

# Komponentenkalibrierung versus Systemkalibrierung

**Maria Hennes, Hilmar Ingensand**

**Zusammenfassung:** In einem geodätischen Meßsystem wird die Funktionsweise einzelner Komponenten und ihr Zusammenwirken immer weniger zugänglich. Deswegen zeichnet sich ein Trend zur Systemkalibrierung ab, der auch aus wirtschaftlicher Sicht begründet zu sein scheint. In der Regel gewährleistet nur eine Komponentenkalibrierung eine durchgreifende Genauigkeitssteigerung, weil die Modellierbarkeit des zu korrigierenden Effektes vorausgesetzt werden muß; diese erfordert die Zuordnung des zu korrigierenden Fehlers zum verursachenden Effekt oder zur beeinflussenden Größe und gelingt wesentlich leichter, wenn das Problem separiert wird. In einzelnen Fällen können das aus der Komponentenkalibrierung resultierende Wissen über das Systemverhalten und Kenntnisse über das Zusammenwirken mehrerer Komponenten eine Systemkalibrierung sinnvoll erscheinen lassen. Umgekehrt ist eine Komponentenkalibrierung nicht immer möglich, weil der Zugang zu den einzelnen Komponenten verwehrt ist.

## 1 Einleitung

Bei den aktuellen komplexen geodätischen Meßsystemen, die eine Vielzahl von Sensoren und die entsprechende System- und Applikationssoftware vereinigen, wird dem geodätischen Benutzer die „wahre“ Funktionsweise immer unzugänglicher. Herstellerinternes geistiges Eigentum und auch die technologische Komplexität der Systeme tragen zusätzlich zu einer weiteren Verunsicherung bei. In den letzten Jahren gab es daher zunehmend Diskussionen über den Nutzen von Komponentenkalibrierungen und Systemkalibrierungen. Basierend auf einigen grundsätzlichen Überlegungen sollen in diesem Beitrag die Voraussetzungen und die Zweckdienlichkeit der Komponenten- und Systemkalibrierung gegenübergestellt werden.

## 2 Definition und Abgrenzung der Kalibrierung

Qualitätskontrolle im Vermessungswesen schließt das Testen und Prüfen, worunter das Verifizieren der Herstellerspezifikationen im Rahmen eines Funktionstestes zu verstehen ist, und das Kalibrieren des benutzten Instrumentariums ein. In der Meßtechnik wird unter Kalibrieren das Feststellen des Zusammenhanges zwischen Ausgangs- und Eingangsgröße verstanden und in der Regel als Kenn-

linie dargestellt. Die Ausgangsgröße ist üblicherweise die Anzeige eines Meßgeräts und die Eingangsgröße bildet die zu bestimmende, d.h. die zu messende Größe. In der geodätischen Meßtechnik wird hingegen zunächst angenommen, daß die zu bestimmende Größe auch tatsächlich angezeigt wird und ein linearer Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße besteht. Abweichungen sollten nur innerhalb der Herstellerspezifikationen auftreten. Es ist zu bemerken, daß die eigentliche Zielgröße, z.B. Koordinatentripel, häufig erst eine Funktion der Meßgröße ist und aus Meßgrößen und zusätzlichen Parametern abgeleitet wird.

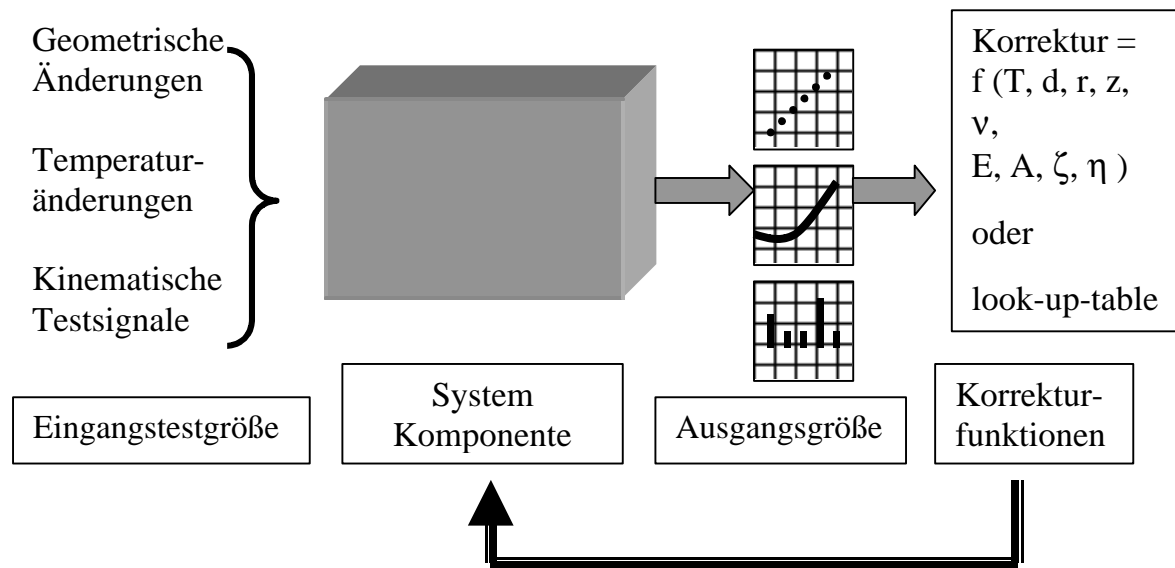


Abb. 1: Der Kalibrierprozeß

Unter Kalibrieren versteht man im geodätischen Bereich die Bestimmung einer Korrekturfunktion für eine signifikante Abweichung. In der Regel ist diese auf eine Komponente des Meßsystems bezogen und gibt noch keinen Aufschluß über die Charakteristik des Gesamtsystems, das üblicherweise aus mehreren Bauteilen (Modulen) besteht und dessen Meßprozeß häufig äußeren Einflüssen unterliegt (z.B. Atmosphäre als Übertragungsmedium). In Anlehnung an die meßtechnische Definition und im Hinblick auf eine einfache, wirtschaftliche Anwendung ist eine Systemkalibrierung, also die gemeinsame Kalibrierung aller Komponenten, anzustreben.

Eine Kalibrierung zielt nicht primär auf die Validierung eines stochastischen Modells ab, sondern auf die Bestimmung des funktionalen Zusammenhangs zwischen Abweichung und Einflußfaktor oder Eingangsgröße. Durch eine Kalibrierung soll die Elimination systematischer Abweichungen gewährleistet werden, die sonst als nicht kalibrierbare Fehler wie stochastische behandelt werden

und in die Genauigkeitsangabe für das Meßsystem einfließen. Das stochastische Modell muß zwar für den Kalibrierungsprozeß bekannt sein und bestimmt die Stochastik des Kalibrierergebnisses mit, aber die Stochastik des Kalibrierergebnisses ist nur ein Nebenprodukt, das aussagt, welche Genauigkeitssteigerung für das Meßsystem nach Anbringen der Kalibrierfunktionen zu erzielen ist.

### **3 Der Meßprozeß**

#### **3.1 Struktur eines Meßsystems**

Bevor Kalibrierverfahren für geodätische Meßsysteme und Komponenten diskutiert werden können, muß die Struktur eines solchen Systems definiert werden. Unter System im technischen Sinn versteht man im allgemeinen Zusammenfügungen unterschiedlicher Bauelemente und Software. Basiselemente sind Sensoren, die meistens in einer eindeutig definierten Position im Meßinstrument angeordnet sind. Diese Sensoren wandeln physikalische oder geometrische Größen in elektrische Größen um. Die anschließende Analog/Digital-Wandlung ermöglicht die Weiterverarbeitung in Mikroprozessoren. Die Einheit von einem oder mehreren Sensoren mit entsprechender Software kann als Komponente eines Meßsystems angesehen werden, die zur Bestimmung einer Beobachtungsgröße (beispielsweise Richtung oder Distanz) dient. Ein Sensormeßwert kann auch von mehreren Komponenten gemeinsam benutzt werden. Neben den Sensoren enthalten insbesondere motorisierte Systeme Aktoren, die eine Bewegung der Komponente ermöglichen. Als weitere Komponenten eines geodätischen Meßsystems sind nicht-aktive Elemente zu nennen, die in der Regel die Ankopplung an die zu messende Größe ermöglichen (Zentrierung, Optik, usw.).

Eine oder mehrere Komponenten bilden dann ein Modul, welches üblicherweise mit einem weiteren Modul die Minimalkonfiguration eines geodätischen Meßsystems bildet. Je ein Modul besetzt den Stand- oder Referenzpunkt und den Zielpunkt; beispielsweise Tachymeter und (aktiver) Reflektor; Nivellier und Latte; usw. Bei differentiellen Systemen, wie z.B. DGPS oder hydrostatischen Meßsystemen, können einzelne Module weitgehend identisch sein.

Daneben gibt es aber auch Meßsysteme, die nur aus einem Modul bestehen (z.B. Neigungsmesser, Vermessungskreisel, Gravimeter, Inertialsysteme). Der Bezug wird hier durch einen physikalischen Effekt (Gravitation, Erdrotation, Massenträgheit) gegeben.

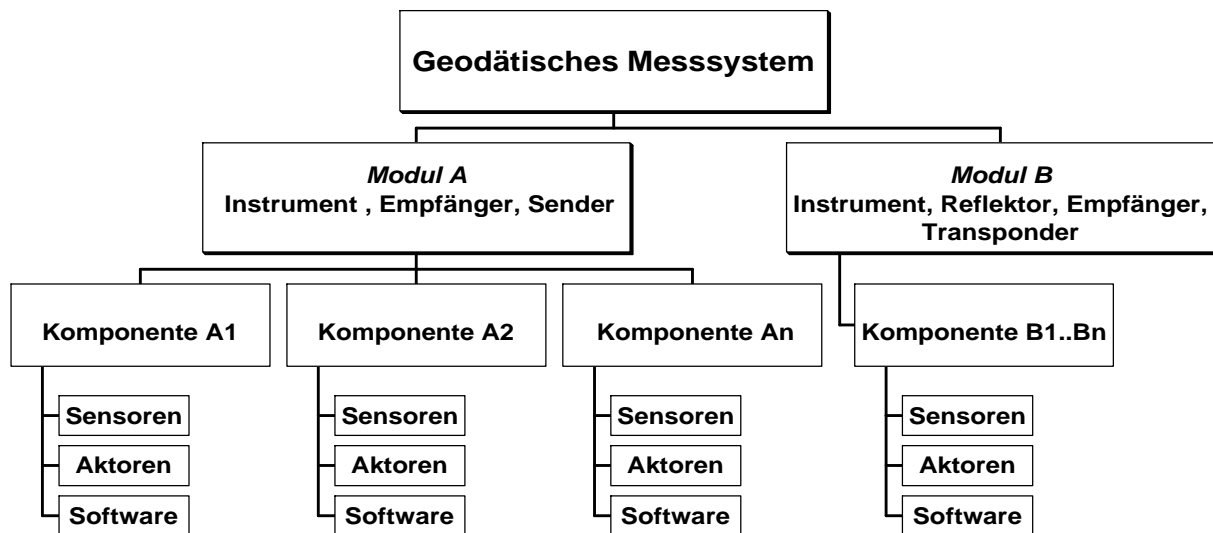


Abb. 2: Struktur eines geodätischen Meßsystems

Der Aufbau eines Moduls kann äußerst komplex sein und neben der Hardware über eine Software-, Bus und Interfacestruktur verfügen. Diese sensornahere Software berücksichtigt bei der Transformation der primären Beobachtungsgröße in die gewünschte Dimension bereits implementierte Kalibrierfunktionen, die vorgängig vom Hersteller ermittelt worden sind. Die hierzu benötigten Kalibrierwerte liegen entweder als Parameter eines funktionalen Modells oder als look-up-table vor. Sie sind in einer gemeinsamen Datenbank abgespeichert, die auch von anderen Komponenten mitbenutzt wird. Das Betriebssystem, welches die Verwaltung innerhalb des Moduls übernimmt, basiert in den seltensten Fällen auf Betriebssystemen aus dem PC-Bereich, so daß das Auslesen oder Manipulieren der abgespeicherten Kalibrierwerte oder sogar Eingriffe in den Funktionsablauf Spezialisten vorbehalten bleiben.

### 3.2 Ankopplung

In der geodätischen Meßtechnik sind vorwiegend geometrische Größen (Distanzen, Richtungen, Winkel, Basislängen) zu bestimmen. Dies bedingt, daß das Meßsystem an die die geometrische Größe definierenden Punkte angekoppelt werden muß. In den meisten Fällen geschieht diese Ankopplung mechanisch und optisch, indem z.B. der Dreifuß mit einem optischen Lot die Verbindung zum Bodenpunkt herstellt; eine Zwangszentrierung soll eine möglichst identische Wiederbesetzung des Punktes garantieren. Die geometrische Lage des Meßwertaufnehmers in Bezug auf die Punktadaption ist zwar vorgegeben, kann aber auch kalibrierbaren Einflüssen unterworfen sein, beispielsweise die Reflektorkonstante, Antennenoffsets etc..

### 3.3 Äußere Einflüsse auf den Meßprozeß

Die äußeren Einflüsse können zwei Klassen zugeordnet werden: 1. Einflüsse, die aufgrund des verwendeten Meßverfahrens als Modellgrößen (beispielsweise Lotabweichung) *direkt* zu berücksichtigen sind und 2. wirkliche Störgrößen, die in ihrer Größe und Auswirkung unvorhersehbar und *nicht unmittelbar* modellierbar sind. Soll beispielsweise mit einem Nivellement der geometrische Höhenunterschied bestimmt werden, muß der Einfluß nicht-äquidistanter Potentialflächen modelliert werden, wobei die notwendigen Daten vorab wiederum durch Messung mit geeigneten Systemen erhoben werden müssen (1.), während beispielsweise Einsinkeffekte kaum vorab modellierbar sind und somit eine Störgröße darstellen (2.).

Die reale Meßtechnik, insbesondere im Außenbereich, muß grundsätzlich mit mehr oder weniger starken echten Störwirkungen rechnen, die das Resultat verfälschen. Diese beeinflussen entweder unmittelbar den Sensor oder wirken mittelbar über den Beobachter, die Adaption oder die (meteorologischen) Umgebungsbedingungen auf das Meßsystem ein. Es können auch Wechselwirkungen zwischen den Sensoren und/oder Aktoren auftreten, wie zum Beispiel gegenseitiges Aufwärmen oder ungleichmäßig abgebaute Materialspannungen nach der Krafteinwirkung durch den Aktor.

Die Reaktion des Sensors, der Komponente bzw. des Moduls ist hochgradig mit der Störgröße korreliert. Eine besondere Problematik liegt darin, daß die Störgrößen in der Regel zeitlichen Variationen unterliegen und die Wirkung mit einer mehr oder weniger großen Zeitverzögerung am Sensor sichtbar werden kann. Beispielsweise bedingt bei der elektrooptischen Distanzmessung die Erhöhung der Umgebungstemperatur eine *unmittelbare* Distanzänderung aufgrund der *unmittelbaren* Reduzierung des Brechungsindex, während die durch die Temperaturabhängigkeit des maßstabsgebenden Quarzes bedingte Distanzänderung aufgrund seiner Ansprechzeit und seiner Lage im Modul erst *verzögert* eintreten wird. Auch bei nicht primär auf kinematische Beobachtungen ausgelegten Meßsystemen sind Kenntnisse über ihr zeitliches Übertragungsverhalten hilfreich, da hiermit Reaktionen auf zeitveränderliche Störgrößen vorhergesagt werden können: beispielsweise kann ein Kompensator derart konstruiert sein, daß er für Vibrationen innerhalb eines bestimmten Frequenzbandes Tiefpaßeigenschaften aufweist, aber Schwingungen in der Nähe seiner Resonanzfrequenz zu Fehlmessungen führen. Neben den zeitlichen treten – vorwiegend bei mobilen Meßverfahren (Nivellement, Inertialsystem, GPS) – auch *lokale* Variationen der äußeren Einflüsse auf, wie zum Beispiel Änderung der Lotrichtung entlang des Nivellementsweges.

### 3.4 Fehlerreduzierende Maßnahmen

Neben Kalibrierprozessen sind eine Vielzahl von weiteren fehlerreduzierenden Maßnahmen im Vermessungswesen gebräuchlich. Einige stammen aus einer Zeit, in der mechanische Konstruktionen numerischen Korrekturen vorgezogen wurden, z.B. Bimetall zur Temperaturkompensation. Dazu zählen auch diametral angeordnete Ableseeinrichtungen, Einrichtungen zur Teilkreisverstellung, durchschlagbare Fernrohre zur Ermöglichung der 2-Lagen-Messung, Schwenkspiegel beim Zeiss Ni002, „innere“ Referenzlichtstrecke, usw. Prinzipiell kann man sie als Selbstkalibrierung verstehen, grundsätzlich greifen sie auf einzelne Komponenten zu.

Gerade geodätische Meßverfahren berücksichtigen die Möglichkeit zur Fehlerreduktion. Üblicherweise sind auch diese komponentenorientiert. Sie werden oftmals schon gewohnheitsmäßig angewendet (2-Lagen-Messung und Beachten der Zielreihenfolge bei Richtungsmessung, gleiche Zielweiten und die Verfahren „Rote Hose“ sowie „RVVR“ beim Nivellement, Horizontieren nach Spielpunkt etc.). Oftmals werden bewußt auch differentielle Verfahren eingesetzt, wodurch sich additiv wirkende Abweichungen kompensieren lassen. Bei der Antennenkalibrierung nach dem Zero-baseline-Verfahren sind die Messungen vorab durchzuführen. Da einerseits all diese Verfahren zeitaufwendig sind und demzufolge die Kosten erhöhen und andererseits Softwarelösungen immer preisgünstiger werden, besteht ein Trend zur numerischen Reduktion von meßprozeßbedingten Abweichungen. Die zunehmende Automatisierung von Meßsystemen schränkt eine Reduktion der Abweichungen mittels des Meßverfahrens mehr und mehr ein, beispielsweise wird sogar eine 2-Lagen-Messung nicht mehr in vollem Umfang von allen Robottachymetern und Lasertrackern unterstützt [Hennes, 2000]. Auch der Trend zu Echtzeit-Verfahren bis hin zur kinematischen Messung wird hergebrachte – und eigentlich notwendige – Beobachtungsstrategien verdrängen.

Trotz allem wird die Meßmethodik auch weiterhin eine entscheidende Rolle im Hinblick auf die Reduktion von Störeinflüssen behalten. Beispielsweise sei daran erinnert, daß die Reduktion der Beobachtungszeiten dazu beiträgt, langsam verlaufende Störungen zu minimieren; hierzu zählen vor allem Drifterscheinungen. Umgekehrt können Langzeitbeobachtungen dazu beitragen, periodische Anteile herauszumitteln, indem die Beobachtungen gleichmäßig über eine Periode verteilt erhoben werden (24h-Messung zur Elimination des Tagesgangs). Bei einer Überlagerung mehrerer und/oder unbekannter (zeitlich) periodischer Anteile ermöglicht eine Langzeitbeobachtung zumindest eine Reduzierung des Fehlers. Das Ziel einer Kalibrierung muß also sein, neben den nicht durch das

Meßverfahren zu eliminierenden Fehlern auch diejenigen zu reduzieren, die üblicherweise durch Beachtung einer speziellen Meßvorschrift reduziert werden.

## **4 Kalibrierungsmerkmale**

### **4.1 Voraussetzungen**

Jede Komponenten- oder Systemkalibrierung setzt natürlich voraus, daß die Komponente oder das System überhaupt kalibrierbar ist. Dies bedeutet, daß eine Abweichung vom Soll-Verhalten zumindest in systematischer Weise auftritt und reproduzierbar ist. Letzteres heißt, daß sie sich auch unter abweichenden Meßbedingungen mit gleichem Betrag einstellt, sofern ihre Ursache unverändert geblieben ist. Eine sinnvolle Kalibrierung setzt also voraus, daß das (Fehl-)Verhalten konstant bleibt und damit die Korrekturfunktion im Rahmen der System- oder Komponentengenauigkeit über einen längeren Zeitbereich (z.B. ein Jahr) gültig ist. Sprunghafte Änderungen, wie z.B. der Quarzfrequenz in EDMs oder der Länge von Invardrähten, erfordern eine regelmäßige Überprüfung der Kalibrierung. Trotzdem sind die Soll-Ist-Abweichungen als stationärer Prozeß zu betrachten, weil zufällige Anteile enthalten sind, die während des Kalibriervorgangs zeitinvariant sind. Die Soll-Ist-Abweichung muß eindeutig sein: sobald Hysterese auftritt, kann eine Reduktion des Fehlers nur richtig erfolgen, wenn die Vorgeschichte bekannt ist – eine für Standardmeßaufgaben üblicherweise nicht gegebene Voraussetzung. Sofern Informationen über die physikalische Ursache der Abweichung vorliegen, sollte das Verfahren zur Bestimmung der Kalibrierwerte und das Modell der Kalibrierfunktion angepaßt werden, weil dies üblicherweise zu einer deutlichen Reduktion des Aufwandes führt: Die Anpassung des Modells an den physikalischen Zusammenhang bedeutet in der Regel eine Reduktion der notwendigen Parameter bei einer gleichen oder gar besseren Beschreibung des Verhaltens, womit gleichzeitig der Meßaufwand zur Bestimmung der Parameter reduziert wird.

Auch der Kalibrierungsprozeß ist ein Meßprozeß, der gewissen Anforderungen genügen muß. Kalibrationsspezifische Störfaktoren müssen von untergeordneter Bedeutung bleiben. Ihr Typ (systematisch oder stochastisch) sowie ihre Größe muß bekannt sein, um im Rahmen einer Fehler- und Varianzfortpflanzung die beim Kalibrierprozeß erreichte Genauigkeit angeben zu können. Sie ist ein entscheidendes Kriterium für die Brauchbarkeit der Kalibrierung.

### **4.2 Anforderungen**

Grundsätzlich ist die *vollständige* Erfassung des Fehlerverhaltens anzustreben. Dies bedingt eine umfassende *Untersuchung* des Meßsystems, worunter die Analyse im Hinblick auf mögliche weitere Fehlerquellen im Kontext des Meßprozesses zu verstehen ist. Naturgemäß fehlt die Motivation zu einem solchen

Vorhaben aus Gründen der Finanzierbarkeit; in der Regel werden aus dem Erfahrungsschatz besonders qualifizierter Anwender im geodätischen Sinne kalibrierbares (Fehl-)Verhalten aufgespürt. Diese Erkenntnisse führen dann letztendlich zu einem großen Teil zu genaueren Meßsystemen und Auswerteverfahren, weil - nun herstellerseitig - verbesserte oder zusätzliche Kalibrierfunktionen implementiert werden. Auf diese Weise nähert man sich dem vollständigen Erfassen immer mehr an - allerdings müssen nun zumindest die „Schnittstellen“ zu bereits vorgenommenen geräteinternen Kalibrierungen genau definiert sein, um dem Benutzer die Korrektur restlicher Fehleranteile zu ermöglichen. Als eine der kritischsten schlecht- bzw. undefinierten Schnittstellen hat sich die Maßstabsbestimmung bei EDM gezeigt [Schauerte, Faßbender; 1997].

Selbstverständlich sollte eine Kalibrierung für alle *Gebrauchsbedingungen* gültig sein. Dies bedeutet, daß das Meßsystem möglichst auch in Gebrauchslage und unter (äußeren) Meßbedingungen, wie sie beim üblichen Gebrauch vorherrschen, zu kalibrieren ist. Da es beim Kalibrieren nicht darum geht, die beim üblichen Gebrauch erreichbare Meßgenauigkeit zu ermitteln, sollten die Methoden zur Bestimmung der Kalibrierwerte eine übergeordnete Genauigkeit aufweisen.

Eine weitere zweifellos generell akzeptierte Anforderung ist, daß die Kalibrierfunktion für den gesamten Meßbereich gilt. Einschränkungen müssen gemeinsam mit den Kalibrierparametern festgelegt und möglicherweise auftretende Unregelmäßigkeiten ebenfalls erwähnt werden. Als Beispiel seien hier Moiré-ähnliche Erscheinungen genannt, die bei bestimmten Digitalnivellier-Latten-Zielweiten-Kombinationen auftreten können. Weiterhin sollte die Kalibrierfunktion einfach zu handhaben sein, d.h. sie sollte entweder durch eine stetige Funktion mit möglichst wenigen Parametern darstellbar sein oder als look-up-table ein nicht-stetiges Verhalten kompensieren können. Auch hier wird wiederum die Problematik der Kalibrier-Schnittstelle deutlich, denn unter Umständen werden herstellerseitig unterschiedliche Parameter für verschiedene Meßbereiche verwendet.

Eine weitere Anforderung ist, daß das Resultat des Kalibriervorganges in eine solche Größe transformiert wird, die sich an dem geodätischen Beobachtungsvorgang orientiert. Beipielsweise wird ein Lasertracker mittels eines Kreisformtestes kalibriert, wobei die Abweichungen zu verschieden orientierten Kreisen derart parameterisiert werden, daß sie zum einen das Verhalten des Trackers und zum anderen unbekannte Größen des Versuchsaufbaus beschreiben.

### **4.3 Einschränkungen**

Laborkalibrierungen gelten nur für definierte - und recht eingeschränkte - Betriebsbedingungen, die Übertragbarkeit der Laboruntersuchungen auf Messungen im Außenbereich ist fraglich. Andererseits schränkt die Prüfung im Außen-



bereich die erreichbare Genauigkeit ein, weil äußere Einflüsse nicht vollständig modelliert werden können.

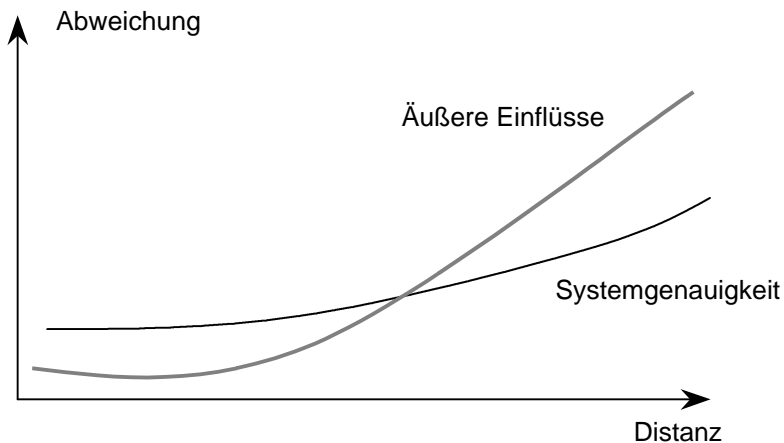


Abb. 3: Zusammenspiel der Systemgenauigkeit und der äußeren Einflüsse

## 5 Kalibrierungstypen

### 5.1 Methodik

Jede Kalibrierung setzt zunächst ein geeignetes Untersuchungsverfahren voraus, um zunächst die Kalibrierbarkeit festzustellen und dann eine Kalibrierfunktion zu bestimmen. Auch hier stellt sich die Frage nach System- oder Komponentenuntersuchung. Prinzipiell wird eine Systemuntersuchung zunächst zeigen, ob überhaupt reproduzierbare und systematische Abweichungen vorliegen, aber erst eine Komponentenuntersuchung gibt Hinweise auf eine sinnvolle Kalibrierbarkeit. Aus den in den Untersuchungen gewonnenen Erkenntnissen sind dann Kalibrierverfahren ableitbar. Sie lassen sich folgendermaßen gliedern:

#### Geometrische Verfahren

- Komparierung bezüglich eines Sollwertgebers
- Vergleich bezüglich einer Referenzlinie (Kreis, Gerade)
- Selbsttest (2 Lagen, innerer Lichtweg)

#### Kinematische Verfahren (Übertragungsverhalten im Zeitbereich)

- Sprungfunktion
- Periodische (sinusförmige) Testsignale
- Trajektorienverfahren (Vergleich mit Zeiterfassung bezüglich geometrischer Referenzlinie)

Systemtests einschließlich Ankopplung, Beobachter, Störgrößen unter regulären Meßbedingungen

- Netze
- Testschleifen

Hinzu kommen Verfahren für die Bestimmung der Abhängigkeit von einer Störgröße. Beipielsweise kann das Temperaturverhalten nur unter definierten Verhältnissen, die durch einen klimatisierbaren Raum (Klimaschrank) realisiert werden können, reproduzierbar analysiert werden. Für die Untersuchung der Grenzen der Funktionsfähigkeit sind spezielle Verfahren zu entwickeln, beispielsweise für das Verhalten eines Digitalnivelliers bei unterschiedlichen Beleuchtungsverhältnissen, für Reaktionen auf Signalunterbrechungen etc. Bei allen gilt, daß die Wiederholung der Messungen bei gleicher Meßanordnung Aufschluß über die stochastischen Anteile liefert.

## **5.2 Systemkalibrierung**

Die Systemkalibrierung hat die Charakteristik eines Blackboxtests, bei dem die Systemreaktion als Output auf eine definierte Eingangsgröße bestimmt wird. Ebenso kann bei konstantem Eingangssignal die Reaktion auf definierte Störgrößen (Vibrationen, Temperatur usw.) analysiert werden. Wie einleitend bereits erwähnt, geht mit abnehmender Transparenz der Funktionsweise geodätischer Meßinstrumente der Trend zur Systemkalibrierung. Dies bedeutet, daß das Meßsystem als Einheit gesehen wird, für die in einer umfassenden Kalibrierung eine (einzige) Korrekturfunktion angegeben werden sollte. Dies ist jedoch aufgrund des Zusammenspiels verschiedener Systemkomponenten mit jeweils eigenem Verhalten nur schwer realisierbar, weil die Parameterisierung hinsichtlich der Größen, von denen die Kalibrierwerte abhängen, kaum vollständig erfolgen kann. Einflüsse einzelner Komponenten sind also nicht trennbar – was vom Ziel der Kalibrierung zunächst auch nicht angestrebt ist, aber auch die Wirkung äußerer Einflüsse ist nicht immer eindeutig rückverfolgbar. Auf der anderen Seite treten gewisse Fehler erst im Zusammenwirken einzelner Komponenten oder Module auf; die resultierenden Abweichungen hängen von der Systemkonfiguration ab: beispielsweise ist für die Additionskorrektur beim EDM der Prisma-mentyp mit entscheidend. Derartige Effekte lassen sich in der Regel nur durch eine Kalibrierung ermitteln, die das vollständige System einbezieht; im Hinblick auf das Resultat handelt es sich jedoch hier um eine Komponentenkalibrierung.

In der Geodäsie impliziert Systemkalibrierung im allgemeinen eine Meßanordnung unter Laborbedingungen oder „normalen“ Umgebungsbedingungen, um das Systemverhalten ohne den Einfluß von äußeren Störgrößen zu bestimmen. Ein wesentliches Merkmal der Systemkalibrierung ist die Verwendung des

Meßsystems in Gebrauchslage. Allerdings verlieren Untersuchungen unter Feldbedingungen durch zu große äußere Einflüsse meistens an Aussagekraft. Solange die Untersuchungen unter Laborbedingungen durchgeführt werden und keine Referenzgeber verwendet werden, lassen sich allerdings auch gute Resultate erzielen, wenn die innere Genauigkeit des Meßsystems hoch ist. Als Beispiel sei die Kalibrierung hinsichtlich zyklischer Effekte bei 360°-Prismen erwähnt [Favre, Hennes, 2000].

### **5.3 Komponentenkalibrierung**

Obwohl für die Komponentenkalibrierung ähnliche Meßverfahren wie die Systemkalibrierung eingesetzt werden, hat die Komponentenkalibrierung eine andere Zielsetzung. Hier geht es um das spezifische Verhalten (Kennlinie, Temperaturverhalten, Zeitverhalten) einer Komponente. Bei bekannter Funktionsweise des Moduls bzw. des Systems läßt sich dann auch der Einfluß dieser Komponente im Gesamtsystem ermitteln (z.B. Neigungsmesser, Kompensator, Teilkreise, GPS-Antenne). Insbesondere bei Meßverfahren, bei denen zunächst kleine Abweichungen der Komponente oder des Moduls aufgrund der Summation dieser systematisch wirkenden Abweichung zu einer nicht mehr vernachlässigbaren Gesamtabweichung des Meßergebnisses beiträgt, sind hochgenaue Komparierverfahren (Interferometer etc.) notwendig. Diese lassen sich in der Regel einfacher realisieren, wenn man sich auf das Verhalten einer Komponente beschränkt. Beispielsweise ist ein Maßstabsfehler einer Nivellierlatte von wenigen ppm bei großen Höhenunterschieden im Endergebnis deutlich bemerkbar; ein anderes Beispiel ist die zweifache Integration der Beschleunigungsmeßwerte bei Inertialsystemen. Bei einer entsprechenden Systemkalibrierung müßte diese Summation mittels eines geeigneten Meßaufbaus simuliert werden.

Mit zunehmender Komplexität der Meßsysteme ist dem Geodäten die Funktionsweise einer Komponente (HF-Teil eines GPS-Empfängers) immer weniger verständlich, so daß der Weg über die Komponentenkalibrierung im ursprünglichen Wortsinn immer wieder in Frage gestellt werden muß. Allerdings sollte auch berücksichtigt werden, daß das Ergebnis einer Komponentenkalibrierung im herkömmlichen Sinn bisher auch nicht die vollständige Übertragungsfunktion – mathematisch als Kalibriergleichung ausgedrückt – war, sondern eine Reihe von Korrekturfunktionen, die jeweils ein spezielles Verhalten beschreiben. Auch das ist eigentlich ein Blackboxtest.

## **6 Schluß**

Die Antwort auf die Frage nach System- oder Komponentenkalibrierung lautet: Wir brauchen beides. Wenn die Struktur des Systems mit seinen Modulen und Komponenten dem Benutzer zugänglich sind, sollten zunächst die Komponenten

einzelnen gezielten Tests unterworfen werden. Bei Systemen, deren Funktionalität aus dem Zusammenspiel von Modulen am Standpunkt und Zielpunkt gegeben ist, ist es unbedingt notwendig, auch das Verhalten einzelner Komponenten und die erreichbare Genauigkeit als Funktion der Distanz, der Umgebungsbedingungen usw. in Laborversuchen zu untersuchen. Nur auf diese Weise konnten und können systematische Fehler bei EDM, Theodoliten und Digitalnivellieren in Komparierverfahren festgestellt werden. Bei komplexen Systemen, bei denen die Funktionsweise der Komponenten einschließlich der Softwarefunktionalität nicht mehr bekannt ist, wie z.B. bei GPS, bleibt nur noch der Systemtest bzw. die Systemkalibrierung im Sinne eines Blackboxtests, wobei gezielt einzelne Einflüsse untersucht werden können, indem definierte Umgebungsbedingungen geschaffen werden [Böckem, Gervaix, 1997]. Man muß jedoch den Trend erkennen, daß die geodätische Testmethodik das Verhalten der Komponente bei neueren Systemen nicht vollständig erfassen kann. Ob eine Systemkalibrierung tatsächlich alle Einflußfaktoren auf die einzelnen Komponenten ausreichend berücksichtigt, ist wegen der Komplexität der Meßsysteme und gegenseitiger Wechselwirkungen nur sehr schwierig zu beurteilen.

**Literatur:**

- BÖCKEM, B.; GERVAIX, F. [1997]: Die Entwicklung des ETH-Kreisformtests als wirksame Untersuchungsmethode für GPS-Vermessungssysteme. VR, S. 56-67.
- FAVRE, C.; HENNES, M. [2000]: Zum Einfluss der geometrischen Ausrichtung von 360°-Reflektoren bei Messungen mit automatischer Zielerfassung. VPK, in Druck.
- HEISTER, H. [1988]: Zur automatischen Kalibrierung geodätischer Längenmessinstrumente. Schriftenreihe der Uni Bw München, Heft Nr. 27.
- HENNES, M. [2000]: Zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit trackender Totalstationen. Beitrag zu XIII Kurs f. Ingenieurvermessung.
- HENNES, M. [1999]: Grundlegende Aspekte zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Robottachymetern. AVN, S. 374-385.
- INGENSAND, H. [1997]: Neue Verfahren zur Zertifizierung geodätischer Messinstrumente, Geodätische Woche, 16.-22.2.1997, Obergurgl, Österreich.
- MAURER, W.; SCHNÄDELBACH, K. [1993]: Bestimmung der Systemgenauigkeit der digitalen Nivelliere NA2000/NA3000. In: Mitt. Geod.Inst. TU Graz, Heft 78, S. 139-147.
- RÜEGER, J.M.; BRUNNER, F.K. [2000]: On System Calibration and Type Testing of Digital Levels. ZfV, in Druck.
- SCHAUERTE, W.; FASSBENDER, H. [1997]: Anpassung der Massstabskalibrierung auf "rechnende" EDM-Instrumente. VR, S.415-437.