

## White paper

# Installation von Maßverkörperungen für ein optimales thermisches Verhalten

Bei Temperaturänderungen an einer Maschine wird die Wärmeausdehnung (auch „thermische Ausdehnung“) dazu führen, dass sich das Längenmaß vieler Maschinenteile ändert. Alle Maßverkörperungen unterliegen ebenso wie die anderen Komponenten einer Maschine den Gesetzen der Physik: Ändert sich die Temperatur, ändert sich auch die Länge der Maßverkörperung. Man kann die auftretenden Fehler entweder akzeptieren oder die Umgebung, in der die Maschine arbeitet, kontrollieren. Aber eine Temperaturänderung um nur ein Grad Celsius könnte zu Messfehlern von über zehn Teilen pro Million (10  $\mu\text{m}/\text{m}$ ) führen. Dieses White Paper behandelt die Frage, wie die thermische Ausdehnung der Maßverkörperung gehandhabt werden kann. Dazu gehören auch Möglichkeiten, wie thermisch induzierte Spannungen („Wärmespannungen“) berechnet und kompensiert werden können. Außerdem wird erklärt, wie sich der Ausdehnungsunterschied zwischen Maßverkörperung und Installationsuntergrund auf die Gesamtleistung eines Messsystems auswirken kann.

### 1 Thermische Montageverfahren

Thermisch induzierte Spannungen in einer Maßverkörperung können berechnet und kompensiert werden. Mithilfe von Temperaturmessungen und bekannten Werten thermischer Ausdehnungskoeffizienten wird normalerweise die Längenveränderung der Maßverkörperung und des Installationsuntergrunds berechnet, die dann kompensiert werden kann. Die Wärmespannung in der Maßverkörperung hängt vom Montageverfahren ab, wie nachstehend erläutert wird. Es muss sichergestellt sein, dass die Temperatur des maßgeblichen Maschinenteils und, gegebenenfalls, des Werkstücks präzise gemessen wird, da Fehler in beiden Fällen die Temperaturkompensation beeinflussen können.

*Beispiel 1:* Stellen Sie sich eine Maschine aus Aluminium mit einer Linearachse von 1 m Länge vor, die in einem Temperaturbereich von 15 bis 25 °C arbeitet. Aluminium hat einen relativ hohen Ausdehnungskoeffizienten von rund 23 ppm/°C ( $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$ ). Die Ausdehnung bzw. Schrumpfung der 1 m langen Achse beträgt:  $\pm 115 \mu\text{m}$  ( $1 \times 23 \times 10^{-6} \times 5 = 115 \times 10^{-6} \text{ m}$ ) über den Temperaturbereich ( $\pm 5$  °C).

Die meisten Maßverkörperungen für Wegmessungen bestehen aus Werkstoffen wie beispielsweise rostfreiem Stahl, die ein anderes thermisches Verhalten als Aluminium haben. Würde eine solche Maßverkörperung unter völliger Missachtung der thermischen Einflüsse bei 20 °C auf dieser Achse montiert werden, könnte die Positioniergenauigkeit sehr darunter leiden. Je nachdem, wie die Maßverkörperung an der 1 m langen Aluminiumachse unseres Beispiels montiert wird, könnte der Positionsfehler bei einer Temperaturänderung um 5 °C 115  $\mu\text{m}$  betragen.

Wir müssen nun überlegen, ob die Maßverkörperung auf den Installationsuntergrund angepasst (thermisch) fixiert oder nicht flächig daran fixiert werden sollte.

#### 1.1 Thermisch am Untergrund fixiert

Wenn sich eine Maschine beim Aufheizen um 115  $\mu\text{m}$  ausdehnt, sollte es immer noch das Ziel sein, unter allen Temperaturen dieselbe physische Position an der Maschine ansteuern zu können – beispielsweise bei einer Aufspannung des Werkstücks an bestimmten Positionen der Maschine. In diesem Fall sollte das Maßband elastisch und in der Lage sein, sich mit der Maschine auszudehnen und zu schrumpfen.

Diese Montageoption nennt sich „thermisch am Untergrund fixiert“, da der Untergrund das Verhalten des Maßbands bestimmt und sich dieses proportional zum Untergrund ausdehnt.

##### 1.1.1 Auswahl einer thermisch fixierten Maßverkörperung

Es gibt verschiedene Anwendungen, bei denen thermisch fixierte Maßverkörperungen von Vorteil sind. Dazu gehören unter anderem Fälle, in denen:

- man eher das Koordinatensystem der Maschine als eine absolute Position benötigt, wenn beispielsweise ein Werkstück angefahren wird, das auf einer bestimmten Position auf dem Maschinenbett fixiert ist.
- der thermische Ausdehnungskoeffizient des Werkstücks nahezu identisch mit dem Ausdehnungskoeffizienten des Installationsuntergrunds an der Maschine ist und beide auf derselben Temperatur gehalten werden, sodass die Maßverkörperung und das Werkstück fast die gleiche Ausdehnung haben. Daher wird jede Längenveränderung des Untergrunds bei einer bestimmten Temperatur automatisch durch eine gleichwertige Längenveränderung der Maßverkörperung kompensiert werden.
- sich die Unsicherheiten im Falle einer langen Maschinenachse bei einer thermisch am Untergrund fixierten Maßverkörperung nicht mit der Länge vergrößern, aber bei einer nicht flächig am Untergrund fixierten Maßverkörperung mit zunehmender Länge deutlich steigen.

- Hätte der Untergrund eine niedrige Wärmeleitfähigkeit und eine hohe thermische Masse (beispielsweise eine dicke Granitplatte), würde die Temperatur des Untergrunds nur minimal durch kurzfristige Veränderungen der Lufttemperatur beeinflusst werden. Kurzfristige Temperaturschwankungen dieser Art könnten daher ruhig ignoriert werden. Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass längerfristige Temperaturveränderungen weiterhin einkalkuliert werden müssen. Diese sind möglicherweise schwieriger zu messen, da es die Durchschnittstemperatur des Untergrunds ist, auf die es ankommt. Deshalb könnten direktere Längenmessungen, die beispielsweise Werte regelmäßig gegen eine bekannte Referenz abgleichen, das geeignetere Verfahren sein.

## 1.2 Nicht flächig am Untergrund fixierte Maßverkörperungen

Eine Maßverkörperung kann so installiert werden, dass sie sich unabhängig vom Untergrund frei ausdehnen oder zusammenziehen kann: Diese Option bezeichnet man als „nicht flächig am Untergrund fixierte Maßverkörperung“. Die Ausdehnung einer solchen Maßverkörperung wird somit vom Ausdehnungskoeffizienten und der Eigentemperatur der Maßverkörperung bestimmt. In Beispiel 1 besteht die Maschine aus Aluminium, das einen hohen Ausdehnungskoeffizienten von ~23 ppm/°C besitzt. Ein Maßband aus Stahl dürfte einen niedrigeren Ausdehnungskoeffizienten von rund 10,1 ppm/°C besitzen. Dadurch reduziert sich die Ausdehnung gegenüber den 115 µm pro 5 °C des Aluminiumuntergrunds auf 50,5 µm pro 5 °C. Die Leistung lässt sich durch Verwendung einer Maßverkörperung mit geringer Ausdehnung und Temperaturkompensation weiter optimieren.

Die Ausdehnung einer Maßverkörperung, die nicht flächig am Untergrund fixiert ist, wird durch ihre Eigentemperatur gesteuert. Solche Maßverkörperungen sind eher dünn (<1,5 mm) und haben eher eine hohe Wärmeleitfähigkeit. Ausgehend von der Dicke des Maßbandes kann man daher annehmen, dass es eine gleichmäßige Temperatur hat. Das macht die Messung der relevanten Temperatur (und somit eine genaue Temperaturkompensation) einfacher. Eine nicht flächig am Untergrund fixierte Maßverkörperung ist weitgehend unabhängig vom Untergrund, dessen Ausdehnungskoeffizient daher nicht genau bekannt sein muss.

Die Temperaturkompensation einer nicht flächig fixierten Maßverkörperung lässt sich optimieren, indem eine Maßverkörperung mit geringem Ausdehnungskoeffizienten verwendet wird. Da Kompensationskorrekturen normalerweise nur geringfügig sind, dürften sich Kompensationsfehler infolge nicht perfekter Temperaturmessungen ebenfalls in Grenzen halten. Dies ist besonders dann vorteilhaft, wenn die Temperaturmessungen mit Unsicherheiten verbunden sind, oder lokale Temperaturschwankungen in verschiedenen Bereichen der Maschine auftreten.

Die Ausdehnung des Untergrunds wird sich zumindest teilweise auf die Ausdehnung der Maßverkörperung unter allen möglichen Montagebedingungen auswirken: Sie wird sich nicht exakt so ausdehnen, wie ihr Ausdehnungskoeffizient allein es vermuten lässt. Die Auslenkung der Maßverkörperung im Verhältnis zu der Position, die sie voraussichtlich hätte, wenn sie perfekt installiert wäre, wird als Störgröße bezeichnet, die bei der Montage einer nicht flächig am Untergrund fixierten Maßverkörperung möglichst minimiert werden sollte. Es sollte darauf hingewiesen werden, dass der kleinstmögliche effektive Ausdehnungskoeffizient durch diese Störgröße begrenzt wird, selbst wenn die Maßverkörperung vom Material her einen sehr niedrigen Ausdehnungskoeffizienten besitzt.

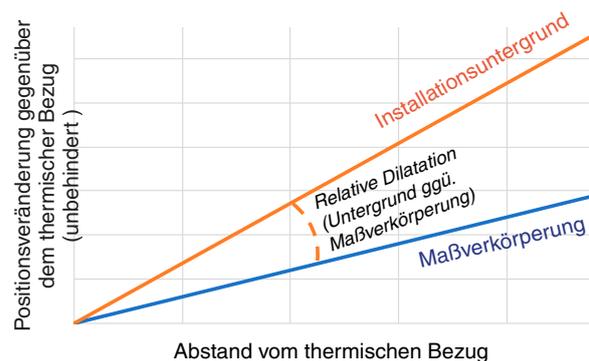


Abbildung 1. Relative Dilatation zwischen Maßverkörperung und Installationsuntergrund

Renishaw hat zwei grundlegende Verfahren, um nicht flächig am Untergrund fixierte Maßverkörperungen so zu installieren, dass die Störgröße unter unterschiedlichsten Bedingungen minimiert wird. Dazu gehören unter anderem die Verwendung einer selbstklebenden Rückseite sowie die Verwendung von Klemmen für Maßstäbe, um einen physischen Versatz der Maßverkörperung zur Achse zu verhindern (die sogenannte „Montage mit Klammer und Klemmen“), bzw. die Verwendung des FASTRACK™-Trägersystems für Edelstahlmaßbänder. Im nächsten Abschnitt wird die Störgröße der Maßverkörperung im Unterschied zu dem Verhalten, das sie bei einer perfekt nicht flächig am Untergrund fixierten Installation zeigen würde, näher erläutert.

## 2 Störgröße bei nicht flächig am Untergrund fixierten Maßverkörperungen

### 2.1 Störgröße

Renishaw hat mathematische Modelle der Störgröße entwickelt und experimentell verifiziert, die sich aus den beiden Montageverfahren – mit Klebeband und mit Klammer und Klemmen – ergeben. Die Modelle selbst sind zu komplex, um sie an dieser Stelle in aller Vollständigkeit vorstellen zu können, und einige der Ergebnisse sind nicht linear: Beispielsweise tritt der größte Positionsfehler am Ende der Maßverkörperung auf. Dieser Fehler lässt sich aber nicht einfach als lineare Interpolation auf die gesamte Maßbandlänge übertragen.

Die folgenden Gleichungen prognostizieren die stärksten denkbaren Störgrößen am Ende der Maßverkörperung.

### 2.1.1 Wichtige Begriffe

**Störgröße** bezeichnet den Positionsfehler am Ende der Maßverkörperung, der dadurch verursacht wird, dass die sich ausdehnende Maßverkörperung und der sich ausdehnende Installationsuntergrund durch das Montageverfahren teilweise gekoppelt werden.

Sie beschreibt die Längenabweichung zwischen einer Maßverkörperung, die theoretisch vollkommen unabhängig vom Untergrund ist, und der tatsächlichen Maßverkörperung. Die Störgröße wird typischerweise in  $\mu\text{m}$  gemessen und in diesem White Paper als  $u$  bezeichnet.

Die **relative Dilatation** bezeichnet die Veränderung in den wärmeinduzierten Ausdehnungsverhältnissen zwischen Maßband und Installationsuntergrund, wie Abbildung 1 zeigt. In diesem Papier wird sie als  $\rho$  bezeichnet und in ppm gemessen. Sie wird folgendermaßen definiert:

$$\text{Relative Dilatation} = \rho = \Delta T(CTE_{\text{Untergrund}} - CTE_{\text{Maßband}})$$

Wobei:

$\Delta T$  die Temperaturänderung gegenüber einem festgelegten Wert ist (normalerweise die Installationstemperatur (20 °C))

$CTE_{\text{Untergrund}}$  der Wärmeausdehnungskoeffizient des Untergrunds ist (ppm/°C)

$CTE_{\text{Maßband}}$  der Wärmeausdehnungskoeffizient der Maßverkörperung ist (ppm/°C)

**Freie Länge** bezeichnet den Abstand zwischen dem Befestigungspunkt der Maßverkörperung am Untergrund, d. h. dem thermischen Bezug (siehe Abschnitt 3.1), und dem freien Ende der Maßverkörperung, das am weitesten von diesem Bezugspunkt entfernt ist. Typischerweise wäre der thermische Bezug in der Mitte der Maßverkörperung und die freie Länge würde der Hälfte der Gesamtlänge der Maßverkörperung entsprechen. In diesem Papier wird die freie Länge als  $z$  bezeichnet und in m *gemessen*.

**Ausdehnungsunterschied** bezeichnet die Differenz zwischen der Wärmeausdehnung der Maßverkörperung und der Wärmeausdehnung des Installationsuntergrunds auf der Strecke zwischen thermischem Bezug und dem am weitesten entfernten freien Ende: Sie wird als  $z\rho$  berechnet.

### 2.1.2 Gleichungen

#### Parameter

Die nachstehenden Gleichungen verwenden die folgenden Parameter:

$E$  = Elastizitätsmodul der Maßverkörperung (Pa)

$A$  = Querschnitt der Maßverkörperung ( $\text{m}^2$ )

$L$  = Gesamtlänge der Maßverkörperung (m)

$z$  = Freie Länge der Maßverkörperung (m)  
d. h., bei einer Maßverkörperung mit mittigem thermischen Bezug  $z = L/2$

$u$  = Störgröße ( $\mu\text{m}$ )

$\rho$  = Relative Dilatation (ppm)

$q$  = Reibungswiderstand pro Längeneinheit durch Montage mit Klammer und Klemmen ( $\text{Nm}^{-1}$ )

$k$  = Schubsteifigkeit pro Längeneinheit durch Montage mit Klebeband ( $\text{Nm}^{-2}$ )

#### Mit Klammer und Klemmen montierte Maßverkörperungen:

Bei einer Maßverkörperung, die mit Klammer und Klemmen (Klemmen und *FASTRACK*) fixiert wird, kann die Störgröße der Maßverkörperung ( $u$ ) folgendermaßen geschätzt werden:

$$u = \frac{qz^2}{2EA}$$

Diese Beziehung trifft solange zu, wie die relative Dilatation oberhalb eines bestimmten Grenzwertes liegt. Dieser wird folgendermaßen bestimmt:

$$\rho \geq \frac{qz}{EA}$$

Diese Bedingung ist unter den meisten Realbedingungen erfüllt. Eine wichtige Konsequenz daraus ist, dass die Störgröße in der Regel unabhängig von der relativen Dilatation auftritt.

Außerdem ist zu sehen, dass die Störgröße sich nach dem Quadrat der freien Länge richtet.

#### Mit Klebeband montierte Maßverkörperungen:

Bei mit Klebeband montierten Maßverkörperungen beträgt die Störgröße der Maßverkörperung etwa:

$$u = \frac{\rho kz^3}{3EA}$$

Dieses Verfahren unterscheidet sich in zwei wichtigen Punkten von der Montage mit Klammer und Klemmen: Die Störgröße ist nun von der relativen Dilatation und der freien Länge in dritter Potenz anstatt von der freien Länge in zweiter Potenz abhängig.

#### Randbedingung:

Die beiden unterschiedlichen Montageverfahren liefern theoretisch identische Störgrößen, wenn:

$$z\rho = \frac{3q}{2k}$$

Liegt der Wert für den Ausdehnungsunterschied (freie Länge multipliziert mit der relativen Dilatation) bei einer Anwendung unter diesem kritischen Wert, dann sind die Störgrößen bei einer Montage mit Klebeband kleiner als bei einer mit Klammer und Klemmen. Der umgekehrte Fall gilt für Werte, die darüber liegen.

Relative Dilatation / Störgröße – Schaubild für Maßband der RTL Reihe

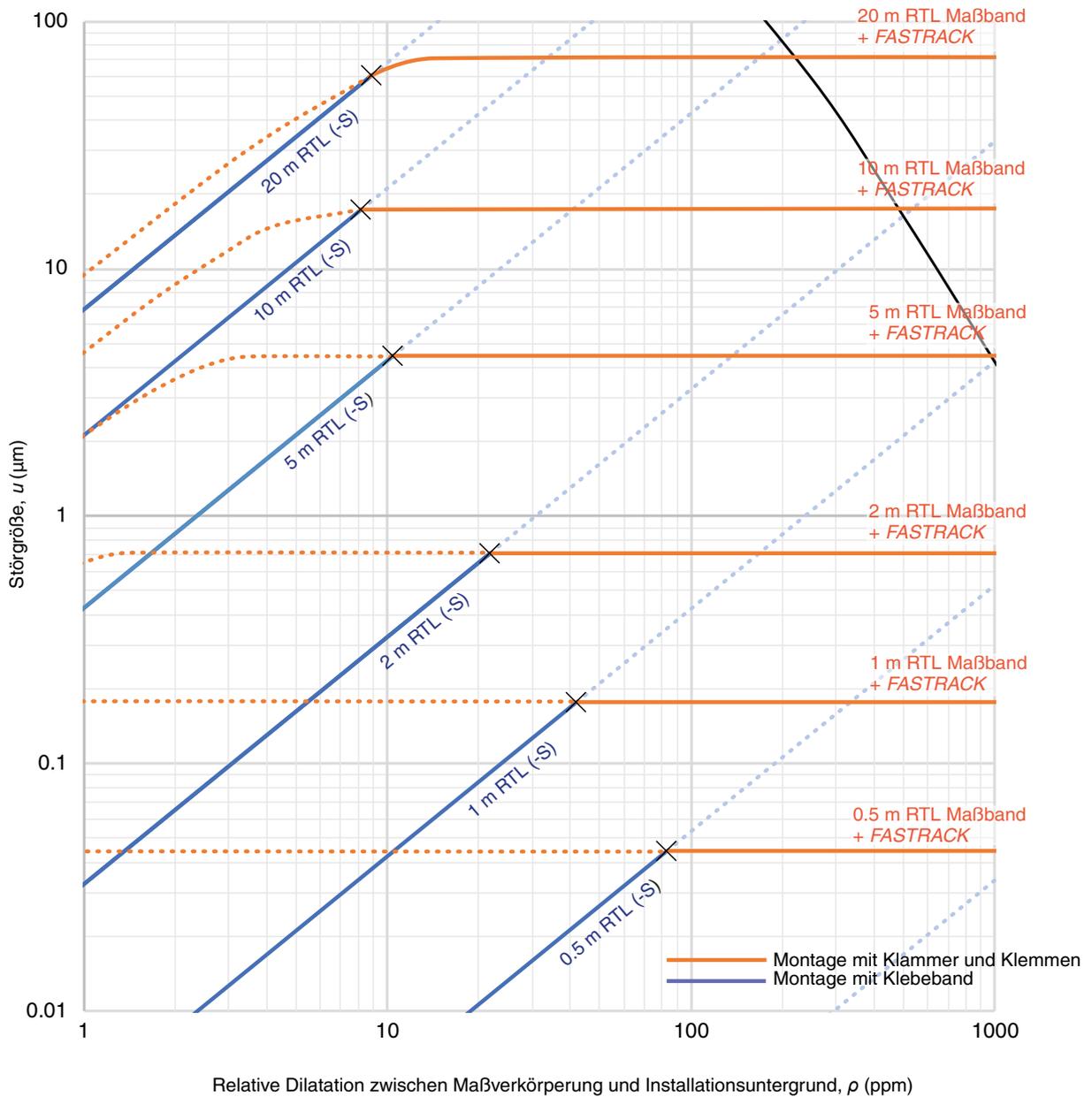


Abbildung 2a. Die Störgröße, die sich aus einer bekannten relativen Dilatation ergibt, für unterschiedliche Längen von Maßbändern der RTL Reihe und Montageverfahren.  
Bitte beachten Sie, dass diese Schaubilder auf der Annahme eines zentralen bzw. nicht vorhandenen Befestigungspunkts beruhen.

Relative Dilatation / Störgröße – Schaubild für REL und RSL Maßstäbe

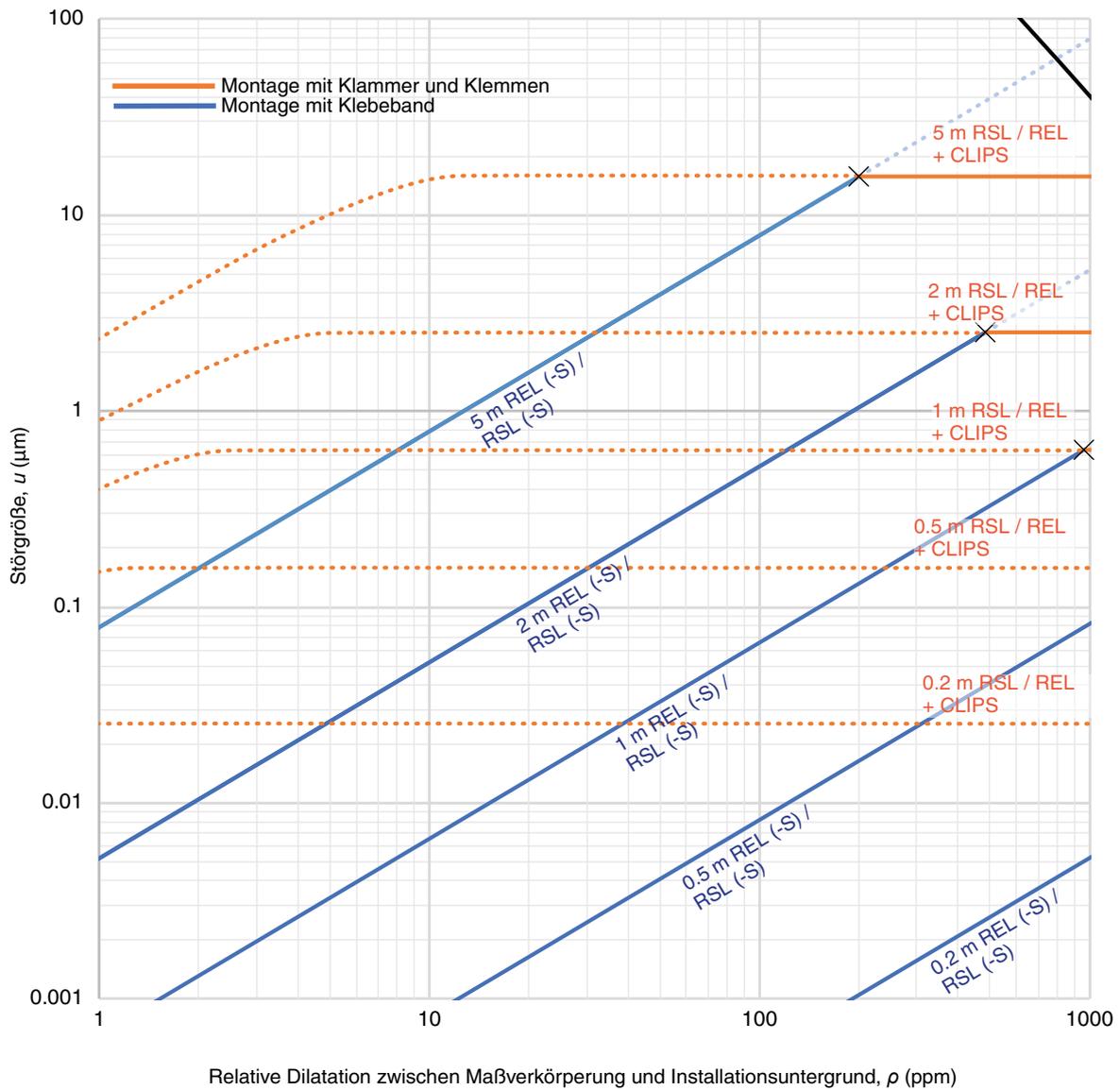


Abbildung 2b. Die Störgröße, die sich aus einer bekannten relativen Dilatation ergibt, für unterschiedliche Längen von Maßstäben der RSL / REL Reihe und Montageverfahren.  
Bitte beachten Sie, dass diese Schaubilder auf der Annahme eines zentralen bzw. nicht vorhandenen Befestigungspunkts beruhen.

Dieser Übergangspunkt wird durch die Werte  $q$  und  $k$  bestimmt. Sobald diese bekannt sind, lässt sich der Übergangspunkt bei ungleicher Wärmeausdehnung für alle Konfigurationen von Maßverkörperungen auswerten.

Man kann diesen Übergangspunkt nutzen um festzustellen, welches der beiden Montageverfahren unter einer bestimmten Bedingung eine niedrigere Störgröße ergibt. Der Übergangspunkt bei ungleicher Wärmeausdehnung beträgt für ein Maßband der RTL Reihe  $20\ \mu\text{m}$  und für einen REL / RSL Maßstab  $500\ \mu\text{m}$ .

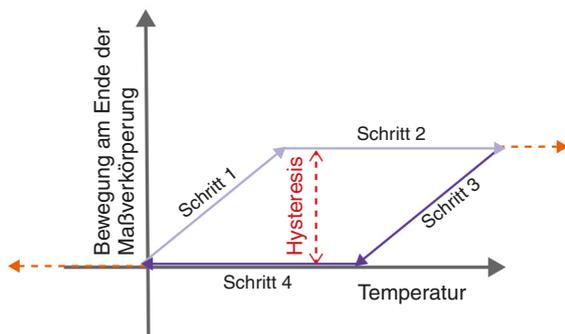


Abbildung 3. Die Bewegung am Ende einer Maßverkörperung bei wechselnder Temperatur. Grundannahme dabei ist, dass die Maßverkörperung mit Klammer und Klemmen befestigt wurde, einen Ausdehnungskoeffizienten von null und der Untergrund einen positiven Ausdehnungskoeffizienten hat.

### Schaubilder – Störgröße/relative Dilatation

Die folgenden Schaubilder stellen übersichtlich in grafischer Form dar, wie sich die Montageverfahren auf die tatsächliche Position der Maßverkörperung an ihren Enden auswirken. Sie können hilfreich sein um vorherzusagen, wie die Messtechnik eines Systems von der Wahl des Montageverfahrens beeinflusst wird. In diesen Schaubildern werden jeweils zwei Kurven für die Störgröße/relative Dilatation bei einer Installation mit Klebeband und mit Klammer und Klemmen für Maßverkörperungen in verschiedenen Längen dargestellt.

Das Montageverfahren, das die kleinste Störgröße (die bessere Leistung) ergibt, wird mittels durchgezogener Linien hervorgehoben.

Die Kurvendarstellungen in Abbildung 2 können hilfreich sein um festzustellen, welches Montagesystem die kleinste Störgröße bei einer vorgegebenen relativen Dilatation ergibt.

Wenn beispielsweise ein RTL Maßband von  $1\ \text{m}$  Länge (Ausdehnungskoeffizient  $\approx 10\ \text{ppm}/^\circ\text{C}$ ) auf einem Untergrund aus Aluminium (Ausdehnungskoeffizient  $\approx 23\ \text{ppm}/^\circ\text{C}$ ) und mittigem thermischen Bezug installiert wurde und dann um  $5\ ^\circ\text{C}$  erwärmt wird, würden wir eine relative Dilatation von  $(23 - 10.1) \times 5 \approx 65\ \text{ppm}$  erhalten.

Aus der Kurvendarstellung in Abbildung 2a wird ersichtlich, dass die Störgröße bei Verwendung des FASTRACK-Montageverfahrens ( $\sim 0,18\ \mu\text{m}$ ) gegenüber dem mit Klebeband ( $\sim 0,28\ \mu\text{m}$ ) minimiert wird.

Der Bereich über der Kurve oben rechts über der schwarzen Linie zeigt, wo das Klebeband aufgrund eines zu hohen Ausdehnungsunterschieds zwischen Maßband und Untergrund versagen könnte.

Bitte beachten Sie, dass diese Kurvendarstellungen auf der Gesamtlänge des Maßbands,  $L$ , basieren, unter der Annahme, dass es entweder mittig fixiert ist, oder gar keinen Befestigungspunkt hat, d. h.  $z = L/2$ . In allen anderen Fällen, in denen die freie Länge  $z$  (Befestigungspunkt bis zum freien Ende) bekannt ist, verwenden Sie einfach  $L = 2z$  in diesen Kurvendarstellungen.

Der Reibungseffekt bei einer Montage mit Klammer und Klemmen lässt sich nicht mit endgültiger Genauigkeit bestimmen: Die Kurvendarstellungen bieten gute, konservative Gestaltungsleitlinien, sollten jedoch nicht als Grundlage für eine spezifische Fehlerkompensation verwendet werden.

### 2.2 Hysterese

Es besteht die Möglichkeit, dass die Störgröße einer mit Klammer und Klemmen installierten Maßverkörperung durch ihre thermische Vorgeschichte beeinflusst wird. Zum besseren Verständnis stellen Sie sich eine mit Klammer und Klemmen montierte Maßverkörperung vor, deren Ausdehnungskoeffizient null ist und die an einem Untergrund befestigt wurde, dessen Ausdehnungskoeffizient nicht null ist. Das System wird vorgeheizt. Zunächst wird das Verhalten der Maßverkörperung weitgehend durch den Untergrund bestimmt, da die thermischen Belastungen nicht stark genug sind, um die aus dem Montageverfahren resultierende Reibung zu überwinden. Diese erste Erwärmung führt dazu, dass sich die Maßverkörperung im Einklang mit dem Ausdehnungskoeffizienten des Untergrunds (Schritt 1 in Abbildung 3) ausdehnt.

Schließlich sind die induzierten Spannungen groß genug und führen dazu, dass die Maßverkörperung über den Untergrund gleitet und sich dann gemäß ihrem eigenen Ausdehnungskoeffizienten (in diesem Fall „null“) ausdehnt (Schritt 2).

Wenn sich die Temperatur dann wieder verringert, kehrt sich der Vorgang um. Es bedarf dann einiger Abkühlung, bis die Maßverkörperung wieder in der Lage ist, den montagebedingten Reibungseffekt zu überwinden und über den Untergrund zurückzugleiten (Schritte 3 und 4). Es wird daher ersichtlich, dass die Position der Maßverkörperung von der Vorgeschichte des Systems abhängig ist: Dies bezeichnet man als montagebedingte Hysterese. Die montagebedingte Hysterese bedeutet eine gewisse Unsicherheit für die Ausdehnung der Maßverkörperung. Das Ausmaß dieses Effekts entspricht der maximalen Störgröße, die bei mittels Klammer und Klemmen fixierten Maßverkörperungen festgestellt wurde. Typischerweise ist bei Maßverkörperungen, die mit Klebeband fixiert werden, keine montagebedingte Hysterese festzustellen, da keine mechanische Reibung auftritt.

### 3 Weitere Überlegungen zur Montage von Maßverkörperungen

Mithilfe des folgenden Auswahlverfahrens können Sie feststellen, welche Maßverkörperung und Montageoption sich am besten für eine bestimmte Anwendung eignen.

#### 3.1 Bezugspunkte

Bei Verwendung einer nicht flächig am Untergrund fixierte Maßverkörperungen empfiehlt es sich, einen thermischen Bezug zu verwenden. Dies ist ein einzelner Punkt, an dem Maßverkörperung und Untergrund fest miteinander verbunden werden, sodass sie sich nicht gegeneinander verschieben können.

Allgemein empfiehlt es sich, den thermischen Bezug in der Mitte der Maßverkörperung anzubringen, da dadurch die freie Länge der Maßverkörperung und somit auf sie wirkende Einflüsse insgesamt reduziert werden.

Wie bereits in Abschnitt 2.1.2 zu sehen war, ist die Störgröße am Ende der Maßverkörperung bei mit Klammer und Klemmen montierten Maßverkörperungen von ihrer freien Länge in zweiter Potenz abhängig, bei mit Klebeband montierten Maßverkörperungen dagegen von der freien Länge in dritter Potenz.

Renishaw Maßbänder können auch ohne einen Bezugspunkt installiert werden. Allerdings ist aus verschiedenen Gründen von einer Installation ohne Bezugspunkt abzuraten. Ohne Verwendung eines Bezugspunktes kann man unmöglich den Punkt kennen, an dem die Maßverkörperung im Verhältnis zum Untergrund unbeweglich ist. Symmetrie-orientierte Argumente könnten nahelegen, dass sich dieser Punkt in der Mitte der Maßverkörperung befindet. Dies wird aber dann nicht der Fall sein, wenn entlang der Maßverkörperung Wärmegefälle auftreten oder Spannmittel oder der Untergrund variable Merkmale besitzen. Darüber hinaus ist es hilfreich, einen thermischen Bezug zu haben, da dieser Bewegungen der Maßverkörperung im Falle von Achsbeschleunigungen verhindert.

#### 3.1.1 Wichtig für die Installationsgüte: **FASTRACK und Montage mit Klammer und Klemmen**

Bei der Verwendung von Maßverkörperungen, die mit Klammer und Klemmen montiert werden, kann die Installationsgüte den Reibungswiderstand und somit die ggf. auftretende Störgröße beeinflussen. Es sollte daher unbedingt darauf geachtet werden, dass der Untergrund vor einer Montage sauber ist, die Installation geradlinig erfolgt und keine Flüssigkeiten auf dem Installationsuntergrund verschüttet werden, welche Rückstände hinterlassen. Ebenso ist ein wiederholtes Abwischen der Fläche mit einem fuselfreien Tuch möglichst zu vermeiden.

Bei Verwendung des *FASTRACK*-Trägersystems oder einer mit Klammer und Klemmen montierten Maßverkörperung ist die Gleitreibungskraft der Achse unbedingt zu prüfen, bevor der Bezugspunkt auf die Maßverkörperung aufgetragen wird.

Ein Vergleich zwischen der Gleitreibungskraft und dem für die Installation erwarteten Wert ( $\leq 0,3 \text{ Nm}^{-1}$  für RTL Maßbänder und  $\leq 25 \text{ Nm}^{-1}$  für Maßstäbe) gibt Aufschluss darüber, ob die berechnete Störgröße erreicht werden wird. Manchmal werden Fehler bei der Installation gemacht, aber nicht erkannt, da die Gleitreibungskraft nicht geprüft wurde. Die Störgröße der Maßverkörperung kann dadurch deutlich höher werden. Die Reibung und somit die maximale Störgröße bei geklemmten Maßstäben kann verringert werden, indem die Anzahl der Klemmen, die den Maßstab in Position halten, gemäß der zum Maßstab gehörenden Installationsanleitung reduziert wird.

#### 3.1.2 Mit Klebeband montierte Maßverkörperung: **maximaler Ausdehnungsunterschied**

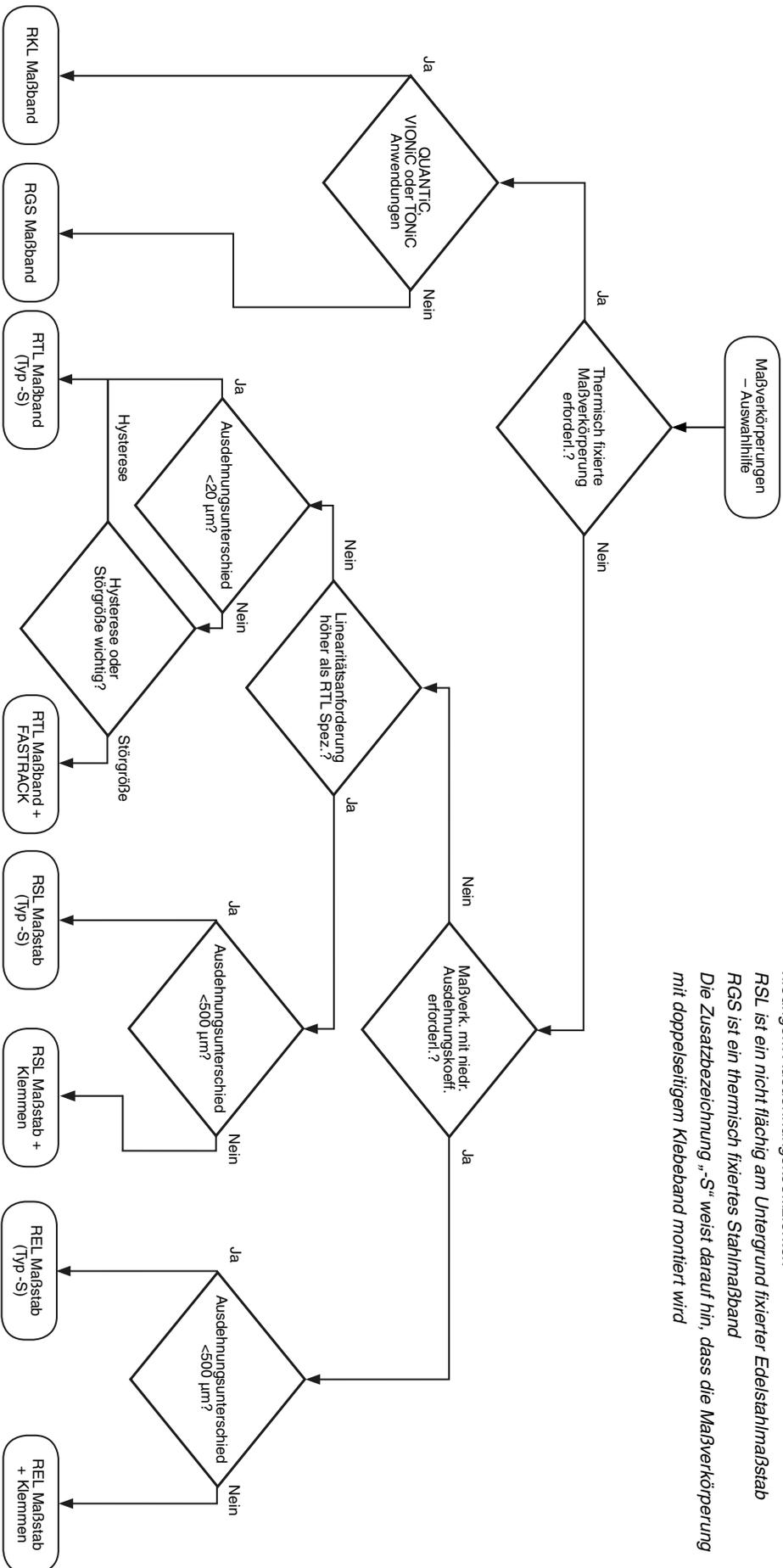
Der maximale Ausdehnungsunterschied bei Maßverkörperungen, die mit Klebeband montiert werden, sollte selbst bei einem Übergang nicht mehr als 1 mm betragen, wie durch die schwarzen Linien in der oberen rechten Ecke der Abbildungen 2a und 2b dargestellt wird. Über diesen Punkt hinaus kann die mechanische Leistung des Klebebands nicht gewährleistet werden.

#### 3.1.3 Am Untergrund thermisch fixierte Maßverkörperung: **RKL und RGS**

Bei Verwendung eines thermisch am Untergrund fixierten RKL oder RGS Maßbands sind unbedingt geklebte Endklemmen anzubringen, um zwei Punkte zu schaffen, an denen das Maßband fest mit dem Installationsuntergrund verbunden ist. Sie stellen die richtige thermische Fixierung des Maßbands sicher, da die Steifigkeit des Klebebands allein nicht ausreicht, um diese zu erreichen.

**4 Hilfe zur Auswahl von Maßverkörperungen**

Mithilfe des folgenden Auswahlverfahrens können Sie feststellen, welche Maßverkörperung und Montageoption sich am besten für eine bestimmte Anwendung eignen.



Mehr darüber, ob Sie Maßverkörperungen mit thermischer Fixierung oder einem niedrigen Ausdehnungskoeffizienten benötigen, erfahren Sie in den Abschnitten 2.2 und 2.3. Manchmal ist es vorteilhaft, ein Montageverfahren mit Klebeband statt mit Klammer und Klemmen zu wählen, obwohl die Störgröße bei letzterem kleiner ist. Dies liegt daran, dass bei der Montage mit Klebeband keine Hysterese auftritt, was bei manchen Anwendungen wichtig sein kann.

**Maßverkörperungen:**  
 RTL ist ein nicht flächig am Untergrund fixiertes Edelstahlmaßband  
 RKL ist ein thermisch fixiertes Stahlmaßband  
 REL ist ein nicht flächig am Untergrund fixierter Edelstahlmaßstab mit niedrigem Ausdehnungskoeffizienten  
 RSL ist ein nicht flächig am Untergrund fixierter Edelstahlmaßstab  
 RGS ist ein thermisch fixiertes Stahlmaßband  
 Die Zusatzbezeichnung „-S“ weist darauf hin, dass die Maßverkörperung mit doppelseitigem Klebeband montiert wird

5 Glossar

Fachbegriffe	Definition
Montage mit Klebeband	Maßverkörperung, die mit doppelseitigem, auf ihrer gesamten Länge aufgebrachtem Klebeband, in ihrer Position gehalten wird.
Ausdehnungskoeffizient	Thermischer Ausdehnungskoeffizient (oder „Wärmeausdehnungskoeffizient“), der Betrag, um den sich die Größe eines Objekts mit der Temperatur ändert. Wird normalerweise in „Teilen pro Million“ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ , ppm) pro Grad Celsius bzw. ppm/°C angegeben.
Dilatation	Die Längenveränderung einer Komponente dividiert durch ihre Originallänge.
Relative Dilatation	Der Unterschied zwischen der Ausdehnung eines Installationsuntergrunds und der darauf montierten Maßverkörperung.
Störgröße	Der Positionsfehler am Ende der Maßverkörperung, der durch das Montageverfahren entsteht. Er beschreibt die Längenabweichung zwischen der idealen, perfekt nicht flächig am Untergrund fixierten Maßverkörperung und der tatsächliche Position am Ende der Maßverkörperung.
Ausdehnungsunterschied	Bezeichnet die Differenz zwischen der thermischen Ausdehnung der Maßverkörperung und der thermischen Ausdehnung des Installationsuntergrunds auf der Strecke zwischen thermischem Bezug und dem am weitesten entfernten freien Ende der Maßverkörperung.
Nicht flächig am Untergrund fixiert	Ein System, bei dem die thermische Ausdehnung der Maßverkörperung von den Eigenschaften der Maßverkörperung bestimmt wird und weitgehend unabhängig vom Installationsuntergrund sein sollte.
Freie Länge	Der Abstand zwischen dem thermischen Bezug einer nicht flächig am Untergrund fixierten Maßverkörperung und jenem Ende der Maßverkörperung, das am weitesten von diesem Punkt entfernt ist. Wenn kein thermischer Bezug verwendet wird, sollte davon ausgegangen werden, dass sich der thermische Bezug in der Mitte der Achse befindet.
Montagebedingte Hysterese	Die Differenz zur tatsächlichen Ausdehnung der Maßverkörperung bei einer bestimmten Temperatur, wenn dieser Temperaturwert von einer höheren oder niedrigeren Temperatur aus erreicht wird.
Thermisch fixiert	Ein System, bei dem die thermische Ausdehnung der Maßverkörperung durch die Ausdehnung des Installationsuntergrunds bestimmt wird.
Montage mit Klammer und Klemmen	Verfahren, bei dem die Maßverkörperung mittels mechanischer Führungen in Position gehalten wird. Dabei werden entweder das <i>FASTRACK</i> -Trägersystem für Maßbänder oder eine Klammer und Klemmen für Maßstäbe verwendet
Thermischer Bezug	Ein Punkt, an dem eine nicht flächig am Untergrund fixierte Maßverkörperung fest mit dem Installationsuntergrund verbunden ist. An dieser Stelle können sich die beiden nicht gegeneinander verschieben. Folglich geht jede Ausdehnung der Maßverkörperung gegenüber dem Installationsuntergrund von diesem Punkt aus.