

---

# Laborversuch

## Regelung eines Gleichstrommotors

Thierry Prud'homme  
thierry.prudhomme@hslu.ch

Modul: MRT+A

---

### Zusammenfassung

In diesem Versuch wird die Drehzahl eines Gleichstrommotors geregelt. Drehzahlregelung von Motoren ist eine typische Aufgabe, zum Beispiel bei Werkzeugmaschinen oder Pumpen.

Zu diesem Zweck wurde ein Versuch an der Hochschule Luzern entwickelt. Dieser Versuch wird in Sektion 1 beschrieben.

Um einen guten Regler entwerfen zu können, müssen Kenntnisse über den Prozess vorhanden sein. Diese Kenntnisse nehmen sehr oft die Form eines Modells an. In der Sektion 2 werden die Differentialgleichungen des Prozesses hergeleitet. Die Parameter des Modells werden experimentell ermittelt.

Mit dem vorgegebenen Modell kann ein Regler entworfen werden. Der Reglerentwurf wird in Sektion 6 durchgeführt.

In der Sektion ?? wird der entworfene Regler auf der Beckhoff-Umgebung programmiert und getestet.

## 1 Einführung

Gleichstrommotoren werden heute in verschiedenen Bereichen eingesetzt. Es wurde ein Versuch mit einem Gleichstrommotor der Firma Maxon Motor AG entwickelt. Das Datenblatt dieses Motors ist im Anhang A zu finden.

Mit diesem Versuch besteht die Möglichkeit entweder die Position oder die Drehzahl zu regeln. Das hat den Vorteil, dass zwei unterschiedliche Systeme in einem Versuch enthalten sind.

Ein Bild des Versuches ist in Abbildung 1 zu sehen.

Verschiedene Massen können am Versuch montiert werden. Eine magnetische Bremse ermöglicht es verschiedenen starke Reibungen zu simulieren.

Die Motorspannung  $u(t)$  kann Werte zwischen  $-24$  (V) und  $+24$  (V) annehmen. Die Position des Motors wird mit einem Encoder gemessen. Das Datenblatt des Encoders ist im Anhang B zu finden. Der Encoder hat eine Auflösung von 512 Impulsen pro Umdrehung.

Der Encoder wird für die Drehzahlregelung wie auch für die Lageregelung benötigt.

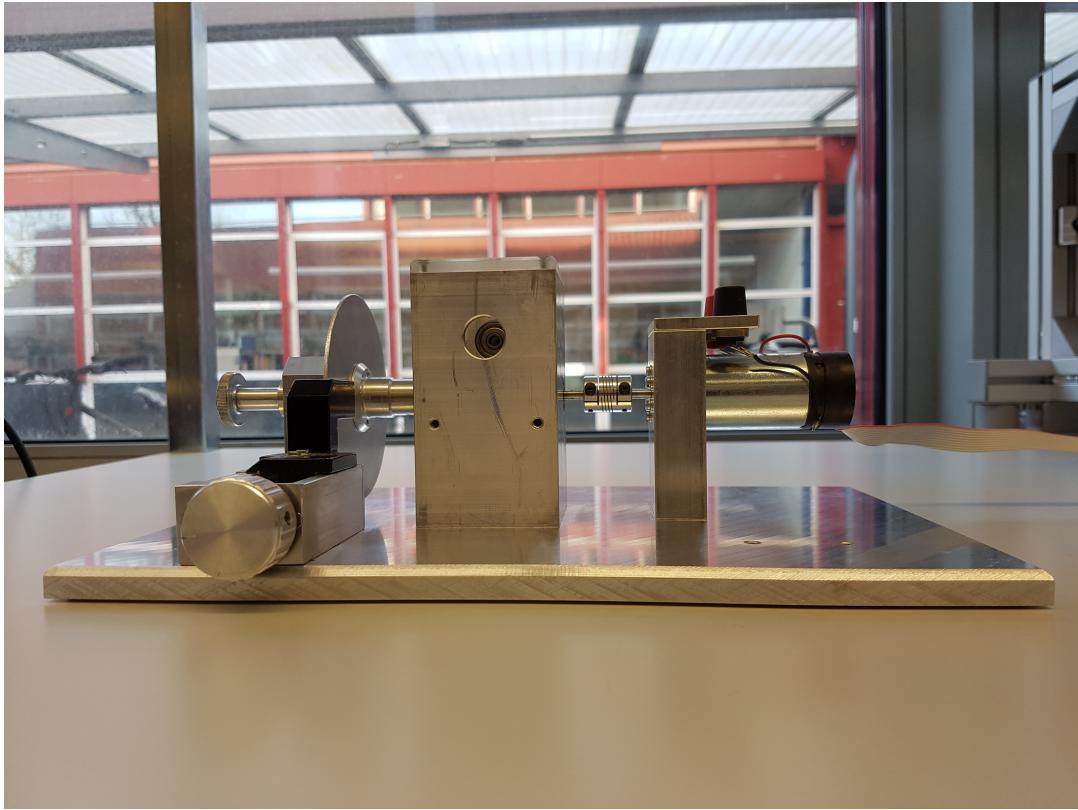


Abbildung 1: Gleichstrommotor Versuch

Für die Steuerung und Regelung wird eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) der Firma Bechhoff eingesetzt.

Ein Netzgerät (24 VDC) ist auch zu erkennen. Dieses dient zur Speisung des Industrie PC, der Klemmen und des Motors. Drei verschiedene Klemme werden benötigt, diese befinden Sie auf der Rückseite des Versuches und sind in der Abbildung 2 zu sehen:

- ES3004: Diese Klemme ermöglicht das Einlesen von analogen Signalen. Sie wird bei der aktuellen Version des Versuches nicht gebraucht.
- EL5101: Diese Klemme ermöglicht das Einlesen von differentiellen Encodersignalen. Sie wird für das Einlesen der Position des Motors mit dem Maxon Encoder gebraucht. Es ist wichtig zu betonen, dass diese Klemme alle Flanke vom Encoder zählt (steigende wie auch fallende Flanke der 2 Signalen A und B). Es ergibt sich somit im Programm eine Auflösung die 4 mal grösser ist als die Auflösung vom Encoder (also 2048 Impulse pro Umdrehung).
- EL7342: Diese Klemme ermöglicht die Steuerung des Gleichstrommotors.

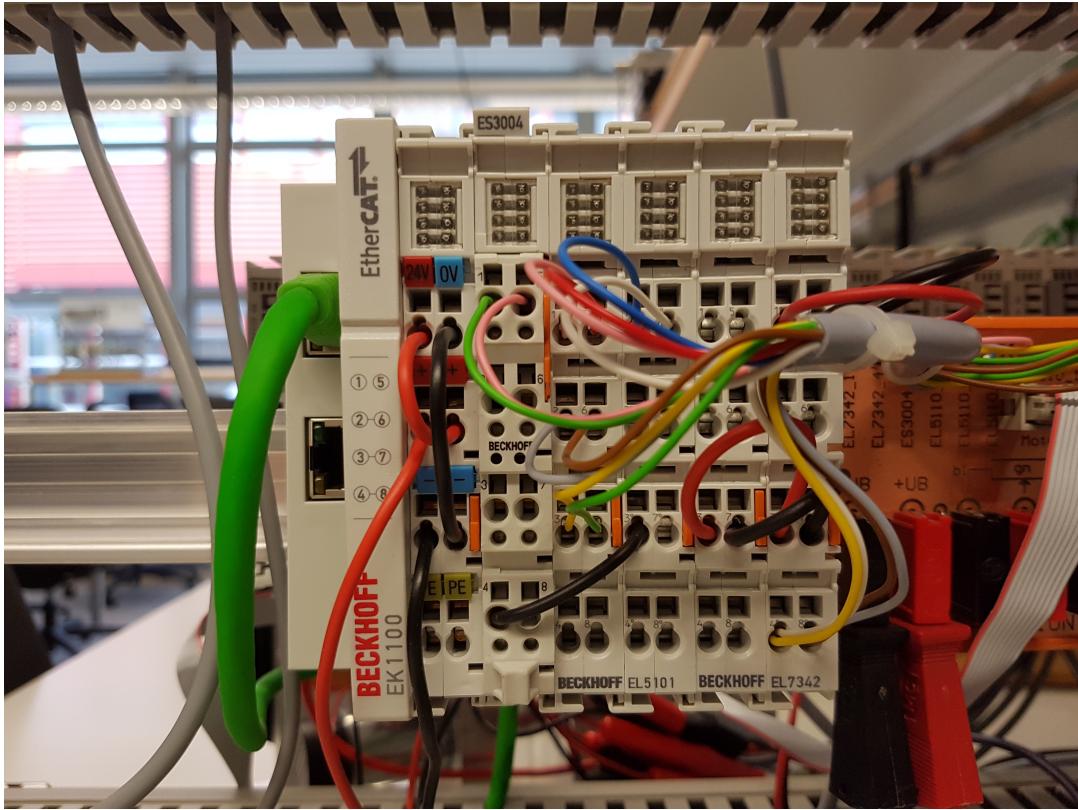


Abbildung 2: Speicherprogrammierbare Steuerung

## 2 Modellierung

In dieser Sektion wird ein einfaches dynamisches Modell für den Versuch hergeleitet.  
Das Prinzip des Versuches wird in der Abbildung 3 beschrieben.

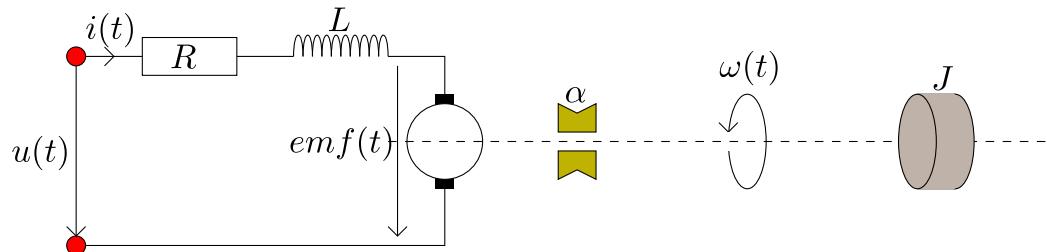


Abbildung 3: Gleichstrommotor Versuch

Die erste elektrische Differentialgleichung beschreibt die Beziehung zwischen dem Strom  $i(t)$  und der Spannung  $u(t)$ .

$$u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + \text{emf}(t) \quad (1)$$

womit  $\text{emf}(t)$  die back-emf Spannung in (V) ist.

Die Werte  $R$  und  $L$  können im Motordatenblatt A ausgelesen werden.

Es wird hier davon ausgegangen, dass  $\text{emf}(t)$  proportional zu der Drehzahl  $\omega(t)$  ist:

$$\text{emf}(t) = K_\omega \omega(t) \quad (2)$$

$K_\omega$  kann auch im Motordatenblatt A ausgelesen werden.

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = K_M i(t) - M_l - \alpha \omega(t) \quad (3)$$

wobei  $M_l$  das Lastmoment ist.  $J$  ist das Massenträgheitsmoment.  $J$  ist die Summe der Massenträgheitsmomente des Motorankers, der Kupplung und der Masse. Das Reibungsmoment wird mit  $\alpha \omega(t)$  (viskose Reibung) modelliert.

$\alpha$  kann mit der einstellbaren magnetischen Bremse geändert werden. Ein Lasmoment  $M_l$  kann auch bei Bremsen der Masse mit der Hand simuliert werden.  $J$  kann auch mit der Wahl der Masse eingestellt werden.

Es wird hier davon ausgegangen dass:

$$K_M = K_\omega \quad (4)$$

Aus der Winkelgeschwindigkeit  $\omega(t)$  kann die Winkelposition  $\theta(t)$  hergeleitet werden:

$$\omega(t) = \frac{d\theta}{dt}(t)$$

Mit Hilfe dieser Differentialgleichungen kann die Übertragungsfunktion  $G(s) = \frac{\Omega(s)}{U(s)}$ , wo bei:

$$\begin{aligned} \omega(t) &\circ \bullet \Omega(s) \\ u(t) &\circ \bullet U(s) \end{aligned}$$

hergeleitet werden:

$$G(s) = \frac{K}{(1 + \tau_1 s)(1 + \tau_2 s)}$$

Die Parameter  $K$ ,  $\tau_1$  und  $\tau_2$  werden experimentell ermittelt.

### 3 Problemstellung

Bei diesem Versuch wird die Drehzahl  $\omega(t)$  geregelt. Dazu wird mit Hilfe von Matlab ein Regler entworfen, welcher dann direkt auf der Beckhoff-Umgebung programmiert und getestet wird. Setzt man die entsprechenden Parameter in die Differentialgleichungen des Versuchs ein, ergiben sich für die Übertragungsfunktion

$$G(s) = \frac{K}{(1 + \tau_1 s)(1 + \tau_2 s)} \quad (5)$$

**Aufgabe 1:** Zeichnen Sie das Blockschaltbild des geregelten Prozesses (wenn der Regler digital implementiert wird). Identifizieren Sie Steuergröße, Regelgröße, Führungsgröße und allfällige Störgröße.

□

**Aufgabe 2:** Berechnen Sie die Übertragungsfunktion  $H(z)$  des erweiterten Systems (analoger Prozess + AD + DA).

□

**Aufgabe 3:** Programmieren Sie den digitalen Regelkreis mit Matlab/Simulink. Für den Regler sollten Sie den PID Block von Simulink wählen.

□

## 4 SPS Programmierung

**Aufgabe 4:** Definieren Sie 2 Variablen für das Einlesen der Motorposition, eine Variable wird direkt mit der Klemme EL5101 verknüpft und gebraucht um die Anzahl an Impulse zu zählen und eine zweite Variable wird für die Drehzahl in (rpm) gebraucht. Sie müssen die korrekte Umrechnung programmieren und den Überlauf und Unterlauf vom Zähler sauber abzufangen.

□

**Aufgabe 5:** Definieren Sie eine Variable um die Motorklemme zu aktivieren. Diese wird mit der Klemme EL7342 verknüpft (Field enable). Definieren Sie noch dazu 2 Variablen, eine Erste wird für die Ansteuerung des Motors mit der Klemme EL7342 verknüpft (Field Velocity). Mit dieser wird die Spannung des Motors gesteuert (32767 für +24 VDC und -32767 für -24 VDC). Die zweite Variable ist für die Spannung des Motors im Programm im (V).

□

**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

Der Prozess muss zuerst ohne Regler angeregt werden, um die Parameter  $K$ ,  $\tau_1$  und  $\tau_2$  bestimmen zu können. Der Prozess wird mit einem Sprung von  $u(t) = 5$  (V) auf  $u(t) = 15$  (V) angeregt. Nach diesem Experiment dürfen die Einstellung der Bremse und die Masse nicht mehr geändert werden, sonst muss das Experiment nach diesen Änderungen noch einmal durchgeführt werden.

**Aufgabe 8:** Führen Sie das Experiment durch und exportieren Sie die Daten in einer Matlab Datei DcMotorSprungDaten.mat

□

**Aufgabe 9:** Zeichnen Sie mit Matlab die gemessen Daten  $u(t)$  und  $\omega(t)$  im gleichen Plot und bestimmen Sie  $K$ ,  $\tau_1$  und  $\tau_2$ . Simulieren Sie mit Matlab und mit den bestimmten Parametern das durchgeführte Experiment. Zeichnen Sie im gleichen Plot die gemessenen Daten und die Simulationsergebnisse. Prüfen Sie ob die Beide gut übereinstimmen.

□

## 6 Reglerentwurf und Implementation

Der Reglerentwurf ist nicht der Fokus bei diesem Versuch. Aus diesem Grund wird die Wahl der Methode den Studierenden überlassen. Es können empirische Verfahren (Ziegler-Nichols, Kuhn) gebraucht werden oder der SISO Tool (mit dem PID Autotuning). Es wird einen analogen PID Regler mit Filter auf den D-Anteil entworfen.

$N$  wird gleich 20 gewählt, und  $T_r = \sqrt{T_i T_d}$ .

**Aufgabe 10:** Definieren Sie die erwarteten Performanzen des Reglers (Bandbreite, Anstiegszeit) und leiten Sie aus denen die Abtastzeit für den geschlossenen Regelkreis.

□

**Aufgabe 11:** 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  $50$  ( $^\circ$ ) und Verstärkungsreserve mindestens  $8$  dB).

□

## 7 Testen

Der Regler wird zuerst in Simulation getestet. Dafür wird der in Matlab/Simulink programmierte digitale Regelkreis gebraucht.

**Aufgabe 12:** *Testen Sie den Regler in Simulation. Die Referenzdrehzahl macht einen Sprung zu der Zeit  $t = 10$  (s) von 500 (rpm) auf 1500 (rpm). Die Simulationsdauer ist 20 (s). Berechnen Sie die Anstiegszeit (wenn 95 % der Differenz zwischen alten Referenzdrehzahl und Neuen erreicht wird, in diesem Fall bedeutet es eine Drezahl von 1'450 (rpm)). Berechnen ein eventuelles Overshoot. Visualisieren Sie den Verlauf der Steuergrösse. Ist die Steuergrösse am Anschlag nach dem Sprung der Referenzgrösse? Testen Sie den Regler mit und ohne Anti-Reset Windup.*

□

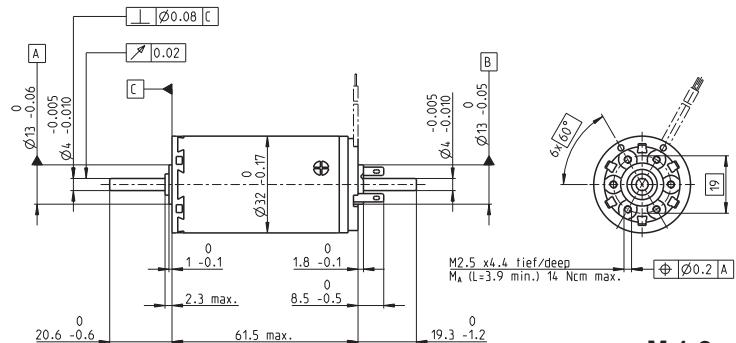
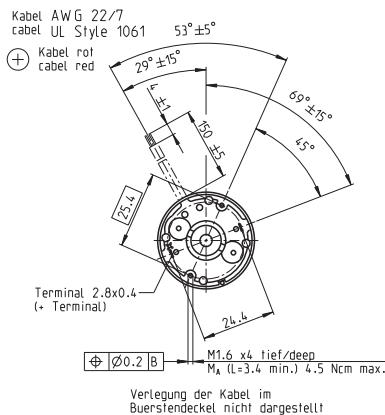
**Aufgabe 13:** *Testen Sie den Regler auf dem realen Motor. Sie sollten das gleiche Szenario wie bei der Simulation testen. Visualisieren Sie die Ergebnisse mit dem TwinCAT Scope. Sie sollten die drei Teile des Reglers separat visualisieren. Bereiten Sie eine kleine Demonstration für den Dozent.*

□

# A Maxon Motor 236655

## A-max 32 Ø32 mm, Graphite Brushes, 15 Watt

maxon A-max



### Order Number

with terminals	<b>236651</b>	236652	<b>236653</b>	236654	<b>236655</b>	236656	236657	236658
with cables	353220	353221	353222	353223	353224	353225	353226	353227

### Motor Data

#### Values at nominal voltage

1 Nominal voltage	V	6.0	9.0	12.0	18.0	24.0	30.0	36.0	48.0
2 No load speed	rpm	5830	4930	4670	5270	5930	5870	5830	3870
3 No load current	mA	153	83.2	58.4	44.8	38.6	30.5	25.2	11.7
4 Nominal speed	rpm	3800	2980	2860	3550	4180	4140	4090	2080
5 Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	31.4	33.1	36.0	37.5	36.7	37.1	36.8	36.9
6 Nominal current (max. continuous current)	A	3.42	2.02	1.55	1.21	0.998	0.798	0.656	0.328
7 Stall torque	mNm	99.7	87.4	95.9	118	127	128	125	81.3
8 Starting current	A	10.4	5.12	3.98	3.66	3.34	2.66	2.15	0.698
9 Max. efficiency	%	75	75	77	79	80	80	80	76

#### Characteristics

10 Terminal resistance	Ω	0.577	1.76	3.02	4.92	7.19	11.3	16.7	68.8
11 Terminal inductance	mH	0.0657	0.209	0.416	0.739	1.04	1.66	2.43	9.71
12 Torque constant	mNm / A	9.58	17.1	24.1	32.2	38.2	48.2	58.3	117
13 Speed constant	rpm / V	996	559	396	297	250	198	164	81.9
14 Speed / torque gradient	rpm / mNm	59.9	57.6	49.5	45.5	47.1	46.3	47.1	48.4
15 Mechanical time constant	ms	27.6	23.5	22.4	21.8	21.7	21.5	21.5	21.5
16 Rotor inertia	gcm <sup>2</sup>	43.9	39.0	43.3	45.9	44.0	44.4	43.6	42.4

### Specifications

#### Thermal data

17 Thermal resistance housing-ambient	7.5 K / W
18 Thermal resistance winding-housing	2.1 K / W
19 Thermal time constant winding	17.7 s
20 Thermal time constant motor	791 s
21 Ambient temperature	-20 ... +85°C
22 Max. permissible winding temperature	+125°C

#### Mechanical data (ball bearings)

23 Max. permissible speed	6000 rpm
24 Axial play	0.12 - 0.22 mm
25 Radial play	0.025 mm
26 Max. axial load (dynamic)	7.6 N
27 Max. force for press fits (static)	110 N
(static, shaft supported)	2000 N
28 Max. radial loading, 5 mm from flange	32 N

#### Mechanical data (sleeve bearings)

23 Max. permissible speed	6000 rpm
24 Axial play	0.12 - 0.22 mm
25 Radial play	0.012 mm
26 Max. axial load (dynamic)	5.0 N
27 Max. force for press fits (static)	110 N
(static, shaft supported)	2000 N
28 Max. radial loading, 5 mm from flange	10.5 N

#### Other specifications

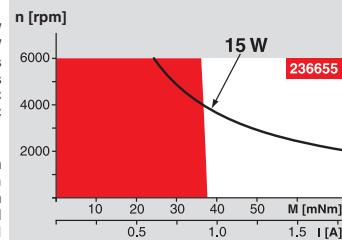
29 Number of pole pairs	1
30 Number of commutator segments	13
31 Weight of motor	211 g

Values listed in the table are nominal.  
Explanation of the figures on page 49.

#### Option

Sleeve bearings in place of ball bearings

### Operating Range



### Comments

#### Continuous operation

In observation of above listed thermal resistance (lines 17 and 18) the maximum permissible winding temperature will be reached during continuous operation at 25°C ambient.  
= Thermal limit.

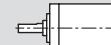
#### Short term operation

The motor may be briefly overloaded (recurring).

— Assigned power rating

### maxon Modular System

#### Planetary Gearhead



#### Spur Gearhead



#### Spindle Drive



#### Recommended Electronics:

LSC 30/2 Page 282

ADS 50/5 282

ADS\_E 50/5 283

EPOS2 Module 36/2 304

EPOS2 24/5 305

EPOS2 50/5 305

EPOS2 P 24/5 308

Notes 18

### Overview on page 16 - 21

#### Encoder MR

256 - 1024 CPT,  
3 channels  
Page 263

#### Encoder HED\_5540

500 CPT,  
3 channels  
Page 267 / 268

# B Maxon Encoder 225785

## Encoder MR Type L, 256 - 1024 CPT, 3 Channels, with Line Driver

**Stock program**

**Standard program**

**Special program (on request)**

Direction of rotation cw (definition cw p. 48)

maxon sensor

		Order Number					
		225783	228452	225785	228456	225787	
Type		Counts per turn	256	500	512	1000	1024
Counts per turn		Number of channels	3	3	3	3	3
Max. operating frequency (kHz)		Max. speed (rpm)	80	200	160	200	320
Max. speed (rpm)		Max. speed (rpm)	18750	24000	18750	12000	18750

overall length

overall length

		maxon Modular System				
+ Motor	Page	+ Gearhead	Page	+ Brake	Page	Overall length [mm] / ● see Gearhead
RE 30, 60 W	80	GP 32, 0.75 - 4.5 Nm	229			79.4
RE 30, 60 W	80	GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	231/232			● 79.4
RE 30, 60 W	80	GP 32 S	249-251			● 79.4
RE 35, 90 W	81					82.4
RE 35, 90 W	81	GP 32, 0.75 - 4.5 Nm	229			● 82.4
RE 35, 90 W	81	GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	231/232			● 82.4
RE 35, 90 W	81	GP 32, 4.0 - 8.0 Nm	234			● 82.4
RE 35, 90 W	81	GP 42, 3 - 15 Nm	237			● 82.4
RE 35, 90 W	81	GP 32 S	249-251			● 82.4
RE 40, 150 W	82					82.4
RE 40, 150 W	82	GP 42, 3 - 15 Nm	237			● 82.4
RE 40, 150 W	82	GP 52, 4 - 30 Nm	240			● 82.4
A-max 32	110/112					72.7
A-max 32	110/112 GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	231/233				● 72.7
A-max 32	110/112 GS 38, 0.1 - 0.6 Nm	236				● 72.7
A-max 32	110/112 GP 32 S	249-251				● 72.7
EC-max 40, 70 W	168					73.9
EC-max 40, 70 W	168	GP 42, 3 - 15 Nm	238			● 73.9
EC-max 40, 120 W	169					103.9
EC-max 40, 120 W	169	GP 52, 4 - 30 Nm	241			● 103.9
EC-i 40, 50 W	190					42.0
EC-i 40, 50 W	190	GP 32, 1 - 6 Nm	233			● 42.0
EC-i 40, 50 W	190	GP 32 S	249-251			● 42.0
EC-i 40, 70 W	191					52.0
EC-i 40, 70 W	191	GP 32, 1 - 6 Nm	233			● 52.0
EC-i 40, 70 W	191	GP 32 S	249-251			● 52.0

**Technical Data**

Supply voltage $V_{CC}$	5 V ± 5%
Output signal	TTL compatible
Phase shift $\Phi$	90°e ± 45°e
Index pulse width	90°e ± 45°e
Operating temperature range	-25 ... +85°C
Moment of inertia of code wheel	≤ 1.7 gcm²
Output current per channel	max. 5 mA

The index signal I is synchronised with channel A or B.

**Pin Allocation**

DIN Connector 41651  
flat band cable AWG 28

**Connection example**

Line receiver  
Recommended IC's:  
- MC 3496  
- SN 75175  
- AM 26 LS 32

Terminal resistance R = typical 120 Ω  
Capacitor C ≥ 0.1 nF per m line length