw. Regeln anzuwenden, die über die der Grammatik hinausgehen.

Bei der Validierung dieser außerhalb der Grammatik implementierten Regeln wurde dieselbe Testmethode verwendet wie im vorigen Punkt beschrieben, d. h. neben einem positiven Testfile (alle Regeln eingehalten) wurden pro Regel ein bis acht negative Testfiles geschrieben und dem Konverter angeboten. Dieser hatte mit Erfolgs- bzw. Fehlermeldungen zu reagieren.

Validierung der Ausgabe-Blöcke (Konvertierungsfunktionen)

Die Konvertierungsfunktionen sind der Kern der Ausgabe-Blöcke und für den Erfolg der Testumgebung im Ganzen kritisch. Sie haben die Aufgabe, die erwarteten Ausgaben in das Format zu bringen, das durch GUM und GUM S1 vorgeschrieben

ist oder – sofern diese nichts vorschreiben – in das von den zu prüfenden Programmen benutzte Format. Die Konvertierungsfunktionen umfassen Formatänderungen (wissenschaftlich <-> dezimal, dezimal absolut <-> dezimal Prozent), Änderungen des Exponenten (da einige Programme nur durch drei teilbare Exponenten verwenden), Rundungen nach verschiedenen Verfahren (mathematisch, kaufmännisch) und Kürzungen auf eine vorgegebene Zahl signifikanter Stellen und Anpassungen von Werten an andere Werte (Anpassung der Stellenzahl des Ergebniswertes an die Stellenzahl der beigeordneten Messunsicherheit).

Wegen der Kritikalität wurden die Konvertierungsfunktionen nicht als Black-Box-Programmtests, sondern als Black-Box- und White-Box-Funktionstests angelegt. Der Umfang der Tests war erheblich (Größenordnung 10 bis 400 Testfälle pro Funktion, generiert mit Äquivalenzklassenmethode).

Validierung der Stringbehandlung

Die Stringbehandlung durch den GUM-Testfall-Konverter spielt immer dann eine Rolle, wenn in einem Testfall für physikalische Größen oder Einheiten Sonderzeichen, Sub- und Superscripte oder etwa griechische Buchstaben oder ähnliches verwendet werden sollen, wie dies in der messtechnischen Praxis häufig vorkommt. Die universellen Testfälle sind zwar durch die Verwendung des Kodierungsformats UTF-16 prinzipiell auf diesen Aspekt vorbereitet, und der am Anfang der Konvertierung stehende Xerces-Parser ist ebenfalls UTF-16-fähig, doch wurde dieses Feature bisher nicht implementiert. Griechische Buchstaben, wie sie z. B. in den Beispielen aus GUM Anhang H verwendet werden, wurden bisher umschrieben (f -> Phi). Die Validierung steht entsprechend ebenfalls noch aus.

4. Erfahrungen bei der Anwendung der Testumgebung

Mit der vorgestellten Testumgebung sind bisher mehrere verschiedenartige den GUM implementierende Softwareprodukte validiert worden. Die dabei gewonnenen Erfahrungen bestätigen die prinzipielle Einsatzfähigkeit der Testumgebung.

In den folgenden Abschnitten werden die Erfahrungen der Autoren bei der Anwendung der Testumgebung beschrieben. Insbesondere werden die Probleme der Softwarehersteller bei der Umsetzung der GUM-Regeln in Softwareprodukten dargestellt. Die erörterten Probleme und Mängel beziehen sich vor allem auf funktionale Probleme „Bugs“ und Mängel bezüglich der Bedienbarkeit, Zuverlässigkeit und Ressourcennutzung.

4.1 Einige grundlegende Aspekte der Testdurchführung

Charakterisierung der geprüften Programme

Die Anwendungserfahrungen wurden bei der Prüfung konkreter Programme gewonnen. Diese Programme werden hier aber nicht benannt. Es ist nicht Ziel dieses Abschnitts, dem Leser die Auswahl eines GUM-Programms zu erleichtern oder eine Produktberatung zu bieten. Stattdessen soll die Beschreibung der aufgetretenen Probleme und Mängel verdeutlichen, wie umfassend eine Prüfung dieser Programme vor ihrem Einsatz bzw. wie „dicht“ die Menge der Testfälle sein muss, um eine Konformitäts- oder eine allgemeine Qualitätsaussage gewinnen zu können.

Zu den im Laufe der letzten Jahre dem Testprogramm unterzogenen GUM-Programmen gehörten Programme, die seit 10 bis 15 Jahren auf dem Markt sind, permanent und in engem Kontakt zu den Anwendern weiterentwickelt und mit Erfolg kommerziell verwertet werden. Solche Programme zeichnen sich in der Regel durch einen ausgewogenen Funktionsumfang und eine ergonomische Benutzeroberfläche aus. Es gehörten dazu aber auch Programme, die mehr oder weniger vor dem Markteintritt standen und Kinderkrankheiten aufwiesen, sowie Programme aus dem universitären bzw. Forschungsbereich, die frei verfügbar sind und für die die jeweiligen Hersteller jede Verantwortung für die Verwendung ablehnen.

Bei den Benutzungsoberflächen reichte die Palette von einfachen, gut funktionierenden Kommandozeilen über mehr oder weniger übersichtliche grafische Oberflächen bis zu grafischen Varianten mit unerwartet reagierenden Bedienelementen, die speziell für diese Zwecke neu programmiert worden sind. Die größten Unterschiede zwischen den Programmen gab es jedoch bezüglich des Funktionsumfangs. Näheres wird dazu im Abschnitt 4.2 dargestellt.

Beschreibung der Art der Prüfung

Für den Test der Programme wurde ein gemeinsames Repository an Testfällen sowie die im Abschnitt 3 vorgestellte Testumgebung verwendet. Das Repository umfasst mehr als 1000 funktionale und mehr als 2000 auf die Bedienbarkeit ausgerichtete Testfälle. Die Testfälle umfassen sämtliche (testbaren) Regeln des GUM [1] und einige des GUM S1 [9]. Regeln, Algorithmen und Funktionen außerhalb von GUM und GUM S1, die von den Programmen angeboten werden, wurden in der Regel nicht in die Tests einbezogen, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Die grundlegende Testmethode für die funktionalen Tests ist der (spezifikationsbestimmte) dynamische Black-Box-Test [11–15]. Für jede GUM-Regel

wurden Testfallklassen bzw. Testfälle entsprechend den üblichen Methoden des Software Engineering (Äquivalenzklassen, Grenzwerte) [11–17] entwickelt. Weitere Testfälle zielen auf Probleme bei der Fehlerbehandlung, bei der Reaktion auf Benutzereingaben oder bei der Interaktion mit dem Betriebssystem. Die Tests umfassen sowohl positive als auch negative Testfälle (vgl. Abschnitt 3). Die positiven Testfälle dienen der Feststellung, dass das GUM-Programm bei Vorliegen aller erforderlichen Eingaben die Berechnungen korrekt ausführt und die Ergebnisse korrekt darstellt. Der Begriff „korrekt“ bezieht sich dabei auf die Übereinstimmung mit dem GUM bzw. GUM S1, und zwar sowohl hinsichtlich des eigentlichen Zahlenwerts als auch hinsichtlich der Rundung und der Stellenanzahl, soweit GUM und GUM S1 diesbezüglich Vorgaben machen. Die negativen Testfälle dienen der Feststellung, dass das GUM-Programm die Berechnung der Ergebnisse ablehnt, sofern die eingegebenen Daten eine Berechnung nach GUM nicht zulassen, die im GUM formulierten Voraussetzungen also nicht gegeben sind.

Bei der Auswertung der Tests wurde stets davon ausgegangen, dass die Ergebnisse dem GUM folgend konfektioniert werden müssen. Dabei müssen die Unsicherheiten auf eine gewisse Anzahl signifikanter Stellen gerundet und die Stellenzahlen der Schätzwerte an diejenigen der dazugehörigen Messunsicherheit angepasst werden, ebenfalls verbunden mit einer Rundung. Wird eine Messunsicherheit auf z. B. zwei signifikante Stellen gerundet, dann können sich Berechnungsfehler oder numerische Probleme, die eine Abweichung von weniger als 0,5 ... 5 % verursachen, nicht auf das fertig konfektionierte Ergebnis auswirken. Die im Folgenden beschriebenen Probleme verursachten stets Abweichungen, die diese Relevanzschwelle mehr oder weniger deutlich überschritten.

4.2 Funktionale Probleme

Funktionsumfang

Das sicherlich für eine Beschaffung wichtigste Kriterium ist der Funktionsumfang eines GUM-Programms, also die Frage, welche oder wie viele Aspekte bzw. Varianten der im GUM und GUM S1 dargestellten Messunsicherheitsabschätzungen durch das Programm unterstützt werden. Hier sei zuerst darauf hingewiesen, dass ein Programm, das nach Selbstaussage eine Berechnung der Messunsicherheit nach GUM oder eine Konformität zum GUM bietet, in der Regel nicht sämtliche Aspekte der Berechnung umfasst. Dies ist solange kein Problem, wie der zukünftige Benutzer die Möglichkeit hat, vor der Beschaffung des Programms oder durch eine Probezeit herauszufinden, ob die von ihm benötigten Aspekte oder Varianten enthalten sind.

Die Unterschiede im Funktionsumfang können z. B. folgende Aspekte betreffen:

- Die Monte-Carlo-Berechnung ist (a) kein Bestandteil, (b) integraler Bestandteil oder (c) durch ein zukaufbares Zusatzprogramm angebotener Bestandteil des GUM-Programms.
- Die Monte-Carlo-Simulation (MC) wird (a) bevorzugt betrieben und auf Wunsch werden Ergebnisse nach dem GUF-Verfahren zusätzlich berechnet und validiert, oder (b) die Ergebnisse nach dem GUF-Verfahren werden bevorzugt berechnet und der Benutzer muss selbst für eine Validierung anhand einer MC-Berechnung sorgen, oder (c) beides wird berechnet, es wird aber keine Validierung bzw. kein Vergleich angeboten.
- Die zu den Eingangsgrößen vorhandenen Daten können (a) in verschiedenen Varianten vorliegen und alle diese Varianten können direkt eingegeben werden, oder (b) die Programme akzeptieren nur wenige Varianten für die Eingabe und der Benutzer muss die Daten vorher aufbereiten bzw. außerhalb des Programms vorverarbeiten, um sie eingeben zu können.
- Zu Typ-B-Eingangsgrößen werden unterschiedlich viele auswählbare Verteilungen angeboten.
- Innerhalb der Modellgleichung sind unterschiedlich viele mathematische Standardfunktionen benutzbar.
- Die Empfindlichkeitskoeffizienten werden (a) numerisch berechnet, (b) analytisch ermittelt, (c) beim Benutzer abgefragt oder (d) es sind mehrere Methoden realisiert.
- Das Modell oder die Eingaben kann bzw. können (a) auf einfache Weise variiert / parametrisiert und die Berechnung mehrfach wiederholt werden, um die Bedeutung verschiedener Einflussfaktoren auf das Ergebnis zu überprüfen, oder (b) diese Parametrisierung / Wiederholung ist nicht direkt möglich.
- Für die Ergebnisgrößen wird (a) nur die Standardmessunsicherheit oder aber (b) auch die Erweiterte Messunsicherheit berechnet. Im zweiten Fall werden die Verteilungen der Ergebnisgrößen (b1) verschieden abgeschätzt oder (b2) beim Benutzer abgefragt, oder (b3) es wird immer eine bestimmte Verteilung angenommen.

- Für die Erweiterte Messunsicherheit der Ergebnisgrößen kann sich (a) der Benutzer zwischen dem p-symmetrischen und dem kürzesten Vertrauensintervall entscheiden – oder (b) das Programm wählt eine der möglichen Varianten automatisch oder (c) das Programm hat nur eine Variante realisiert.
- Das Programm erlaubt (a) eine oder (b) mehrere Ergebnisgrößen. Bei mehreren Ergebnisgrößen wird deren Korrelation (b1) berechnet oder (b2) nicht berechnet.
- Bei der MC-Simulation wird (a) nur das nicht adaptive, (b) nur das adaptive oder (c) beide Verfahren angeboten.

Eine weitere Angabe mag die erheblichen Unterschiede bezüglich des Funktionsumfangs verdeutlichen: die Angabe, wie viel Prozent der gut 1000 funktionalen Testfälle aus dem Repository durch die jeweiligen Programme verarbeitet werden konnten. Hier reichte die Palette von 42 % bis 85 % der funktionalen Testfälle.

Berechnungsprobleme

Bei Berechnungsproblemen handelt es sich häufig um Formeln, die abweichend vom GUM implementiert sind, wobei es sich dabei sowohl um irrtümliche als auch um absichtliche Abweichungen handeln kann. Im zweiten Fall kann erwartet werden, dass die Abweichung vom Hersteller beschrieben und begründet wird.

Unter die Berechnungsprobleme fallen aber auch Rundungs- und Stellenzahlprobleme, da sie unmittelbar die Brauchbarkeit der Ergebnisse beeinflussen. Einige dieser Probleme werden im Folgenden näher beschrieben:

Liegt nur eine Eingangsgröße x vor, übernimmt die Ergebnisgröße y den Freiheitsgrad dieser Eingangsgröße. Eines der Programme berechnete in solchen Fällen stets $v_y = v_x - 1$ statt $v_y = v_x$. Dieser Ansatz ist weder begründet, noch war er dokumentiert. Er besagt im Kontext des GUM, dass die allein aus der Messunsicherheit von x berechnete Messunsicherheit von y als weniger zuverlässig betrachtet wird, als die Messunsicherheit von x selbst.

Werden bei der Berechnung der Varianz einer Beobachtungsreihe Erfahrungswerte einbezogen, dann lieferte eines der Programme Werte, die keiner der in GUM und GUM S1 aufgeführten Formeln entsprachen. Die Abweichungen waren systematisch, sodass der Verdacht nahelag, dass eine eigene Formel verwendet wurde. Es war auch eine eigene Formel dokumentiert, dieser entsprachen die berechneten Werte jedoch ebenfalls nicht.

Werden in der Modellgleichung Standardfunktionen wie Cosinus verwendet, wird üblicherweise beim Testen das Argument variiert, um die Berech-

nung des Cosinus⁴ und der restlichen Modellgleichung für verschiedene Argumente zu prüfen. Verwendet werden z. B. Argumente aus allen vier Quadranten, die Grenzen der Quadranten sowie gelegentlich Werte außerhalb des Grundbereichs $0 \dots 2\pi$. Eines der Programme zeigte hier eine Abweichung bei nur einem einzigen der Testfälle. Der Grund lag darin, dass das Programm die Argumente auf Zulässigkeit überprüfte und irrtümlich den Wert $\pi/2$ als unzulässig für den Cosinus bewertete.

Viele Programme verwenden für das Nachschlagen des Erweiterungsfaktors für die t-Verteilung vereinfachte Tabellen oder Listen. Werden z. B. schon ab Freiheitsgraden von $v_{\text{eff}} = 30$ die Werte für $v_{\text{eff}} = \infty$ verwendet, dann werden signifikant zu kleine Überdeckungsintervalle berechnet.

Eines der Programme schien in der Tabelle der Erweiterungsfaktoren $t(p, v_{\text{eff}})$ auch dann zu interpolieren, wenn dies eigentlich nicht notwendig war. Für direkt nachschlagbare Werte wie $t = 2,15$ wurden „genauere“ Werte wie $t = 2,1477$ ermittelt. Die Vermutung liegt nahe, dass das Programm weder nachschlag noch interpolierte, sondern die Tabelle über eine Funktion komplett nachgebildet hatte.

Zwei der Programme ermittelten Korrelationskoeffizienten aus Beobachtungsreihen korrekt, aber mit nur zwei Nachkommastellen. Das hatte erhebliche Rundungsfehler zur Folge. Bei einem Testfall betrug die Abweichung 40 % bei der Messunsicherheit des Ergebnisses.

Auch der numerisch ermittelte (Näherungs-) Wert des Empfindlichkeitskoeffizienten wurde in einem Fall mit einer begrenzten Stellenzahl berechnet, die nicht nur für die Anzeige, sondern auch für die Weiterverarbeitung verwendet wurde. Dadurch kam es zu einem zusätzlichen Fehler bei der Messunsicherheit des Ergebnisses in der Höhe der Relevanzschwelle.

Protokoll-, Übertragungs- und Speicherfehler

Hierbei handelt es sich z. B. um die unvollständige Speicherung der Eingaben des Benutzers oder die unvollständige Ausgabe der Daten in die Protokolle, sodass die Berechnung später nicht noch einmal vollständig nachvollzogen werden kann. Problematisch kann auch die Ausgabe stark gerundeter Ergebnisse sein, die für eine Weiterverarbeitung aber genauer benötigt werden. Folgende Probleme traten u. a. auf:

Eines der Programme erfasste beim Speichern der Benutzereingaben die Überdeckungswahrscheinlichkeit p für die Berechnung der erweiterten Messunsicherheit nicht. Unabhängig davon, welche Eingabe der Benutzer gemacht hatte, betrug der Wert nach dem Speichern und erneuten Öffnen des Budgets immer $p = 95 \%$.

Eines der Programme gab Korrelationen zwischen Eingangsgrößen nicht ins Protokoll aus, sodass die Berechnung anhand des Protokolls nicht reproduziert werden konnte. Bei anderen Programmen fehlte die Art des Überdeckungsintervalls oder die Angabe, ob adaptiv oder nicht adaptiv gerechnet worden war.

Eines der Programme sah als Mindestwert für die Überdeckungswahrscheinlichkeit p den in der Praxis unüblichen Wert von $p = 0,1 \%$ vor. Ließ der Benutzer diesen Wert unverändert stehen, tauchte er als $p = 0,0 \%$ in der Ergebnisdarstellung auf.

Eines der Programme speicherte die Matrix der Korrelationskoeffizienten auf unübliche Art. Zwar wurden z. B. nach einer Änderung die neuen Koeffizienten gespeichert und überschrieben die alten Werte, davon waren aber alle Koeffizienten mit dem (neuen) Wert 0 ausgenommen. Für diese blieb der alte Wert erhalten, sodass die gespeicherte Korrelationsmatrix aus einer Mischung alter und neuer Koeffizienten bestand.

Eines der Programme ermittelte Messunsicherheiten mit drei signifikanten Stellen, speicherte davon aber nur zwei und erweiterte die Stellenzahl beim Wieder-Einlesen durch Anhängen einer Null wieder auf drei. Zum einen entstand dadurch ein Rundungsfehler, zum anderen wurde mehr Wissen über die Messunsicherheit dargestellt, als vorhanden war.

Numerische Probleme

Gelegentlich kann der Umstand, dass die Programme mit Maschinenzahlen, also mit Zahlen begrenzter Auflösung, arbeiten, zu speziellen Effekten führen. Glücklicherweise sind die Berechnungen nach GUM oder mit MC nur selten so komplex, dass sich dies auf die Korrektheit der Ergebnisse auswirkt. Aufgetreten sind bei den Tests aber trotzdem z. B. die folgenden Effekte:

Besitzt eine Eingangsgröße eine gegenüber ihrem Schätzwert sehr kleine Messunsicherheit, dann kann die Berechnung des Differenzenquotienten, der als Näherung für den Empfindlichkeitskoeffizienten benötigt wird, aus numerischen Gründen völlig abseitige Ergebnisse erbringen. Sollten in diesem Fall keine Plausibilitätstests die Verwendung dieses verunglückten Empfindlichkeitskoeffizienten verhindern, kann das Endergebnis beliebig vom korrekten Wert abweichen. Dieses Problem hatten und haben im Prinzip alle getesteten Programme.

Relative Standardmessunsicherheiten sollten nicht ausgegeben werden, wenn der dazugehörige Schätzwert Null ist. Bei einem Programm kam es gelegentlich vor, dass der Schätzwert trotz einer Anzeige von „0,0“ intern einen numerisch noch fassbaren Wert besaß und eine unsinnig große relative Standardmessunsicherheit ausgegeben wurde.

Bei einem anderen Programm wurde zu Schätzwerten mit dem Wert 0 eine relative Standardmessunsicherheit von 0 angegeben, was fachlich nicht korrekt ist.

Eines der Programme ermittelte leicht unterschiedliche Ergebnisse abhängig davon, ob für zwei Eingangsgrößen die Option „ohne Korrelation“ oder aber „mit Korrelation, $r = 0$ “ gewählt wurde.

Eines der Programme ermittelte aus numerischen Gründen bei der Berechnung der Korrelation zwischen zwei Beobachtungsreihen gelegentlich Werte leicht oberhalb von +1 bzw. leicht unterhalb von -1 und lehnte dann die weitere Berechnung ab. Solch eine enge Korrelation von Beobachtungsreihen sollte in der messtechnischen Praxis allerdings kaum vorkommen.

4.3 Probleme mit der Bedienbarkeit der Programme

Eine unklare oder komplizierte Bedienung kostet im besten Fall nur etwas Zeit, im Extremfall kann sie jedoch, wie sich zeigte, zu erheblichen Berechnungsfehlern führen. Bei einem der geprüften Programme, das eine speziell entwickelte Benutzeroberfläche aufwies, wichen die aus einer Beobachtungsreihe berechneten Mittelwerte und Standardabweichungen fast immer von den erwarteten Werten ab. Da die Implementierung der Formeln für Mittelwert und Standardabweichung kein größeres Problem darstellen dürfte, war zu vermuten, dass die Ursache eher in der Benutzeroberfläche des Programms lag. Bei der Eingabe von Beobachtungswerten verschwanden diese Werte zumindest stets vom Bildschirm und die Eingabe musste wiederholt werden, bis die Werte nicht mehr verschwanden. Es ist zu vermuten, dass das Programm einen Teil der verschwundenen Werte in die Berechnungen einbezog und dies die Ursache für die abweichenden Mittelwerte und Standardabweichungen war.

Eine ähnliche Situation lag für dieses Programm bei der Verwendung von Standardfunktionen vor. Ergab sich für eine Modellgleichung $y = \sin(x)$ ein Schätzwert von $y = -7$, dann liegt die Vermutung nahe, dass die Funktion $\sin()$ nicht als solche erkannt wurde.

Eines der anderen Programme ersetzte nicht plausible oder ungültige Benutzereingaben durch eigene gültige Werte erst in dem Moment, in dem der Benutzer die entsprechende Eingabeseite verließ und diese Veränderung seiner Eingaben deswegen nicht mehr bemerken konnte.

Dasselbe Programm erwies sich als besonders heikel bei der Eingabe des letzten Wertes einer Beobachtungsreihe. Während alle vorangegangenen Werte mit verschiedenen Tasten abgeschlossen werden durften, war beim letzten Wert eine bestimmte Taste vonnöten. Bei Benutzung einer

falschen Taste wurde der letzte Wert stillschweigend durch 0,0 ersetzt, was in der Regel zu einem verfälschten Mittelwert und einer verfälschten Standardabweichung führte.

Während die bisherigen Beispiele zu einer meist unbemerkten Verfälschung der Berechnungsergebnisse führten und damit relativ schwerwiegend waren, sollen interessehalber hier noch einige Beispiele angeführt werden, bei denen dies nicht der Fall war. Es handelt sich um Benutzungsprobleme, die „nur“ Zeit oder Aufmerksamkeit kosteten. Bei der Einbeziehung von Erfahrungswerten in die Berechnung der Varianz einer beobachteten Größe sollte der Benutzer genau darauf achten, welche Art von Eingaben erwartet werden. Bei einem der Programme war - je nach ausgewählter Statistik - mal die Eingabe der früheren (pooled) Standardabweichung der Einzelwerte, mal die Eingabe der früheren Standardabweichung des Mittelwerts erforderlich.

Bei einem der Programme wurden an vielen Stellen Benutzereingaben, die eigentlich bereits abgeschlossen und vom Programm akzeptiert worden waren, in einem späteren Schritt und sichtbar für den Benutzer wieder zurück auf einen Standardwert gesetzt. Sie mussten dann erneut eingegeben werden und wurden manchmal wieder zurückgesetzt. Der Benutzer war gezwungen zu probieren, in welcher Reihenfolge die Eingaben am besten erfolgen, um akzeptiert und nicht wieder zurückgesetzt zu werden.

Einige Programme unterlassen die Betragsbildung bei der Berechnung der Unsicherheitsbeiträge der einzelnen Eingangsgrößen. Das brachte fachlich nicht unbedingt sinnvolle, aber wertmäßig korrekt berechnete negative Unsicherheitsbeiträge mit sich.

Zwei der Programme erkannten eine Modellgleichung wie „ $0 = y + x$ “, die nicht nach einer Ergebnisgröße aufgelöst ist, nicht und lehnten sie deswegen auch nicht ab. Stattdessen nahmen sie an, die Zahl 0 wäre die Ergebnisgröße.

Eines der Programme brach die Berechnung ab, wenn die vom Benutzer eingegebene Korrelationsmatrix Eigenwerte mit dem Wert 0 aufwies. Solche positiv semidefiniten Matrizen sind nicht grundsätzlich unzulässig, sondern werden vom GUM selbst in Beispielen verwendet. Diese Beispiele aus dem GUM ließen sich mit diesem Programm nicht nachberechnen.

4.4 Dokumentationsmängel

Will der Benutzer einem Problem auf den Grund gehen, erweist sich die Dokumentation der Programme häufig als lückenhaft. Meist fehlen detaillierte Angaben zu den Berechnungsschritten oder -optionen, bei denen GUM oder GUM S1 mehrere Varianten vorsehen. Deswegen sei hier nur ganz

allgemein angemerkt, dass sich folgende Erläuterungen häufig nicht in den Handbüchern fanden:

- welche Methode und welche Stützstellen bei der Berechnung des numerischen Anstiegs benutzt werden,
- ob es einen Linearitätstest gibt und wie er genau funktioniert,
- ob der Erweiterungsfaktor für die t-Verteilung per Interpolation oder Abschneiden und Nachschlagen berechnet wird,
- wie der effektive Freiheitsgrad des Ergebnisses im korrelierten Fall berechnet und wie die Formel begründet wird,
- welche Funktion der U-Verteilung zugrunde liegt, wenn eine solche angeboten wird,
- ob und wie die erweiterten Messunsicherheiten korrelierter Ergebnisgrößen berechnet werden.

5. Fazit und Ausblick

Die geprüften Programme für die Berechnung der Messunsicherheit nach GUM variieren stark in ihrem Funktionsumfang. Die durchgeführten Validierungen haben aufgezeigt, dass jedes der geprüften Programme Programmierfehler, Benutzbarkeits- und/oder Dokumentationsprobleme aufweist. Die Vielfalt der aufgetretenen Fehler zeigt, dass eine kurze, testweise Inbetriebnahme des Programms vor einem eventuellen Kauf nicht effektiv ist, um seine Eignung für den geplanten Einsatz einschätzen zu können.

Selbstverständlich sind grobe Programmierfehler bei der Umsetzung einer Formel durch wenige Tests zu entdecken. Anders sieht es aus, wenn der Fehler nicht eine ganze Formel oder Funktion, sondern nur einen bestimmten Argumentwert betrifft oder wenn er durch die starke Rundung des Ergebnisses nur unter bestimmten Bedingungen und damit nur gelegentlich auftritt. Die durchgeführten Tests zeigen, dass eine ganze Reihe von aufgetretenen Problemen schwer zu identifizieren sind oder die Berechnungsergebnisse unsystematisch oder unauffällig verfälschen.

Somit scheint eine systematische Validierung dieser Programme, besonders wenn es sich um einen Einsatz im gesetzlich geregelten Bereich handelt, angeraten. Dabei sollte auf eine vollständige Abdeckung aller funktionalen Vorgaben aus GUM und GUM S1 geachtet werden, sowie auf eine den Regeln des Software Engineering entsprechende Testfallgenerierung.

Zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit soll die Testumgebung in der nächsten Zeit weiter ausgebaut werden. Insbesondere für die Qualitätsmerkmale Benutzbarkeit und Zuverlässigkeit sind Erweiterungen sinnvoll. Des Weiteren stellt die bisher fehlende Berücksichtigung von Monte-Carlo-Berechnungen ein noch offenes Problem dar. Da Monte-Carlo-Ergebnisse nicht direkt mit Soll-Ergebnissen verglichen werden können (sie müssen nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit mit analytisch gewonnenen Ergebnissen übereinstimmen), ist für die Einbeziehung von Monte-Carlo-Testfällen die Erweiterung der Grammatik erforderlich. Mit der Erweiterung um Monte-Carlo-Berechnungen steht die Frage in Zusammenhang, ob die Testfälle um solche für das Software-Qualitätsmerkmal Effizienz erweitert werden sollten. Es ist vorstellbar, dass nicht nur die funktionale Korrektheit der Monte-Carlo-Berechnungen, sondern auch ihre Dauer für den Benutzer interessant ist. Allerdings ist die Dauer der Berechnung keine objektivierbare Anforderung. Schließlich ist die Frage des Übergangs von rationalen zu komplexen Zahlen interessant, insbesondere für bestimmte Anwendungsfelder wie z. B. Hochfrequenzmesstechnik. Datenmodell und Grammatik müssten dafür nicht bzw. nur geringfügig geändert werden.

Literatur

- [1] ISO/IEC Guide 98-3:2008: *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement*; *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*, JCGM 100:2008
- [2] N. Greif, H. Schrepf: *GUM conformity of software products – a discussion from a software tester's perspective*, ACTA IMEKO, Vol. 2, No. 2, 34–40, 2013
- [3] N. Greif, H. Schrepf, D. Richter: *Software validation in metrology: A case study for a GUM-supporting software*, Measurement 39 (2006) 849–855, Elsevier, 2006
- [4] N. Greif, H. Schrepf: *Validierung von Software zur Bestimmung von Messunsicherheiten*, VDI-Berichte 1947, Messunsicherheit praxisgerecht bestimmen, 409-418, Düsseldorf, 2006
- [5] A. Weckenmann, T. Wiedenhöfer: *Software zur Unterstützung bei der Ermittlung der Messunsicherheit*, Technisches Messen 72 (2005) 5, 278–285, 2005
- [6] S. Mieke, V. Hartmann, H. Schrepf: *Rechnergestützte Messunsicherheitsermittlung – Anforderungen an moderne Softwarelösungen*, Messunsicherheit praxisgerecht bestimmen, VDI-Fachtagung Erfurt, 8.–9. Nov. 2011, VDI-Verlag, 2011
- [7] M. Hernla, C. Weißmüller: *Ringvergleich Koordinatenmesstechnik 2009*, VDI-Fachtagung Erfurt, 8.–9. Nov. 2011, VDI-Verlag, 2011
- [8] A. Weckenmann, T. Wiedenhöfer, K.-D. Sommer: *Messunsicherheitsbestimmung in der Nanotechnologie am Beispiel eines Nanoclusters*, Technisches Messen 71 (2004) 2, 93–100, 2004
- [9] *Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Propagation of distributions using a Monte Carlo method*; JCGM 101:2008
- [10] N. Greif, H. Schrepf: *Eine Testumgebung für GUM-Konformitätstests*, PTB-Bericht IT 19, ISBN 978-3-95606-201-8, 2015
- [11] B. Beizer: *Black-Box Testing – Techniques for Functional Testing of Software and Systems*, ISBN 978-0471120940, Wiley, 1995
- [12] G. J. Myers: *Methodisches Testen von Programmen*, ISBN 978-3486256345, Oldenbourg, 2001
- [13] A. Spillner, T. Lenz: *Basiswissen Softwaretest*, ISBN 978-3864900242, dpunkt.verlag, 2012
- [14] S. Grünfelder: *Software-Test für Embedded Systems*, ISBN 978-3864900488, dpunkt.verlag, 2013.
- [15] E. Wallmüller: *Softwarequalitätssicherung in der Praxis*, ISBN 978-3446158467, Carl Hanser, 1990
- [16] P. Liggesmeyer: *Software-Qualität: Testen, Analysieren und Verifizieren von Software*, Lehrbuch der Softwaretechnik, ISBN 978-3827420565, Spektrum Akademischer Verlag, 2009
- [17] P. Liggesmeyer: *Modultest und Modulverifikation*, BI Wissenschaftsverlag Mannheim, Wien, Zürich, ISBN 3-411-14361-4, Spektrum Akademischer Verlag, 1990
- [18] ANSI/IEEE 754:2008: *Floating-Point Arithmetic*
- [19] ISO/IEC 25010:2011, *Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuARE) – Systems and software quality models*

Sicherheitsaspekte bei Geldspielgeräten: Auswirkungen der neuen SpielV auf den Zulassungsprozess

Gervin Thomas¹, Kerstin Thiele², Reiner Kuschfeldt³

1. Einleitung

Geldspielgeräte werden seit Jahrzehnten entwickelt und aufgestellt. Um gewisse Schutzziele zu erfüllen, wird dieser Markt vom Gesetzgeber reguliert. Dabei ist ein zentrales Schutzziel der Jugend- und Spielerschutz. Um diesen Schutz zu gewährleisten, dürfen ausschließlich Geräte auf dem deutschen Markt aufgestellt werden, die über eine Bauartzulassung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) verfügen. Dies ist durch die Gewerbeordnung (GewO) geregelt. Ferner sind die Voraussetzungen für die Zulassung von Geldspielgeräten in der Spielverordnung (SpielV) festgelegt. Die PTB ist darüber hinaus gemäß SpielV ermächtigt, eine technische Richtlinie herauszugeben, die den Zulassungsprozess für Geldspielgeräte beschreibt, um die Prüfbarkeit und Durchführung zu gewährleisten. Die Bauartzulassung wird innerhalb der PTB von der Arbeitsgruppe „Spielgeräte“ durchgeführt. Ende 2014 wurde die SpielV zweimal geändert, worauf auch die technische Richtlinie vollständig überarbeitet und ergänzt werden musste, da viele neue konzeptionelle und technische Anforderungen zu beachten waren. Die wesentlichen Neuregelungen betrafen folgende Punkte:

- Verbesserung des Manipulationsschutzes
- Verbesserung des Spieler- und Jugendschutzes

Im Zuge dieser Neuregelungen kamen auf die PTB viele Herausforderungen zu. Alle bereits bestehenden Konzepte und Prüfprozesse mussten in diesem novellierten Rechtsgebäude erneut betrachtet und bewertet werden. Dieser Artikel beschreibt die Auswirkungen und Änderungen des Zulassungsprozesses aufgrund der neuen gesetzlichen Grundlagen. Er legt einen besonderen

Fokus auf die gesteigerten Anforderungen bzgl. der IT-Sicherheit. Aus diesem Grund wird nur auf Themen eingegangen, die die Bauartzulassung betreffen. Regelungen, die z. B. die Aufstellung betreffen, sind nicht Fokus dieses Artikels.

Kapitel 2 gibt einen Überblick über die gesetzlichen Grundlagen der Bauartzulassung und die Entwicklung der technischen Richtlinie 5.0. In den Kapiteln 3 und 4 werden die technischen und konzeptionellen Neuerungen sowie deren Einfluss auf die Bauartzulassung dargestellt. Zum Abschluss wird im Kapitel 5 ein Fazit gezogen.

2. Gesetzlicher Hintergrund

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt ist für die Prüfung und Bauartzulassung von Geldspielgeräten gemäß § 33c GewO zuständig. Näheres dazu ist in den §§ 11 ff. der Spielverordnung geregelt. Die Spielverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 27. Januar 2006 wurde am 10.11.2014 durch die 6. Verordnung zur Änderung der Spielverordnung [1] geändert. Kurze Zeit darauf wurde diese nochmals mit der 7. Verordnung [2], am 12.12.2014, nachjustiert.

Zentrales Schutzziel des Gesetzgebers ist der Schutz des Spielers. Insbesondere soll durch besondere Maßnahmen verhindert werden, dass pathologische Spieler unangemessene Verluste in kurzer Zeit erleiden. Ein weiteres Schutzziel ist die Stärkung des Manipulationsschutzes zur Verhinderung der Steuerhinterziehung und Geldwäsche. Die darunter fallenden technischen Maßnahmen prüft die PTB im Rahmen der Bauartzulassung.

Die Spielverordnung ermächtigt die PTB gemäß §12 Abs. 4, eine technische Richtlinie herauszugeben, um die Prüfbarkeit der eingereichten Baumuster zu sichern, die Durchführung der Bauartzulassung zu unterstützen und um bauartabhängige Voraussetzungen für eine

¹ Dr.-Ing.
Gervin Thomas,
Arbeitsgruppe 8.53
„Spielgeräte“,
E-Mail:
gervin.thomas@
ptb.de

² Dipl.-Ing.
Kerstin Thiele,
Arbeitsgruppe 8.53
„Spielgeräte“,
E-Mail:
kerstin.thiele@ptb.de

³ Dipl.-Ing.
Reiner Kuschfeldt,
Arbeitsgruppe 8.53
„Spielgeräte“,
E-Mail:
reiner.kuschfeldt@
ptb.de

wirksame Überprüfung aufgestellter Geräte zu schaffen. Zusätzlich ist sie für die Hersteller von Geldspielgeräten ein wichtiges Hilfsmittel bei der Konstruktion ihrer Geräte und gibt ihnen Handlungssicherheit.

Aufgrund der 6. und 7. Verordnung zur Änderung der SpielV erstellte die PTB eine neue technische Richtlinie, um die Zulassung nach Vorgaben des Gesetzgebers zu gewährleisten. Indem die PTB zusammen mit dem BMWi Konsultationsveranstaltungen mit Herstellern und Sachverständigen im Zuge der Erstellung der Richtlinie durchführte, wurden die neuen Herausforderungen aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet. Am 27.01.2015 wurde die technische Richtlinie in der Version 5.0 (TR5.0) von der PTB finalisiert. Anschließend wurde sie bei der Europäischen Kommission zur Notifizierung eingereicht, um nichttarifäre Handelshemmnis auszuschließen. Nach einer dreimonatigen Stillhaltefrist wurde die TR5.0 [3] im Mai 2015 von der Europäischen Kommission notifiziert und wird seitdem als Grundlage für die Bauartzulassung verwendet.

3. Verbesserung des Manipulationsschutzes

Der Gesetzgeber hat mit der 6. und 7. Verordnung zur Änderung der Spielverordnung mehrere Maßnahmen festgelegt, um den Manipulationsschutz von Geldspielgeräten zu erhöhen. Eines der Hauptziele ist die Bekämpfung von Steuerhinterziehung und Geldwäsche. Um den Herstellern die Zeit zu geben, diese Maßnahmen umzusetzen, wurden sie

vom Gesetzgeber im Rahmen einer Übergangsfrist stufenweise eingeführt. Die erste Stufe bildete ein IT-Sicherheitsgutachten, das ab dem 10.05.2015 zusammen mit dem Antrag auf Bauartzulassung eingereicht werden muss. Details dazu werden im Kapitel 3.1 dargestellt. Die nächste Verschärfung der Sicherungsmaßnahmen folgte am 10.02.2016 durch die Vorgabe, dass alle neu zugelassenen Bauarten die Daten der Kontrolleinrichtung gesichert aufzeichnen müssen, um in geeigneter Form alle Einsätze, Gewinne und den Kasseneinhalt zu dokumentieren. Weiterführende Informationen werden im Kapitel 3.2 dargestellt.

3.1 Sicherheitsgutachten

Zur Stärkung des Manipulationsschutzes von Geldspielgeräten wurde vom Gesetzgeber gefordert, dass allen Anträgen auf Zulassung eines Geldspielgerätes nach dem 10.05.2015 ein IT-Sicherheitsgutachten beigefügt sein muss. Dieses Gutachten muss von einer vom BSI nach den *Common Criteria* (CC) [4] oder ITSEC [5] zertifizierten oder gleichwertigen Prüfstelle erstellt werden. Das IT-Sicherheitsgutachten orientiert sich dabei an den Vorgaben der *Common Criteria*, welche in die ISO 15408 [6] überführt wurden. Die *Common Criteria* sind international abgestimmte Kriterien für die Evaluierung der Vertrauenswürdigkeit von IT-Produkten. Diese Evaluierung ist jedoch relativ zeit- und kostenintensiv. Um diesen Aufwand zu reduzieren, wurden unter anderem Teile der CC-Evaluierung im Vorfeld durchgeführt. In Kooperation mit dem *Fraunhofer-Institut für Angewandte und Integrierte Sicherheit* (AISEC) [7] wurde von der PTB eine Bedrohungsanalyse durchgeführt [8], in der als kritisch eingestufte Angriffsszenarien identifiziert wurden. Zu diesem Zweck wurde eine allgemeine generische Struktur von Geldspielgeräten erstellt, auf die die Angriffsszenarien abzielen. Diese ist in Bild 1 dargestellt. Durch die Manipulation einer der dargestellten Komponenten wird das Sicherheitskonzept des Geldspielgerätes verletzt und die Vorgaben der SpielV können nicht mehr gewährleistet werden. Durch eine Überprüfung nach Maßgabe des Standes der Technik soll dies von einer unabhängigen zertifizierten Stelle ausgeschlossen werden.

Die Angriffe sind, wie in den CC üblich, allgemein formuliert, um auf die jeweiligen technischen Gegebenheiten jeder Bauart angepasst zu werden. Eine umfassende Angriffsanalyse auf Geldspielgeräte wurde bereits in [9] präsentiert. Die zertifizierte Prüfstelle identifiziert die spielverordnungrelevanten Hard- und Softwarekomponenten, um Bedrohungen auf Basis der Angriffsszenarien zu untersuchen. Ziel der IT-Gutachten ist es, die spielverordnungrelevanten Komponenten dahingehend zu untersuchen, ob ihre Integrität, Authen-

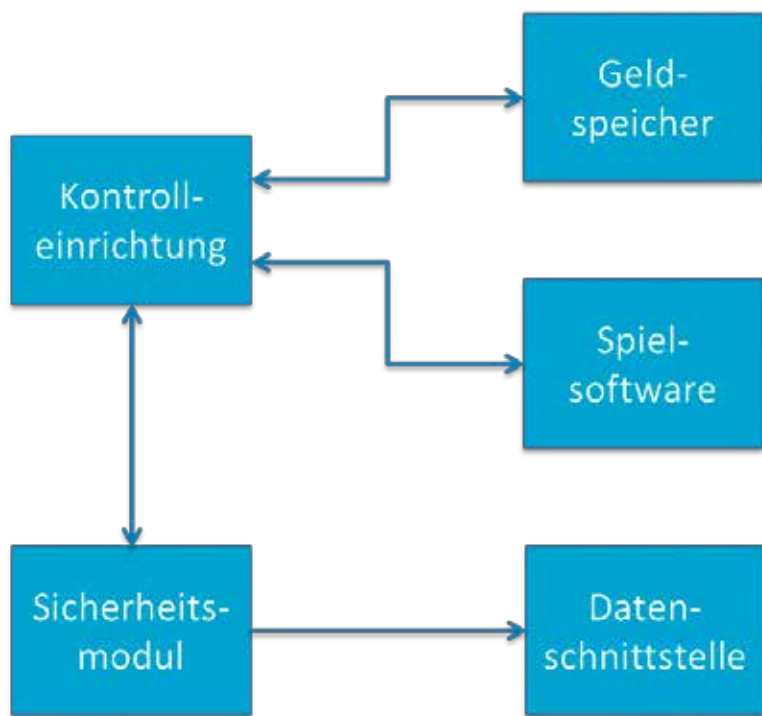


Bild 1: Generische Architektur von Geldspielgeräten [8]

tizität, Vertraulichkeit und Verfügbarkeit nach Maßgabe des Standes der Technik gesichert ist.

Der Zulassungsprozess der PTB ändert sich durch diese Neuerungen in mehreren Bereichen. Im Vorfeld der Antragsstellung steht die PTB dem Hersteller und auch der Prüfstelle mit ihrem Expertenwissen beratend zur Seite. Dies gewährleistet, dass der Hersteller bereits bei der Entwicklung relevante Sicherheitsaspekte beachten kann. Auf der anderen Seite hat die Prüfstelle die Möglichkeit, sich über Themen, die Geldspielgeräte betreffen, zu informieren. Nach der Einreichung des Zulassungsantrages verifiziert die PTB das IT-Sicherheitsgutachten auf Vollständigkeit und adäquate Anpassung an die Geldspielgerätee-architektur. Nachdem die Zulassung für ein Geldspielgerät erteilt wurde, schließt sich ein Überwachungsprozess an. Sicherheitsgutachten können für eine ganze Klasse von Geldspielgeräten gelten. Wird ein Gerät aus dieser Klasse mit neuen Sicherheitsmaßnahmen versehen oder ein bis dato unbekannter Angriff erfolgreich durchgeführt, muss von der Prüfstelle ein neues (Teil-) Gutachten erstellt werden. Dieses Gutachten muss die neuen Sicherheitsmaßnahmen bewerten und bestätigen, dass das Gerät wieder nach Maßgabe des Standes der Technik gesichert gebaut ist. Dies kann zur Folge haben, dass andere Geräte der gleichen Klasse auch von den neuen Sicherheitsmaßnahmen betroffen sind. Diese Geräte müssen durch die PTB identifiziert werden, um geeignete Maßnahmen einzuleiten. Die Überwachung der Geräteabhängigkeiten ist sehr umfangreich, da die Abhängigkeiten von Geräten und Geräteklassen auf komplexe Graphen abgebildet werden. Aus diesem Grund wurde von der Arbeitsgruppe „Spielgeräte“ ein IT-Werkzeug auf Basis einer umfangreichen Datenbank geschaffen, welches die Überwachung der einzelnen Abhängigkeiten von Geldspielgeräten zu Sicherheitsgutachten ermöglicht.

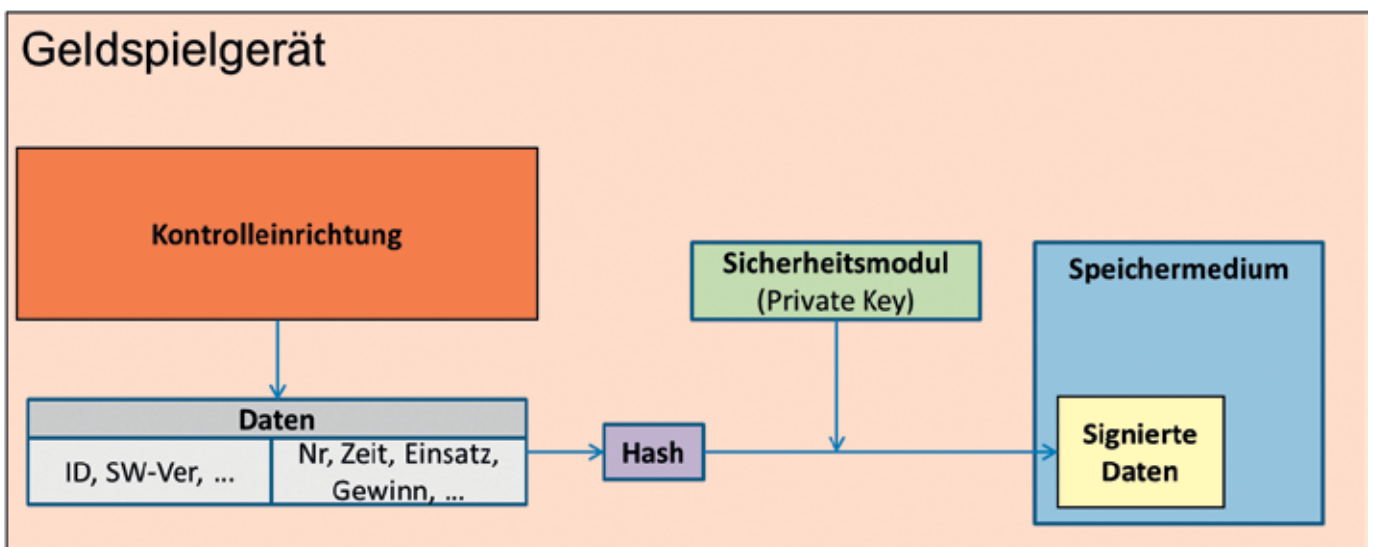
Zusätzlich prüft die PTB alle Angriffsszenarien der Bedrohungsanalyse in regelmäßigen Abständen auf ihre Aktualität. Falls erforderlich, werden bestehende Angriffsszenarien erweitert bzw. neue, bisher unbekannte in die Bedrohungsanalyse aufgenommen, um den Stand der Technik sicherzustellen.

3.2 Gesicherte KE-Daten

Für jedes in Deutschland zugelassene Geldspielgerät ist zwingend vorgeschrieben, dass es eine Kontrolleinheit (KE) besitzt. Jegliche Einsätze, Gewinn- und Zustandsmeldungen müssen von der Spielsteuerung an die KE gesandt und durch diese bestätigt werden. Dadurch ist gewährleistet, dass die Anforderungen gemäß §13 Nr.2 bis Nr. 6a SpielV geprüft und eingehalten werden. Ferner müssen die Daten der KE (Einsätze, Gewinne und der Kasseninhalt) gemäß §13 Nr. 9 zeitgerecht, unmittelbar und auslesbar erfasst werden. Diese Daten bilden die Grundlage für die Erhebungen von Fiskaldaten und müssen daher nach dem Stand der Technik gesichert sein. Einsatz und Gewinn sind hierbei selbsterklärend, der Kasseninhalt ist die rechnerische Differenz aus Einsätzen und Gewinnen. Für alle relevanten Daten werden vom Gesetzgeber gemäß §13 Nr. 9a SpielV folgende Vorgaben definiert:

- 1.) Verfügbarkeit und Auswertbarkeit
- 2.) Authentizität der Daten
(Zuordnung zum erzeugenden Gerät)
- 3.) Verknüpfung mit dem Entstehungszeitpunkt
- 4.) Vollständigkeit
- 5.) Integrität der Daten

Bild 2:
Gesicherte
KE-Daten



Um diese Vorgaben zu erfüllen, ist in der Regel ein Verfahren wie in Bild 2 dargestellt nötig. Die relevanten Buchungsdaten der KE werden dabei mit der Geräte-ID und Merkmalen der SW-Version versehen, um die Authentizität zu gewährleisten. Zusätzlich erhält jeder Datensatz eine fortlaufende, eindeutige Buchungsnummerierung und einen Zeitstempel. Dies garantiert die Vollständigkeit und die Verknüpfung mit dem Entstehungszeitpunkt. Die so erzeugten Daten werden anschließend durch ein Signaturverfahren gesichert, um ihre Integrität zu garantieren. Da die Sicherung der Daten nach dem Stand der Technik erfolgen muss, sind Mindestvorgaben für die Schlüssellänge der Signaturverfahren einzuhalten. Diese Vorgaben werden in Standards vom BSI [10] und der Bundesnetzagentur [11] definiert. Anschließend erfolgt die Ablage der signierten Daten auf ein Speichermedium mit Standardzugang, damit deren Verfügbarkeit gesichert ist. Für die Speicherung der Daten wurde ein einheitlicher Ablagestandard entwickelt, der die Auswertbarkeit garantiert. Der Datenablagestandard wurde zusammen mit dem Fraunhofer AISEC erarbeitet und muss in jedem Geldspielgerät implementiert werden.

Die Sicherung der KE-Daten hat direkten Einfluss auf den Zulassungsprozess der PTB. Hierzu wird auf der einen Seite geprüft, ob der Hersteller den definierten Ablagestandard und die Sicherungsverfahren nach Vorgabe des BSI bzw. der Bundesnetzagentur einhält, damit die Daten nach Stand der Technik gegen Veränderungen geschützt sind. Auf der anderen Seite wird im Zulassungsprozess getestet, ob die Daten der Kontrolleinheit auch den signierten Daten auf dem Speichermedium entsprechen. Hierzu werden von der Arbeitsgruppe „Spielgeräte“ vollautomatische softwaregestützte Prüfwerkzeuge entwickelt und getestet, um den Zulassungsprozess zu automatisieren und damit zu beschleunigen. Bei der Prüfung der gesicherten KE-Daten sowie der Entwicklung der Softwarewerkzeuge werden aktuelle kryptografische oder gleichwertige Verfahren angewandt. Die PTB prüft und bewertet die neu entwickelten Konzepte nach dem Stand der Technik.

Um die Sicherheit der KE-Daten zu gewährleisten, muss das Konzept zur Datenspeicherung sowie deren Manipulationsfestigkeit noch im Rahmen des IT-Sicherheitsgutachtens von einer zertifizierten, unabhängigen Prüfstelle validiert werden. Dabei werden verschiedenste Angriffsvektoren betrachtet, die die Daten direkt oder die kryptografischen Verfahren zur Verarbeitung beeinflussen.

4. Spielerschutz

Zu den wichtigsten Maßnahmen, um den Spieler- und Jugendschutz zu verbessern, sind das Verbot

von Geldäquivalenten (GÄ), eine Pause mit vollständigem Reset aller Spielmerkmale nach 3 Stunden Spielbetrieb sowie ein Identifikationsmittel zur Freischaltung des Geldspielgerätes zu nennen. Diese Themen werden in den Kapitel 4.1 bis 4.3 erläutert. Zu der gleichen Kategorie gehören auch die Anpassung der Einsatz- und Gewinn Grenzen, das Verbot der Automatik taste (aufgebuchte Beträge gelangen nicht unbeeinflusst zum Einsatz) sowie diverse Regelungen, die die Aufstellung betreffen. Die Änderungen der Einsatz- und Gewinn Grenzen sowie das Verbot der Automatik taste lassen sich durch geringe Anpassung im Zulassungsprozess überprüfen und werden daher in diesem Artikel nicht näher betrachtet. Ferner sind Themen, die die Aufstellung betreffen, nicht Teil des Zulassungsprozesses und werden daher hier ebenfalls nicht behandelt.

4.1 Verbot von Geldäquivalenten

Unter GÄ versteht man eine feste Zuordnung von Spielmerkmalen zu realem Geld. Seit der 6. Verordnung zur Änderung der SpielV [1] ist eine solche feste Zuordnung von Geld zu Spielmerkmalen nicht mehr gestattet.

Die Überprüfung der Geldspielgeräte auf GÄ während des Zulassungsprozesses gestaltet sich dabei als arbeits- und zeitintensiv. Sie basiert vor allem auf der Analyse des Spielkonzeptes und der Geldbewegung. Dabei muss sichergestellt werden, dass an keinem Ort und zu keinem Zeitpunkt Geldäquivalente entstehen oder auftauchen. Eine IT-gestützte Überprüfung kann hier nur unterstützend erfolgen, da die Analyse der Spielkonzepte nicht automatisierbar ist. Hier kommt das langjährige und umfangreiche Expertenwissen der Arbeitsgruppe „Spielgeräte“ zur Beurteilung zum Einsatz.

4.2 Drei Stunden Pause

Eine weitere Maßnahme des Gesetzgebers, um den Spielanreiz zu begrenzen, ist eine Spielpause nach drei Stunden Spielbetrieb gemäß §13 Nr. 6a SpielV. Diese Ruhepause muss mindestens 5 Minuten andauern und darf dem Spieler keinen Anreiz zum Weiterspielen bieten. Um dies zu gewährleisten, darf in dieser Zeit kein Spielbetrieb möglich sein und auch keine sonstigen Animationen vom Geldspielgerät angeboten werden. Außerdem muss die komplette Entleerung des Geldspeichers zum Beginn der Pause gewährleistet sein. Zusätzlich müssen alle Spielmerkmale auf einen vordefinierten Anfangswert gesetzt werden. Mit diesen Maßnahmen will der Gesetzgeber eine „Abkühlphase“ für den Spieler erreichen. Die Auflösung bzw. Löschung von jeglichen Merkmalsballungen soll dem Spieler darüber hinaus den Anreiz zum Weiterspielen nehmen.

Diese Vorgaben des Gesetzgebers lassen sich im Zulassungsprozess der PTB gut durch selbstentwickelte Datenanalysetools in die bestehenden Prüfungen integrieren. Die intern verwendeten Softwarewerkzeuge sind modular aufgebaut und lassen sich um die zusätzliche Prüfung der geforderten Pause erweitern. Durch die Erfahrungen der vorherigen SpielV und die fortwährende Entwicklung der IT-gestützten Analysewerkzeuge ist eine zu großen Teilen automatisierte Prüfung möglich. Jedoch müssen alle automatisierten Prüfungen überwacht und im Nachgang durch das Fachpersonal der Arbeitsgruppe „Spielgeräte“ analysiert werden, um diese im Rahmen der gesetzlichen Vorgaben zu deuten.

4.3 Identifikationsmittel

Zur weiteren Stärkung des Spielerschutzes ist für zugelassene Geräte nach dem 10.02.2016 ein Identifikationsmittel zur Freischaltung des Spielbetriebs vorgeschrieben. Hierbei hat der Gesetzgeber nicht die konkrete Form oder Ausprägung dieses Identifikationsmittels vorgeschrieben, sondern diese Schutzmaßnahme technologieoffen formuliert. Vom Gesetzgeber wurden dabei folgende Kriterien für das Identifikationsmittel gemäß §13 Nr. 10 SpielV festgelegt:

- (1) Spielbetrieb ist nur unter ständiger Verwendung eines Identifikationsmittels möglich
- (2) Es muss sich um ein gültiges, gerätegebundenes, personenungebundenes Identifikationsmittel handeln
- (3) Die Gültigkeit muss vor der Aufnahme des Spieles geprüft werden
- (4) Während des Spielbetriebes dürfen keine Daten auf dem Mittel gespeichert werden

Ein schematisches Ablaufdiagramm zur Erfüllung dieser Vorgaben ist in Bild 3 dargestellt. Das Geldspielgerät unterscheidet zwischen den zwei Zuständen Pause und Spielbetrieb. Die Spielverordnung schreibt vor, dass in einer Pause der Geldspeicher leer sein muss und keine Spielvorgänge, einsatz- und gewinnfreie Probe- oder Demonstrationsspiele oder sonstige Animationen angeboten werden dürfen [1] [2]. Damit der Spieler das Gerät in den Spielbetrieb überführen kann, muss er in das Gerät ein Identifikationsmittel (Ident) einführen. Dieses Identifikationsmittel darf keine Rückschlüsse auf den Spieler zulassen (personenungebunden). Zusätzlich darf ein Identifikationsmittel nur vom zugehörigen Spielgerät als gültig erkannt werden, nicht jedoch von einem beliebigen anderen Gerät (gerätegebunden). Nachdem das Geldspielgerät die Gültigkeit des Identifikationsmittels überprüft hat, kann es in den Spielbetrieb wechseln. Während des Spielbetriebes ist es nicht möglich, Daten auf dem Identifikationsmittel zu speichern, um unter anderem ein Spielertracking zu verhindern. Wird das Identifikationsmittel entfernt, muss der Spielbetrieb beendet werden und das Geldspielgerät kehrt in den Pause-Zustand zurück.

Durch diese Vorgaben des Gesetzgebers wurde der Zulassungsprozess für Geldspielgeräte um eine technische Neuerung erweitert. Eine Art ID-Karte wäre eine offensichtliche Ausprägung eines gerätegebundenen, spielerungebundenen Identifikationsmittels, jedoch wurde den Herstellern durch die technologieoffene Formulierung Spielraum bei der Ausgestaltung der Form und des Konzeptes eröffnet. Da bis zum heutigen Tage noch kein Geldspielgerät mit einem Identifikationsmittel zugelassen wurde, ist die Vorbereitung für einen erweiterten Zulassungsprozess durch die unbekanntenen Entwicklungsmöglichkeiten entsprechend schwierig. Klar ist jedoch, dass die Konzepte auf aktuellen kryptografischen oder gleichwertigen Verfahren basieren müssen.

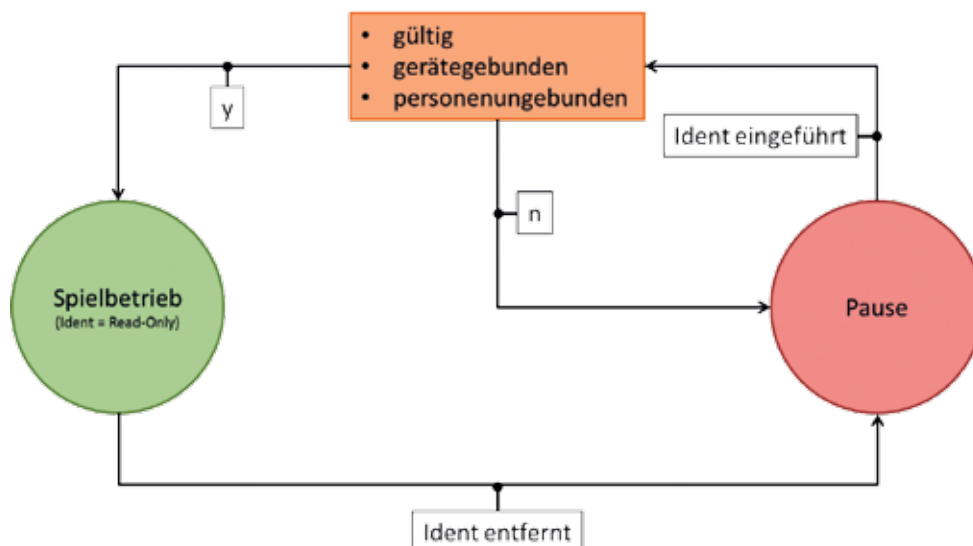


Bild 3: Ablaufdiagramm des Identifikationsmittels

Ergänzend zum Zulassungsprozess in der PTB unterliegen Teile dieses Konzeptes dem IT-Sicherheitsgutachten, welches bereits in Kapitel 3.1 erläutert wurde. Die unabhängige Prüfstelle muss dabei Angriffsvektoren betrachten, die z. B. die eindeutige Zuordnung von Geldspielgeräten und Identifikationsmitteln brechen, oder auch die Manipulationsfestigkeit derjenigen Komponenten überprüfen, die die Authentizität des Identifikationsmittels verifiziert. Die Arbeitsgruppe „Spielgeräte“ verifiziert anschließend, ob die Prüfstelle alle gerätespezifischen Besonderheiten einbezogen hat.

5. Fazit

Die neue SpielV bringt viele technische und konzeptionelle Anforderungen mit sich, um den Manipulationsschutz von Geldspielgeräten zu erhöhen und gleichzeitig den Jugend- und Spielerschutz zu stärken. Um diese Vorgaben zu erfüllen, musste der Zulassungsprozess von Geldspielgeräten angepasst und erweitert werden. Dieser Artikel präsentierte die Auswirkungen der neuen Anforderungen auf den Zulassungsprozess von Geldspielgeräten. Das von einer zertifizierten Prüfstelle erstellte IT-Sicherheitsgutachten schließt alle spielverordnungsrelevanten Komponenten ein und wird von der PTB auf Vollständigkeit und gerätespezifische Anpassung bewertet. Ferner werden die Angriffsszenarien regelmäßig von der PTB geprüft und ggf. erweitert. Die gesicherte Aufzeichnung aller relevanten KE-Daten zur Fiskalerhebung bedingt die Analyse und Bewertung von kryptografischen Verfahren nach dem Stand der Technik. Die Untersuchung kann teilweise automatisiert durchgeführt werden. Das Verbot der Geldäquivalente basiert auf der Analyse des Spielkonzeptes sowie der Geldbewegung und ist damit arbeits- und zeitintensiv und wird durch IT-gestützte Prüfungen nur unterstützt. Im Gegensatz dazu ist die Überwachung der 3 Stunden Pause nahezu vollständig über selbstentwickelte Datenanalysetools automatisiert möglich. Das Identifikationsmittel und die gesicherten KE-Daten basieren auf aktuellen kryptografischen oder gleichwertigen Verfahren und sind teilweise automatisiert prüfbar.

Insgesamt ist die Bauartzulassung durch die Änderungen der SpielV aufwendiger und zeitintensiver geworden und verlangt zusätzlich umfangreiche Prüfungen. Diese können teilweise halbautomatisch bzw. vollautomatisch durchgeführt werden. Dazu ist die Neu- und Weiterentwicklung von softwarebasierten Prüfwerkzeugen unabdingbar. Die Ergebnisse dieser Werkzeuge werden in die Begutachtung und Bewertung durch die Fachleute der Arbeitsgruppe „Spielgeräte“ als Grundlage der abschließenden Prüfentscheidung einbezogen. Durch diesen adaptiven Prozess sichert die PTB ihren Auftrag bzgl. bestehender und kommender Herausforderungen.

Referenzen

- [1] 6. *Verordnung zur Änderung der Spielverordnung*, BGBl. I, Nr. 50, 1678–1682, 10. November 2014
- [2] 7. *Verordnung zur Änderung der Spielverordnung*, BGBl. I, Nr. 57, 2003, 12. Dezember 2014
- [3] Physikalisch Technische Bundesanstalt, *Technische Richtlinie für Geldspielgeräte – Version 5.0*, Berlin, 27.01.2016, www.ptb.de/spielgeraete (Letzter Zugriff am 30.01.2017)
- [4] The Common Criteria Recognition Agreement Members, *Common Criteria for Information Technology Security Evaluation*, www.commoncriteriaportal.org (Letzter Zugriff am 30.01.2017)
- [5] Europäische Kommission, *Information Technology Security Evaluation Criteria (ITSEC)*
- [6] International Organization for Standardization, *ISO/IEC 15408 – Evaluation Criteria for Information Technology Security*, www.iso.org (Letzter Zugriff am 30.01.2017)
- [7] Fraunhofer – Institut für Angewandte und Integrierte Sicherheit (AISEC), <http://www.aisec.fraunhofer.de/> (Letzter Zugriff am 30.01.2017)
- [8] Fraunhofer Research Institution for Applied and Integrated Security AISEC, *Bedrohungsprofil für Geldspielgeräte*, Garching, 2014
- [9] J. Heyszl und F. Thiel: *Geldspielgeräte in Zukunft mit geprüfter Sicherheit*, Datenschutz und Datensicherheit – DuD, 2015
- [10] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, *Technische Richtlinie - Kryptographische Verfahren: Empfehlungen und Schlüssellängen*, Bonn, 2016, www.bsi.bund.de (Letzter Zugriff am 30.01.2017)
- [11] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, *Bekanntmachung zur elektronischen Signatur nach dem Signaturgesetz und der Signaturverordnung (Übersicht über geeignete Algorithmen)*, Bonn, 2014, www.bundesnetzagentur.de (Letzter Zugriff am 30.01.2017)

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.

Verlag

Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7
28195 Bremen
Internet: www.schuenemann.de
E-Mail: info@schuenemann-verlag.de

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)
Dr. Florian Thiel
(wissenschaftlicher Redakteur)
Telefon: (05 31) 592-82 02
Telefax: (05 31) 592-30 08
E-Mail: sabine.siems@ptb.de

Leser- und Abonnement-Service

Karin Drewes
Telefon (0421) 369 03-56
Telefax (0421) 369 03-63
E-Mail: drewes@schuenemann-verlag.de

Anzeigenservice

Karin Drewes
Telefon (0421) 369 03-56
Telefax (0421) 369 03-63
E-Mail: drewes@schuenemann-verlag.de

Erscheinungsweise und Bezugspreise

Die PTB-Mitteilungen erscheinen viermal jährlich. Das Jahresabonnement kostet 39,00 Euro, das Einzelheft 12,00 Euro, jeweils zzgl. Versandkosten. Bezug über den Buchhandel oder den Verlag. Abbestellungen müssen spätestens drei Monate vor Ende eines Kalenderjahres schriftlich beim Verlag erfolgen.

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: 10.7795/310.20170199



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