

Stefan Basler

# Encoder und Motor-Feedback- Systeme

Winkellage- und Drehzahlerfassung  
in der industriellen Automation

 Springer Vieweg

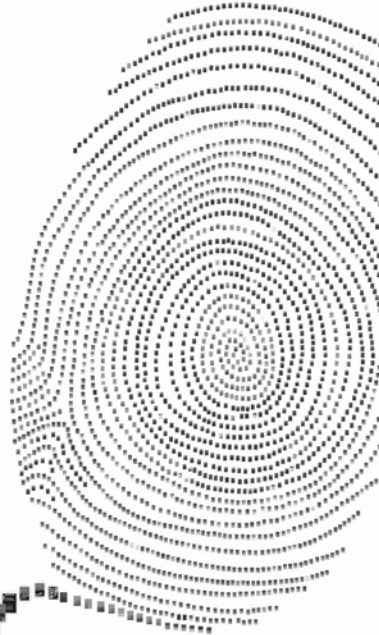
---

# Encoder und Motor-Feedback-Systeme

# Lizenz zum Wissen.




Sichern Sie sich umfassendes Technikwissen mit Sofortzugriff auf tausende Fachbücher und Fachzeitschriften aus den Bereichen: Automobiltechnik, Maschinenbau, Energie + Umwelt, E-Technik, Informatik + IT und Bauwesen.

Exklusiv für Leser von Springer-Fachbüchern: Testen Sie Springer für Professionals 30 Tage unverbindlich. Nutzen Sie dazu im Bestellverlauf Ihren persönlichen Aktionscode **C0005406** auf [www.springerprofessional.de/buchaktion/](http://www.springerprofessional.de/buchaktion/)



**Jetzt  
30 Tage  
testen!**

Springer für Professionals.  
Digitale Fachbibliothek. Themen-Scout. Knowledge-Manager.

-  Zugriff auf tausende von Fachbüchern und Fachzeitschriften
-  Selektion, Komprimierung und Verknüpfung relevanter Themen durch Fachredaktionen
-  Tools zur persönlichen Wissensorganisation und Vernetzung

[www.entschieden-intelligenter.de](http://www.entschieden-intelligenter.de)

Springer für Professionals

 Springer

---

Stefan Basler

# Encoder und Motor-Feedback- Systeme

Winkellage- und Drehzahlerfassung  
in der industriellen Automation



Springer Vieweg

Stefan Basler  
Brigachtal, Deutschland

ISBN 978-3-658-12843-2      ISBN 978-3-658-12844-9 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-658-12844-9

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2016

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature  
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

---

# Vorwort

Nahezu überall dort, wo sich in der industriellen Automation Achsen drehen, rotative Bewegungen in lineare oder lineare Bewegungen in rotative umgesetzt werden besteht der Bedarf die Winkellage und/oder die Drehzahl zu messen. Messgeräte die dazu eingesetzt werden bezeichnet man als Encoder, Motor-Feedback-Systeme oder ganz allgemein als Drehgeber. Drehgeber scheinen einfache Gebilde zu sein. Dabei sind sie komplexe, mechatronische Geräte, die einen wichtigen Beitrag für die industrielle Automation leisten, nicht zuletzt hinsichtlich Ressourcen- und Energieeffizienz.

Gibt es bereits Fachbücher zu Drehgebern stellen diese überwiegend die Funktionsprinzipien der Sensorik in den Vordergrund. Insbesondere Beiträge in Sammelwerken für Sensoren konzentrieren sich darauf. Artikel in den branchenüblichen Fachzeitschriften adressieren punktuelle Innovationen einzelner Geräte oder Hersteller und die wissenschaftliche Literatur beschäftigt sich überwiegend mit theoretischen Fragestellungen. Entsprechend war das Ziel mit diesem Werke einen Überblick über möglichst viele Aspekte dieser Geräte und deren Anwendung zu geben. Mit dem Anspruch einen Bogen von der Theorie zur Praxis zu spannen werden die Messaufgaben, die Funktionsprinzipien, Geräte und Anwendungsaspekte behandelt. Insbesondere soll die Lücke geschlossen werden die bis heute hinsichtlich einer dedizierten Betrachtung der Motor-Feedback-Geräte besteht.

Dieses Buch basiert auf und ist motiviert durch den Beitrag von SICK STEGMANN GmbH in dem Buch „Sensoren in Wissenschaft und Technik“. Mit der Planung einer neuen Auflage war die Frage verbunden, ob Teile des Buchs nicht als Ausgliederung in der „essentials“-Reihe des Springer-Verlags denkbar wären. Dieses Angebot annehmend hat sich schnell herausgestellt, dass der Rahmen der „essentials“ für das Themengebiet zu eng wird, so dass mit dem Verlag

zusammen entschieden wurde ein umfanglicheres Werk zu erstellen. Neben der schriftlichen Arbeit ergibt sich eine didaktische Aufarbeitung der Thematik aus der Erarbeitung und Durchführung einer Vorlesung an der HFU Hochschule Furtwangen University im Rahmen des „Mechatronischen Seminars“ im Fachbereich Maschinenbau und Mechatronik.

Ein herzliches Dankeschön geht an meine Kollegen aus den Entwicklungs- und Marketingabteilungen der SICK STEGMANN GmbH. Hier möchte ich mich insbesondere an Dr.-Ing. David Hopp, Heiko Krebs, Christian Lohner, Reinhold Mutschler, Dr. Christian Sellmer, Dr. Simon Stein, Trevor Stewart und Rolf Wagner wenden, die das Manuskript aufmerksam studiert und durch Ihre Tipps einen wertvollen Beitrag zu dem Buch geleistet haben. Katharina Hirt danke ich für die Unterstützung bei der Erstellung zahlreicher Grafiken. Dem Verlag und insbesondere dem Lektorat vertreten durch Reinhard Dapper und Andrea Broßler danke ich für die gute Zusammenarbeit.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie: Regina, Sophia und Lena. Ist das Werk auch noch so klein, so hat es doch Zeit in Anspruch genommen, die sonst Ihnen gegönnt gewesen wäre.

Brigachtal  
November 2015

Stefan Basler

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	1
<b>2</b>	<b>Messaufgabe</b> .....	5
2.1	Winkel, Drehzahl und Winkelbeschleunigung .....	5
2.2	Messbereich .....	8
2.3	Winkelrechnung in Drehgebern .....	9
2.4	Codierung .....	14
2.4.1	Inkrementalcode .....	14
2.4.2	Absolutcode .....	16
2.4.3	Synchronisation .....	18
2.5	Auflösung, Messwertabweichung, Reproduzierbarkeit .....	22
2.5.1	Allgemeines .....	22
2.5.2	Messwertabweichung bei Drehgebern .....	27
2.5.3	Messwertabweichungen bei Sinus-Cosinus basierter Winkelrechnung .....	31
	Literatur .....	41
<b>3</b>	<b>Sensorische Funktionsprinzipien</b> .....	43
3.1	Optische Funktionsprinzipien .....	45
3.1.1	Vorbemerkung .....	45
3.1.2	Schlüsselkomponenten .....	45
3.1.3	Schattenbildverfahren .....	52
3.1.4	Verfahren basierend auf optischer Beugung .....	56
3.1.5	Weitere optische Funktionsprinzipien .....	58

3.2	Magnetische Funktionsprinzipien . . . . .	62
3.2.1	Vorbemerkungen . . . . .	62
3.2.2	Magnetfeldsensoren . . . . .	62
3.2.3	Messanordnungen und Magnete . . . . .	66
3.2.4	Spezielle magnetische Sensoren für Drehgeber . . . . .	70
3.3	Induktive Funktionsprinzipien . . . . .	72
3.3.1	Allgemeines . . . . .	72
3.3.2	Signalverarbeitung . . . . .	77
3.3.3	Häufig verwendete induktive Drehgeber . . . . .	80
3.4	Kapazitives Funktionsprinzip . . . . .	83
3.5	Resistiv-Potenziometrisches Funktionsprinzip . . . . .	88
3.6	Zusammenfassung . . . . .	92
	Literatur . . . . .	93
<b>4</b>	<b>Aufbau und Schnittstellen von Drehgebern . . . . .</b>	<b>95</b>
4.1	Vorbemerkungen . . . . .	95
4.2	Drehgeberkomponenten und -module . . . . .	97
4.2.1	Mechanische Lagerung . . . . .	97
4.2.2	Kupplungselemente . . . . .	101
4.2.3	Multiturn Module . . . . .	104
4.2.4	Sensorelektronik und Signalverarbeitung . . . . .	111
4.3	Mechanische und elektrische Schnittstellen . . . . .	113
4.3.1	Mechanischer Anbau . . . . .	113
4.3.2	Elektrische Schnittstellen . . . . .	116
4.3.3	Aspekte des Drehgeber-Anbaus . . . . .	122
	Literatur . . . . .	123
<b>5</b>	<b>Drehgeber in der Anwendung . . . . .</b>	<b>125</b>
5.1	Übergeordnete Aspekte . . . . .	125
5.1.1	Einordnung . . . . .	125
5.1.2	Funktionale Sicherheit . . . . .	126
5.1.3	Mehrwertfunktionen . . . . .	131
5.2	Encoder . . . . .	133
5.2.1	Aufgabe und Anforderungen . . . . .	133
5.2.2	Elektrische Schnittstellen . . . . .	136
5.2.3	Anwendungen . . . . .	145
5.3	Motor-Feedback-Systeme . . . . .	146
5.3.1	Aufgabe und Anforderungen . . . . .	146
5.3.2	Elektrische Schnittstellen . . . . .	153

---

5.3.3	Anwendungen.....	160
5.3.4	Geberlose Antriebssysteme .....	165
	Literatur .....	168
	<b>Abkürzungen</b> .....	169
	<b>Weiterführende Literatur</b> .....	173
	<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	175

## Zusammenfassung

Encoder und Motor-Feedback-Systeme, oder ganz allgemein, Drehgeber, wandeln einen Winkel zweier sich relativ zueinander drehbarer Objekte in ein elektrisches Signal. Neben gebräuchlichen Begriffen für die Geräte wird eine schematische Sicht auf die Funktionsblöcke eingeführt. Darauf folgt eine Übersicht zu Drehgeberfunktionen und -eigenschaften, die im weiteren Verlauf des Buchs weiter detailliert werden.

Nahezu überall, wo etwas bewegt wird, drehen sich Achsen. Um diese rotatorische Bewegung steuern und regeln zu können, bedarf es Encoder und Motor-Feedback-Systeme. Diese wandeln den Winkel zweier relativ zueinander drehbarer Objekte in ein elektrisches Signal um. Encoder und Motor-Feedback-Systeme unterscheiden sich dabei primär in der Anwendung und sich daraus ergebenden Geräteanforderungen. Während Encoder in allgemeinen Anwendungen zur Erfassung eines Winkels einer Drehachse verwendet werden, sind Motor-Feedback-Systeme speziell für den Einsatz in Elektromotoren<sup>1</sup> ausgelegt. Man kann auch unterscheiden, dass ein Encoder als Lastgeber dient (er misst an der Lastachse) und ein Motor-Feedback-System als Motorgeber (es ist direkt im oder am Elektromotor angebracht).

---

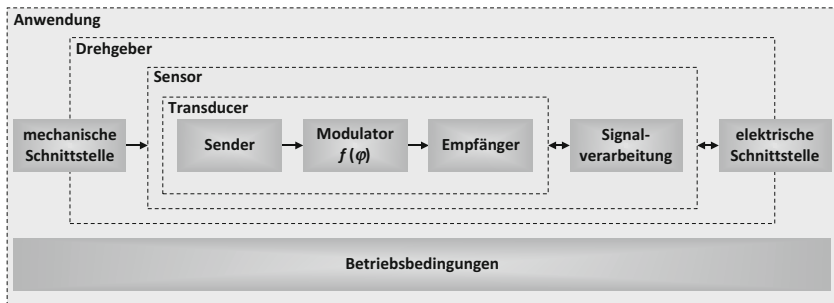
<sup>1</sup>Im industriellen Umfeld können auch nicht elektrisch betriebene rotatorische Aktoren eingesetzt werden. Da aber Elektromotoren am häufigsten vorkommen, wird im Rahmen dieses Buches nur dieser Aktor betrachtet.

Neben Encoder und Motor-Feedback-Systeme gibt es weitere Begriffe (vgl. Abb. 1.1). Diese sind teilweise redundant oder bezeichnen spezifische Ausprägungen. Im Rahmen dieses Buches wird bevorzugt der Begriff Drehgeber verwendet, wenn es sich um allgemeine Darstellungen handelt. Die Begriffe Motor-Feedback-System und Encoder werden an den Stellen eingesetzt an denen die Anwendung zu unterscheiden ist. Die weiteren Begriffe werden nur in relevanten Ausnahmen genutzt.

Der Sensorkern eines Drehgebers besteht grundsätzlich aus drei Elementen (Abb. 1.2;  $\varphi$ : Winkel).<sup>2</sup> Der Sender bringt Energie in das System ein. Der Modulator verändert die eingebrachte Energie proportional zum mechanischen Winkel und



**Abb. 1.1** Begriffe für Sensoren für Winkel und Drehbewegung



**Abb. 1.2** Schematische Darstellung der Funktionsblöcke eines Drehgebers

<sup>2</sup>Hier ergeben sich durchaus Parallelen mit der Nachrichtentechnik hinsichtlich der Betrachtung von Sender, Übertragungskanal und Empfänger.

dient somit als Maßverkörperung. Der Empfänger wandelt die modulierte physikalische Größe in ein elektrisches Signal. Kombiniert mit Signalverarbeitung, elektrischer und mechanischer Anbindung erhält man einen Drehgeber.

Diese abstrakte Betrachtungsweise hinsichtlich Sender-Modulator-Empfänger lässt sich mittels unterschiedlicher sensorischer Prinzipien umsetzen. In Drehgebern finden sich optische, magnetische, induktive, kapazitive und resistiv-potenziometrische Sensorkerne (Kap. 3). Weiterhin kann man nach elektromechanischen und mechatronischen Drehgebern unterscheiden. Bei elektromechanischen Drehgebern sind keine halbleitenden Elemente verbaut, wohl aber bei den mechatronischen. Bei den elektromechanischen Drehgebern stellt der Drehgeber nur den „Transducer“ (dt.: Wandler) dar. Die auswertende Einheit steuert Sender und Empfänger und führt alle Maßnahmen zur Winkelauswertung durch. Bei einem mechatronischen Drehgeber hingegen geschieht dies alles geräteintern. Die aufbereitete Winkelinformation kann mit geringem Aufwand durch die auswertende Einheit verwendet werden. Auch können durch den Einsatz von Mikrocontrollern Funktionen mit Mehrwert bereitgestellt werden, die Drehgeber werden „intelligent“. Beispiele finden sich hierzu in Abschn. 5.1.3.

Darüber hinaus haben Drehgeber viele weitere Funktionen und Eigenschaften. Diese lassen sich in einem morphologischen Kasten übersichtlich darstellen (Tab. 1.1). Details zu all diesen finden sich in den nachfolgenden Kapiteln.

Dieses Buch behandelt Drehgeber, also Geräte zur Erfassung rotativer Positionen. Fast alle Betrachtungen dazu lassen sich auch auf lineare Wegsensoren anwenden. Schließlich ist – mathematisch gesehen – eine Gerade ein Kreis mit unendlich großem Radius. Bei den Motor-Feedback-Systemen wird in der Praxis begrifflich nicht unterschieden, ob es sich um eine rotative oder lineare Messaufgabe handelt.

**Tab. 1.1** Übersicht zu Drehgeberfunktionen und -eigenschaften in einem morphologischen Kasten

Parameter	Ausprägung		
Art der Anwendung	Lagegeber (Encoder)	Motorgeber (Motor-Feedback-System)	
Gerätetopologie	elektromechanisch	mechatronisch	
Codierung	inkremental	absolut	hybrid (inkremental & absolut)
Messbereich	Teilkreis	Vollkreis (Singleturn)	Rundachsfunktion Mehrere Umdrehungen (Multiturn)
mechanische Konfiguration des Sensorkerns	berührend	berührungslos	
sensorisches Funktionsprinzip	optisch	magnetisch	induktiv
Anordnung des Sensorkerns	reflexiv	transmissiv	
Art der elektrischen Schnittstelle	digital parallel	digital seriell	analog hybrid
Kupplungsart	Wellenkupplung	Statorkupplung	
Lagerart	eingelagert	fremdgelagert (lagerlos)	
Flansch	Servoflansch	Klemmflansch	
Wellenart	Vollwelle	Aufsteck-Hohlwelle	Durchsteckwelle/Hohlwelle Konuswelle
Gerätetopologie	Gerät	Kit („Bausatz“)	
Elektrischer Abgang	Stecker radial	Stecker axial	Kabel radial Kabel axial
Funktionale Sicherheit (SIL und PL)	keine/PLa	SIL1/PLb/c	SIL2/PLd SIL3/PLe

---

## Zusammenfassung

Die Messaufgabe von Drehgebern besteht darin die Winkelstellung einer rotativen Achse zu einem Referenzpunkt zu messen und anzuzeigen. In diesem Kapitel werden relevante theoretische und messtechnische Grundlagen gelegt, notwendige Begriffe definiert und in Bezug gesetzt. Dabei wird nicht nur die eigentliche Winkelmessung betrachtet, sondern auch die Erfassung abgeleiteter Größen wie die Drehzahl und die Winkelbeschleunigung.

---

## 2.1 Winkel, Drehzahl und Winkelbeschleunigung

In der Trigonometrie (Mathematik der ebenen Geometrie) schließen zwei von einem gemeinsamen Punkt ausgehenden Geraden einen Winkel ein. Im Sinne von Drehgebern ist die Sichtweise besser geeignet wonach ein Winkel die Stellung zweier Schenkel mit der Drehachse als Scheitelpunkt beschreibt, also die Winkelstellung einer Drehachse zu einem Bezugspunkt, bzw. einer Bezugsachse (Abb. 2.1). Im Rahmen dieses Buchs wird der zu messende Winkel mit  $\varphi$  bezeichnet. Das Vorzeichen wird in der Praxis mit der Blickrichtung auf die Drehachse definiert. In der folgenden theoretischen Betrachtung spielt dies aber keine Rolle.

Für Winkel verwendet man die Einheiten Grad und Radian (das Gon wird hier nicht betrachtet<sup>1</sup>). Dabei hat eine Umdrehung bekanntermaßen 360 Grad

---

<sup>1</sup> Geodatisches Winkelmaß; 1 *Umdrehung*  $\hat{=}$  400 gon