

Dokumentation der Kalibrierverfahren für Glasmaßstäbe und kapazitive Längenmesssysteme

Ausführliche Verfahrensbeschreibung mit Formeldarstellung und Gegenüberstellung

Messbereich 1: Glasmaßstäbe bis 1.000 mm bei 0,1 mm Auflösung

Messbereich 2: Kapazitive Längenmesssysteme bis 1.500 mm bei 0,01 mm Auflösung

Hinweis: Diese Unterlage beschreibt die messtechnisch sinnvolle Struktur einer Kalibrieranweisung. Sie ersetzt keine verbindliche interne Laborvorschrift oder akkreditierte Verfahrensanweisung.

1. Ziel, Aufbau und messtechnischer Rahmen

Ziel dieser Dokumentation ist die zusammenhängende Beschreibung zweier Kalibrierverfahren für lineare Längenmesssysteme. Im ersten Teil wird die Kalibrierung von Glasmaßstäben mit einer Skalenteilung beziehungsweise Auflösung von 0,1 mm und einer maximalen Nennlänge von 1.000 mm beschrieben. Im zweiten Teil wird die Kalibrierung kapazitiver Längenmesssysteme mit einer Auflösung von 0,01 mm und einer maximalen Länge von 1.500 mm behandelt. Im dritten Teil werden beide Verfahren hinsichtlich Messprinzip, Prüfaufbau, mathematischer Auswertung, Messunsicherheit und praktischer Eignung gegenübergestellt.

Für beide Verfahren ist die Rückführbarkeit auf höherwertige Normale sicherzustellen. In der Praxis erfolgt dies typischerweise über ein Laserinterferometer, einen hochgenauen Längenkomparator oder kalibrierte Referenzverkörperungen. Die Messung muss unter stabilen Umgebungsbedingungen durchgeführt werden, damit thermische Einflüsse, mechanische Spannungen und elektrische Störeinflüsse die Ergebnisse nicht verfälschen.

1.1 Allgemeine Umgebungsbedingungen

Als Referenztemperatur ist 20 °C anzusetzen. Vor Beginn der Messung sind Messobjekt, Spannmittel und Referenzsystem ausreichend zu temperieren. Luftzug, direkte Sonneneinstrahlung, lokale Erwärmung durch Beleuchtung und Erschütterungen sind zu vermeiden. Bei kapazitiven Systemen ist zusätzlich auf eine elektrisch störarme Umgebung zu achten. Die Umgebungsbedingungen sind zu protokollieren, da sie Bestandteil der Messunsicherheitsbetrachtung sind.

2. Detailliertes Kalibrierverfahren für Glasmaßstäbe

Ein Glasmaßstab ist ein lineares Maßverkörperungssystem mit aufgebrachter Teilung, dessen Skalenstriche optisch abgetastet oder visuell ausgewertet werden können. Das Kalibrierziel besteht darin, die tatsächliche Lage definierter Teilstriche entlang der Maßverkörperung zu bestimmen und die Abweichung von den Sollpositionen anzugeben. Die Kalibrierung dient damit der Ermittlung von Korrekturwerten, der Bewertung der maximalen Abweichung und der Ermittlung der Messunsicherheit.

2.1 Messprinzip und Messgröße

Die Messgröße ist die lineare Ortskoordinate eines Teilstrichs relativ zum Nullstrich. Gemessen wird somit die Differenz zwischen der tatsächlichen Lage $x_{i,ist}$ eines Striches i und seiner nominellen Lage $x_{i,soll}$. Das Ergebnis jeder Einzelposition ist die Längenabweichung E_i .

$$E_i = x_{i,ist} - x_{i,soll}$$

Längenabweichung am Messpunkt i

Wird zusätzlich der Nullpunktfehler separat betrachtet, kann die relative Teilungsabweichung bezogen auf den Nullstrich berechnet werden. Dies ist insbesondere dann zweckmäßig, wenn die Güte der Teilung unabhängig von einer eventuellen Verschiebung des gesamten Maßstabs beurteilt werden soll.

$$E_{i,rel} = (x_{i,ist} - x_{0,ist}) - (x_{i,soll} - x_{0,soll})$$

Relative Teilungsabweichung bezogen auf den Nullstrich

2.2 Messmittel und Prüfaufbau

Für die Kalibrierung wird vorzugsweise ein Längenkomparator mit hochgenauer Verfahrenheit und optischer Abtasteinrichtung eingesetzt. Die Referenzlänge wird entweder interferometrisch oder über ein höherrangiges Referenzsystem bestimmt. Der Glasmaßstab ist spannungsarm zu lagern, damit keine Biegung oder Torsion in die Skalenebene eingetragen wird. Die Messachse des Komparators, die Teilung des Glasmaßstabs und die optische Abtastachse sind so auszurichten, dass Cosinusfehler minimiert werden.

$$L_{\text{gemessen}} = L_{\text{wahr}} \cdot \cos(\alpha)$$

Bei kleinem Winkel α führt Fehljustage zu einem Cosinusfehler

Für kleine Winkel kann der relative Cosinusfehler näherungsweise durch $\alpha^2/2$ beschrieben werden. Dadurch wird deutlich, dass schon geringe Verkipnungen bei langen Messstrecken relevante Beiträge liefern können.

$$f_{\text{cos}} \approx 1 - \cos(\alpha) \approx \alpha^2 / 2$$

Näherung für kleine Winkel in rad

2.3 Vorbereitung des Messobjekts

Vor der Kalibrierung ist der Glasmaßstab visuell auf Beschädigungen, Ausbrüche, verschmutzte Teilstriche, Delaminationen oder Montagefehler zu prüfen. Die Teilung ist mit fussselfreiem Material und geeigneten Reinigungsmitteln zu säubern. Anschließend erfolgt eine thermische Stabilisierung, typischerweise über mehrere Stunden. Das Messobjekt darf erst eingebaut werden, wenn die Temperaturangleichung an das Labor hinreichend erreicht ist.

Die Nullmarke und die zu prüfenden Teilstriche werden in einem Messplan festgelegt. Bei einer Länge von 1.000 mm und einer Auflösung von 0,1 mm ist es in der Regel nicht wirtschaftlich, jeden einzelnen Strich messtechnisch vollumfänglich zu erfassen. Üblich sind definierte Hauptmesspunkte, beispielsweise in 10-mm- oder 20-mm-Schritten, ergänzt um verdichtete Messreihen im Randbereich und an auffälligen Stellen.

2.4 Durchführung der Messung

Zu Beginn wird der Nullstrich angefahren und seine Lage mit dem Referenzsystem bestimmt. Danach werden die festgelegten Messpunkte nacheinander abgefahren. An jedem Messpunkt sind mehrere Wiederholmessungen durchzuführen, um die Kurzzeitstreuung und die Wiederholbarkeit zu bewerten. Die Messreihenfolge sollte so gewählt werden, dass eine unerkannte Drift möglichst sichtbar wird, etwa durch Messung von Anfang, Mitte und Ende in mehreren Zyklen.

$$\bar{x}_i = (1 / n) \cdot \sum x_{i,j}$$

Arithmetischer Mittelwert der n Wiederholmessungen am Messpunkt i

$$s_i = \sqrt{[\sum (x_{i,j} - \bar{x}_i)^2 / (n - 1)]}$$

Empirische Standardabweichung der Wiederholmessungen

Aus dem Mittelwert wird die Lage des jeweiligen Teilstrichs abgeleitet. Der Komparator muss dabei umkehrspielarm arbeiten. Sofern die Messeinrichtung eine Richtungsabhängigkeit zeigt, sind Hin- und Rückfahrt getrennt zu erfassen. Zusätzlich ist zu prüfen, ob die Fokuslage, die

Kantenerkennung oder die Bildauswertung bei unterschiedlichen Strichbreiten zu systematischen Verschiebungen führt.

2.5 Temperaturkorrektur und lineare Ausdehnung

Wenn die Messung nicht exakt bei 20 °C erfolgt, ist die gemessene Länge auf die Bezugstemperatur umzurechnen. Dies gilt sowohl für das Messobjekt als auch für die Referenz. Für den Glasmaßstab ist der lineare thermische Ausdehnungskoeffizient α_{Glas} zu berücksichtigen.

$$L_{20} = L_T / [1 + \alpha_{\text{Glas}} \cdot (T - 20 \text{ °C})]$$

Umrechnung der bei Temperatur T bestimmten Länge auf 20 °C

Bei kleinen Temperaturabweichungen kann die temperaturbedingte Längenänderung auch direkt als Korrektur angegeben werden.

$$\Delta L_T \approx L \cdot \alpha_{\text{Glas}} \cdot \Delta T$$

Temperaturkorrektur für kleine ΔT

Die Unsicherheit des Ausdehnungskoeffizienten und die Unsicherheit der Temperaturmessung sind gesondert zu berücksichtigen. Bei langen Maßstäben steigt der Einfluss proportional mit der Länge und kann einen dominanten Unsicherheitsanteil bilden.

2.6 Auswertung und Ergebnisdarstellung

Für jeden Messpunkt wird die Abweichung E_i aus dem temperaturkorrigierten Messwert berechnet. Anschließend kann eine Korrekturtabelle erstellt werden, in der zu jeder Nennposition die anzubringende Korrektur K_i aufgeführt ist. Die Korrektur ist definitionsgemäß das additive Vorzeicheninverse der Abweichung.

$$K_i = -E_i$$

Korrekturwert für den Messpunkt i

Zusätzlich ist die maximale betragsmäßige Abweichung innerhalb des Kalibrierbereichs anzugeben. Bei Bedarf kann aus den Einzelwerten ein Regressionsansatz für Skalensteigung und Nullpunktfehler bestimmt werden.

$$x_{i,\text{ist}} = a + b \cdot x_{i,\text{soll}} + \varepsilon_i$$

Lineares Regressionsmodell mit Offset a und Steigungsfehler b

Weicht b signifikant von 1 ab, liegt ein Maßstabsfehler beziehungsweise ein Skalierungsfehler vor. Der Offset a beschreibt eine Nullpunktverschiebung. Die Restgröße ε_i bildet die lokale Teilungsabweichung ab.

2.7 Messunsicherheitsbudget für Glasmaßstäbe

Die kombinierte Standardunsicherheit setzt sich aus zufälligen und systematischen Anteilen zusammen. Typische Beiträge sind: Wiederholbarkeit, Auflösung und Interpolation des Ablesesystems, Referenzunsicherheit des Komparators, Temperaturmessung, Unsicherheit des Ausdehnungskoeffizienten, Ausrichtungsfehler, Kantenerkennungsfehler sowie Stabilität des Aufbaus.

$$u_c = \sqrt{(u_{\text{rep}}^2 + u_{\text{ref}}^2 + u_T^2 + u_{\alpha}^2 + u_{\text{align}}^2 + u_{\text{read}}^2 + \dots)}$$

Kombinierte Standardunsicherheit

$$U = k \cdot u_c$$

Erweiterte Messunsicherheit mit Erweiterungsfaktor k, häufig k = 2

Die Standardunsicherheit der Wiederholbarkeit ergibt sich aus der Standardabweichung des Mittelwerts.

$$u_{\text{rep}} = s_i / \sqrt{n}$$

Beitrag der Wiederholbarkeit am Messpunkt i

3. Detailliertes Kalibrierverfahren für kapazitive Längenmesssysteme

Kapazitive Längenmesssysteme arbeiten berührungslos oder quasiberührungslos und leiten die Positionsinformation aus der Änderung der elektrischen Kapazität zwischen Sensorelektrode und Gegenfläche oder zwischen periodisch strukturierten Elektrodenanordnungen ab. Das Kalibrierziel besteht darin, die Ausgangsgröße des Sensors, beispielsweise Spannung, digitalen Zählwert oder skalierten Längenwert, einer rückgeführten Referenzlänge zuzuordnen und systematische Abweichungen wie Nichtlinearität, Offset, Drift und Hysterese zu bestimmen.

3.1 Physikalisches Messprinzip

Für eine idealisierte Parallelplattenanordnung gilt für die elektrische Kapazität C näherungsweise:

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A / d$$

ϵ_0 : elektrische Feldkonstante, ϵ_r : relative Permittivität, A: wirksame Fläche, d: Abstand

Die Messgröße hängt damit invers vom Elektrodenabstand d ab. Reale kapazitive Wegsensoren verwenden jedoch häufig komplexere Elektrodengeometrien, differentielle Auswertung und elektronische Linearisation. Trotzdem bleibt der grundsätzliche Zusammenhang bestehen: Eine geometrische Längenänderung bewirkt eine Änderung der Kapazität und damit eine Änderung des elektrischen Ausgangssignals.

Ist das Ausgangssignal S direkt proportional zur Kapazitätsänderung, kann für kleine Arbeitsbereiche vereinfacht eine lineare Beziehung angenommen werden. Für große Messbereiche bis 1.500 mm ist dagegen in der Regel eine mehrgliedrige Kalibrierfunktion erforderlich.

$$L = a_0 + a_1 \cdot S + a_2 \cdot S^2 + \dots + a_m \cdot S^m$$

Allgemeine Kalibrierfunktion zwischen Sensorsignal S und Länge L

3.2 Anforderungen an den Prüfaufbau

Die Kalibrierung erfolgt vorzugsweise auf einem Präzisionsführungs- oder Positioniersystem mit interferometrischer Referenzmessung. Entscheidend ist die exakte Führung entlang der Messachse, da kapazitive Sensoren empfindlich auf Verkippung, Lateralkomponenten und Änderungen des Luftspaltes reagieren können. Zusätzlich ist auf eine stabile Versorgungsspannung, definierte Erdung und elektromagnetische Verträglichkeit zu achten.

Vor Messbeginn muss die vorgeschriebene Aufwärmzeit des elektronischen Systems eingehalten werden. Dadurch werden thermisch bedingte Driftvorgänge in Elektronik, Sensor und

Auswertelektronik reduziert. Danach erfolgt der Nullabgleich im Referenzpunkt. Je nach Systemkonzept ist ein mechanischer Endmaß- oder Referenzanschlag zu verwenden.

3.3 Messstrategie und Messplan

Bei einer Auflösung von 0,01 mm und einer Länge bis 1.500 mm ist eine dichte Punktverteilung erforderlich, damit Nichtlinearitäten sicher erkannt werden. Typisch ist eine schrittweise Messung in festen Intervallen, zum Beispiel 1 mm, 5 mm oder 10 mm, kombiniert mit Zusatzpunkten in den Umkehrbereichen. Für hochgenaue Bewertungen werden Hin- und Rückfahrt vollständig getrennt aufgenommen.

Am Messpunkt i werden der Referenzwert $L_{i,ref}$ und das Sensorsignal S_i oder der intern ausgegebene Längenwert $L_{i,sys}$ aufgezeichnet. Liegt bereits ein direkt ausgegebener Wegwert vor, ergibt sich die Einzelabweichung zu:

$$E_i = L_{i,sys} - L_{i,ref}$$

Abweichung des Systems gegenüber dem Referenzwert

Werden Hin- und Rückfahrt getrennt ausgewertet, kann die Hysterese am Punkt i als halbe Differenz oder als Betragsdifferenz der beiden Richtungswerte beschrieben werden. Für die volle Hysteresebreite gilt:

$$H_i = |L_{i,vor} - L_{i,zurück}|$$

Hysterese am Messpunkt i

Die maximale Hysterese H_{max} ist der größte derart ermittelte Betragswert im gesamten Messbereich.

3.4 Bestimmung von Linearität und Kalibrierfunktion

Die Nichtlinearität beschreibt die Abweichung der Systemkennlinie von einem idealen Zusammenhang. Zunächst kann eine lineare Regression zwischen Referenzwert und Systemsignal angesetzt werden:

$$L_{ref} = a + b \cdot S + \epsilon$$

Linearisierungsansatz erster Ordnung

Bleiben die Residuen ϵ nicht zufällig klein, ist ein Polynom höherer Ordnung oder eine stückweise tabellarische Linearisation vorzusehen. Ein allgemeiner polynomialer Ansatz lautet:

$$L_{ref} = a_0 + a_1 \cdot S + a_2 \cdot S^2 + a_3 \cdot S^3 + \dots$$

Polynomische Kalibrierfunktion

Die Koeffizienten werden üblicherweise mit der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt. Die Nichtlinearität am Messpunkt ergibt sich aus der Differenz zwischen Referenzlänge und dem mit der Kalibrierfunktion modellierten Wert.

$$N_i = L_{i,ref} - L_{i,modell}$$

Nichtlinearität beziehungsweise Residuum am Punkt i

Für die praktische Anwendung wird häufig eine Korrekturtabelle bevorzugt. Diese ist vor allem dann sinnvoll, wenn lokale Inhomogenitäten oder geometrisch bedingte periodische Fehler nicht durch ein niedriges Polynom angemessen wiedergegeben werden.

3.5 Drift und Zeitstabilität

Kapazitive Systeme können eine zeitabhängige Drift zeigen, verursacht durch Temperaturänderungen, Elektronikdrift oder Änderungen der dielektrischen Umgebung. Zur Bewertung werden feste Referenzpunkte über die Zeit wiederholt gemessen. Die Driftgeschwindigkeit kann als Quotient aus Signaländerung und Zeitintervall angegeben werden.

$$D = \Delta L / \Delta t$$

Drift pro Zeiteinheit

Zusätzlich kann die thermische Empfindlichkeit des Systems bestimmt werden. Wird bei mehreren Temperaturen gemessen, ergibt sich der Temperaturkoeffizient näherungsweise aus:

$$k_T = \Delta L / \Delta T$$

Temperaturkoeffizient des Ausgangswerts beziehungsweise der Längenanzeige

3.6 Kapazitive Besonderheiten: Einfluss von Spalt, Permittivität und Randbedingungen

Im Gegensatz zum Glasmaßstab hängt das Messergebnis eines kapazitiven Systems nicht nur von einer geometrischen Teilung ab, sondern wesentlich von der Feldverteilung. Änderungen des Luftspaltes, der Parallelität, der relativen Permittivität der Umgebung sowie der Abschirmung wirken sich auf die Messgröße aus. Deshalb sind mechanische Führung, Sensormontage und Umgebungseinflüsse Teil des Messmodells. Selbst wenn die Elektronik intern linearisiert, bleiben Restfehler, die durch Kalibrierung und Unsicherheitsanalyse abgebildet werden müssen.

Bei langen Messbereichen ist zudem zu prüfen, ob die Messkennlinie ortsabhängig variiert. Ursachen können Fertigungsstreuungen der Skalenstruktur, unterschiedliche Abschirmbedingungen, Kabelbewegungen oder Feldverzerrungen im Randbereich sein.

3.7 Messunsicherheitsbudget für kapazitive Systeme

Das Unsicherheitsbudget umfasst neben der Referenzunsicherheit und Wiederholbarkeit insbesondere elektronische und umgebungsbedingte Beiträge. Typische Komponenten sind: Rauschen der Elektronik, Auflösung des Auswertegeräts, Restnichtlinearität nach Kalibrierung, Hysterese, Temperaturdrift, mechanische Führungsfehler, Ausrichtungsfehler, EMV-Einflüsse und Unsicherheit des Referenzsystems.

$$u_c = \sqrt{(u_{ref}^2 + u_{rep}^2 + u_{res}^2 + u_{hys}^2 + u_{drift}^2 + u_{align}^2 + u_{EMV}^2 + \dots)}$$

Kombinierte Standardunsicherheit

Wird die Hysterese nicht separat korrigiert, kann sie als rechteckverteilte Einflussgröße in die Unsicherheit eingehen.

$$u_{hys} = H_{max} / (2 \cdot \sqrt{3})$$

Standardunsicherheit aus einer nicht korrigierten Hysterese

Analog kann ein bekannter Grenzwert der Restnichtlinearität als rechteckverteilte Größe behandelt werden.

$$u_{res} = N_{max} / \sqrt{3}$$

Standardunsicherheit aus maximaler Restnichtlinearität bei rechteckiger Verteilung

Abschließend wird die erweiterte Unsicherheit angegeben.

$$U = k \cdot u_c$$

Erweiterte Unsicherheit, typischerweise mit $k = 2$

4. Gegenüberstellung beider Kalibrierverfahren

Obwohl beide Verfahren das gemeinsame Ziel haben, eine rückgeführte Beziehung zwischen angezeigter und wahrer Länge herzustellen, unterscheiden sie sich grundlegend im Messprinzip und damit auch in der Struktur des Kalibrierprozesses. Der Glasmaßstab ist eine Maßverkörperung mit diskreten Teilstrichen, während das kapazitive System ein sensorisches Messsystem mit elektrischer Signalverarbeitung darstellt. Daraus ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an Prüfaufbau, mathematisches Modell und Unsicherheitsbudget.

Kriterium	Glasmaßstab	Kapazitives Längenmesssystem	Bewertung
Messprinzip	Teilungsverkörperung mit optischer Lagebestimmung	Elektrische Kapazitätsänderung mit elektronischer Auswertung	Kapazitive Systeme sind modellabhängiger.
Kalibriergegenstand	Lage einzelner Teilstriche	Gesamte Übertragungsfunktion des Systems	Kapazitive Systeme erfordern stärkere Signalmodellierung.
Messbereich	Bis 1.000 mm	Bis 1.500 mm	Längerer Bereich erhöht Ausrichtungs- und Drifanforderungen.
Auflösung	0,1 mm	0,01 mm	Kapazitives System besitzt zehnfach feinere Auflösung.
Dominante Fehlerquellen	Ausrichtung, Strichdetektion, Temperatur, Referenz	Nichtlinearität, Hysterese, Drift, Temperatur, EMV	Kapazitive Systeme reagieren stärker auf Umgebungsbedingungen.
Auswertung	Korrekturtabelle, Nullpunkt- und Steigungsfehler	Kalibrierfunktion, Residuenanalyse, Hysteresebewertung	Kapazitives Verfahren ist mathematisch aufwendiger.
Messunsicherheit	Häufig von Referenz, Temperatur und Ausrichtung geprägt	Häufig zusätzlich von Elektronik und Drift geprägt	Kapazitives Verfahren hat mehr Unsicherheitskomponenten.
Robustheit	Hoch bei sauberer optischer Ablesung	Eher empfindlich gegen Umgebungsänderungen	Glasmaßstäbe sind meist robuster im Alltagsbetrieb.
Korrekturmodell	Lokal positionsbezogen	Global oder stückweise signalbezogen	Kapazitive Systeme profitieren von modellbasierter Korrektur.

Für Glasmaßstäbe steht die geometrische Richtigkeit der Teilung im Vordergrund. Das Verfahren ist vergleichsweise anschaulich und direkt, da jede Messstelle einer klaren Nennposition entspricht. Dagegen muss bei kapazitiven Längenmesssystemen die Sensorkennlinie als Ganzes erfasst und bewertet werden. Dadurch wächst der mathematische und experimentelle Aufwand

deutlich, insbesondere wenn hohe Anforderungen an Linearität, Reproduzierbarkeit und Langzeitstabilität gestellt werden.

Aus metrologischer Sicht ist der Glasmaßstab typischerweise dann vorteilhaft, wenn robuste und nachvollziehbare Längenreferenzen benötigt werden. Das kapazitive Messsystem ist dort überlegen, wo hohe Auflösung, dynamische Erfassung und kompakte Integration gefordert sind. Für die Kalibrierung bedeutet dies jedoch, dass zusätzliche Einflussgrößen beherrscht und dokumentiert werden müssen.

5. Empfohlene Struktur eines Kalibrierprotokolls

Abschnitt	Mindestinhalt	Bemerkung
Identifikation	Hersteller, Typ, Seriennummer, Messbereich, Auflösung	Eindeutige Zuordnung des Prüfobjekts
Umgebung	Temperatur, Feuchte, Datum, Dauer der Stabilisierung	Für Rückverfolgbarkeit und Unsicherheitsbudget
Referenzmittel	Typ, Seriennummer, Kalibrierstatus, Unsicherheit	Rückführbarkeit dokumentieren
Messplan	Messpunkte, Anzahl Wiederholungen, Fahrtrichtung	Vorab festlegen und unverändert anwenden
Rohdaten	Einzelmesswerte je Messpunkt	Nachvollziehbarkeit der Auswertung
Auswertung	Abweichungen, Korrekturen, Regression, Hysterese	Methodisch konsistent angeben
Unsicherheit	Einflussgrößen, Verteilungen, Sensitivitätsbeiwerte, U	Ggf. nach GUM strukturiert
Ergebnis	Kalibrierwerte, Gültigkeitsbereich, Konformitätsaussage	Nur auf definierter Grundlage treffen

6. Zusammenfassung

Die Kalibrierung von Glasmaßstäben bis 1.000 mm konzentriert sich auf die genaue Bestimmung diskreter Teilstrichlagen. Das Verfahren ist geprägt durch saubere optische Erfassung, thermische Korrektur und die Berechnung positionsbezogener Abweichungen. Die wesentlichen Formeln betreffen Teilungsabweichung, Temperaturkorrektur, Mittelwertbildung und Messunsicherheitsfortpflanzung.

Die Kalibrierung kapazitiver Längenmesssysteme bis 1.500 mm ist stärker modellbasiert. Zusätzlich zur reinen Längenabweichung sind Hysterese, Drift, Restnichtlinearität und Umgebungsabhängigkeit zu erfassen. Die mathematische Beschreibung erfolgt über Kennlinien, Regressionsfunktionen und erweiterte Unsicherheitsmodelle.

Die Gegenüberstellung zeigt, dass Glasmaßstäbe bei hoher Nachvollziehbarkeit und Robustheit Vorteile besitzen, während kapazitive Systeme eine höhere Auflösung und funktionale Flexibilität

bieten, aber eine aufwendigere Kalibrierung und strengere Beherrschung der Einflussgrößen erfordern.