



---

# SCS-Richtlinien Prüfen von Werkzeug- und Längenmessmaschinen

---

**Dokument Nr. 206.dw**

**Ausgabe Februar 2013, Rev. 02**

*Durch das Sektorkomitee "Kalibrieren" erstelltes Dokument zur Harmonisierung der Tätigkeit in Kalibrierlaboratorien.*

**INHALTSVERZEICHNIS**

1.	Anwendungsbereich .....	3
2.	Kalibrierung der Positioniergenauigkeit von Werkzeugmaschinen .....	3
2.1.	Gegenstand der Kalibrierung.....	3
2.2.	Messmittel.....	3
2.3.	Anforderungen an die zu prüfende Maschine .....	3
2.4.	Berücksichtigung des Temperatureinflusses.....	3
2.5.	Allfällige Korrekturen .....	3
2.6.	Messunsicherheit.....	4
2.7.	Zertifikat .....	4
3.	Kalibrierung der Maschinengeometrie von Werkzeugmaschinen.....	4
3.1.	Gegenstand der Kalibrierung.....	4
3.2.	Messmittel.....	4
3.3.	Anforderungen an die zu prüfende Maschine .....	4
3.4.	Berücksichtigung des Temperatureinflusses.....	4
3.5.	Allfällige Korrekturen .....	4
3.6.	Messunsicherheit.....	4
3.7.	Zertifikat .....	5
4.	Prüfung der Genauigkeit von Messmaschinen mittels Prüfkörpern .....	5
4.1.	Gegenstand der Prüfung .....	5
4.2.	Messmittel.....	5
4.3.	Anforderungen an die zu prüfende Maschine .....	5
4.4.	Berücksichtigung des Temperatureinflusses.....	5
4.5.	Allfällige Korrekturen .....	5
4.6.	Messunsicherheit.....	5
4.7.	Zertifikat .....	6
5.	Kalibrieren von Längenmessmaschinen .....	6
5.1.	Gegenstand der Kalibrierung.....	6
5.2.	Messmittel.....	6
5.3.	Messverfahren .....	6
5.3.1	Linearität des Massstabes.....	6
5.3.2	Parallelität der Taster .....	6
5.3.3	Prüfung der absoluten Genauigkeit.....	6
5.4.	Anforderungen an die zu prüfende Maschine .....	7
5.5.	Berücksichtigung des Temperatureinflusses.....	7
5.6.	Messunsicherheit.....	7
5.7.	Zertifikat .....	7
6.	Beispiel zur Ermittlung der Messunsicherheit: Positioniergenauigkeit gemessen mit Laserinterferometer .....	7
6.1.	Mathematisches Modell.....	7
6.2.	Einflussgrößen .....	8
6.2.1	Zähler des Interferometers .....	8
6.2.2	Wellenlänge.....	8
6.2.3	Brechungsindex .....	8
6.2.4	Materialtemperatur .....	8
6.2.5	Positionierwiederholbarkeit.....	9
6.2.6	Cosinus-Fehler .....	9
6.2.7	Totweg .....	9
6.2.8	Abbe-Fehler .....	9
6.3.	Messunsicherheitsbudget.....	9
6.4.	Erweiterte Messunsicherheit .....	9

## **1. Anwendungsbereich**

Die vorliegende Richtlinie gilt für die Kalibrierung oder Prüfung von Werkzeugmaschinen und Längenmessmaschinen mit Hilfe von Laserinterferometern und Massverkörperungen sowie für die Bestätigung der spezifizierten Genauigkeit von Koordinatenmessmaschinen mittels Prüfkörper. Die Anwendung dieser Richtlinie ist zwingend für alle dafür akkreditierten Kalibrierstellen, sofern nicht ausdrücklich eine andere Vereinbarung getroffen wurde.

## **2. Kalibrierung der Positioniergenauigkeit von Werkzeugmaschinen**

### **2.1. Gegenstand der Kalibrierung**

Abweichung des Sollverfahrweges (von der Maschine angezeigt bzw. programmiert) vom effektiv gefahrenen Weg. Gemessen wird parallel zur jeweiligen Maschinenachse, an einem geeigneten Ort, möglichst in der Mitte des Bearbeitungs-/Messvolumens. Die Messorte (Achse, Arbeitshöhe, Anfangspunkt) sind genau zu protokollieren.

### **2.2. Messmittel**

Laserinterferometer mit geeigneter Kompensationseinheit zur Berücksichtigung des Brechungsindex der Luft. Temperaturmessgerät mit mehreren Fühlern.

### **2.3. Anforderungen an die zu prüfende Maschine**

Aufstellung an einem geeigneten, vibrationsfreien Ort, entsprechend den Anforderungen des Herstellers. Ohne Zugluft und direkte Sonneneinstrahlung, der Messunsicherheit angepasste Temperaturverhältnisse.

Das Verhalten der Maschine muss durch je 6 kinematische Fehlerfunktionen pro Achse hinreichend gut beschrieben werden können, was Anforderungen an deren Steifigkeit, Repetierbarkeit und Spiel stellt. Dies zu beurteilen ist Sache des Prüfers.

### **2.4. Berücksichtigung des Temperatureinflusses**

Die Temperatur der Maschine wird an einem geeigneten Ort im Bearbeitungs-/Messvolumen (z.B. auf dem Spanntisch) und nach Möglichkeit auch an der Massverkörperung (Masstäbe, Spindeln...) erfasst und protokolliert. Die Messwerte des Laserinterferometers werden a priori nicht auf eine Referenztemperatur korrigiert (d.h. Anzeigegerät des Laserinterferometers ohne Materialtemperaturkorrektur). Die bei diesen Bedingungen gemessenen "Rohdaten" können zertifiziert werden. Das Zertifikat beinhaltet die Temperaturwerte und ihre Messstellen.

### **2.5. Allfällige Korrekturen**

Wird oder wurde eine Maschine auf 20 °C korrigiert, so können korrigierte Werte im Zertifikat angegeben werden. Es soll klar vermerkt werden, dass es sich um rechnerisch ermittelte Werte handelt; ebenso soll die dazu verwendete Berechnungsmethode angegeben werden (z.B. dass man um den Betrag des Unterschiedes der Tischtemperatur zu 20 °C mit dem für die Masstäbe angenommenen Ausdehnungskoeffizienten von ... korrigiert hat). Es soll klar zum Ausdruck kommen, dass diese Umrechnung hypothetisch ist und nach bestem Wissen erfolgte. Die angegebene Unsicherheit für die korrigierten Werte richtet sich nach den jeweiligen Umständen (v.a. Temperaturverhältnisse im Raum, Temperaturgradienten in der Maschine).

## 2.6. Messunsicherheit

Die Ermittlung der Messunsicherheit erfolgt durch die Kalibrierstelle nach der EA-Richtlinie EA4/02. Als Grundlage können das im Kapitel 6 erarbeitete Beispiel dienen. Es berücksichtigt die herrschenden Temperaturverhältnisse.

## 2.7. Zertifikat

Zertifiziert werden **Messresultate**, ev. allfällig daraus berechnete Grössen, falls die Art der Berechnung angegeben wird. Ein Schluss auf eine allgemeine Bearbeitungs- oder Messgenauigkeit ist **nicht** zulässig, da das Zusammenspiel der einzelnen Fehlerfunktionen sowie das Werkzeug bzw. der Tastkopf nicht berücksichtigt werden. Das Zertifikat enthält zudem die relevanten Temperaturwerte sowie deren Messstellen.

## 3. Kalibrierung der Maschinengeometrie von Werkzeugmaschinen

### 3.1. Gegenstand der Kalibrierung

Geradheitsabweichung und rotatorische Abweichungen (Kipp- und Rollbewegungen) der Führungen, sowie die Rechtwinkligkeit der Achsen zueinander, gemessen an geeigneter Stelle in der Mitte des Bearbeitungs-/ Messvolumens.

### 3.2. Messmittel

Für die Geradheit:

Geradheitsinterferometer (ev. Fluchtfernrohr).

Für die rotatorischen Abweichungen:

Elektronische Neigungsmesser, Winkelinterferometer, Autokollimationsfernrohr, elektronische Neigungsmesser.

Für die Rechtwinkligkeit:

Optisches Rechtwinkelprisma zusammen mit Autokollimator oder Laserinterferometer, Rechtwinkligkeitsverkörperung.

### 3.3. Anforderungen an die zu prüfende Maschine

Aufstellung an einem geeigneten, vibrationsfreien Ort, entsprechend den Anforungen des Herstellers. Ohne Zugluft und direkte Sonneneinstrahlung, der Messunsicherheit angepasste Temperaturverhältnisse.

Das Verhalten der Maschine muss durch je 6 kinematische Fehlerfunktionen pro Achse hinreichend gut beschrieben werden können, was Anforderungen an deren Steifigkeit, Repetierbarkeit und Spiel stellt. Dies zu beurteilen ist Sache des Prüfers.

### 3.4. Berücksichtigung des Temperatureinflusses

Die Temperatur der Maschine muss an geeigneten Stellen erfasst und protokolliert werden.

### 3.5. Allfällige Korrekturen

Die Messwerte dürfen nicht korrigiert werden. Die Maschine kann in numerisch korrigiertem Zustand geprüft werden. Dies soll auf dem Zertifikat vermerkt werden.

### 3.6. Messunsicherheit

Die Ermittlung der Messunsicherheit erfolgt durch die Kalibrierstelle nach der EA-Richtlinie EA4/02. Sie berücksichtigt die herrschenden Temperaturverhältnisse.

### 3.7. Zertifikat

Zertifiziert werden nur **Messresultate**. Ein Schluss auf eine allgemeine Bearbeitungs- oder Messgenauigkeit ist **nicht** zulässig, da das Zusammenspiel der einzelnen Fehlerfunktionen sowie das Werkzeug bzw. der Tastkopf nicht berücksichtigt werden. Das Zertifikat enthält zudem die relevanten gemessenen Temperaturwerte sowie deren Messstellen.

## 4. Prüfung der Genauigkeit von Messmaschinen mittels Prüfkörpern

### 4.1. Gegenstand der Prüfung

Die zu prüfende Messmaschine misst die Dimensionen/Form- und Lageabweichungen von Prüfkörpern im Vergleich zu deren Istwert, wie er aus dem Kalibrierzertifikat der Prüfkörper hervorgeht.

Beispiele: ISO 10360-2, "CMMA Test", VDI/VDE-Richtlinie 2617, ANSI/ASME B89.1.12M-1990.

### 4.2. Messmittel

Endmasse, Stufenendmasse, Kreisnormal, Kugelplatte, Kugelstange. Der Prüfkörper muss von einer akkreditierten Stelle kalibriert sein. Allfällige Aufspannvorrichtungen sind Teile der Prüfkörper und somit ebenfalls der Kalibrierung unterworfen.

### 4.3. Anforderungen an die zu prüfende Maschine

Aufstellung an einem geeigneten, vibrationsfreien Ort, entsprechend den Anforderungen des Herstellers. Ohne Zugluft und direkte Sonneneinstrahlung, der Messunsicherheit angepasste Temperaturverhältnisse.

Das Verhalten der Maschine muss durch je 6 kinematische Fehlerfunktionen pro Achse hinreichend gut beschrieben werden können, was Anforderungen an deren Steifigkeit, Repetierbarkeit und Spiel stellt. Dies zu beurteilen ist Sache des Prüfers.

### 4.4. Berücksichtigung des Temperatureinflusses

Die Temperatur der Maschine und des Prüfkörpers muss an geeigneten Stellen erfasst und protokolliert werden.

### 4.5. Allfällige Korrekturen

Die Messwerte dürfen nicht korrigiert werden. Die Referenzwerte des Prüfkörpers werden auf die tatsächlich herrschende Temperatur korrigiert. Die Maschine kann in numerisch korrigiertem Zustand geprüft werden. Dies soll auf dem Zertifikat vermerkt werden.

### 4.6. Messunsicherheit

Es wird keine Messunsicherheit angegeben (gegeben durch die Messunsicherheit der zu prüfenden Maschine selbst). Die Messunsicherheit der Kalibrierung der Prüfkörper muss im Zertifikat erwähnt werden.

## 4.7. Zertifikat

Das Zertifikat enthält die Messresultate, die vom Hersteller spezifizierten Grenzwerte sowie die Norm, nach der der Hersteller die Spezifikationen angibt. Das Zertifikat kann auch eine Konformitätsaussage enthalten, nach der die Einhaltung der Spezifikationen bestätigt oder allenfalls widerlegt wird, sofern der Test unter genauer Einhaltung des normierten Verfahrens und der spezifizierten Betriebsbedingungen erfolgt ist. Bei einer Konformitätsaussage ist die Unsicherheit der kalibrierten Werte der Normale zu berücksichtigen. Anstelle von Herstellerspezifikationen können andere Spezifikationen und Verfahren verwendet werden, falls dies mit dem Auftraggeber so vereinbart wurde. Die Messstrategie muss, soweit relevant, beschrieben werden. Das Zertifikat enthält zudem die relevanten gemessenen Temperaturwerte sowie deren Messstellen. Ein Schluss auf eine allgemeine Genauigkeit der untersuchten Messmaschine ist **nicht** zulässig.

## 5. Kalibrieren von Längenmessmaschinen

### 5.1. Gegenstand der Kalibrierung

Die Kalibrierung einer Längenmessmaschine umfasst die interferometrische Messung der Linearität des Massstabes, die Prüfung der absoluten Genauigkeit mit Hilfe von Endmassen, sowie die Messung der Parallelität der Taster.

### 5.2. Messmittel

Laserinterferometer mit geeigneter Kompensationseinheit zur Berücksichtigung des Brechungsindex der Luft; kalibrierte Endmasse (10 mm, 1/3, 2/3 und 3/3 des Messbereiches); Präzisionskugel mit der Messkraft angepasstem Durchmesser.

### 5.3. Messverfahren

#### 5.3.1 Linearität des Massstabes

Das Laserinterferometer wird koaxial zur Messachse der Längenmessmaschine ausgerichtet, das Interferometer nach Möglichkeit an Stelle des festen Tasters, der Reflektor am beweglichen Taster des Messschlittens montiert. Gemessen wird in Intervallen von höchstens 10 mm. Falls aus konstruktiven Gründen das Abbe-Prinzip während der interferometrischen Messung verletzt wird, muss zusätzlich die Kippbewegung des Schlittens gemessen werden, um die daraus entstehende Messunsicherheit abschätzen zu können.

#### 5.3.2 Parallelität der Taster

Die Parallelität der Taster wird durch Messung des Durchmessers einer Präzisionskugel an verschiedenen Orten zwischen den Flachtastern bestimmt. Der Ort des Schlittens bleibt dabei fest, gemessen wird mit der Anzeige des Tastsystems.

#### 5.3.3 Prüfung der absoluten Genauigkeit

Die Prüfung der absoluten Genauigkeit ist nur mit Massverkörperungen (z.B. Endmassen) zuverlässig möglich, da nur so das Tastsystem einbezogen wird. Dazu ist das vom Hersteller der Messmaschine empfohlene Zubehör zu verwenden (in der Regel 1 Flachtaster und 1 Kugeltaster oder 2 Kugeltaster).

## 5.4. Anforderungen an die zu prüfende Maschine

Aufstellung an einem geeigneten, vibrationsfreien Ort, entsprechend den Anforderungen des Herstellers. Ohne Zugluft und direkte Sonneneinstrahlung, der Messunsicherheit angepasste Temperaturverhältnisse.

Es ist Sache des Prüfers zu beurteilen, ob die Messmaschine die notwendigen Anforderungen an Steifigkeit, Repetierbarkeit und Spiel erfüllt.

## 5.5. Berücksichtigung des Temperatureinflusses

Die Kalibrierung darf nur bei guten Laborbedingungen durchgeführt werden (in der Regel  $(20 \pm 0.5) \text{ }^\circ\text{C}$ ). Für die interferometrische Messung wird die Materialkompensation des Lasers entweder auf die Massstabtemperatur oder die Temperatur eines der Taster eingestellt, wobei der thermische Ausdehnungskoeffizient des Massstabes zu berücksichtigen ist. Die Temperaturmessstelle ist zu protokollieren. Weist die interferometrische Messung einen Proportionalitätsfehler (Steigung) auf, so kann dieser zur Berechnung des Linearitätsfehlers des Massstabes auf Null korrigiert werden.

Bei der Prüfung mit Endmassen ist die Endmasstemperatur für dessen Istmass zu messen und zu berücksichtigen.

## 5.6. Messunsicherheit

Die Ermittlung der Messunsicherheit erfolgt durch die Kalibrierstelle nach der EA-Richtlinie EA4/02. Für die Linearitätsmessung kann als Grundlage das im Kapitel 6 erarbeitete Beispiel dienen. Für die Endmassmessung ist die Messunsicherheit gegeben durch die Unsicherheit der Kalibrierung der Endmasse, die Auflösung und die Repetierbarkeit der Messmaschine, die Ebenheit der Taster sowie die herrschenden Temperaturverhältnisse.

## 5.7. Zertifikat

Das Zertifikat enthält sämtliche Messwerte sowie eine globale Aussage über die Abweichung von der Linearität des Massstabes und die Abweichung von der Parallelität der Taster. Zudem sind die relevanten gemessenen Temperaturwerte sowie deren Messstellen anzugeben.

## 6. Beispiel zur Ermittlung der Messunsicherheit: Positioniergenauigkeit gemessen mit Laserinterferometer

### 6.1. Mathematisches Modell

Die mit einem Laserinterferometer gemessene Wegstrecke  $L_x$  lässt sich durch ein gemessenes Vielfaches  $N$  der Wellenlänge  $\lambda$  beschreiben, korrigiert durch den vom Kompensationsgerät gemessenen Brechungsindex  $n$  und unter Berücksichtigung einer Materialtemperaturkorrektur. Weitere Korrekturterme tragen dem Ausrichtfehler (cos-Fehler), dem Totweg („dead path“) und dem Abbe-Fehler Rechnung:

$$L_x = N \frac{\lambda}{n} - \alpha \cdot L \cdot t_m + \delta L_{rep} + \delta L_{\cos} + \delta L_{dp} + \delta L_{Abbe}$$

wobei:

$L_x$	gemessene Wegstrecke
$N$	Anzahl Wellenlängen, die vom Interferometer gezählt wurden
$\lambda$	Vakuumwellenlänge des Lasers
$n$	Brechungsindex der Luft
$\alpha$	thermischer Ausdehnungskoeffizient der Maschinenmassstäben der für die Temperaturkorrektur berücksichtigt wurde
$t_m$	Abweichung der Materialtemperatur $T_m$ von den Bezugsbedingungen 20°C: $t_m = T_m - 20 \text{ °C}$
$\delta L_{rep}$	Korrektur infolge der Positionierwiederholbarkeit der gerühten Maschine
$\delta L_{cos}$	cosinus-Korrektur
$\delta L_{dp}$	Korrektur des Totweges
$\delta L_{Abbe}$	Korrektur des Abbefehlers

## 6.2. Einflussgrößen

### 6.2.1 Zähler des Interferometers

Die Auflösung des Zählers des Interferometers beträgt  $\lambda/64$ , was bei einer Wellenlänge von 633 nm einer maximalen Auflösung von 10 nm entspricht. In der Praxis wird in der Regel mit der Anzeigauflösung von 0.1  $\mu\text{m}$  gearbeitet, was einer Standardunsicherheit von  $50 \text{ nm}/\sqrt{3} = 29 \text{ nm}$ .

### 6.2.2 Wellenlänge

Die Unsicherheit der Kalibrierung der Vakuumwellenlänge des Lasers beträgt  $10^{-9}\lambda$ , die vom Hersteller spezifizierte Stabilität dieser Wellenlänge während des 2-jährigen Kalibrierintervalls beträgt  $10^{-8}\lambda$ , was rechteckverteilt eine Standardunsicherheit von  $6 \cdot 10^{-9}\lambda$  ergibt.

### 6.2.3 Brechungsindex

Der Brechungsindex der Luft wird durch eine Kompensationseinheit, die Luftdruck und Lufttemperatur misst, bestimmt. Für die Messung der Lufttemperatur wird eine Standardunsicherheit von 0.3 °C angenommen, die die Unsicherheit der Kalibrierung des Luftfühlers miteinschliesst. Die Messung des Luftdruckes erfolgt mit einer Standardunsicherheit von 0.5 hPa. Für die relative Feuchte wird ein fester Wert von 50% angenommen, mit einer Standardabweichung von 10%. Die Empfindlichkeitskoeffizienten für Lufttemperatur, Luftdruck und Feuchte ergeben sich aus der Edlén'schen Formel und betragen:

$$c_t = -9.2 \cdot 10^{-7} \text{ °C}^{-1}$$

$$c_p = 2.7 \cdot 10^{-7} (\text{hPa})^{-1}$$

$$c_{rH} = 10^{-8} (\%rH)^{-1}$$

### 6.2.4 Materialtemperatur

Die maximale Abweichung der Materialtemperatur von 20 °C beträgt  $\pm 3 \text{ °C}$ , rechteckverteilt, was einer Standardabweichung von 1.7 °C entspricht. Die Messresultate werden auf 20 °C korrigiert, wobei ein Ausdehnungskoeffizient von  $(11.5 \pm 1) \cdot 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$  angenommen wird. Die Standardunsicherheit der Materialtemperaturmessung inklusive Unsicherheit der Kalibrierung der Fühler beträgt 0.2 °C.



## 6.2.5 Positionierwiederholbarkeit

Die Positionierwiederholbarkeit der geprüften Maschine wird als Anteil an die Messunsicherheit für die Positionsabweichung an einem Punkt genommen und beträgt 1.3  $\mu\text{m}$ .

## 6.2.6 Cosinus-Fehler

Die Ausrichtung des Laserstrahls zur Bewegungsrichtung der Maschine ist besser als 1 mm auf 500 mm Verfahrweg, was einen maximalen cos-Fehler von  $(1/2)(1/500)^2$  erzeugt und rechteckverteilt einer Standardunsicherheit von  $1.15 \cdot 10^{-6} \cdot L$  entspricht.

## 6.2.7 Totweg

Der Totweg ist die optische Wegstrecke zwischen Interferometer und Reflektor bei der Ausgangsposition (Null) des Schlittens. Änderungen des Brechungsindex und der Materialtemperaturkorrektur während der Messzeit geben Anlass zu nichtkompensierten Driften. Durch geeignete Anordnung des Messaufbaus wird dieser Totweg minimal gehalten und kann somit vernachlässigt werden.

## 6.2.8 Abbe-Fehler

Die Positioniergenauigkeit wird im Messvolumen und nicht auf den Massstäben geprüft. Die Messresultate gelten deshalb nur für den geprüften Ort, nicht im ganzen Messvolumen und nicht auf den Massstäben. Es muss keine Abbe-Fehler-Korrektur berücksichtigt werden.

## 6.3. Messunsicherheitsbudget

Messgröße $x_i$	Std.unsicherheit $u(x_i)$	Empfindl.koeff. $c_i$	Beitrag zur Messunsicherheit	
			$u_i(y)$ konst.	$u_i(y)$ prop. zu $L$
$N$	0.03 $\mu\text{m}$	1	0.03 $\mu\text{m}$	
$\lambda$	$6 \cdot 10^{-9} \lambda$	$L$		$0.006 \cdot 10^{-6} L$
$t_l$	0.3 $^{\circ}\text{C}$	$-9.2 \cdot 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot L$		$0.28 \cdot 10^{-6} L$
$p_l$	0.5 hPa	$2.7 \cdot 10^{-7} \text{ hPa}^{-1} \cdot L$		$0.13 \cdot 10^{-6} L$
$rH$	10%	$10^{-8} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot L$		$0.10 \cdot 10^{-6} L$
$t_m$	0.2 $^{\circ}\text{C}$	$11.5 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot L$		$2.3 \cdot 10^{-6} L$
$\alpha$	$10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	$1.7 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot L$		$1.7 \cdot 10^{-6} L$
$\delta L_{rep}$	1.4 $\mu\text{m}$	1	1.4 $\mu\text{m}$	
$\delta L_{cos}$	1/500	-		$1.15 \cdot 10^{-6} \cdot L$
<b>Kombinierte Standardunsicherheit <math>u_c</math></b>			<b>1.4 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b><math>3.1 \cdot 10^{-6} L</math></b>

## 6.4. Erweiterte Messunsicherheit

Die mit  $k = 2$  erweiterte Messunsicherheit beträgt:

$$U = \sqrt{(2.8 \mu\text{m})^2 + (6.2 \cdot 10^{-6} \cdot L)^2} \approx 2.8 \mu\text{m} + 6.2 \cdot 10^{-6} \cdot L$$