

---

# Laborversuch

## Regelung einer magnetischen Aufhängung

Thierry Prud'homme  
thierry.prudhomme@hslu.ch

Modul: MRT+A

---

### Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Problemstellung</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Modellierung</b>	<b>3</b>
3.1	Die Modellbildung der Strecke . . . . .	4
3.2	Die Modellbildung der statischen Vorsteuerung . . . . .	5
3.3	Die Modellbildung des Stellglieds . . . . .	5
3.4	Die Modellbildung des Sensors . . . . .	6
<b>4</b>	<b>SPS Programmieren</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>Parameteridentifikation und Nullpunktaufnahme</b>	<b>8</b>
5.1	Nullpunktaufnahme . . . . .	8
5.2	Parameteridentifikation . . . . .	8
<b>6</b>	<b>Reglerentwurf</b>	<b>8</b>
<b>7</b>	<b>Die Versuchsdurchführung</b>	<b>10</b>
<b>A</b>	<b>Elektromagnet</b>	<b>11</b>
<b>B</b>	<b>Distanzsensor</b>	<b>12</b>

### Abbildungsverzeichnis

1	Bild der magnetische Aufhängung . . . . .	2
2	Wirkungsplan des Regelkreises . . . . .	3
3	Vereinfachte Darstellung der Strecke . . . . .	4

# 1 Einführung

Ein Bild des Versuches ist in der Abbildung 1 zu sehen.

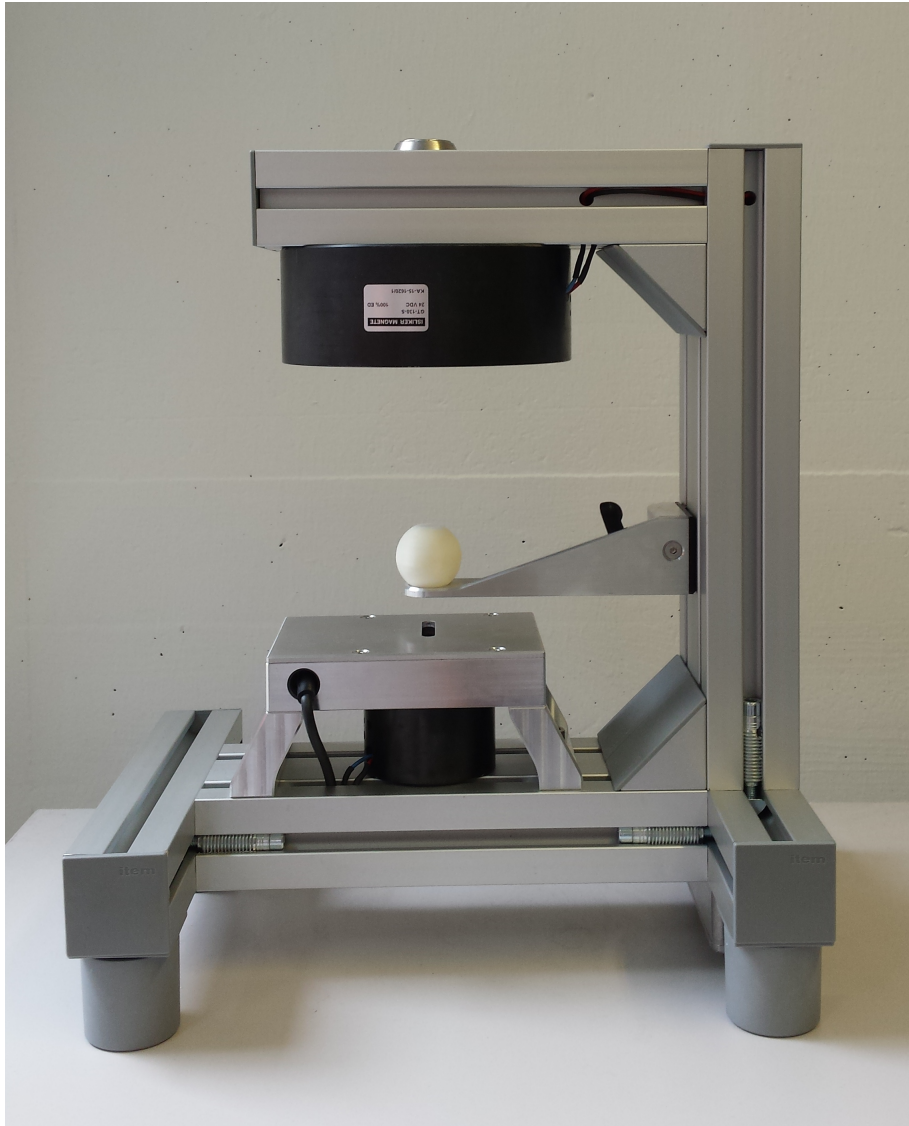


Abbildung 1: Bild der magnetische Aufhängung

Die Kugel muss in der Luft stabil schweben. Es sollte möglich sein, verschiedene Sollpositionen zu fahren (Führungsverhalten) und der geregelte Prozess sollte gewisse Störungen kompensieren können (Störverhalten).

## 2 Problemstellung

In diesem Versuch wird die Position  $x(t)$  einer schwebenden Kugel geregelt. Ein Elektromagnet bildet ein magnetisches Feld, der vom Strom  $i(t)$  abhängig ist. Je grösser der Strom  $i(t)$ , je mehr wird der Elektromagnet die Kugel an sich ziehen. Der Elektromagnet kann die Kugel abstossen und anziehen. Die Schwerkraft wirkt aber nur in eine Richtung.

Dieser Prozess ist nicht linear, zuerst wegen der Schwerkraft und weil die Beziehung Strom-ziehende Kraft hoch komplex ist.

**Aufgabe 1:** Zeichnen Sie das Blockschaltbild des geregelten Systems (mit diskretem Regler). Auf dem Bild sollten die Regelgrösse, die Steuergrösse, die Referenzgrösse und die mögliche Störgrössen für den Prozess vorhanden sein.

□

**Aufgabe 2:** Ergänzen Sie das Blockschaltbild mit einer diskreten Vorsteuerung.

□

## 3 Modellierung

Der gesamte **analoge** geschlossene Regelkreis wird in Teilsysteme aufgeteilt und als vereinfachtes Blockdiagramm in der Abbildung 2 dargestellt.

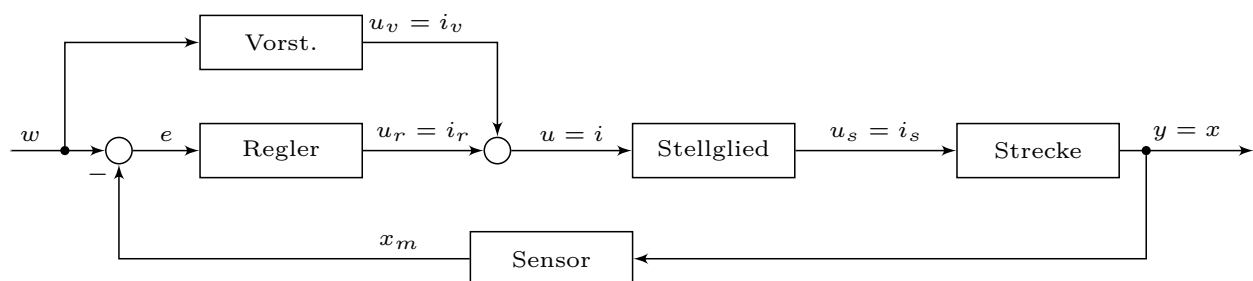


Abbildung 2: Wirkungsplan des Regelkreises

In der Tabelle 1 sind die Abkürzungen der Signale beschrieben.

Abkürzung	Beschreibung	Einheit
$w$	Führungsgrösse (Sollposition)	[m]
$e$	Regelfehler	[m]
$i_r$	Stellgrösse, Regler	[A]
$i_v$	Stellgrösse, Vorsteuerung	[A]
$i_s$	Magnetstrom	[A]
$x$	Kugelposition (Regelgrösse)	[m]
$x_m$	gemessene Kugelposition (Rückführgrösse)	[m]

Tabelle 1: Beschreibung der Abkürzungen

Die Strecke beinhaltet die Kugel im Magnetfeld. Das Stellglied beinhaltet den stromgeordneten RL-Stromkreis. Der geschlossene Regelkreis beschreibt eine Kaskadenregelung mit einer statischen Vorsteuerung.

### 3.1 Die Modellbildung der Strecke

Mit Hilfe der vereinfachten Darstellung der Strecke (Abbildung 3) wird die Bewegungsdifferentialgleichung aufgestellt.

$$m\ddot{x} = F_g - F_m + F_s = mg - F_m + F_s \quad (1)$$

womit  $F_m$  die ziehende Kraft vom Elektromagnet,  $F_g = mg$  die Schwerkraft und  $F_s$  eine Störkraft die von einem 2. Elektromagnet erzeugt werden kann. Für diesen Versuch ist  $F_s = 0$ .

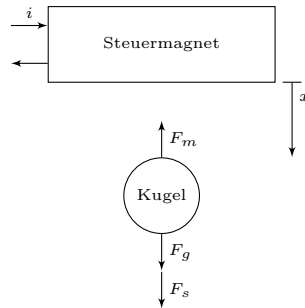


Abbildung 3: Vereinfachte Darstellung der Strecke

Die Kraft auf den ferromagnetischen Körper in der Kugel wird mit folgender Funktion beschrieben:

$$F_m(x, i) = -\frac{1}{2} \frac{dL(x)}{dx} i^2 = f(x) i^2 \quad (2)$$

Diese Funktion  $F_m(x, i)$  wird wie folgt approximiert:

$$F_m(x, i) = -mg \frac{i^2}{i_0^2(x)} \quad (3)$$

$i_0(x_0)$  wird als statische Kennlinie bezeichnet.

Die Bewegungsdifferentialgleichung kann somit wie folgt vereinfacht werden:

$$\ddot{x} = g - g \frac{i^2}{i_0^2(x)} \quad (4)$$

Die statischen Kennlinie  $i_0(x)$  lässt sich nur mit einem grossen Aufwand theoretisch approximieren. Am Besten wird diese Funktion experimentell ermittelt. Diese Identifikation wird im Abschnitt 5 beschrieben.

Die statische Kennlinie  $i_0(x)$  wird mit einem Polynom dritten Grades wie folgt angenähert:

$$i_0(x) = a_i + b_i x + c_i x^2 + d_i x^3 \quad (5)$$

Zu erkennen ist, dass es sich bei dieser Differentialgleichung um eine nicht lineare und instabile Differentialgleichung handelt.

Diese kann um einen bestimmten Arbeitspunkt  $(x_0, i_0)$  linearisiert werden. Es ergibt sich die folgende Übertragungsfunktion.

$$G_{Strecke}(s) = \frac{\Delta X}{\Delta I} = \frac{\frac{k_i}{k_x}}{\frac{1}{k_x} s^2 - 1} \quad (6)$$

mit:

$$k_x = \frac{-2g(b_i x_0 + 2c_i x_0^2 + 3d_i x_0^3)}{a_i + b_i x_0 + c_i x_0^2 + d_i x_0^3} \quad (7)$$

$$k_i = \frac{2g}{a_i + b_i x_0 + c_i x_0^2 + d_i x_0^3} \quad (8)$$

$$(9)$$

### 3.2 Die Modellbildung der statischen Vorsteuerung

Die Vorsteuerung wird verwendet, um den stationären Strom des Stellglieds und der Strecke für den gewünschten Arbeitspunkt voreinzustellen.

**Aufgabe 3:** Welche Vorteile hat die statische Vorsteuerung?

□

Die ideale Vorsteuerung für die nicht-lineare Strecke  $i_v(x)$  kann wie folgt aus der Gleichung 4 hergeleitet werden:

$$i_v(x) = a_i + b_i x_0 + c_i x_0^2 + d_i x_0^3 \quad (10)$$

### 3.3 Die Modellbildung des Stellglieds

Der Stellglied ist ein innerer Strom-Regelkreis. Dieser Regelkreis wird hier als PT1 approximiert und experimentell ermittelt:

$$G_{stell}(s) = \frac{i_s(s)}{i(s)} = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (11)$$

womit  $\tau = 0.025 \text{ (s)}$  ( $25 \text{ (ms)}$ )

### 3.4 Die Modellbildung des Sensors

Es wird davon ausgegangen, dass der Sensor perfekt ist:

$$G_{Sensor}(s) = 1 \quad (12)$$

## 4 SPS Programmieren

Das Datenblatt des Elektromagnets ist im Anhang A zu finden. Der Elektromagnet ist an einer Klemme **EL2535** verbunden. Diese Klemme ist eine PWM Klemme mit einem internen Stromregler. Mit dieser ist es somit möglich direkt den Sollstrom des Elektromagnets vorzugeben.

**Aufgabe 4:** Definieren eine erste Variable vom Typ *INT*, die mit der Klemme **EL2535** verknüpft wird (Feld *PWM output*). Diese Variable wird gebraucht, um den oben-erwähnten Sollstrom zu setzen. Ein Wert von 32767 entspricht 1 (A) und -32767 entspricht -1 (A). Sie definieren eine zweite Variable vom Typ *REAL* für diesen Sollstrom in (A). Sie müssen die korrekte Umrechnung programmieren.

□

Die Position der Kugel wird mit einem Distanzsensor erfasst. Der Sensor liefert einen Strom zwischen 4 und 20 (mA), der proportional zum Arbeitsbereich ist. Das Datenblatt des Sensors ist im Anhang B zu finden. Dieser Sensor hat einen Arbeitsbereich von 50 (mm) bis 150 (mm). Der Bereich ist somit 100 (mm) breit. Dieser Sensor ist an der Klemme **EL3012** verbunden. Diese Klemme kodiert einen Strom von 0 bis 20 (mA) als *INT* mit Werten von 0 bis 32767. Der Umrechnungsfaktor  $f$  von *INT* zum (m) ist somit:

$$f = \frac{0.1}{32767} \frac{20}{16} = \frac{1}{262136} \quad (13)$$

**Aufgabe 5:** Definieren Sie eine Variable vom Typ *INT*, die mit der Klemme **EL3012** verknüpft wird (Feld *Value*) und eine zweite Variable vom Typ *REAL* für die Distanz der Kugel in (m)

□

**Aufgabe 6:** Programmieren Sie den kompletten PID Regler (mit Anti-Reset Windup und Filter auf dem D-Anteil).

□

**Aufgabe 7:** Es sollte möglich sein, den Prozess auch ohne Regler anzuregen. Sie könnten 2 Zustände „Open-Loop“ und „Closed-Loop“ im Baustein Main dafür vorsehen.

□

## 5 Parameteridentifikation und Nullpunktaufnahme

### 5.1 Nullpunktaufnahme

Die Position der Kugel ist gleich 0 (m) wenn die Kugel am Elektromagnet klebt. Bringen Sie die Kugel mit der Hand an dieser Position und merken Sie sich die gemessene Position im SPS Programm. Diese Position wird jetzt von der gemessenen Position abgezogen (Nullpunktaufnahme). Die Position wird Richtung Boden positiv gezählt. Passen Sie eventuell das Zeichnen in Ihrem SPS Programm an.

### 5.2 Parameteridentifikation

Es wird bei diesem Versuch nur die Kennlinie  $i_0(x)$  ermittelt.

Im stationären Zustand (Die Kugel bleibt an einer bestimmten Position) kann die Gleichung 4 wie folgt vereinfacht werden:

$$0 = g - g \frac{i^2}{i_0^2(x)} \quad (14)$$

Wir haben somit hier  $i = i_0(x)$ . Es muss somit nur der Strom ermittelt werden, der genau die Schwerkraft der Kugel kompensiert.

Die Position  $x = 0$  ist wenn der obersten Teil der Kugel in Kontakt mit dem Elektromagnet ist. Es muss hier mit der Bedienungssoftware den Nullpunkt aufgenommen werden.

Die Kugel wird nachher mit dem Hebelarm an verschiedenen Positionen gefahren, und für jede Position wird der Strom des Magneten Schritt für Schritt hochgefahren bis die Kugel nach oben gezogen wird.

Es muss am Ende des Experiments die folgende Tabelle vorliegen:

x (m)	i (A)
0.035	-
0.040	-
0.045	-
0.050	-

Tabelle 2: Tabelle für die Ermittlung der Kennlinie

Diese Werten werden in Matlab programmiert um mit dem Befehl `polyfit` die Koeffizienten  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  und  $d_i$  vom folgenden Polynom zu ermitteln:

$$i_0(x) = a_i + b_i x + c_i x^2 + d_i x^3$$

Die neuen Werten müssen in die Übertragungsfunktion  $G_{Strecke,s}(s) = \frac{\Delta X}{\Delta I}$  integriert werden.

## 6 Reglerentwurf

Es wird ein PID-T1 Regler mit folgender Übertragungsfunktion entworfen:



$$G_{PID}(s) = K_P \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{\frac{T_d}{N} s + 1} \right) \quad (15)$$

Dabei sollen folgende Parameter und Konstanten beim Reglerentwurf für den geschlossenen Regelkreis verwendet werden:

Erdbeschleunigung	$g = 9.81$	$\left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$
Arbeitspunkt	$x_0 = 0.04$	$[\text{m}]$
Reglerverstärkung	$K_p \in [-40, -20]$	$\left[ \frac{\text{A}}{\text{m}} \right]$
Gewichtung D-Anteil	$T_d = \frac{1}{\sqrt{k_x}}$	$[\text{s}]$
Filterungsfaktor des D-Anteils	$N = 100$	$[\quad]$
Abtastzeit	$T = 0.5$	$[\text{ms}]$

Sie werden zuerst den Regler ohne I Anteil testen.

Die Übertragungsfunktion der analogen Strecke ist:

$$G(s) = G_{\text{stell}}(s)G_{\text{Strecke}}(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \frac{\frac{k_i}{k_x}}{\frac{1}{k_x} s^2 - 1} \quad (16)$$

**Aufgabe 8:** Berechnen Sie mit dem Matlab Befehl `c2d`  $H(z)$  für  $T = 0.0005$  (s) (0.5 (ms))

□

**Aufgabe 9:** Lassen Sie die Stabilitätsreserven von Matlab mit dem Befehl `margin` berechnen. Sie müssen dafür die diskrete Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises brauchen ( $L(z) = K(z)H(z)$  wo  $K(z)$  die  $z$ -Übertragungsfunktion des PID Reglers ist). Schauen Sie sich die Nyquist-Frequenz, passen Sie den Regler oder die Abtastzeit an wenn die Reserven zu klein sind (Phasenreserve mindestens 50 (°) und Verstärkungsreserve mindestens 8 dB).

□

**Aufgabe 10:** Programmieren Sie den geschlossenen digitalen Regelkreis mit allen Teilsystemen und der statischen nichtlinearen Vorsteuerung, der nicht linearen Strecke und dem von Ihnen entworfenen PD Regler im Programm Matlab-Simulink.

□

**Aufgabe 11:** Simulieren Sie einen Führungssprung von 5mm von einem Arbeitspunkt bei  $x_0=40\text{mm}$ .

□

## 7 Die Versuchsdurchführung

**Aufgabe 12:** *Führen Sie einen Führungssprung von 5mm aus und zeichnen Sie die Führungssprungantwort und die Stellgrößen (den Stellstrom und die Stellspannung des Stellglieds) des geregelten Systems auf und vergleichen Sie diese mit der Simulation (jeweils für das geregelte System mit dem PD-T1 und PID-T1 Regler).*



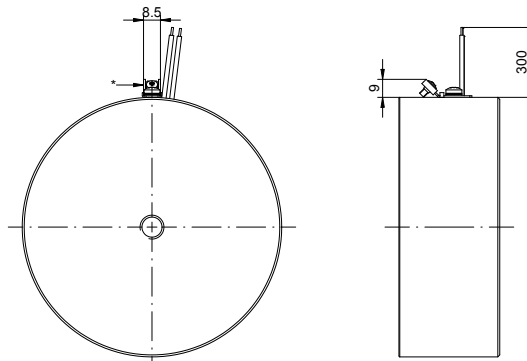
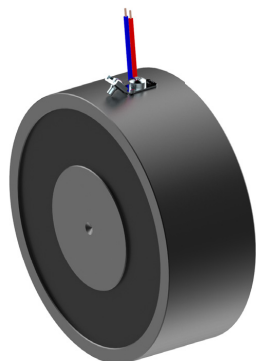
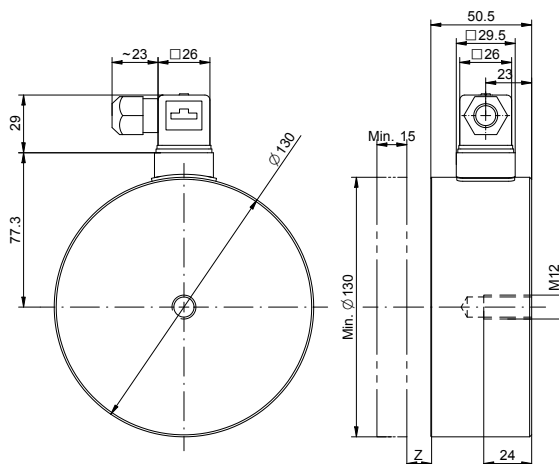
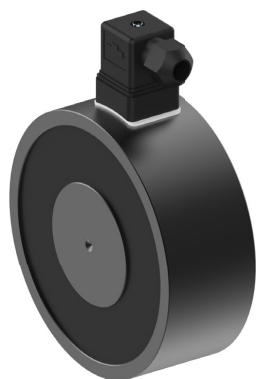
**Aufgabe 13:** *Versuchen Sie, das Regelverhalten durch Änderung der Regelparameter qualitativ zu verbessern.*



# A Elektromagnet

GT-130 Elektro Haftmagnet  
GT-130 Electro Magnet

**ISLIKER MAGNETE**



\* = Erdungsanschluss nur über 50 VDC  
Electrical grounding only over 50 VDC

## Spezifikationen

## Specifications

Elektrische Leistung	23.9W								Power requirement
Abstand Z Magnet - Gegenplatte [mm]	0	0.1	0.5	1	2	3	4	5	Distance Z Solenoid - counter plate [mm]
Haftkraft [N]	6200	5500	2400	750	220	110	70	55	Holding force [N]
Resthaltekr. (stromlos) [N]	~ 620	0							Remanence (currentless) [N]

Vorzugs-Nennspannung	24VDC (max. 230VAC)		Preferred rated voltage
Einschaltzeit ED%	100%		Duty cycle %
Isolierstoffklasse	B (130°C) DIN VDE 0580		Class of insulation
Prüfspannung Überspannungskategorie	EN 60664-1 III		Test voltage Surge category
Schutzart Litzenanschluss W Steckanschluss S	IP20 (IEC 60529) IP40 (IEC 60529)		Degree of protection Lead wire W Plug and socket connection S
El. Anschlussart Litzenanschluss W Steckanschluss S	Litzen (300mm), AWG20 Steckanschluss DIN 175301-803	Lead wires (300mm), AWG20 Plug and socket connection DIN 175301-803	Electrical termination Lead wire W Plug and socket connection S
Gleichrichter Litzenanschluss W Steckanschluss S	max. Strom 1.5A nicht verfügbar verfügbar	max. current 1.5A not available available	Rectifier Lead wire W Plug and socket connection S
Oberflächenbehandlung	Gehäuse nitrocarburisiert	Solenoid housing nitrocarburized	Surface treatment
Total Magnetgewicht	4.000kg		Total weight of solenoid

ISLIKER MAGNETE AG - CH-8450 Andelfingen - Tel. +41 (0)52 305 25 25 - info@islikermagnete.ch - www.islikermagnete.ch

2016-05-13

## B Distanzsensor

### OD1-B100H50I25 | OD Mini

DISPLACEMENT-MESSSENSOREN



#### Bestellinformationen

Typ	Artikelnr.
OD1-B100H50I25	6050512

Weitere Geräteausführungen und Zubehör → [www.sick.com/OD\\_Mini](http://www.sick.com/OD_Mini)



#### Technische Daten im Detail

##### Performance

<b>Messbereich</b>	50 mm ... 150 mm
<b>Auflösung</b>	20 µm <sup>1)</sup>
<b>Reproduzierbarkeit</b>	30 µm <sup>1) 2)</sup>
<b>Linearität</b>	± 100 µm <sup>3) 4)</sup>
<b>Ansprechzeit</b>	2 ms / 4 ms / 8 ms / 16 ms / Auto <sup>5)</sup>
<b>Messfrequenz</b>	2 kHz / 1 kHz / 500 Hz / 250 Hz / Auto
<b>Lichtsender</b>	Laser, rot
<b>Laserklasse</b>	1 (EN 60825-1) <sup>6)</sup>
<b>Typ. Lichtfleckabmessung (Distanz)</b>	700 µm x 600 µm (100 mm)
<b>Zusatzfunktion</b>	Mittelwerteinstellung 1 ... 512x, automatische oder manuelle Empfindlichkeitsanpassung, einlernbare Analogausgänge, einlernbare Schaltausgänge, invertierbarer Schaltausgang, Schaltmodus: Fenster (Wnd), Schaltmodus: Distanz zu Objekt (DtO), Schaltmodus: Objekt zwischen Sensor und Hintergrund (ObSB), Multifunktionseingang: Laser-off / externer Teach-in / Trigger

<sup>1)</sup> Mittelwerteinstellung: 512.

<sup>2)</sup> Konstante Rahmenbedingungen.

<sup>3)</sup> Messung auf 90 % Remission (Keramik, weiß)

<sup>4)</sup> Für beste Performance max. Aufwärmzeit von 5 Minuten beachten.

<sup>5)</sup> Bei fixer Empfindlickeiteinstellung und Mittelwerteinstellung = 1. Bei automatischer Empfindlichkeit und Messrate 500 µs: 2 ... 7,5 ms Ansprechzeit/Messrate 1.000 µs: 4 ... 15 ms Ansprechzeit.

<sup>6)</sup> Wellenlänge: 655 nm, max. Leistung: 390 µW (Laserklasse 1) / < 1 mW (Laserklasse 2)

##### Schnittstellen

<b>Schaltausgang</b>	1 x PNP/NPN
<b>Multifunktionseingang (MF)</b>	1 x <sup>1)</sup>
<b>Datenschnittstelle</b>	1 x 4 mA ... 20 mA (< 300 Ω)

<sup>1)</sup> MF nutzbar als Laser-off, Trigger, externer Teach-in oder deaktiviert.