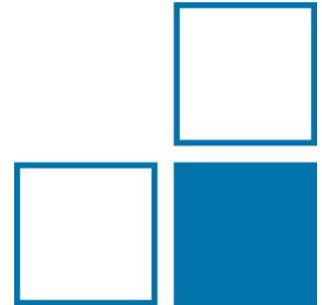


Bestimmung der thermischen Ausdehnungseigenschaften von Materialien durch Primärdarstellung des Meter

Dr. R. Schödel

Fachbereich

„Interferometrie an Maßverkörperungen“



- Einführung
- Darstellung der Länge mittels Interferometrie / Abbildende Interferometer zur Darstellung der Länge von Maßverkörperungen
- Einige spezielle Interferometer der PTB
- Beispiele für höchstgenaue Messungen zur Charakterisierung der thermischen Ausdehnung und der Langzeitstabilität spezieller Materialien

Einführung

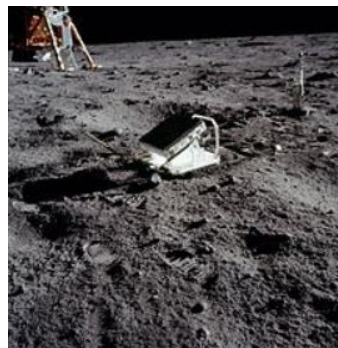
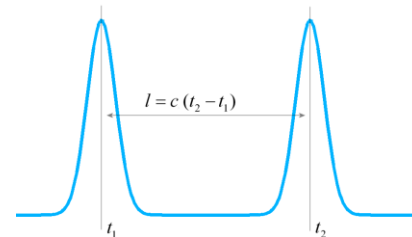
1983

Ein Meter ist definiert als die Länge der Strecke, die das Licht im Vakuum während der Dauer von 1/299 792 458 Sekunde zurücklegt.

Die Entfernung Erde Mond lässt sich zum Beispiel durch Bestimmung der Zeit, die ein Laserpuls von der Erde zum Mond und zurück braucht, messen (etwa 2,6 Sekunden)


Die Länge von kurzen Entfernungen oder von Maßverkörperungen lässt sich am genauesten mittels Interferometrie darstellen.

Die SI Maßeinheit für die Länge wird über die Zeit definiert: $1 \text{ m} \square 3,335\ 640\ 952 \text{ ns}$

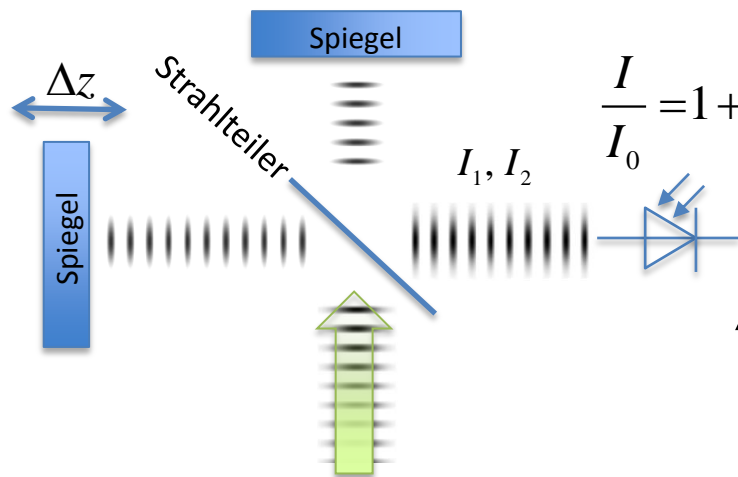


Retroreflektor der Apollo-11-Mission 



Laser-Ranging-System des geodätischen Observatoriums Wettzell in Bayern 

Primärdarstellung der Länge mittels Interferometrie



$$\frac{I}{I_0} = 1 + \gamma \cos \Delta\varphi$$

$$\Delta\varphi = k 2 \Delta z$$

$$2 \Delta z = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \lambda = \frac{c}{\nu} \frac{\Delta\varphi}{2\pi} = c \Delta t$$

$$\Delta t = \frac{1}{\nu} \frac{\Delta\varphi}{2\pi}$$

$\Delta\varphi$: Phasendifferenz (Anzahl der Interferenzordnungen)

Δz : Länge (bzw. Verschiebungsweg)

Δt : Zeitdifferenz

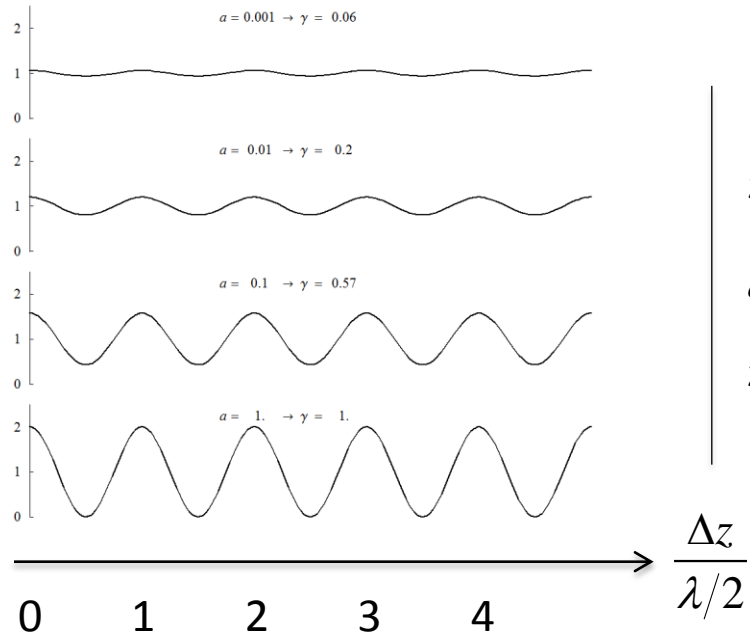
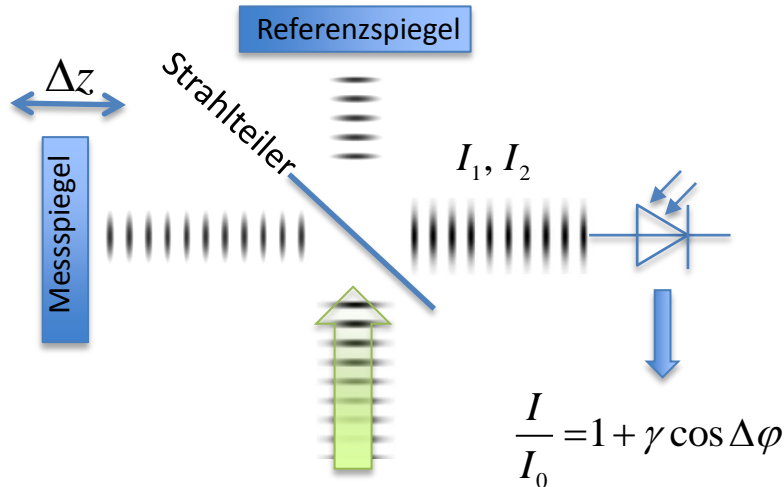
λ : Wellenlänge

k : Wellenzahl ($k = 2\pi/\lambda$)

ν : Frequenz (300 .. 600 THz)

Definitionsgemäße Darstellung der Maßeinheit der Länge durch Messung einer Interferenzintensität (und Kenntnis der Frequenz des Lichtes)

Primärdarstellung der Länge mittels Interferometrie



$$\gamma = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

$$a = I_1/I_2, I_0 = I_1 + I_2$$

$$\gamma = \frac{2\sqrt{a}}{a+1}$$

$$\Delta\phi = k 2 \Delta z = \frac{2\pi}{\lambda/2} \Delta z$$

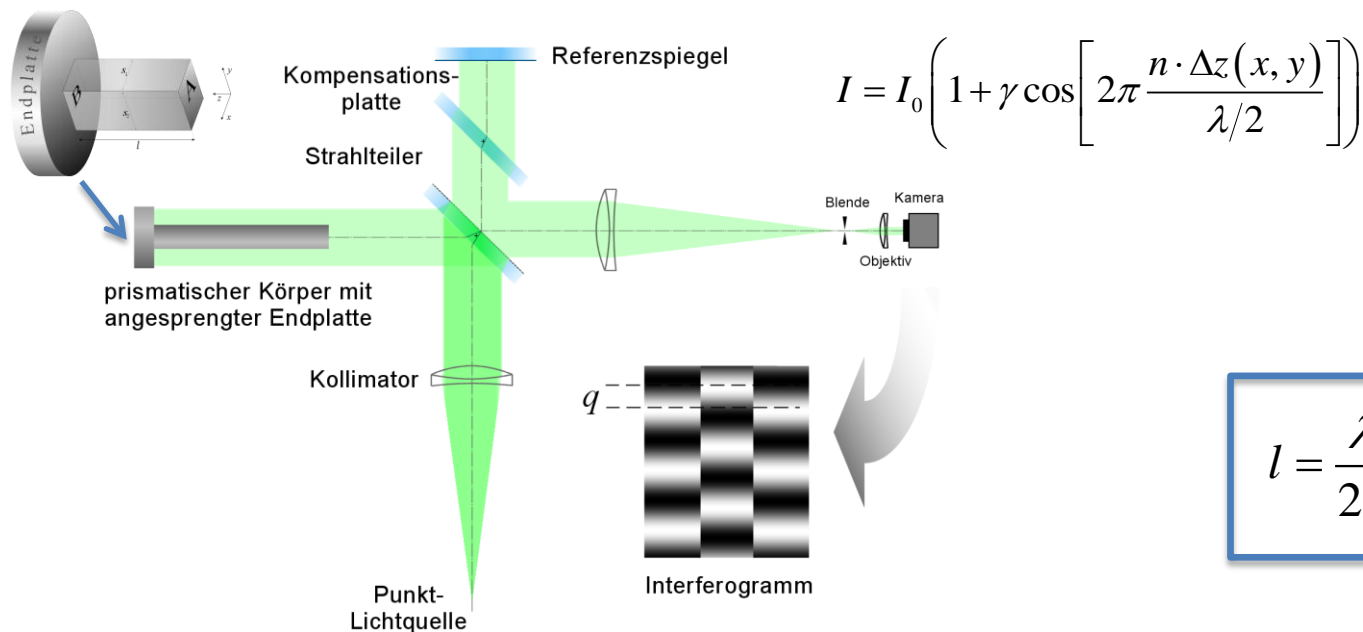
$$\Delta\phi \rightarrow \phi$$

$$\Delta z \rightarrow l$$

$$l = \lambda/2 \frac{\phi}{2\pi}$$

Längenmessung möglich durch „Zählen von Interferenzstreifen“

Abbildende Interferometer zur Darstellung der Länge

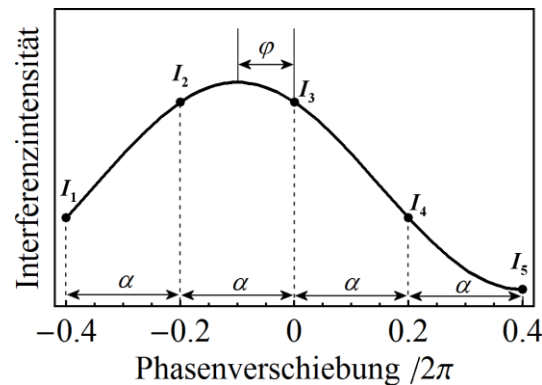
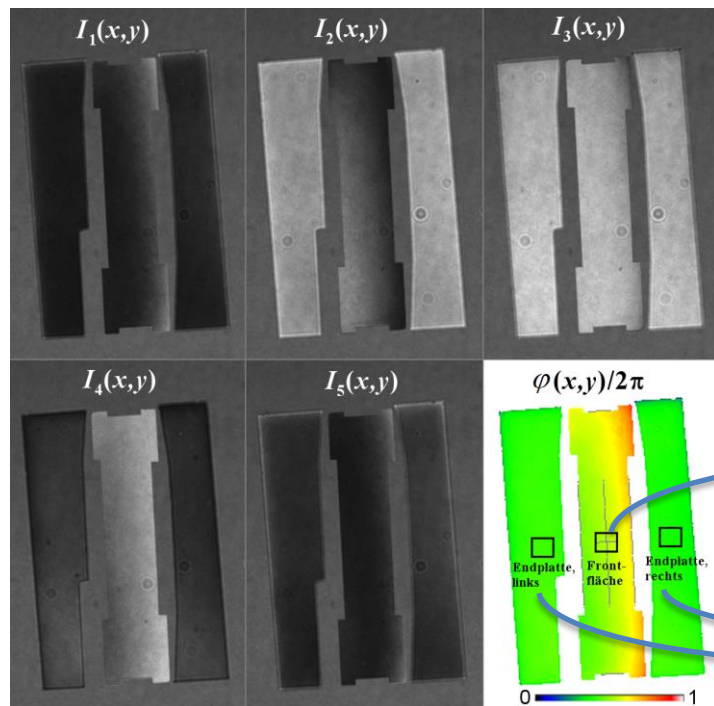


$$l = \frac{\lambda}{2n} (i + q)$$

Strahlen decken einen großen lateralen Bereich (z.B. 60 mm) ab.
 Die gemessene Länge entspricht Längendifferenzen an verschiedenen Positionen im Messarm des Interferometers.

Abbildende Interferometer zur Darstellung der Länge

Bestimmung des Interferenzbruchteils mittels „Phasen-Schritt Interferometrie“



$$q = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1}{2} (\bar{\varphi}_{\text{rechts}} + \bar{\varphi}_{\text{links}}) - \bar{\varphi}_{\text{mitte}} \right]$$

$$l = \frac{\lambda}{2n} (i + q)$$

Primärdarstellung der Länge mittels Interferometrie

Bestimmung der ganzzahligen Interferenzordnungen durch Nutzung verschiedenen Wellenlängen

$$l_1 = \lambda_1/2 (i_1 + q_1)$$

$$l_2 = \lambda_2/2 (i_2 + q_2)$$



$$\Delta = \frac{1}{2} |l_1 - l_2|$$

Identifizierung der „richtigen“ Länge durch Beurteilung des Koinzidenzkriteriums



$$l = \frac{\lambda}{2n} (i + q)$$

R Schödel *Utilisation of coincidence criteria in absolute length measurements by optical interferometry in a vacuum and in air*. Measurement Science and Technology, **26** (2015), 084007

Begrenzende Faktoren bei der Darstellung der Länge

Größe	Type	typische Messunsicherheit	geschätzte Grenze
Frequenz (ν) der Lichtquelle	relativ	1E-8 ... 1E-12	1E-15
Phasenmessung	absolut	1 nm	0.01 nm
Brechzahl der Luft (n)	relativ	3E-8	1E-9
Geometrie der Maßverkörperung	absolut	2 nm	0.05 nm
Strahljustage	relativ	5E-9	1E-10
Wellenfrontfehler und Beugung	relativ	>1E-8	1E-9
Oberflächeneffekte	absolut	5 nm	0.5 nm
Temperaturmessung	relative	>3E-8 (für Stahl)	1E-11 ("zero-expansion" material)

$$\left\{ \begin{aligned} \lambda_{\text{air}} &= \frac{c}{n_{\text{air}} \nu} = \frac{c_{\text{air}}}{\nu} \\ n_{\text{air}} &\approx 1,000\,3 \end{aligned} \right.$$

z.B. Parallelität von Endflächen

Kosinusfehler

Qualität der opt. Komponenten

$$l_{20} = l \left(1 - \alpha (t - 20 \text{ °C}) \right)$$

Beispiel für die Darstellung und Weitergabe des Meter

Interferometrische Kalibrierung von Parallelendmaßen bei der PTB

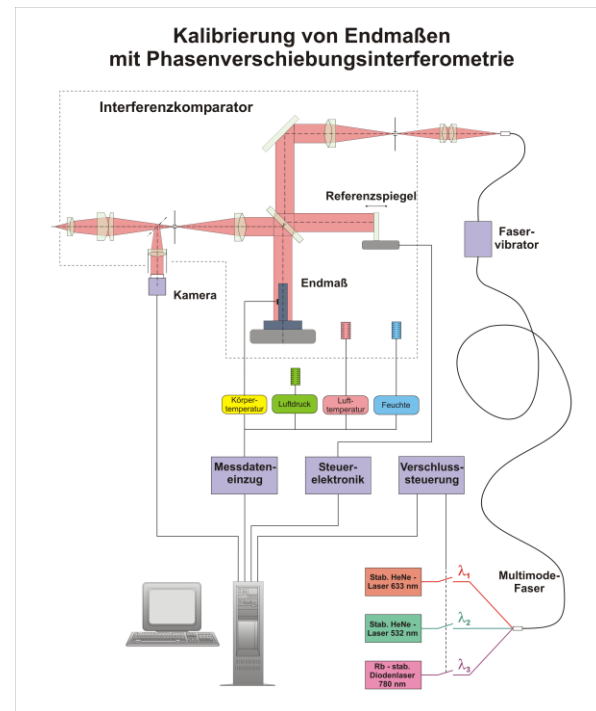
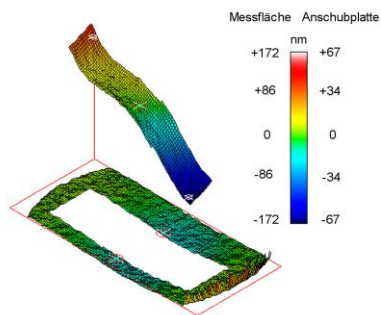
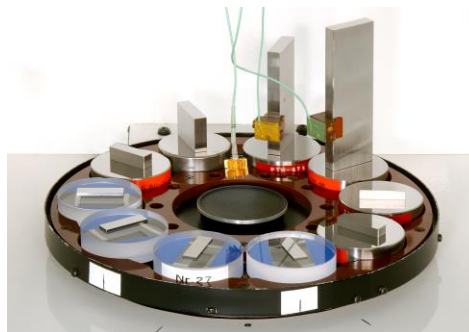


$$l_{20} = l(1 - \alpha(t - 20^{\circ}\text{C}))$$

Die Genauigkeit der Kenntnis des thermischen Ausdehnungskoeffizienten begrenzt die Genauigkeit der Länge.

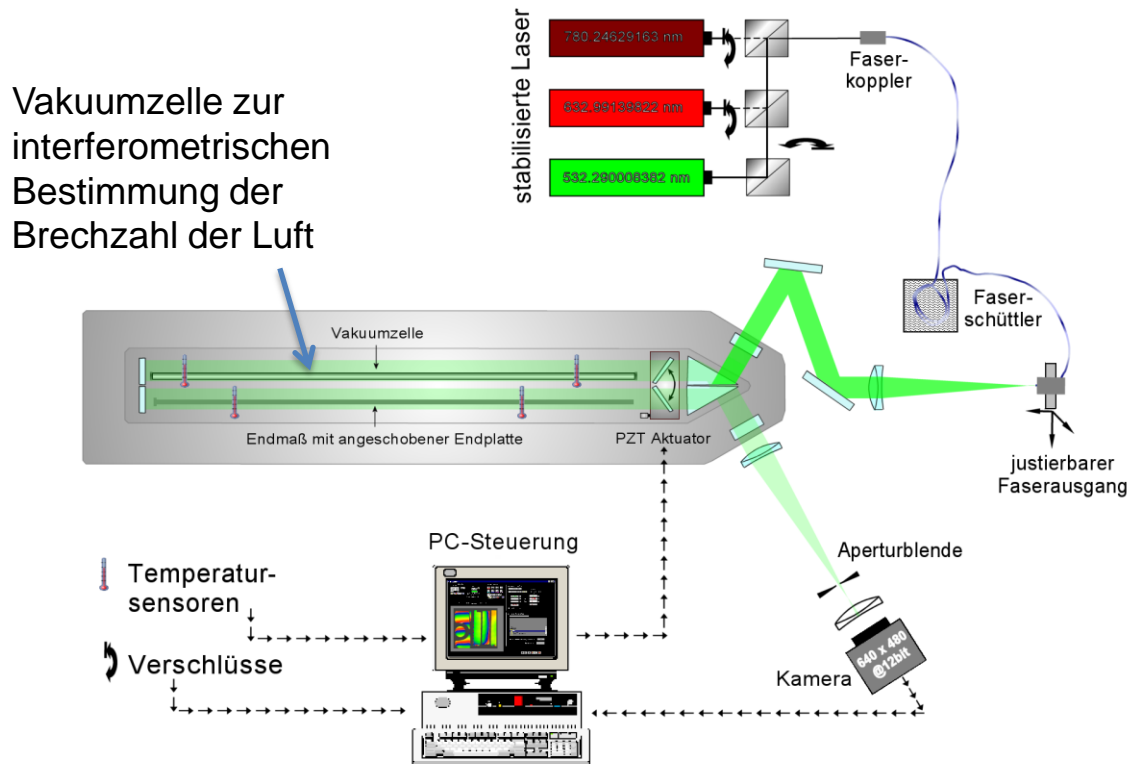
Einige spezielle Interferometer der PTB

1) Interferometer zur Primärkalibrierung von Parallelendmaßen bis 200 mm



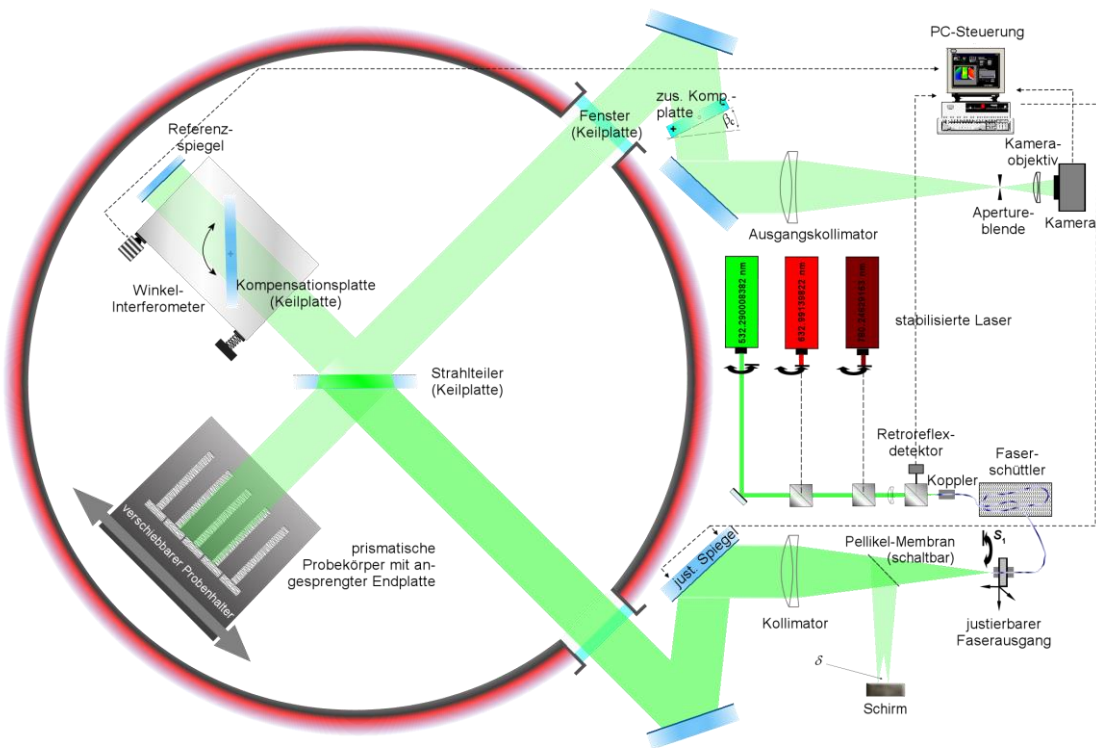
Einige spezielle Interferometer der PTB

2) Interferometer zur Primärkalibrierung von Parallelendmaßen bis 1000 mm



Einige spezielle Interferometer der PTB

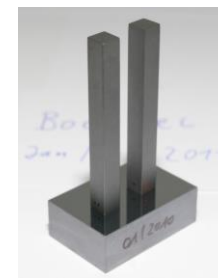
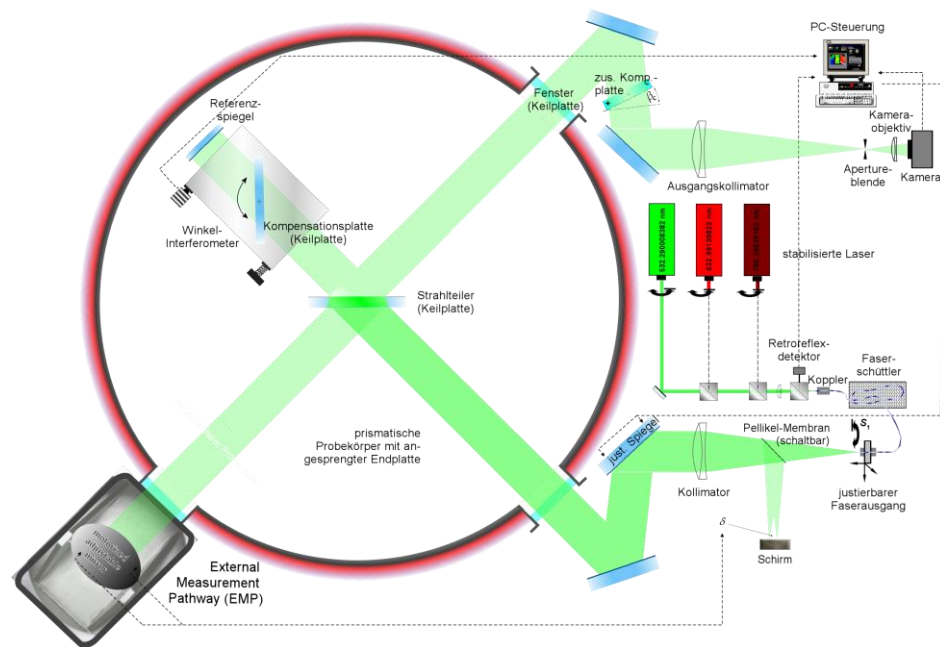
3) Das Ultra-Präzisions-Interferometer (UPI) zur Primärdarstellung von Längen im Vakuum



sub-nm genaue
Längenmessungen im
Temperaturbereich
von ca. 10°C bis 50°C

Einige spezielle Interferometer der PTB

3) Das Ultra-Präzisions-Interferometer (UPI) zur Primärdarstellung von Längen im Vakuum

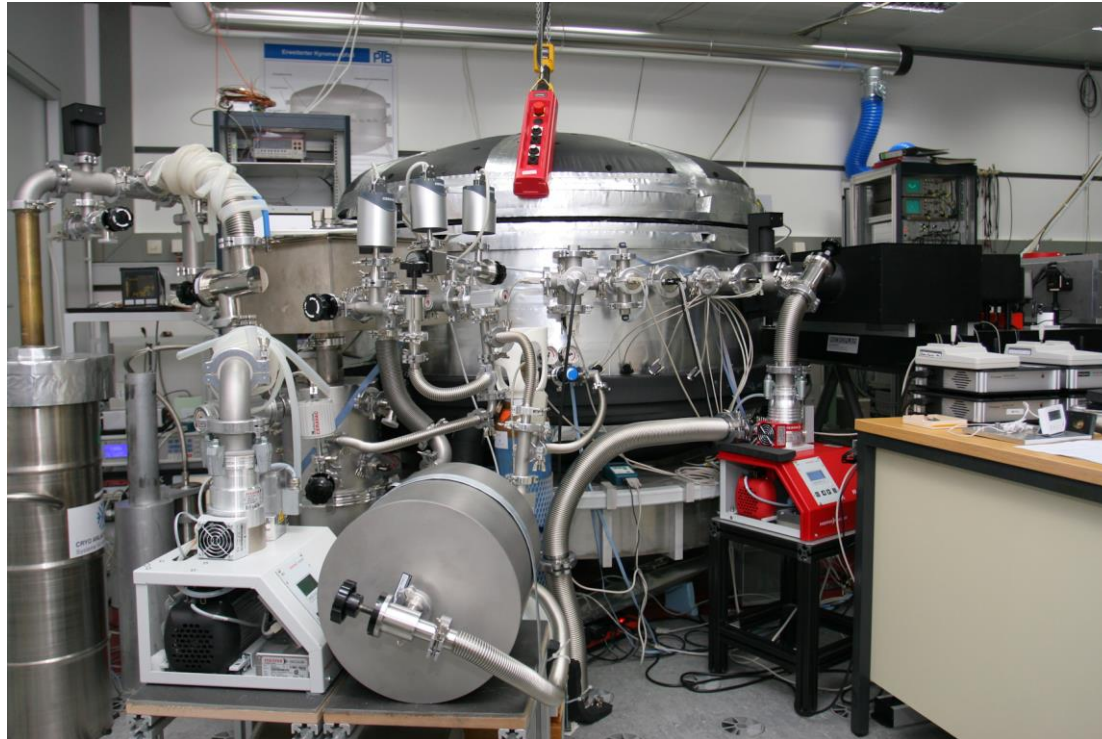


nm genaue Messung von
Längen im Temperaturbereich
von ca. -266°C bis ca. 20°C

R Schödel, A Walkov, M Zenker, G Bartl, R Meeß, D Hagedorn, C Gaiser, G Thummes and S Heltzel *A new Ultra Precision Interferometer for absolute length measurements down to cryogenic temperatures.* Meas. Sci. Technol. **23** (2012) 094004

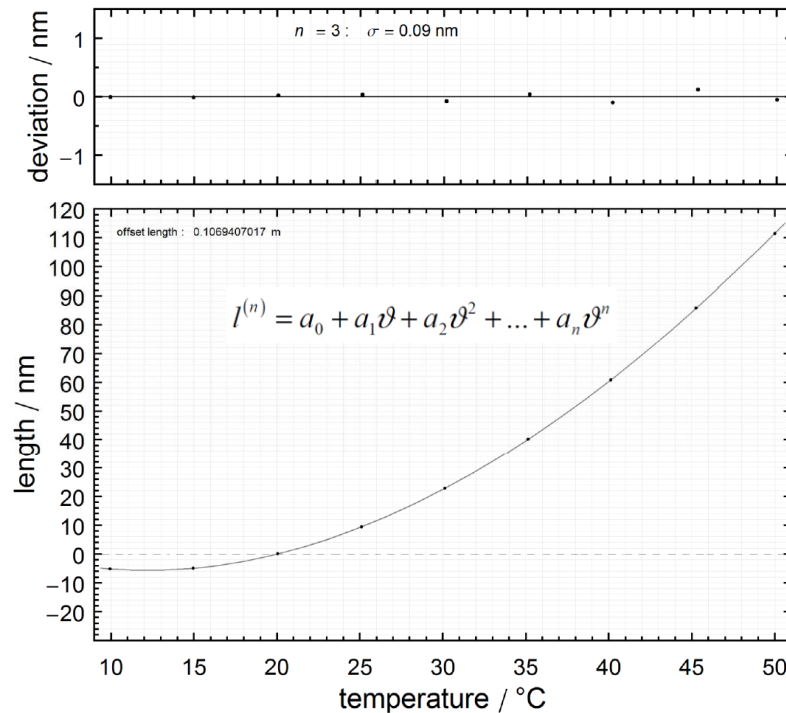
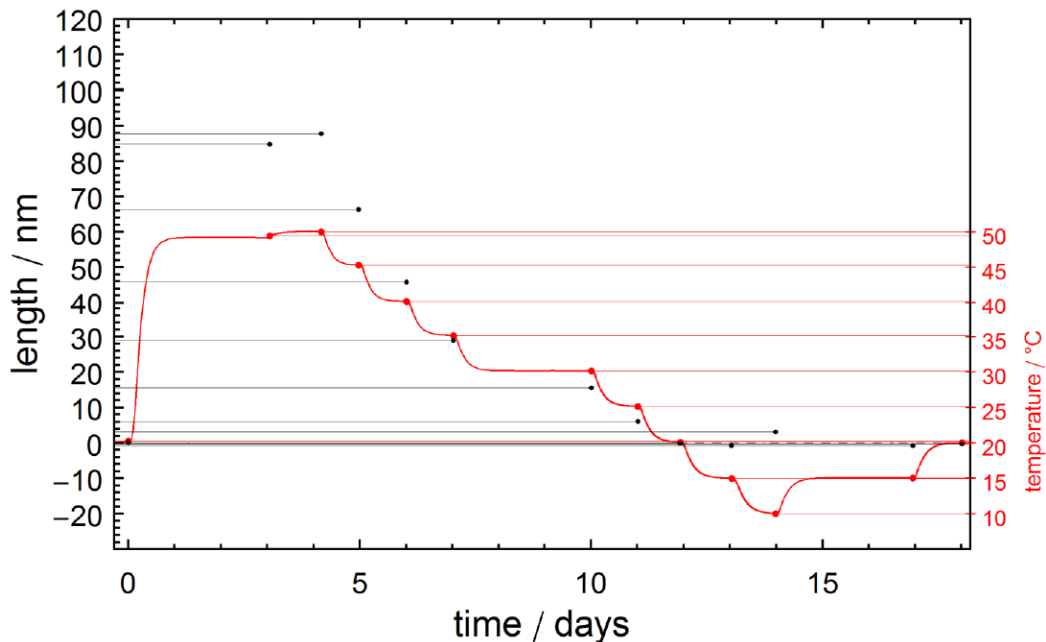
Einige spezielle Interferometer der PTB

3) Das Ultra-Präzisions-Interferometer (UPI) zur Primärdarstellung von Längen im Vakuum

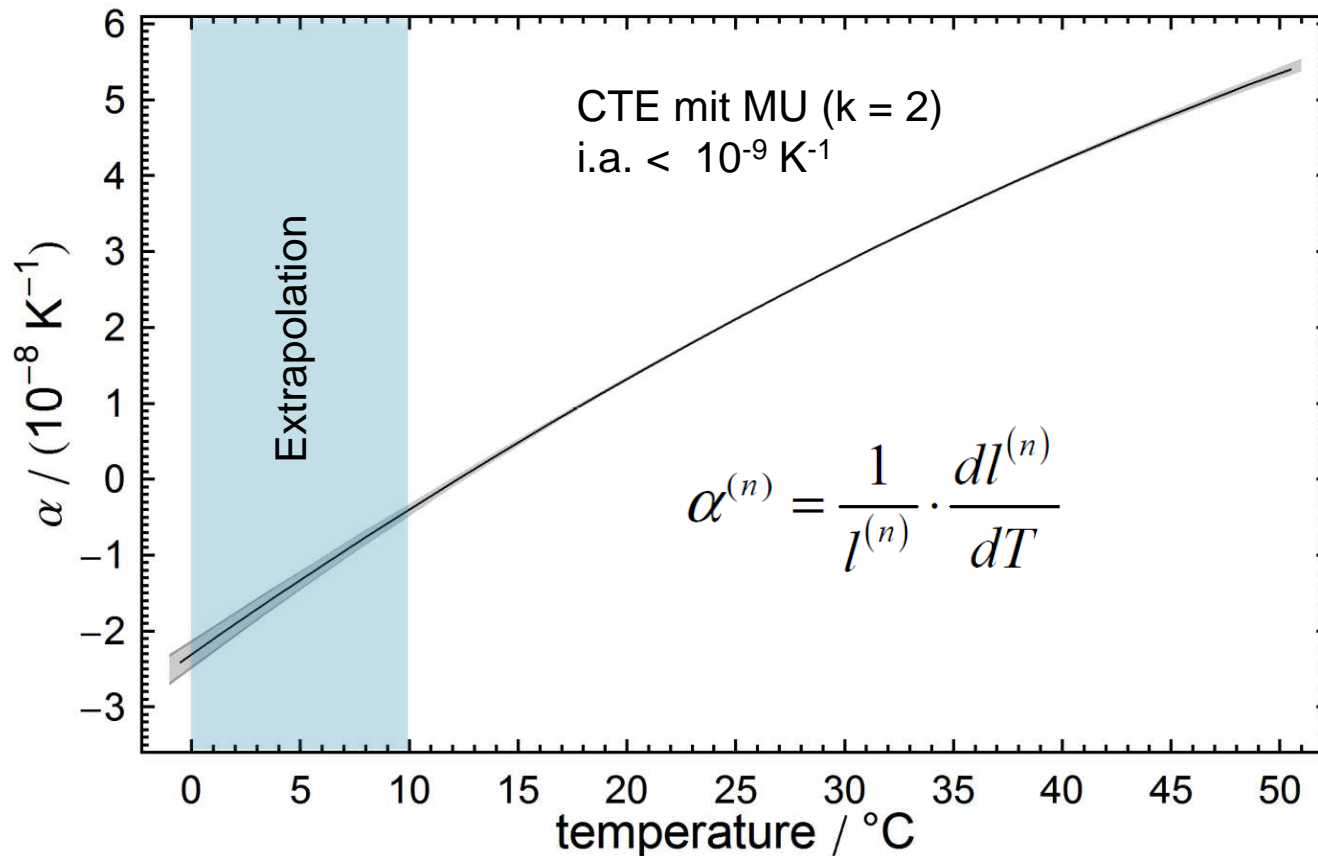


Beispiel 1: thermisches Ausdehnungsverhalten (Vakuum)

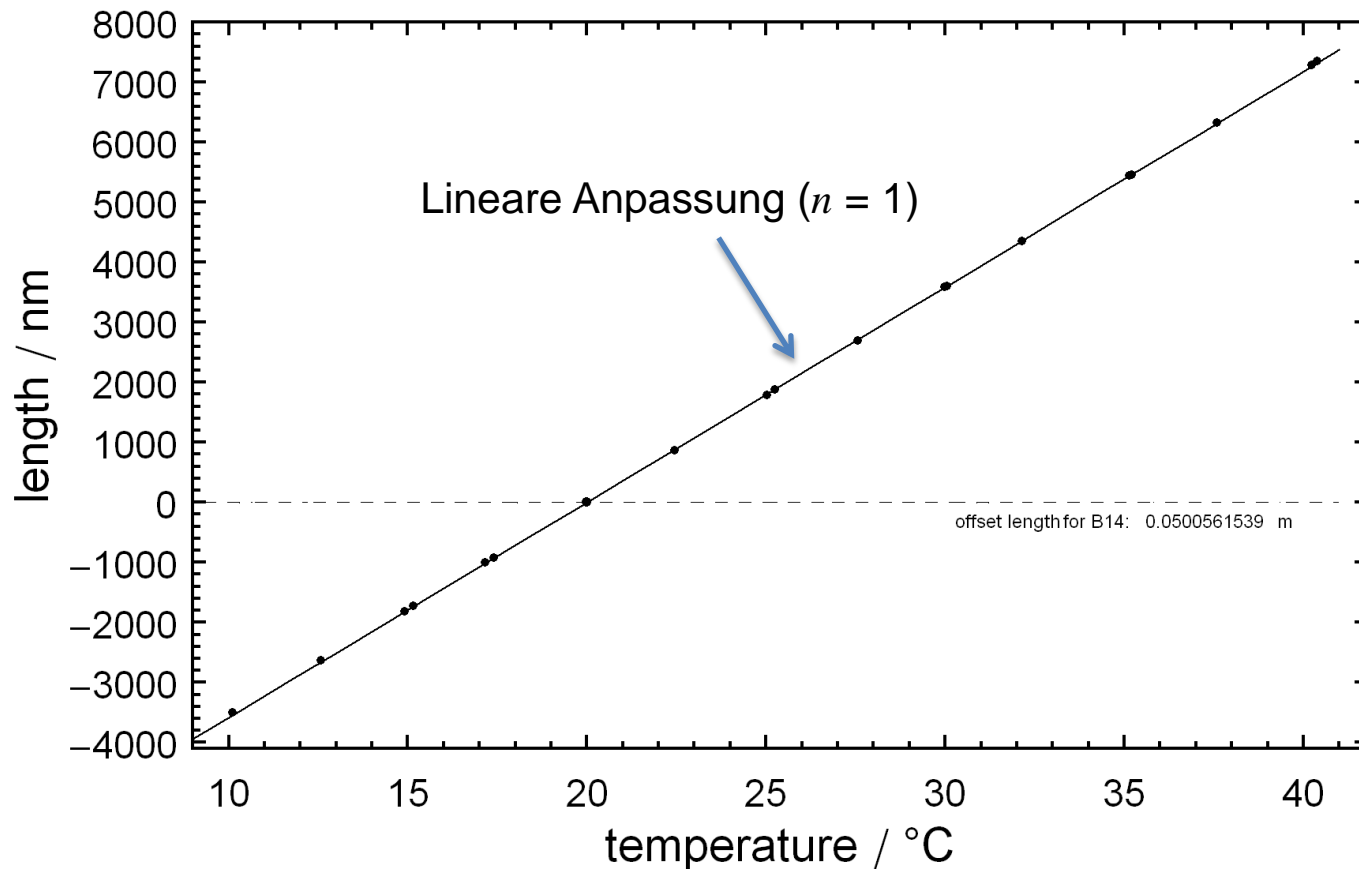
Messungen der (absoluten Länge) von Körpern als Funktion der Temperatur und Zeit



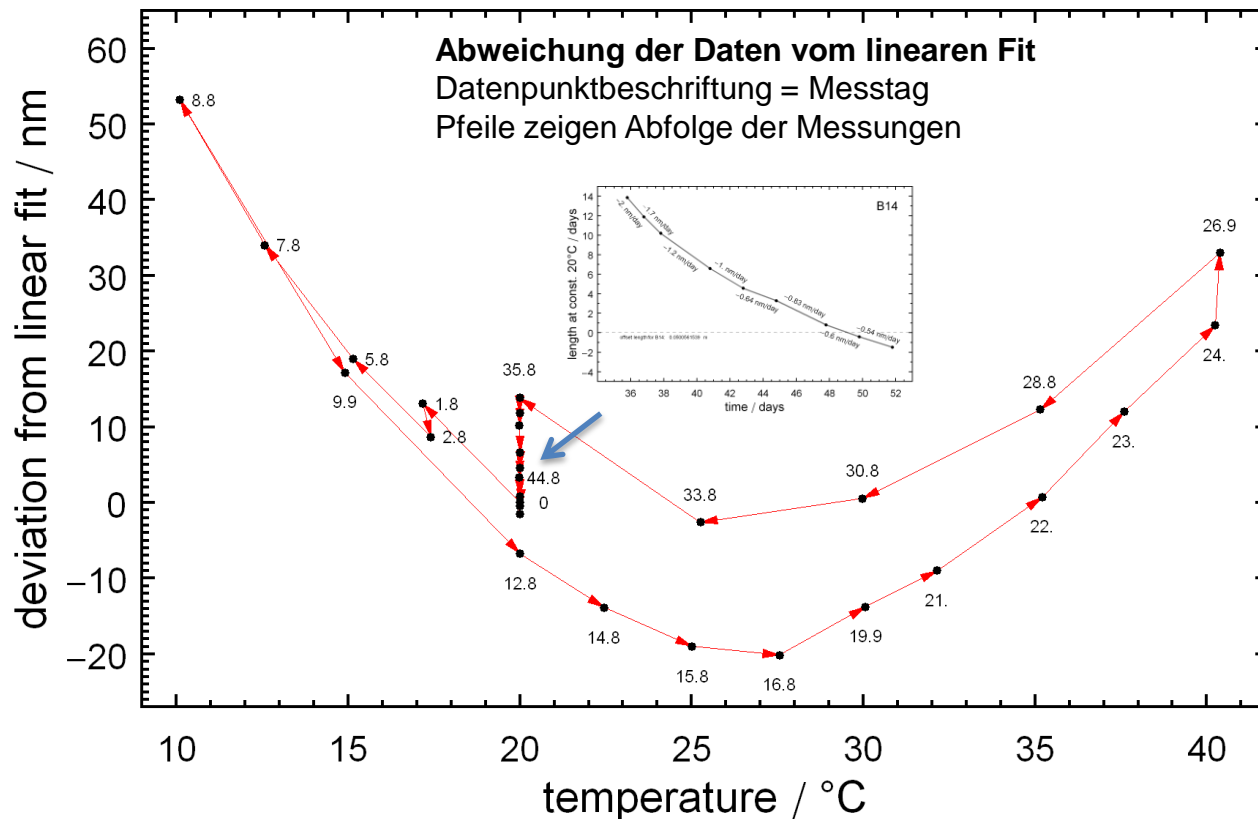
Beispiel 1: thermisches Ausdehnungsverhalten (Vakuum)



Beispiel 2: thermisches Ausdehnungsverhalten (Vakuum)

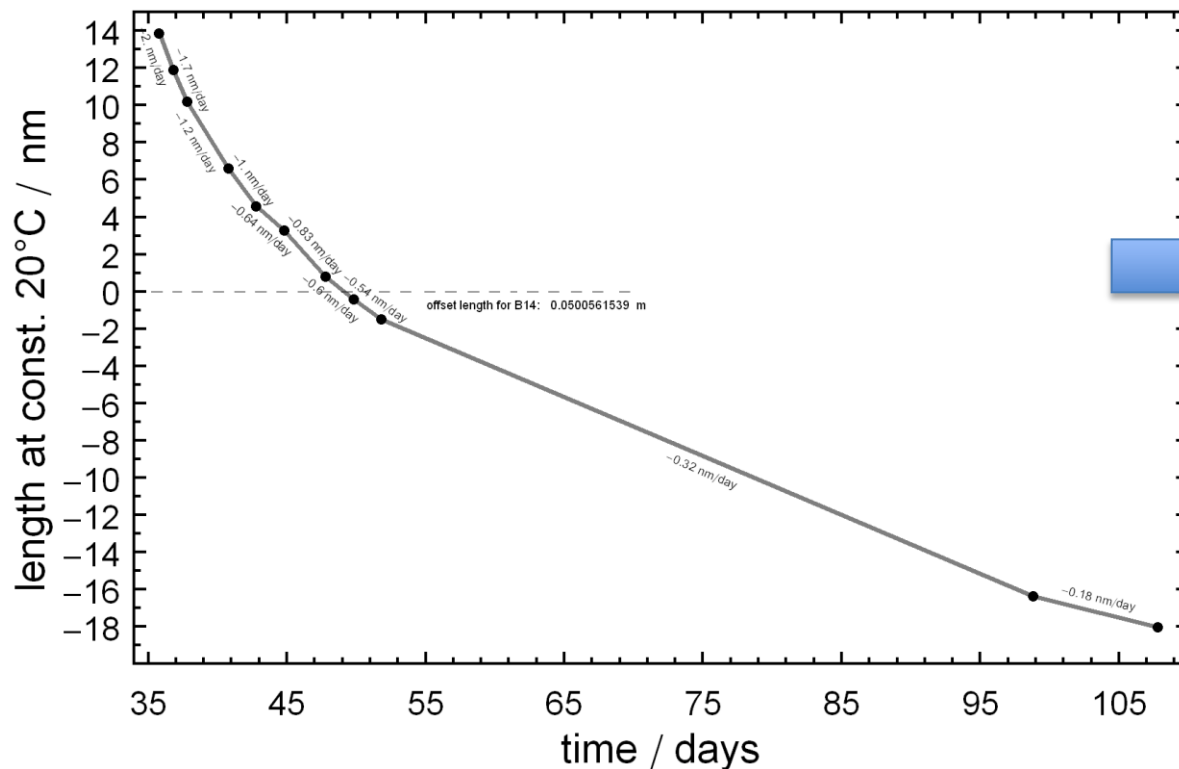


Beispiel 2: thermisches Ausdehnungsverhalten (Vakuum)



➔ „seltsam anmutendes“
 Hysterese-artiges
 Verhalten

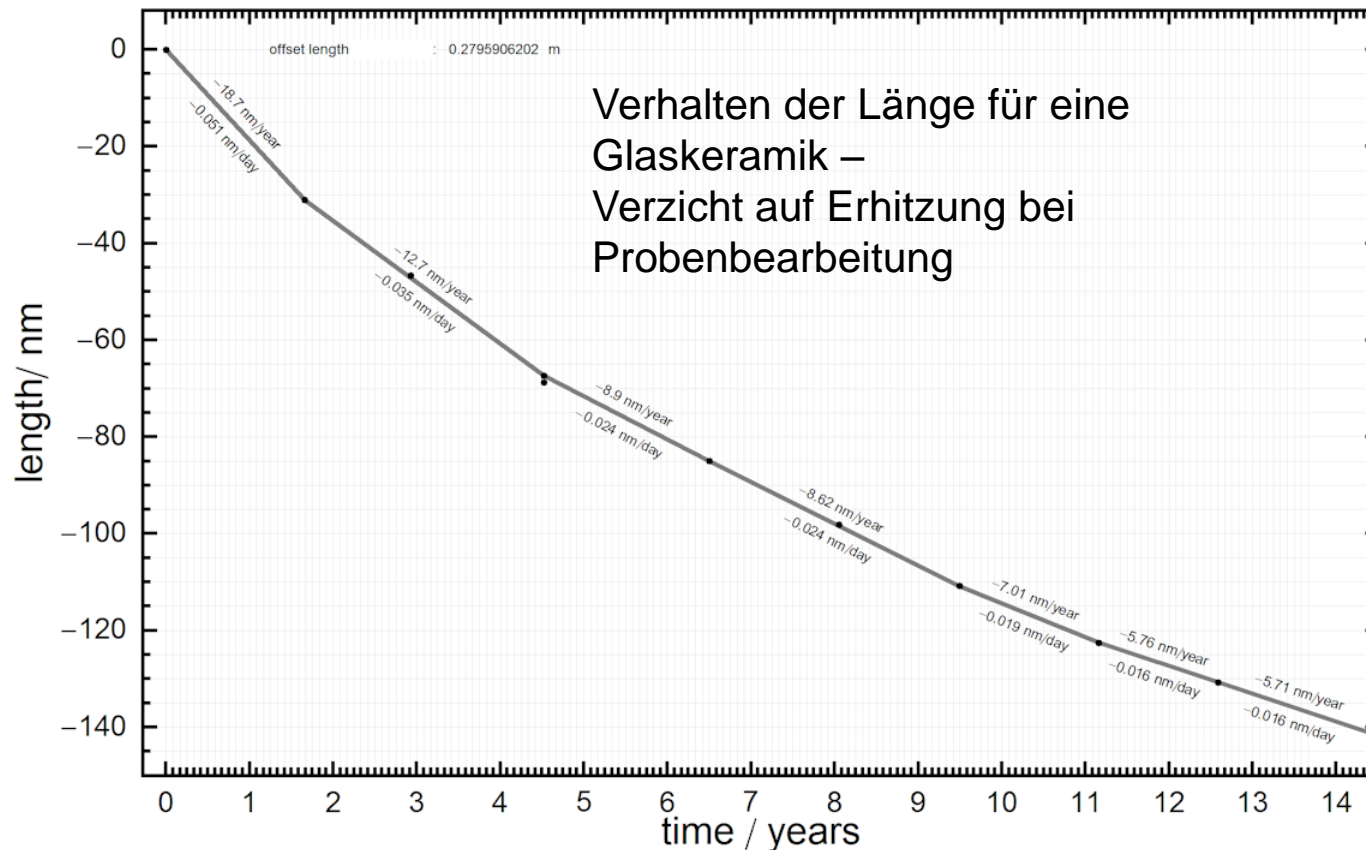
Beispiel 2: thermisches Ausdehnungsverhalten (Vakuum)



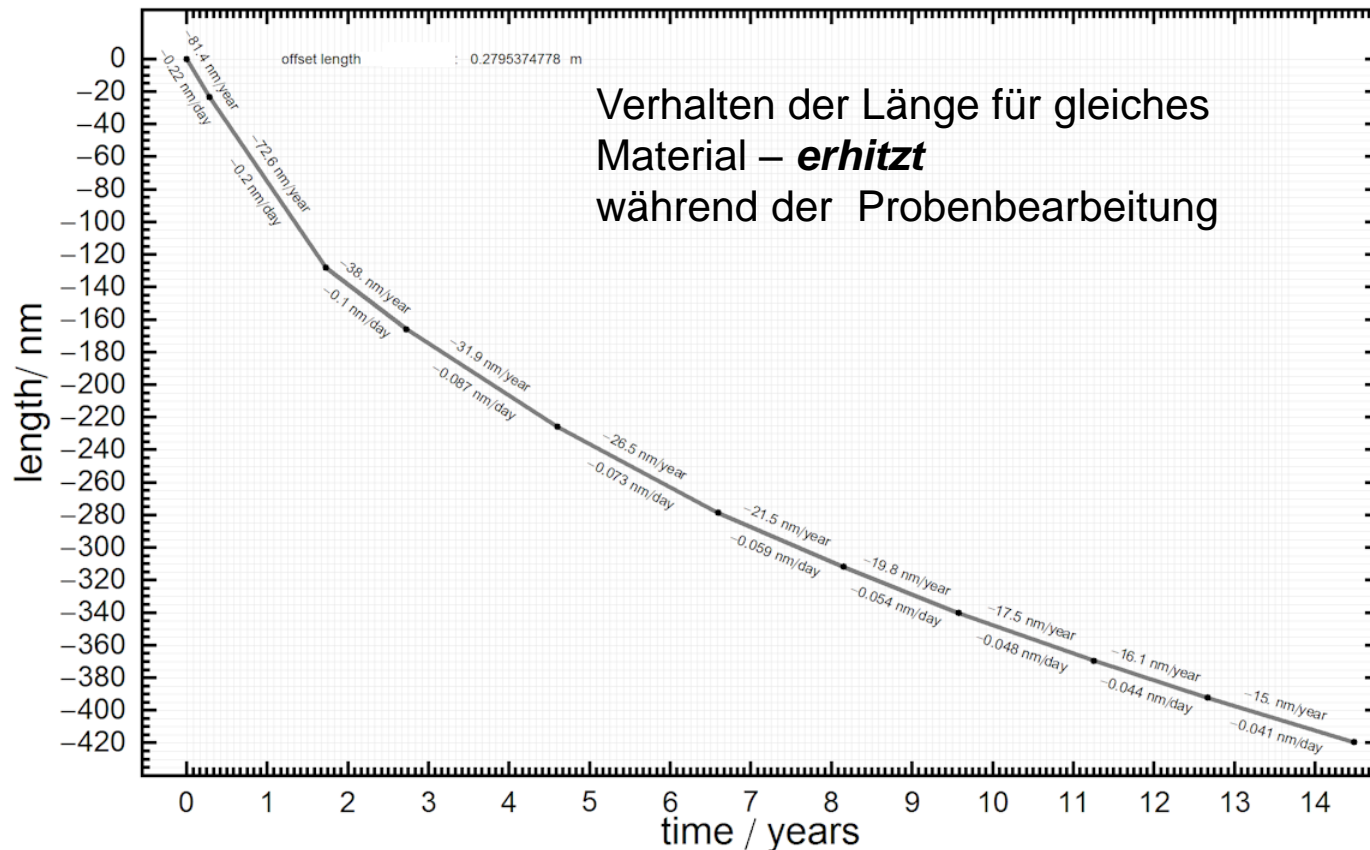
Verhalten der Länge hängt offenbar von der Temperaturvorgeschichte ab (Messzyklus, Herstellungs-/Bearbeitungsprozesse)

CTE ist, strenggenommen, **nicht definiert**

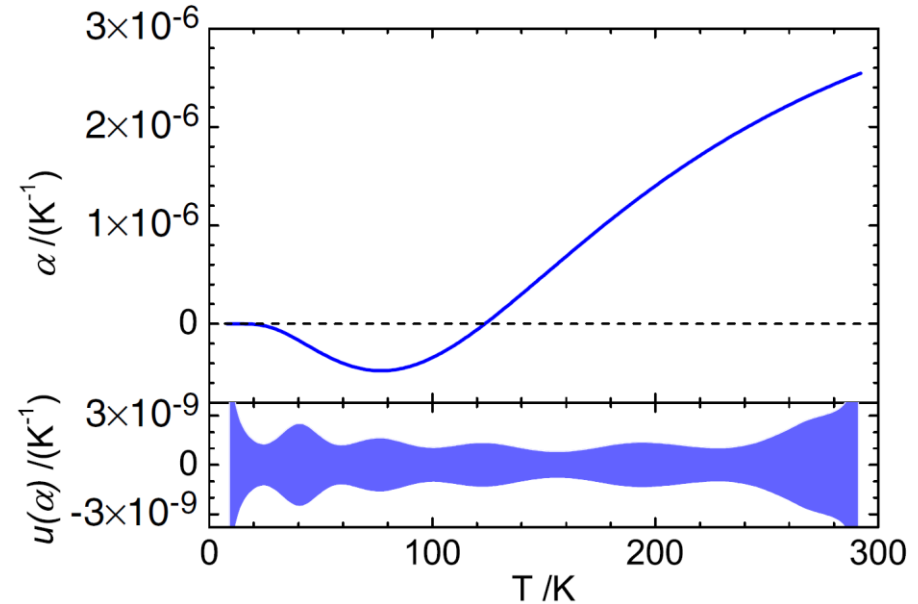
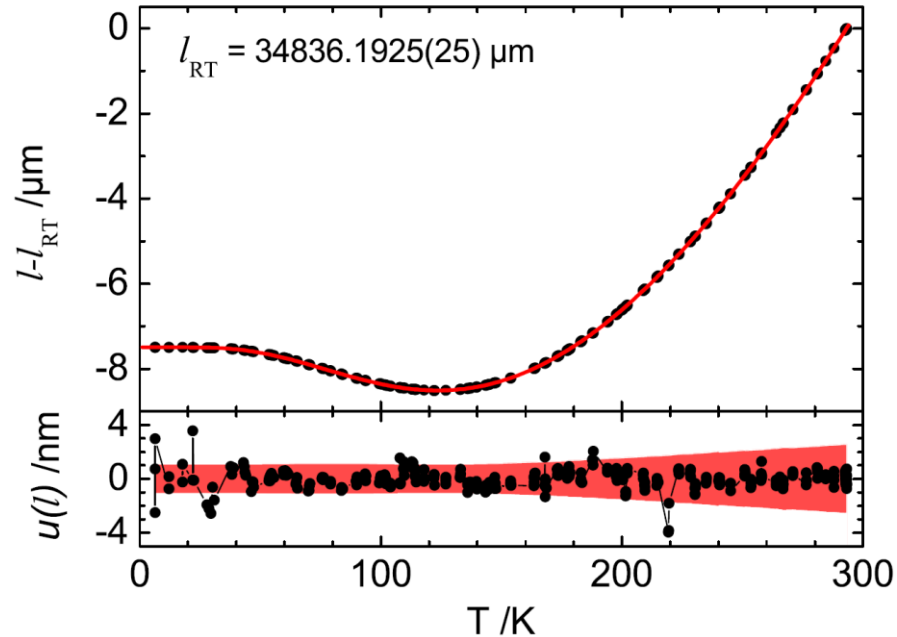
Beispiel 3: Langzeitstabilität und Einfluss der Vorgeschichte



Beispiel 3: Langzeitstabilität und Einfluss der Vorgeschichte



Beispiel 4: Silicium als CTE-Referenzmaterial neu gemessen



T Middelmann, A Walkov, G Bartl, R Schödel
Thermal expansion coefficient of single-crystal silicon from 7 K to 293 K. Phys. Rev. B **92**, 174113 (2015),



**Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin
Fachbereich 5.4**

„Interferometrie an Maßverkörperungen“

Bundesallee 100

38116 Braunschweig

www.ptb.de