

Aufgabenspezifische Messunsicherheit von Koordinatenmessungen

Task Specific Uncertainty of Coordinate Measurements

Michael Hernla, Dortmund,
Klaus Wendt, Matthias Franke, Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig

Zusammenfassung Der Beitrag beschreibt drei Verfahren zur Ermittlung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit von Koordinatenmessungen nach dem international anerkannten „Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen“ (GUM): Numerische Simulation, Messung von kalibrierten Werkstücken sowie Messunsicherheitsbudget. Er stellt drei Ansätze zur praktischen Umsetzung dieser Verfahren an Werkstücken mit Regelgeometrien gegenüber und diskutiert ihre Einsatzmög-

lichkeiten. ▶▶▶ **Summary** The article describes three procedures to estimate the task specific uncertainty of coordinate measurements according to the GUM, the internationally acknowledged “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”: Numerical simulation, calibrated workpieces, and uncertainty budget. It compares three approaches to realize these procedures at workpieces with regular geometric features and discusses possible applications.

Schlagwörter Koordinatenmessungen, Messunsicherheit, Simulation, kalibrierte Werkstücke, Messunsicherheitsbudget ▶▶▶
Keywords Coordinate measurement, uncertainty of measurement, simulation, calibrated workpieces, uncertainty budget

1 Einleitung

Die allgemein anerkannte Richtlinie für die Ermittlung und Angabe von Messunsicherheiten ist heutzutage der „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ (GUM) [1]. Auf dieser Grundlage kann die aufgabenspezifische Messunsicherheit von Koordinatenmessungen mit drei unterschiedlichen Verfahren ermittelt werden:

- Numerische Simulation
- Experimentelle Ermittlung
- Tabellarische Messunsicherheitsbilanz

Alle drei Verfahren setzen das Vorhandensein eines mathematischen Modells sowie die Beschreibung und Quantifizierung von Unsicherheitsbeiträgen voraus. Für die Koordinatenmesstechnik stehen mit VDI/VDE 2617 Blatt 7, 8 und 11 drei Richtlinien zur Bestimmung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit zur Verfügung.

VDI/VDE 2617 Blatt 7 [3] beschreibt Anforderungen für die Anwendung der Simulationsmethode. Das zugehörige Verfahren erfordert detaillierte Kenntnisse über das Messgerät, die Umgebungsbedingungen und das Werkstück. Die Methode ist in der Software „Virtuelles KMG“ (VCMM) umgesetzt. Diese ist kommerziell verfügbar und derzeit in die Auswertesoftware von zwei Herstellern von Koordinatenmessgeräten (KMG) integriert.

Die experimentelle Ermittlung der Messunsicherheit nach VDI/VDE 2617 Blatt 8 Anhang C [4] setzt ein geeignetes, kalibriertes Werkstück voraus und ermittelt die Messunsicherheit aus Mehrfachmessungen.

Die Richtlinie VDI/VDE 2617 Blatt 11 [5] beschreibt die Ermittlung der Messunsicherheit durch Aufstellen einer Messunsicherheitsbilanz in Tabellenform. Der in

dieser Richtlinie vereinfachte Ansatz zur Abschätzung der Messunsicherheit setzt lediglich pauschale Angaben zu den Messbedingungen als Vorwissen voraus.

Der Beitrag beschreibt die prinzipielle Vorgehensweise bei Anwendung der drei Verfahren und vergleicht beispielhaft Messunsicherheiten, die mit diesen Verfahren an den gleichen Messobjekten für identische Prüfaufgaben bestimmt wurden. Am Ende werden Vorteile und Grenzen der drei Verfahren gegenübergestellt und die sich daraus ergebenden Einsatzmöglichkeiten diskutiert.

2 Messunsicherheit

Der Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen (GUM) [1] ist die international verbindliche Grundlage zur Ermittlung der Messunsicherheit. Er stellt Regeln für die Angabe der Messunsicherheit im Bereich der Normung, Kalibrierung sowie Akkreditierung von Laboratorien und metrologischen Diensten bereit. Die Messunsicherheit ist definiert als ein „Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgröße zugeordnet werden könnte“ ([1], zitiert nach [2]).

Der GUM beschreibt eine einheitliche Vorgehensweise zur Ermittlung der Messunsicherheit. Für die im mathematischen Modell der Messung enthaltenen Einflussgrößen X_i werden Standardunsicherheiten $u(x_i)$ und Sensitivitätskoeffizienten c_i berechnet, deren Produkte als Unsicherheitsbeiträge $u_i(y)$ in die Standardunsicherheit $u(y)$ der Messgröße Y eingehen. Dabei wird lediglich unterschieden, auf welche Weise die Standardunsicherheiten $u(x_i)$ der Einflussgrößen ermittelt wurden: entweder nach der Methode A aus Messungen oder nach der Methode B aus anderen Quellen.

Zur Berechnung der erweiterten Messunsicherheit U muss die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der Messgröße bekannt sein. In der Regel wird eine Normalverteilung angenommen, bei der die Standardunsicherheit $u(y)$ für einen festgelegten Grad des Vertrauens von 95% mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ multipliziert wird.

3 Messunsicherheit von Koordinatenmessungen

3.1 Simulation mit dem Virtuellen KMG

Eine Möglichkeit zur Ermittlung der Messunsicherheit von Koordinatenmessungen ist die numerische Simulation oder Monte-Carlo-Methode, die Gegenstand des GUM-Supplements 1 ist [7]. Das Prinzip und wesentliche Elemente zur Umsetzung des Verfahrens sind für die Koordinatenmesstechnik in der Richtlinie VDI/VDE 2617 Blatt 7 [3] beschrieben. Weitere Einzelheiten und Literaturangaben enthält [8]. Das von der PTB entwickelte Virtuelle KMG (VCOMM) stellt eine softwaretechnische Umsetzung dieses Verfahrens dar. Durch die Integration in die kommerziell erhältliche Auswertesoftware zweier KMG-Hersteller ist für Anwender die automatische Berechnung von Messunsicherheiten direkt im Messprogramm möglich.

Das Verfahren basiert auf einem rechnergestützten mathematischen Modell des Messprozesses, das die wesentlichen Einflussgrößen abbildet. Bei der Simulation werden die Werte der Einflussgrößen innerhalb ihrer möglichen oder vermuteten Wertebereiche variiert, welche durch Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen beschrieben werden. Der Messprozess wird also als zufällige Kombination aller möglichen Zustände der Einflussgrößen vielfach rechnerisch wiederholt. Aus der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der resultierenden Messgröße wird dann die erweiterte Messunsicherheit abgeleitet.

Vom Hersteller der Simulationssoftware muss nach [3] angegeben werden, welche Einflussgrößen in seiner Software berücksichtigt werden können und welche Daten der Anwender dazu eingeben muss. Folgende Einflüsse sind mindestens zu berücksichtigen:

- Geometrieabweichungen des KMG einschließlich Drift
- Abweichungen des Messkopfsystems
- Einflüsse aus der Abweichung von der Bezugstemperatur und aus zeitlichen und räumlichen Temperaturunterschieden bei KMG und Werkstück

Zusätzlich muss das Modell des Messprozesses dokumentiert sein, z. B. mit dem kinematischen Modell des KMG, dem Temperaturmodell und dem Messplan. Die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen der Einflussgrößen und die Standardunsicherheiten sind nach den Forderungen des GUM anzugeben. Die Anwendungsbedingungen und damit die Grenzen des Verfahrens sind vom Hersteller ebenfalls festzulegen, z. B. hinsichtlich der Beschaffenheit der Werkstücke, der Auswahl der Messaufgaben und der Messverfahren, des Temperaturbereichs und der zulässigen Temperaturunterschiede [3].

Einsatzgebiete des Verfahrens sind vor allem die Kalibrierung von Normalen und Meisterteilen für Vergleichsmessungen (Substitutionsmessungen) mit Koordinatenmessgeräten oder Mehrstellenmeseinrichtungen sowie die Bereitstellung von Normalen für das Verfahren mit kalibrierten Werkstücken.

Die Simulationssoftware muss zunächst mit den Daten über das geometrische Verhalten des KMG an seinem Standort unter den herrschenden Umgebungsbedingungen versorgt werden. Das erfolgt in der Regel durch den Hersteller bzw. einen qualifizierten Experten. Die Daten können auf konkreten Messungen (z. B. Kugelplattenmessungen zur Ermittlung der Führungsabweichungen) oder Erfahrungswissen (z. B. Kenntnisse des Herstellers über Fertigungsabweichungen der Komponenten) beruhen. Die Gültigkeit der Eingangsdaten wird durch Messungen an kalibrierten Normalen überprüft und durch regelmäßige Überwachung bestätigt.

Zur rechnerischen Ermittlung der Messunsicherheit wird das Messobjekt zunächst einmal mit der zuvor festgelegten Messstrategie (Anzahl und Anordnung der Messpunkte) real gemessen und die gewünschten Messgrößen werden als Referenzwerte bestimmt. Anschließend simuliert die Software durch Variation der

Einflussgrößen weitere Messungen. Aus den Ergebnissen wird die Standardunsicherheit $u(y)$ der Messgröße Y unter Berücksichtigung eventuell vorhandener systematischer Messabweichungen automatisch berechnet.

Der Unsicherheitsbeitrag von Formabweichungen wird von dem „Virtuellen KMG“ bei Unterabtastung der Werkstückoberfläche mit wenigen Punkten bisher nicht automatisch berücksichtigt. An dem Problem wird aber gearbeitet [8].

3.2 Messung von kalibrierten Werkstücken

In VDI/VDE 2617 Blatt 8, Anhang C [4] wird ein Verfahren zur experimentellen Ermittlung der Messunsicherheit beschrieben. Dabei wird ein kalibriertes Werkstück wiederholt gemessen und daraus die Standardunsicherheit des Messprozesses abgeleitet. Zusätzlich zur Streuung der Messwerte wird die systematische Abweichung b zwischen dem Mittelwert der Messreihe und dem Kalibrierwert des Normals in die Messunsicherheit einbezogen. Andere Einflüsse, wie z. B. die Werkstoff- und Fertigungsstreuung, werden bei diesem Verfahren der experimentellen Unsicherheitsermittlung rechnerisch abgeschätzt. Nicht zuletzt muss bei diesem Verfahren auch die Unsicherheit des kalibrierten Werkstücks mit berücksichtigt werden.

Die ermittelten Messunsicherheiten lassen sich auf andere, ähnliche Werkstücke übertragen, wenn die in [4] angegebenen Ähnlichkeitsbedingungen eingehalten werden. Dazu zählt, dass das KMG, die Messstrategie und die Umgebungsbedingungen die gleichen sind wie bei der Messung des Werkstücks, für die die Unsicherheit des Messprozesses ermittelt werden soll. Das heißt auch, dass bei einem automatisierten KMG mit demselben Messprogramm gemessen wird.

Zur Bestimmung der Messunsicherheit ist das kalibrierte Werkstück entsprechend [4] zwanzigmal zu messen, zusätzlich drei weitere, reale Werkstücke ebenfalls je zwanzigmal. Aus den Messungen am kalibrierten Werkstück werden der Mittelwert \bar{y} , die Standardabweichung und die systematische Abweichung b des Mittelwertes der Messreihe vom kalibrierten Wert y_C (mit der Standardunsicherheit u_C) berechnet. Die Standardabweichungen der Messreihen an allen vier Werkstücken werden zur Standardunsicherheit u_p des Messprozesses gemittelt. Die Standardunsicherheit u_W für den Werkstoff und den Herstellprozess wird aus Vorwissen abgeschätzt. Sie soll z. B. die Streuung des Ausdehnungskoeffizienten des Werkstücks aus verschiedenen Materialchargen sowie die Einflüsse aus Formabweichung und Oberflächenrauheit enthalten.

Die einzelnen Standardunsicherheiten werden quadratisch zur Standardunsicherheit der Messgröße addiert, auch die systematische Messabweichung b . Die in [4] beschriebene Addition des Betrages b zur erweiterten Messunsicherheit U erfüllt nicht die Forderungen des GUM.

Eine Voraussetzung des Verfahrens ist, dass die Wiederholungsmessreihen die ganze mögliche Streubreite der

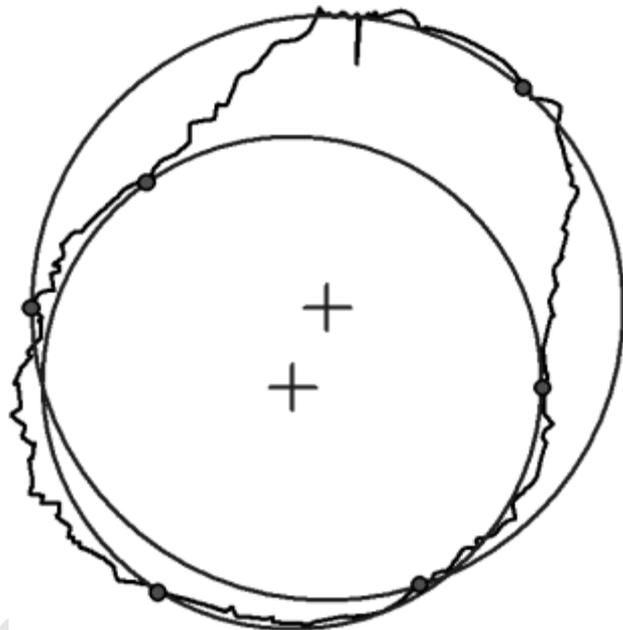


Bild 1 Wiederholungsmessungen an verschiedenen Stellen führen zu stark unterschiedlichen Kreisparametern.

Messbedingungen abdecken, z. B. auch die Temperaturunterschiede über den Tag, die Woche und das Jahr oder eventuellen Schichtbetrieb. Die Messreihen sind deshalb über einen längeren Zeitraum zu verteilen, und die ermittelte Messunsicherheit gilt nur für den dabei auftretenden Temperaturbereich, der natürlich dokumentiert werden muss.

In der Werkstückzeichnung ist die vollständige Oberfläche beschrieben. Die Messung mit Einzelpunkten auf Koordinatenmessgeräten stellt dagegen eine willkürliche Stichprobe dar. Die ermittelten Parameter gelten daher nur für genau dieses Punktmuster. Der zufällige Streueinfluss der Formabweichungen wird so nicht erfasst, siehe Bild 1. Im Mittel wird deshalb die Messunsicherheit zu klein abgeschätzt [6].

3.3 Messunsicherheitsbilanz

Die häufigsten Messaufgaben in der Koordinatenmesstechnik betreffen einfache Formelemente wie Geraden, Ebenen, Kreise und Zylinder, an bzw. zwischen denen einfache Prüfmerkmale wie Durchmesser, Abstände und Lageabweichungen ermittelt werden. Die mathematischen Modelle für diese Standardmessaufgaben brauchen nur einmal aufgestellt zu werden, da die Messabläufe im Prinzip immer dieselben sind. Man kann sie daher sehr gut in einfachen, formalisierten Berechnungstabellen hinterlegen. Beispiele für solche Modelle und das praktische Vorgehen sind in [5] und [6] enthalten. Für die Anwendung sind nur noch die Unsicherheitsbeiträge der einzelnen Einflussgrößen aus den bekannten Informationen für die aktuelle Messung entsprechend der Methode B des GUM zu bestimmen.

Die wichtigsten Unsicherheitseinflüsse bei Koordinatenmessungen sind die Anzahl und Anordnung der

Messpunkte, die Formabweichungen des Werkstücks, die Geometrieabweichungen des KMG, die Messabweichungen des Tastsystems und die Temperatur. Die rechnerische Abschätzung des Temperatureinflusses wurde schon mehrfach beschrieben (z. B. [6]), sodass hier nicht speziell darauf eingegangen wird.

Bei Koordinatenmessungen werden die Formelemente in der Regel nach der Methode der kleinsten Quadrate berechnet. Nach Linearisierung des Problems erhält man ein homogenes Gleichungssystem mit der Matrix \mathbf{M} der Normalgleichungen (auch: Koeffizientenmatrix) [9; 10]. Diese enthält die partiellen Ableitungen der linearisierten Formelementgleichung. Unter der Annahme, dass die Messpunkte auf dem Formelement alle mit gleicher Genauigkeit erfasst werden, gilt für die Elemente der Matrix \mathbf{M} , dass diese allein von der Anzahl und Anordnung der Messpunkte auf dem Formelement bestimmt werden. Die Standardunsicherheiten der berechneten Formelementparameter lassen sich mit Hilfe der inversen Normalgleichungsmatrix \mathbf{M}^{-1} aus der Kovarianzmatrix

$$\mathbf{S} = \mathbf{M}^{-1} \cdot s^2 \quad (1)$$

ableiten, wobei s^2 die Varianz der Messabweichungen an dem entsprechenden Formelement ist [6; 9; 10]. Damit hängen die Unsicherheiten der Formelementparameter – abgesehen von s – wesentlich von der Anzahl und Anordnung der Messpunkte ab. Das heißt, für bestimmte, bevorzugte regelmäßige Messpunktanordnungen werden die Unsicherheiten nur noch von der Messpunktanzahl und der Varianz s^2 beeinflusst [6; 10; 11]. Letztere muss abgeschätzt werden, wozu es folgende Möglichkeiten gibt:

- 1) Bei der Messung von kleinen Geometrien mit vernachlässigbar kleinen Formabweichungen enthält die Standardabweichung s am Ausgleichselement nur die Antaststreuung des KMG. Diese liegt erfahrungsgemäß etwa bei einem Drittel des konstanten Anteils A aus dem spezifizierten Grenzwert der Längenmessabweichung (siehe unten, Gleichung (2): $s = A/3$). Bei dieser Abschätzung von s werden aber die örtlichen Formabweichungen des Werkstücks nicht berücksichtigt und die Unsicherheit der Formelementparameter wird ggf. zu klein abgeschätzt.
- 2) Die Schätzung der Standardabweichung s der Messpunkte – berechnet aus den Messpunktständen zum Ausgleichselement – enthält neben der Antaststreuung des KMG auch einen Anteil aus den örtlichen Formabweichungen des Werkstücks. Diese sind jedoch zum Teil systematischer Natur, sodass die Unsicherheit damit ggf. zu groß abgeschätzt wird.
- 3) Schließlich kann die Standardabweichung s aus den Messpunktabweichungen zum Ausgleichselement durch die Trennung von systematischen und zufälligen Anteilen mit Hilfe mathematischer Verfahren abgeschätzt werden. Die Standardabweichung s enthält dann sowohl die Antaststreuung des KMG als auch einen Anteil der örtlichen Formabweichungen aus der

zufälligen Lage der Antastpunkte auf der Werkstückoberfläche.

Mit der Antaststreuung des KMG wird die Unsicherheit tendenziell zu klein abgeschätzt, mit der Standardabweichung der Messpunkte vom Ausgleichselement zu groß – damit liegt sie aber zumindest auf der sicheren Seite. Nur die Trennung der zufälligen von den systematischen Messwertanteilen liefert eine realistische Messunsicherheit, erfordert aber einen größeren Berechnungsaufwand. Einzelheiten sind in der Literatur beschrieben [6; 10; 11].

Die Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten wird nach DIN EN ISO 10360-1 [12] mit dem Grenzwert der Längenmessabweichung spezifiziert (MPE: Maximum Permissible Error):

$$\text{MPE}_E = \left(A + \frac{L}{K} \right) \mu\text{m} \quad (2)$$

Man unterscheidet den konstanten Anteil A und den längenabhängigen Anteil L/K . Der konstante Anteil A begrenzt dabei die Antaststreuungen des Messgerätes. Der längenabhängige Anteil L/K kann dagegen als Grenzwert der Geometrieabweichungen des KMG für die aktuelle Messlänge L angesehen werden, die durch die Maßstabs- und Führungsabweichungen verursacht werden.

Die Geometrieabweichungen des KMG wirken sich – je nach Art des Prüfmerkmals sowie Lage und Orientierung des Formelements – unterschiedlich auf die Längenmessungen aus. Umgekehrt werden damit für einen gegebenen Grenzwert der Längenmessabweichung auch die verschiedenen Geometrieabweichungen begrenzt. Somit lassen sich spezifische Grenzwerte für verschiedene Prüfmerkmale ableiten und als Grenzwerte für die Geometrieabweichungen des KMG verwenden [5; 6]. Im Einzelfall können durch Vergleichsmessungen an Normalen oder mit anzeigenden Messgeräten die ermittelten Grenzwerte für die Geometrieabweichungen des KMG überprüft werden. In der Regel sind die dabei tatsächlich gemessenen Geometrieabweichungen deutlich kleiner als die Grenzwerte [6]. Die Unsicherheitsbeiträge der Geometrieabweichungen des KMG werden mit den abgeleiteten Grenzwerten mit geringstem Aufwand nach oben abgeschätzt.

In ähnlicher Weise lassen sich auch die anderen in [12] definierten Grenzwerte zur Abschätzung von weiteren Messabweichungen verwenden, z. B. bei Mehrfachtaster-systemen und Drehtischen. Gegebenenfalls müssen sie dazu umgerechnet werden [5; 6].

Dabei wird natürlich vorausgesetzt, dass das KMG regelmäßig mit den in Normen bzw. Richtlinien festgelegten Verfahren überwacht wird, und dass der Grenzwert der Längenmessabweichung nach Gleichung (2) wie auch alle anderen Grenzwerte von dem KMG auch tatsächlich eingehalten wird.

4 Gegenüberstellung der Messunsicherheiten

Im Zusammenhang mit der Erarbeitung der Richtlinie VDI/VDE 2617 Blatt 11 [5] wurden Messunsicher-

heitsvergleiche mit der PTB und der eumetron GmbH (Simulation mit dem Virtuellen KMG) sowie mit der Daimler AG (experimentelle Ermittlung mit kalibrierten Werkstücken) durchgeführt. Die wesentlichen Ergebnisse dieser Vergleiche werden im Folgenden vorgestellt. Bei dem Vergleich wurde der Beitrag der Formabweichungen der Oberfläche nicht untersucht. Hierzu wird auf die Literatur verwiesen [6; 10; 11].

4.1 Virtuelles KMG (PTB) und Messunsicherheitsbilanz

Für den Vergleich wurden unterschiedliche Parametersätze als Eingangsdaten für das Virtuelle KMG generiert, die unterschiedlich genaue Koordinatenmessgeräte beschreiben.

Mit den sehr detaillierten Angaben zu den tatsächlichen Abweichungen des KMG wurden für 100.000 unterschiedliche, zufällig im Messvolumen angeordnete Messlinien durch Simulation die Längenmessabweichungen berechnet. Daraus wurden die spezifischen Werte (A und K) für den Grenzwert MPE_E der Längenmessabweichung nach Gleichung (2) abgeleitet und als Eingangsdaten für die Messunsicherheitsbilanz nach [5] verwendet. Die Genauigkeitsspezifikationen der vier simulierten KMGs finden sich in Tabelle 1.

Als Prüfkörper für die Vergleiche diente ein glatter Prüfcylinder aus Stahl mit dem Durchmesser 100 mm und der Länge 250 mm, wie er auch bei der Validierung der DKD-Laboratorien verwendet wurde, die für Kalibrierungen mit dem Virtuellen KMG akkreditiert sind [8]. Der Prüfcylinder wurde jedoch nicht tatsächlich gemessen, sondern es wurden nur die Messungen zur Ermittlung der Messunsicherheit anhand von Nominaldaten simuliert. Der Einfluss der Formabweichung spielt daher keine Rolle. Zusätzlich zu den im Bild 2 dargestellten fünf Lagen des Prüfcylinders wurde eine sechste Lage eingeführt, die dieselbe Orientierung wie Nr. 1 hat (parallel zur X -Achse), wobei die Länge des Zylinders aber 600 mm betrug.

An dem Prüfcylinder wurden folgende Prüfmerkmale ausgewertet: Durchmesser, Abstand der beiden Stirnflächen, Rechtwinkligkeit der Zylinderachse zu den Stirnflächen, Parallelität der Stirnflächen sowie Koaxialität von zwei Zylinderachsen jeweils an gegenüberliegenden Enden des Prüfcylinders. Die Punktmuster wurden so variiert, dass sowohl über den ganzen Umfang von 360° als auch über Teilbereiche davon gemessen

wurde (zwischen 60° und 180°). Bei kleinen Teilbereichen sind die Unsicherheiten naturgemäß größer [5; 6].

Zusätzlich wurde ein Kegel mit dem Neigungswinkel 45° simuliert und sein Durchmesser in verschiedenen Messebenen ausgewertet.

Insgesamt wurden die Unsicherheiten für 33 Prüfmerkmale ermittelt. Für das KMG 4 mit den dominanten Geometrieabweichungen ($K = 30$) sind sie im Bild 3 zusammengestellt. In den meisten Fällen ist die Unsicherheit aus der Messunsicherheitsbilanz deutlich größer als die mit dem Virtuellen KMG ermittelte, durchschnittlich um den Faktor 2,3 (siehe Tabelle 1). Das ist darauf zurückzuführen, dass in der Unsicherheitsbilanz nach [5] die spezifizierten Grenzwerte zur Abschätzung der Geometrieabweichungen des KMG verwendet werden, bei der Simulation aber die tatsächlichen Abweichungen und ihre Unsicherheiten. Diese können im Einzelfall sehr viel kleiner sein.

Nur bei wenigen Prüfmerkmalen ist die berechnete Unsicherheit kleiner: Nr. 1 (Durchmesser), Nr. 2, 6 und 28 (Abstände) sowie Nr. 32 und 33 (Kegeldurchmesser). Die Differenzen sind jedoch relativ gering und liegen in der Größenordnung des Streubereiches der Standardabweichung aus den 500 mit dem VCMM simulierten Messungen. Dieser beträgt z. B. für ein Vertrauensniveau von 95% rund $\pm 6\%$.

Das durchschnittliche Verhältnis der Unsicherheiten aus der Messunsicherheitsbilanz (U_{Bilanz}) zu denen aus der Simulation (U_{VCMM}) in Tabelle 1 zeigt einen Zusammenhang mit der Gerätespezifikation: Es wird mit zunehmendem konstanten Anteil A ebenfalls größer. Die KMGs 3 und 4 unterscheiden sich dagegen bei gleichem A nur wenig. Die Ursache ist vor allem in den Antastabweichungen zu suchen: Bei den KMGs 1 bis 3 überwiegen bei 31 von 33 Prüfmerkmalen die Unsicherheitsbeiträge, die aus den Antaststreuungen abgeschätzt werden. Der

Tabelle 1 Genauigkeitsspezifikation der KMGs und das mittlere Verhältnis der Unsicherheit nach [5] zu der aus dem VCMM (PTB).

KMG	$A/\mu\text{m}$	K	$\frac{U_{Bilanz}}{U_{VCMM}}$
1	1,5	250	1,4
2	2,0	200	1,8
3	2,5	167	2,2
4	2,5	30	2,3

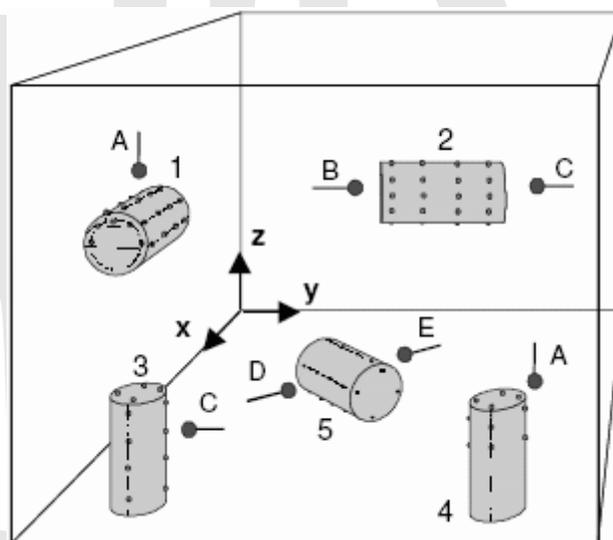


Bild 2 Prüfcylinder in verschiedenen Lagen und Orientierungen.

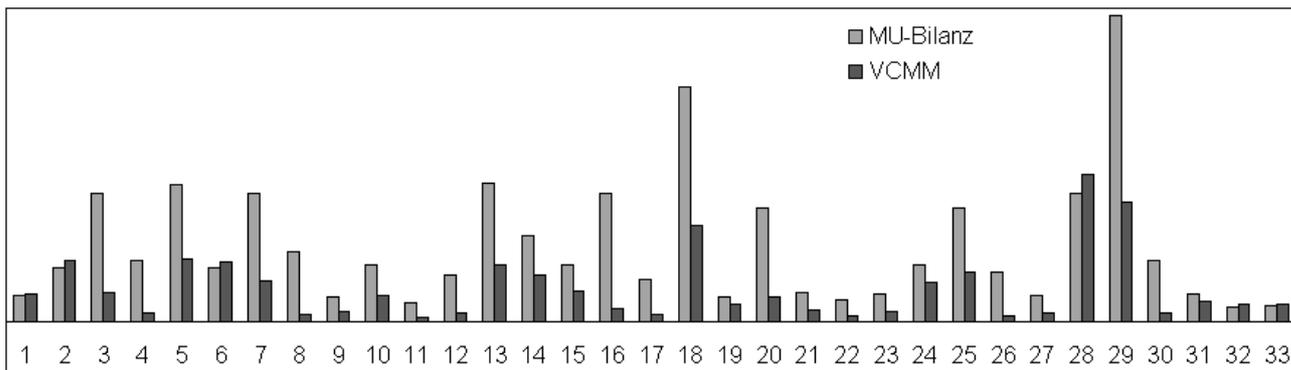


Bild 3 Unsicherheiten berechnet nach [5] und aus der Simulation für das KMG 4 aus Tabelle 1 (PTB).

nach [5] abgeschätzte Temperatureinfluss ist in allen Fällen vernachlässigbar klein.

Beim KMG 4 liefern dagegen die nach [5] aus dem Grenzwert abgeschätzten Geometrieabweichungen bei 28 Prüfmerkmalen den größten Unsicherheitsbeitrag. Dieses KMG wurde speziell mit einem sehr kleinen Faktor K für den längenabhängigen Anteil im Grenzwert nach Gleichung (2) rechnerisch konfiguriert, um für den Vergleich den Einfluss der Geometrieabweichungen überhaupt sichtbar zu machen. In der Regel liefern die Geometrieabweichungen sonst nicht die größten Unsicherheitsbeiträge.

4.2 Virtuelles KMG (eumetron) und Messunsicherheitsbilanz

Als Prüfkörper diene ein Prüfzylinder aus Aluminium mit dem Durchmesser 100 mm und der Länge 200 mm, der mit einigen Bohrungen und Anflächungen versehen ist. Der Prüfkörper wurde tatsächlich gemessen. In einigen Fällen wurde die Oberfläche nur am halben Umfang angetastet. Im Unterschied zu dem Vergleich mit der PTB wurden hier die Messunsicherheiten mit dem VCMM mehrmals ermittelt und die größte Unsicherheit auf halbe Mikrometer aufgerundet. Deshalb wurden auch die nach [5] berechneten Unsicherheiten aufgerundet. Der Temperatureinfluss ist in allen Fällen vernachlässigbar klein.

Die Unsicherheiten sind im Bild 4 gegenübergestellt. Im Einzelnen handelt es sich um folgende Prüfmerkmale:

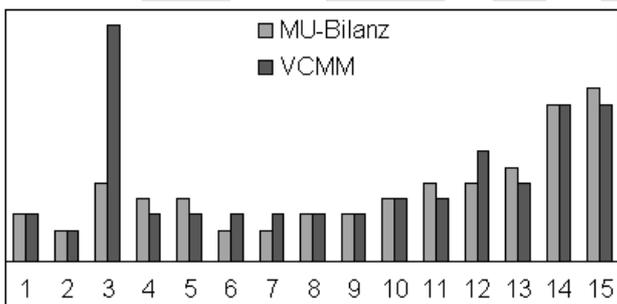


Bild 4 Unsicherheiten berechnet nach [5] und aus der Simulation (Firma eumetron).

Durchmesser, Kegeldurchmesser (Neigungswinkel 60°), Abstand der Stirnflächen, Geradheit, Ebenheit, Rundheit, Zylinderform, Rechtwinkligkeit der Zylinderachse zur Stirnfläche, Position einer Teilkreisbohrung, Symmetrie und Koaxialität. Insgesamt stimmen die Werte recht gut überein, nur der Kegeldurchmesser (Nr. 3) fällt völlig aus der Reihe. Hier liefert der Neigungswinkel des Kegels den größten Unsicherheitsbeitrag. Bisher konnte noch nicht geklärt werden, ob es sich um einen Fehler im mathematischen Modell oder bei der Quantifizierung der Einflussgrößen (oder beides) handelt. Hier wirkt erschwerend, dass das Virtuelle KMG keine einzelnen Unsicherheitsbeiträge liefert.

4.3 Kalibrierte Werkstücke und Messunsicherheitsbilanz

Ein weiterer Vergleich wurde unter „rauen“ Praxisbedingungen mit dem experimentellen Verfahren der Unsicherheitsermittlung durch Messung von kalibrierten Werkstücken nach VDI/VDE 2617 Blatt 8 Anhang C [4] durchgeführt. Als Prüfkörper diene das Kurbelgehäuse eines Verbrennungsmotors aus Aluminium. Dieser Prüfkörper wurde mit dem VCMM kalibriert und wird bei der Daimler AG routinemäßig zur Ermittlung der Messunsicherheit eingesetzt. Die Teile werden direkt im Fertigungsbereich auf einem KMG ohne Einhausung (Klimazelle) gemessen, wobei ihre Temperatur erfasst und die durch die Abweichung von der Bezugstemperatur 20°C bedingte Längenmessabweichung rechnerisch korrigiert wird.

Die Prüfmerkmale sind hier Durchmesser (Nennmaße bis 82 mm) und Koordinaten bzw. Abstände von Bohrungsmittelpunkten (Nennmaße bis ca. 270 mm). Das Kurbelgehäuse wurde in mehreren Winkelstellungen des Drehtisches sowie mit verschiedenen Tastern gemessen, die jeweils über die Tasterwechseinrichtung ausgetauscht wurden.

Das Bild 5 zeigt den Vergleich. Die nach [5] berechneten Messunsicherheiten sind im Mittel etwa 1,7-mal so groß wie die aus den Messreihen experimentell ermittelten. Hier wirken sich vor allem die großen Grenzwerte der Vierachsenabweichungen des Drehtisches bei den Koordi-

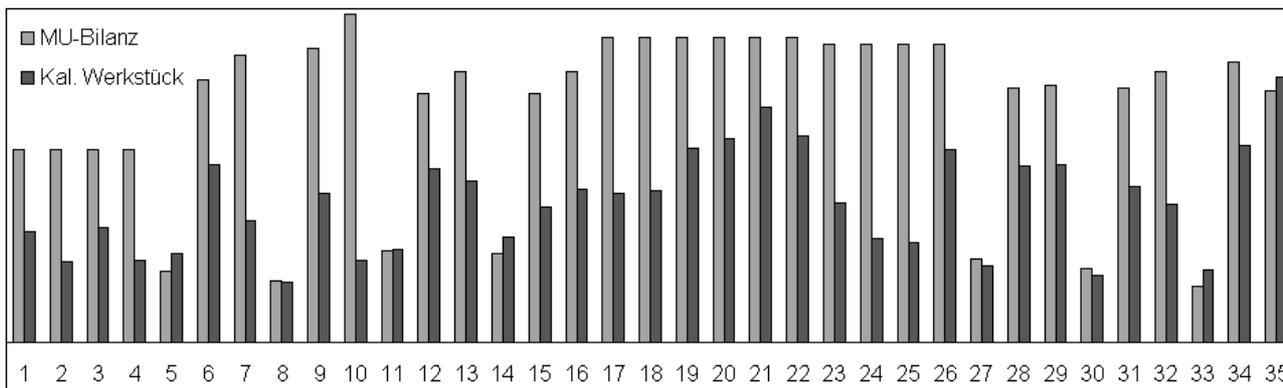


Bild 5 Nach [5] berechnete und mit einem kalibrierten Werkstück ermittelte Unsicherheiten (Daimler AG).

naten bzw. Abständen aus. Diese sind wesentlich größer als die tatsächlichen Abweichungen in den Messreihen. Bei den sieben Durchmessern sind die berechneten Unsicherheiten und die experimentell ermittelten etwa gleich und deutlich kleiner als bei den Koordinaten bzw. Abständen.

Die größeren Messunsicherheiten bei den Koordinaten bzw. Abständen sind in diesem Fall unproblematisch, da die Toleranzen hier entsprechend groß sind (zwischen 60 und 300 μm). Die Prüfprozesseignung als Verhältnis der Messunsicherheit zur Toleranz wird trotzdem überwiegend eingehalten. Die Toleranzen der Durchmesser sind deutlich kleiner (10 bis 15 μm) und die Bewertung ist hier unabhängig von dem Verfahren zur Unsicherheitsermittlung.

5 Vergleich der Verfahren

Die Tabelle 2 fasst die wesentlichen Aussagen des Vergleiches der drei Verfahren zusammen.

Für die Simulation mit dem Virtuellen KMG ist eine spezielle Software erforderlich, die derzeit von zwei Herstellern von Koordinatenmessgeräten angeboten wird. Das experimentelle Verfahren und das Verfahren mit Berechnungstabellen können unabhängig von Herstellern auf allen KMGs angewendet werden, vorausgesetzt, ein kalibriertes Werkstück ist vorhanden bzw. ein mathematisches Unsicherheitsmodell existiert oder lässt sich vom Anwender entwickeln.

Für einfache Prüfmerkmale existieren beim Vorgehen gemäß VDI/VDE 2617 Blatt 11 [5] Berechnungshilfen, die das Aufstellen und Entwickeln des Unsicherheitsmodells

Tabelle 2 Vergleich der Verfahren zur Messunsicherheitsbestimmung.

	Virtuelles KMG	Experimentelle Ermittlung	Messunsicherheitsbilanz
Einfache bzw. komplexe Messaufgaben	Kein Mehraufwand in Abhängigkeit von Komplexität	Kein Mehraufwand in Abhängigkeit von Komplexität	Für einfache Prüfmerkmale liegen Berechnungshilfen vor, der Aufwand für neue Modelle kann erheblich sein
Häufig unterschiedliche Aufgaben	Kein Mehraufwand bei neuen Messaufgaben	Nur für gleichbleibende Messaufgaben, Einsatz auf verschiedenen KMGs möglich (herstellerunabhängig)	Für jedes neue Prüfmerkmal ist eine Bilanz aufzustellen
Anwendbarkeit	Nur bestimmte Softwareprodukte (zwei Hersteller)	Universell, Voraussetzung ist ein kalibriertes Werkstück	Universell, wenn eine Software für die Messunsicherheitsbilanzen vorliegt
Schulungsaufwand	Einweisung in die Softwarebedienung	gering	Erhöht im Vergleich zum VCMM, Verständnis für die Grundlagen der Unsicherheitsberechnung notwendig
Wiederkehrender Aufwand für die Prüfung des KMG	Regelmäßige Fehleraufnahme und periodische Zwischenprüfung	Rekalibrierung der Prüfkörper (Werkstücke), periodische Zwischenprüfung	Regelmäßige Bestätigungsprüfung des KMG
Einmaliger Aufwand	Lizenzkosten für Softwareoption und Erstinstallation	Kosten für die Beschaffung und Kalibrierung der Prüfkörper	Kosten für Software, gering im Vergleich zum VCMM
Zeitlicher Mehraufwand je Werkstück	Kalibrierung der Taststifte, Rechenzeit für Simulation	Mehrfachmessungen	Auswahl und Berechnen der Messunsicherheitsbilanz

erleichtern [6]. Für komplexe Aufgabenstellungen kann das Aufstellen des Modell aber sehr zeitaufwendig und schwierig sein und erheblichen Mehraufwand bedeuten, der bei dem experimentellen Verfahren und auch beim Virtuellen KMG nicht anfällt.

Beim Virtuellen KMG entsteht in diesem Sinne kein Mehraufwand, wenn häufig unterschiedliche Messaufgaben zu messen sind. Im Vergleich dazu ist beim Vorgehen nach VDI/VDE 2617 Blatt 11 für jede unterschiedliche Messaufgabe jeweils neu eine Messunsicherheitsbilanz zu erstellen. Die Anwendung der experimentellen Methode rentiert sich vor allem bei gleichbleibenden Messaufgaben im Rahmen der Serienfertigung – auch mit dem Vorteil, dass die kalibrierten Werkstücke auf verschiedenen Koordinatenmessgeräten eingesetzt werden können.

Alle drei Verfahren erfordern einen gewissen Schulungsaufwand, der sicherlich bei der experimentellen Vorgehensweise am geringsten ist. Die richtige Anwendung des Virtuellen KMG setzt im Vergleich dazu schon einen erhöhten Schulungsaufwand zur Einweisung in die Softwarebedienung voraus. Die Erstellung einer Messunsicherheitsbilanz setzt Grundlagenwissen in der Erstellung von Unsicherheitsmodellen und der Unsicherheitsfortpflanzung voraus und erfordert daher im Vergleich den höchsten Schulungsaufwand.

Neben Kosten für die Schulung fallen zusätzlich einmalige Anschaffungskosten an: Beim Virtuellen KMG Lizenzkosten für die Software, bei der experimentellen Methode Kosten für die Bereitstellung und Kalibrierung der Werkstücke. Bei der Messunsicherheitsbilanz sind die Kosten für die Software vergleichsweise gering.

Wiederkehrende Aufwendungen bzw. Kosten resultieren daraus, dass für die zuverlässige Anwendung des Virtuellen KMG die Geometrieabweichungen regelmäßig in Abständen von ein bis zwei Jahren erneut aufgenommen werden müssen, und dass das KMG zusätzlich durch periodische Zwischenprüfungen laufend überwacht werden muss. In ähnlicher Weise setzt die Anwendung der Messunsicherheitsbilanzen nach VDI 2617 Blatt 11 die regelmäßige Bestätigungsprüfung des Koordinatenmessgeräts nach ISO 10360-2 [13] voraus, da die Kenngrößen des KMG wichtige Eingangsparameter der Unsicherheitsermittlung sind. Bei der experimentellen Methode fallen regelmäßig Kosten für die Rekalibrierung der Werkstücke an. Auch hier empfiehlt es sich, das KMG regelmäßig durch Überwachungsmessungen zu kontrollieren.

Zusätzlich zu den einmaligen und regelmäßig wiederkehrenden Aufwendungen kann je nach Verfahren auch ein zeitlicher Mehraufwand für jede einzelne Messaufgabe entstehen. Beim Virtuellen KMG sind das die notwendige Kalibrierung der Taststifte vor jeder Messung und die Rechenzeit für die Simulation. Bei der experimentellen Methode ergeben sich durch die notwendigen Mehrfachmessungen erheblich höhere Messzeiten. Auch die Auswahl und Auswertung der Messunsicherheitsbilanzen erfordert für jede Messung einen gewissen Zeitaufwand.

Im Vergleich der Methoden zeigt sich, dass die Anwendung teilweise eingeschränkt ist und der Einsatz bei bestimmten Messungen vorteilhaft ist beziehungsweise aber auch Nachteile mit sich bringen kann. Welches Verfahren letztendlich zum Einsatz kommt, hängt daher sehr stark vom Anwendungsfall und den vorhandenen Ressourcen ab.

6 Zusammenfassung

Die aufgabenspezifische Messunsicherheit von Koordinatenmessungen kann heute durch numerische Simulation, experimentell oder durch Aufstellen von Messunsicherheitsbilanzen ermittelt werden. Bei allen drei Verfahren werden die Unsicherheiten nur für die Einflussgrößen ermittelt, die im mathematischen Modell enthalten sind bzw. durch die Messreihen erfasst werden.

Die Ermittlung der Messunsicherheit mit dem Virtuellen KMG erfordert einmalig einen relativ hohen Installationsaufwand. Das Virtuelle KMG ist sehr einfach durch den Messtechniker zu handhaben, ist auch für komplexe Messaufgaben geeignet und liefert im Vergleich die kleinsten Messunsicherheiten.

Die experimentelle Ermittlung der Messunsicherheit erfordert einen hohen Zeit- und Kostenaufwand. Diese Methode eignet sich besonders für den Einsatz in der Serienfertigung.

Die Berechnung nach VDI/VDE 2617 Blatt 11 erlaubt die Aufstellung von Messunsicherheitsbilanzen mit geringem Aufwand. Das Verfahren liefert im Allgemeinen zu große Messunsicherheiten und eignet sich vor allem für einfache Geometrien.

Literatur

- [1] Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections). Hrsg. vom BIPM Bureau International des Poids et Mesures, Sèvres 2008.
- [2] DIN V ENV 13005: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen (GUM). Hrsg. vom DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag Berlin 1999.
- [3] VDI/VDE 2617 Blatt 7: Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten; Kenngrößen und deren Prüfung; Ermittlung der Unsicherheit von Messungen auf Koordinatenmessgeräten durch Simulation. Hrsg. vom VDI Verein Deutscher Ingenieure. Beuth Verlag Berlin 2008.
- [4] VDI/VDE 2617 Blatt 8: Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten; Kenngrößen und deren Prüfung; Prüfprozesseignung von Messungen mit Koordinatenmessgeräten. Hrsg. vom VDI Verein Deutscher Ingenieure. Beuth Verlag Berlin 2006.
- [5] VDI/VDE 2617 Blatt 11: Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten; Kenngrößen und deren Prüfung; Ermittlung der Unsicherheit von Messungen auf Koordinatenmessgeräten durch Messunsicherheitsbilanzen. Hrsg. vom VDI Verein Deutscher Ingenieure. Beuth Verlag Berlin 2009.
- [6] Hernla, M.: Messunsicherheit bei Koordinatenmessungen. Abschätzung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit mit Hilfe von Berechnungstabellen. 1. Auflage, expert verlag, Renningen 2007.
- [7] Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ – Propagation

of distributions using a Monte Carlo method. Hrsg. vom JCGM Joint Committee for Guides in Metrology, Genf 2008.

- [8] Schwenke, H.; Franke, M.: Bestimmung der Messunsicherheit von Messungen mit KMG – Status und Ausblick. In: PTB-Mitteilungen 117 (2007) Nr. 4, S. 363–371.
- [9] DIN 1319 Teil 4: Grundlagen der Messtechnik; Teil 4: Auswertung von Messungen; Messunsicherheit. Hrsg. vom DIN Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag Berlin 1999.
- [10] Hernla, M.: Aufgabenspezifische Messunsicherheit bei Koordinatenmessungen. In: tm – Technisches Messen 64 (1997) Nr. 7/8, S. 286–293.
- [11] Hernla, M.: Anwendung von Filtern bei der Auswertung gemessener Oberflächenprofile. In: tm – Technisches Messen, München 67 (2000) Nr. 3, S. 128–135.
- [12] DIN EN ISO 10360-1: GPS – Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) – Teil 1: Begriffe. Hrsg. vom DIN Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag Berlin 2003.
- [13] DIN EN ISO 10360-2: GPS – Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) – Teil 2: KMG angewendet für Längenmessungen. Hrsg. vom DIN Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag Berlin 2002.



Dr.-Ing. Michael Hernla ist freiberuflicher Ingenieur und bietet Beratung und Schulungen zu den Themen Längenmesstechnik, Koordinatenmesstechnik, Messgenauigkeit, Messunsicherheit und Prüfprozesseignung sowie zu Zeichnungseintragungen für Form und Lage an.

Adresse: Sonnenplatz 13, 44137 Dortmund, Tel.: +49 (0231) 136010,
E-Mail: michael.hernla@t-online.de



Dr.-Ing. Klaus Wendt leitet die PTB-Arbeitsgruppe Koordinatenmessgeräte.

Adresse: Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Tel.: +049 (0531) 592-5323,
E-Mail: klaus.wendt@ptb.de



Dipl.-Ing. Matthias Franke ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der PTB-Arbeitsgruppe Koordinatenmessgeräte.

Adresse: Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Tel.: +049 (0531) 592-5324,
E-Mail: matthias.franke@ptb.de

Manuskripteingang: 25. April 2010, zur Veröffentlichung angenommen: 17. September 2010

article is protected by German copyright law. You may copy and distribute this article for your personal use only. Other use is only allowed with written permission by the copyright holder.



Mathematische Methoden zum maschinellen Lernen



Ethem Alpaydin
Maschinelles Lernen
2008. XVIII | 440 S. | Broschur | € 44,80 | ISBN 978-3-486-58114-0

Maschinelles Lernen heißt, Computer so zu programmieren, dass ein bestimmtes Leistungskriterium anhand von Beispieldaten und Erfahrungswerten aus der Vergangenheit optimiert wird. Das vorliegende Buch diskutiert diverse Methoden, die ihre Grundlagen in verschiedenen Themenfeldern haben: Statistik, Mustererkennung, neuronale Netze, künstliche Intelligenz, Signalverarbeitung, Steuerung und Data Mining. In der Vergangenheit verfolgten Forscher verschiedene Wege mit unterschiedlichen Schwerpunkten. Das Anliegen dieses Buches ist es, all diese unterschiedlichen Ansätze zu kombinieren, um eine allumfassende Behandlung der Probleme und ihrer vorgeschlagenen Lösungen zu geben.

Bestellen Sie in Ihrer Fachbuchhandlung oder direkt bei uns:
Tel: 089/45051-248, Fax: 089/45051-333, verkauf@oldenbourg.de

Oldenbourg