



Stefan Basler

Drehgeber und Motor-Feedback- Systeme

Winkellage- und Drehzahlerfassung
in der industriellen Automation

2. Auflage



Springer Vieweg

Drehgeber und Motor-Feedback-Systeme

Stefan Basler

Drehgeber und Motor- Feedback-Systeme

Winkellage- und Drehzahlerfassung
in der industriellen Automation

2. Auflage

 Springer Vieweg

Stefan Basler
Brigachtal, Deutschland

ISBN 978-3-658-49403-2 ISBN 978-3-658-49404-9 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-49404-9>

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

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2016, 2025

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 allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jede Person benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des/der jeweiligen Zeicheninhaber*in sind zu beachten.

Der Verlag, die Autor*innen und die Herausgeber*innen gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autor*innen oder die Herausgeber*innen übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Alexander Grün

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Wenn Sie dieses Produkt entsorgen, geben Sie das Papier bitte zum Recycling.

Vorwort zur 2. Auflage

Erstaunlich, was sich in den letzten zehn Jahren, seit Veröffentlichung der 1. Auflage, in der Welt der Drehgeber und Motor-Feedback-Systeme getan hat. Landläufig gelten diese Sensoren der industriellen Automation als ausgereift und konservativ. Dem ist aber nicht so. Insbesondere in den Bereichen sensorische Funktionsprinzipien und den digitalen Funktionen hat die Entwicklung durchaus mit aktuellen Trends mitgehalten. Unterstützt wird diese These bei einem Blick auf Neuanmeldungen technischer Schutzrechte in diesem Technologiefeld beim Deutschen Patent- und Markenamt. Dies ist schon Motivation genug für eine zweite Auflage dieses Buches.

Damit wollte ich mich aber nicht begnügen. So habe ich alle Kapitel, bis auf das einführende, erweitert, wo es sinnvoll und von Mehrwert für den Leser und die Leserin schien. Nur die prominentesten Technologieerweiterungen zu berücksichtigen ist aber zu fade. So habe ich vermehrt in wissenschaftlichen Veröffentlichungen und der Patentliteratur nach spannenden Technologieansätzen recherchiert – insbesondere die Patentliteratur wird in Literaturrecherchen gerne übersehen, dabei ist diese oft die einzige öffentliche Quelle zu Neuerungen aus dem industriellen Umfeld. Gestützt wird dieser Ansatz durch deutlich erweiterte Quellenangaben.

Getreu dem Motto „Der Fortschritt lebt vom Austausch von Wissen“¹ habe ich für einen weiteren Austausch mit der Leserschaft eigens einen eMail-Account eingerichtet:

drehgeber-und-mfb@gmx.de

¹ Zitat wird Albert Einstein zugeordnet, was aber historisch nicht belegt ist.

Es interessiert mich ob und wie Ihnen dieses Buch im Studium oder der täglichen Arbeit von Nutzen ist – oder auch nicht. Ich freue mich über jeden konstruktiven Hinweis. Neugierig bin ich auch auf Anekdoten im Zusammenhang mit Drehgebern und Motor-Feedback-Systemen. Haben Sie Wünsche für eine weitere Auflage, lassen Sie es mich wissen.

Brigachtal
Mai 2025

Stefan Basler

Vorwort zur 1. Auflage

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, sodass mit dem Verlag zusammen entschieden wurde ein umfänglicheres 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

1	Einleitung	1
2	Messaufgabe	7
2.1	Winkel, Drehzahl und Winkelbeschleunigung	7
2.2	Messbereich	11
2.3	Winkelrechnung in Drehgebern	13
2.4	Codierung	20
2.4.1	Inkrementalcode	23
2.4.2	Absolutcode	25
2.4.3	Synchronisation	28
2.5	Auflösung, Messwertabweichung, Reproduzierbarkeit	31
2.5.1	Allgemeines	31
2.5.2	Messwertabweichung bei Drehgebern	37
2.5.3	Messwertabweichungen bei Sinus-Cosinus basierter Winkelrechnung	42
2.5.4	Signalverarbeitung und -korrektur	54
	Literatur	59
3	Sensorische Funktionsprinzipien	61
3.1	Optische Funktionsprinzipien	63
3.1.1	Vorbemerkungen	63
3.1.2	Schlüsselkomponenten	63
3.1.3	Schattenbildverfahren	75
3.1.4	Verfahren basierend auf optischer Beugung	79

3.1.5	Weitere optische Funktionsprinzipien	81
3.2	Magnetische Funktionsprinzipien	89
3.2.1	Vorbemerkungen	89
3.2.2	Magnetfeldsensoren	90
3.2.3	Messanordnungen und Magnete	99
3.2.4	Spezielle magnetische Sensoren für Drehgeber	108
3.3	Induktive Funktionsprinzipien	113
3.3.1	Vorbemerkungen	113
3.3.2	Signalverarbeitung	119
3.3.3	Häufig verwendete induktive Drehgeber	122
3.4	Kapazitives Funktionsprinzip	127
3.5	Resistiv-Potenziometrisches Funktionsprinzip	133
3.6	Zusammenfassung	138
	Literatur	139
4	Aufbau und Schnittstellen von Drehgebern	145
4.1	Vorbemerkungen	145
4.2	Drehgeberkomponenten und -module	147
4.2.1	Mechanische Lagerung	147
4.2.2	Kupplungselemente	151
4.2.3	Multiturn-Module	159
4.2.4	Sensorelektronik und Signalverarbeitung	173
4.3	Mechanische und elektrische Schnittstellen	175
4.3.1	Mechanischer Anbau	175
4.3.2	Elektrische Schnittstellen	180
4.3.3	Aspekte des Drehgeber-Anbaus	186
	Literatur	187
5	Drehgeber und Motor-Feedback-Systeme in der Anwendung	189
5.1	Übergeordnete Aspekte	189
5.1.1	Einordnung	189
5.1.2	Funktionale Sicherheit	190
5.1.3	Mehrwertfunktionen	197
5.2	Drehgeber	201
5.2.1	Aufgabe und Anforderungen	201
5.2.2	Elektrische Schnittstellen	204
5.2.3	Anwendungen und spezielle Drehgebervarianten	216
5.3	Motor-Feedback-Systeme	220
5.3.1	Aufgabe und Anforderungen	220
5.3.2	Elektrische Schnittstellen	230

5.3.3 Anwendungen	239
5.3.4 Geberlose Antriebssysteme	245
Literatur	249
Abkürzungen	251
Literatur	257
Stichwortverzeichnis	259

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Begriffe für Sensoren für die Winkellage- und Drehzählerfassung	2
Abb. 1.2	Schematische Darstellung der Funktionsblöcke eines Drehgebers (φ : Winkel)	3
Abb. 2.1	Winkel bei rotatorischer Bewegung	8
Abb. 2.2	Beispielhafte Messbereiche bei Drehgebern: oben – Singleturn, mitte – Multiturn (Messbereich: 4 Umdrehungen), unten – Rundachsfunktion (Messbereich: 2,73 Umdrehungen)	12
Abb. 2.3	Einheitskreisdarstellung mit rotierendem Vektor und daraus abgeleitete sinusförmige Signale	14
Abb. 2.4	Definition von φ_{elektr} und φ_{mech} bei winkelabhängigen Sinus-/Cosinus-Signalen mit 4 Perioden pro Umdrehung (PPR = 4)	16
Abb. 2.5	Struktur eines Kalman-Filters gemäß den Gleichungen der Grundform des Kalman-Filter nach [14]; vereinfachte Darstellung	18
Abb. 2.6	Ablaufdiagramm für den Algorithmus zur Berechnung eines Kalman-Filter	20
Abb. 2.7	Bewegungsablauf des Beispiels zur Darstellung von Eigenschaften eines EKF	21
Abb. 2.8	Vergleich <i>atan</i> -Interpolation (links) vs. EKF-Schätzung (rechts): Position	21

Abb. 2.9	Vergleich <i>atan</i> -Interpolation (links) vs. EKF-Schätzung (rechts): Geschwindigkeit	22
Abb. 2.10	Vergleich <i>atan</i> -Interpolation (links) vs. EKF-Schätzung (rechts): Beschleunigung	22
Abb. 2.11	Inkrementalsignale in Oszilloskopdarstellung, oben links – 1-kanalig digital, oben rechts – 3-kanalig digital, unten – 2-kanalig analog (sin/cos)	24
Abb. 2.12	Codescheibe für einen optischen Inkrementalgeber. (Quelle: SICK AG)	25
Abb. 2.13	Binäre Absolutcodes: oben – 5-Bit Binär-Code, unten – 5-Bit Gray-Code	26
Abb. 2.14	Nonius Codierung durch Überlagerung von Strichgittern unterschiedlicher Periodizität (zur besseren Verdeutlichung des Effekts dreimal hintereinander dargestellt)	27
Abb. 2.15	Nonius- und $M \times N$ -Codierung: ganz oben – Sinussignal eines Nonius-Codes mit $m = 16$ und $n = 15$, zweite von oben – entsprechende Winkelsignale der Nonius-Spuren, mitte – berechneter Winkel aus den Nonius- bzw. $M \times N$ -Codes, zweite von unten – Sinussignale eines $M \times N$ -Codes mit $m = 16$ und $n = 3$, entsprechende Winkelsignale des $M \times N$ -Codes	27
Abb. 2.16	Absolutcode: oben – schematische Darstellung einer 10-Bit Pseudo-Random-Code-Maßspur mit Abtaster; unten links – Codescheibe eines optischen Absolutwertdrehgebers mit Gray-Code; unten rechts – Codescheibe eines optischen Absolutwertdrehgebers mit Pseudo-Random-Code (in Anlehnung an SICK AG)	29
Abb. 2.17	Synchronisation zweier Teilmessungen	30
Abb. 2.18	Auflösung bei Inkrementalsignalen	32
Abb. 2.19	Amplitudenquantisierung und Winkelinterpolation: oben – analoge Sinus-/Cosinus-Signale, zweite von oben – Sinus-/Cosinus-Signale amplitudenquantisiert, zweite von unten – interpolierter Winkel, unten – sich ergebende Winkelschritte	33
Abb. 2.20	Drehzahlauflösung, δ_n , für verschiedene Abtastfrequenzen, f , und Drehgeberauflösungen, δ	35
Abb. 2.21	Auflösung und Genauigkeit bei Drehgebern	36
Abb. 2.22	Messwertabweichung über den Messbereich ε	38

Abb. 2.23	Winkelfehler beispielhaft für einen Drehgeber mit PPR = 16: von oben links im Uhrzeigersinn – gemessener und idealer Winkel, Winkelfehler, Ordnungsspektrum des Winkelfehlers, differentielle Nichtlinearität, integrale Nichtlinearität	39
Abb. 2.24	Geometrische Betrachtung der integralen Nichtlinearität	40
Abb. 2.25	Signal- und Fehlerkurven eines Systems mit großer integraler Nichtlinearität und PPR = 16: links oben – Sinussignal, rechts oben Einheitskreisdarstellung mit repräsentativen Punkten, links unten – aufgeprägter Winkelfehler (INL), rechts unten – alternative Sichtweise zur integralen Nichtlinearität	41
Abb. 2.26	Winkelfehlerbetrachtung bei perfekten Sinus-Cosinus-Signalen (PPR = 16): oben – Sinus-Cosinus-Signale, mitte – Winkelfehler, unten links – Lissajous-Figur, unten rechts – Ordnungsspektrum des Winkelfehlers	43
Abb. 2.27	Winkelfehlerbetrachtung bei Sinus-Cosinus-Signalen ungleicher Amplitude (PPR = 16): oben – Sinus-Cosinus-Signale, mitte – Winkelfehler, unten links – Lissajous-Figur, unten rechts – Ordnungsspektrum des Winkelfehlers	44
Abb. 2.28	Winkelfehlerbetrachtung bei Sinus-Cosinus-Signalen mit Phasenfehler (PPR = 16): oben – Sinus-Cosinus-Signale, mitte – Winkelfehler, unten links – Lissajous-Figur, unten rechts – Ordnungsspektrum des Winkelfehlers	45
Abb. 2.29	Winkelfehlerbetrachtung bei Sinus-Cosinus-Signalen mit Offsetfehler (PPR = 16): oben – Sinus-Cosinus-Signale, mitte – Winkelfehler, unten links – Lissajous-Figur, unten rechts – Ordnungsspektrum des Winkelfehlers	46
Abb. 2.30	Veränderung des Winkelfehlers für einen Drehgeber mit PPR = 16 und PPR = 64 über: links – Offset, mitte – Amplitude, rechts – Phase	46

Abb. 2.31	Winkelfehlerbetrachtung bei Sinus-Cosinus-Signalen mit hohem Klirrfaktor ($PPR = 16$): oben – Sinus-Cosinus-Signale, mitte – Winkelfehler, unten links – Lissajous-Figur, unten rechts – Ordnungsspektrum des Winkelfehlers	47
Abb. 2.32	Winkelfehlerbetrachtung bei Sinus-Cosinus-Signalen mit positionsabhängigem sinus- bzw. cosinusförmigem Übersprechen mit einer Amplitude von 2,5 % der Kanäle zueinander: oben – Sinus-Cosinus-Signale, mitte – Winkelfehler, unten links – Lissajous-Figur, unten rechts – Ordnungsspektrum des Winkelfehlers	48
Abb. 2.33	Winkelfehlerbetrachtung bei Sinus-Cosinus-Signalen mit starkem weißem Rauschen: oben – Sinus-Cosinus-Signale, mitte – Winkelfehler, unten links – Lissajous-Figur, unten rechts – Ordnungsspektrum des Winkelfehlers	49
Abb. 2.34	Fehler durch Zeitversätze in der sin/cos-Abtastung: links – in Abhängigkeit des Zeitversatzes und der Drehzahl, rechts oben – in Abhängigkeit von der Drehzahl ($\Delta t = 2,2 \mu s$), rechts unten – in Abhängigkeit des Zeitversatzes ($n = 340 \text{ Upm}$)	51
Abb. 2.35	Beispiel für den Einfluss von Winkelfehlern auf den Fehler in der Ermittlung der Winkelgeschwindigkeit ($PPR = 16$): oben – fehlerbehaftete Sinus-Cosinus-Signale, mitte links – Winkelfehler, mitte rechts – Drehzahl, unten links – Ordnungsspektrum des Winkelfehlers, unten rechts – Ordnungsspektrum des Drehzahlfehlers	54
Abb. 2.36	Drehzahlfehler bei abgetasteten Sinus-Cosinus-Signalen in Abhängigkeit des Abtastintervalls T und der Drehgeberauflösung δ	55
Abb. 2.37	Typisches Blockdiagramm für Drehgeber-Signalverarbeitung. (In Anlehnung an [2])	56
Abb. 2.38	Blockdiagramm mit Clarke-Transformation für mehrphasige Systeme	58
Abb. 3.1	Möglichkeiten zur Anordnung der Elemente des Sensors bei Drehgebern	62

Abb. 3.2	Anordnungen bei optischen Drehgebern: links – Scheibe transmissiv, mitte – Scheibe reflexiv, rechts – Trommel reflexiv	64
Abb. 3.3	Reflektive Anordnung (Codescheibe ist in zwei axialen Positionen dargestellt). (Eigene Darstellung in Anlehnung an [12])	66
Abb. 3.4	Schematische Darstellung einer Beleuchtungseinheit für optische Drehgeber	68
Abb. 3.5	Schematisierte Darstellung eines Abtast-ASICs für einen optischen Drehgeber. (In Anlehnung an SICK AG) ...	72
Abb. 3.6	Optischer Abtaster mit virtueller Maske. (Eigene Darstellung in Anlehnung an [19])	73
Abb. 3.7	Optische Abtastung für bildverarbeitenden Drehgeber. (Eigene Darstellung in Anlehnung an [22])	75
Abb. 3.8	Schattenbildverfahren als optisches Abtastprinzip. (In Anlehnung SICK AG)	76
Abb. 3.9	Aufbau eines eigengelagerten optischen Drehgebers mit Schattenbildverfahren. (In Anlehnung SICK AG)	77
Abb. 3.10	Elektroformierte Federstruktur am Innendurchmesser einer Metallcodescheibe. (In Anlehnung an SICK AG)	79
Abb. 3.11	Prinzip der Drehgeber mit diffraktiver Optik. (In Anlehnung an [16])	80
Abb. 3.12	Verdrehungsmoiré	82
Abb. 3.13	Prinzip eines optischen Polarisationsdrehgebers	84
Abb. 3.14	Signale eines 4-phasigen optischen Polarisationsdrehgebers	85
Abb. 3.15	Alternative Anordnungen von Polarisationdrehgeberkomponenten: oben – eine Lichtquelle zentrisch und mehrere Photodioden mit ausgerichteten Polarisatoren auf zentrischem Kreis, unten links - eine Lichtquelle exzentrisch und mehrere Photodioden mit strukturiertem Polarisator blockweise exzentrisch, unten rechts – eine zentrische Photodiode und mehrere Lichtquellen mit ausgerichteten Polarisatoren auf zentrischem Kreis	86
Abb. 3.16	Ringförmig rotierender Lichtspot	87

Abb. 3.17	Prinzip der optischen Maus (links) und Anwendungsbeispiel der selbstmischenden Interferenz zur Messung der Rotation einer Oberfläche (rechts; zwei Sensoreinheiten mit entgegengesetzter Neigung zur Reduzierung der Effekte mechanischer Toleranzen)	88
Abb. 3.18	Schematische Darstellung eines horizontalen (links) und eines vertikalen Hall-Elements (rechts)	91
Abb. 3.19	Hall-Sensor: links – Hall-Sensor mit vier um ein rotatorisches Zentrum angeordneten horizontalen Hall-Elementen, rechts – Anordnung eines magnetischen Drehgebersensors mit diametral magnetisiertem Zylindermagnet und Hall-Sensor mit schematischer Darstellung der magnetischen Feldstärkekomponente senkrecht zum Sensor (Z-Richtung)	92
Abb. 3.20	3D-Hall-Pixelsensor (rechts) mit einem horizontalen Hall-Element zur Erfassung der magn. Flussdichte in der Z-Achse und je zwei vertikale Hall-Elemente für jeweils die X- und Y-Achse	93
Abb. 3.21	Zirkular vertikaler Hallsensor (schematische Darstellung in Draufsicht) mit zentrisch angeordnetem drehbaren Dipol-Magnet und rotierender Anschlusstechnik	94
Abb. 3.22	Details zu XMR-Sensoren: links – XMR-Sensor-Messbrücke, mitte – AMR-Sensorstruktur, rechts – AMR-Element mit Barber-Pole	95
Abb. 3.23	Schichtmodelle von XMR-Sensorelementen in vereinfachter schematischer Darstellung: links – AMR, mitte – GMR, rechts – TMR. (In Anlehnung an [52])	98
Abb. 3.24	Sensorkomponente mit zwei magnetischen Sensorelementen; links – vertikal gestapelt, rechts – horizontal nebeneinander	99
Abb. 3.25	Messanordnungen magnetischer Drehgeber: links – tangential-exzentrisch, mitte – axial-zentrisch, rechts – axial-exzentrisch)	100
Abb. 3.26	Verschiedene magnetische Maßverkörperungen jeweils in Draufsicht (oben) und Seitenansicht (unten): links – Diametralmagnet, mitte – Polscheibe, rechts – Polrad	101

Abb. 3.27	Ringmagnet mit Halbach-Muster unter Darstellung der Feldlinien und der magnetischen Feldstärke und zentrisch angeordnetem Magnetfeldsensor	102
Abb. 3.28	magnetischer Zahnradsensor	107
Abb. 3.29	Wiegand-Draht: links oben – Wiegand-Draht mit gegensinniger Magnetisierung von Mantel und Kern, links unten – Wiegand-Draht mit gleichsinniger Magnetisierung von Mantel und Kern, rechts – elektrischer Impuls eines Wiegand-Drahts	109
Abb. 3.30	Verhalten eines Wiegand-Draht in einem veränderlichen magnetischen Feld	110
Abb. 3.31	Anordnungsbeispiele eines Wiegand-Sensors	110
Abb. 3.32	Wirkprinzip eines Reed-Schalters	111
Abb. 3.33	Domänenzähler. (In Anlehnung an [76])	112
Abb. 3.34	Arten induktiver Kopplung: links – variabler Transformator, rechts – variable Reluktanz	113
Abb. 3.35	Schematische Darstellung eines Reluktanzresolver: oben – Schnittbild, unten – Draufsicht	115
Abb. 3.36	Targets für induktive Drehgebersensorik: von links oben im Uhrzeigersinn – Leiterschleife, LC-Resonanzkreis, leitfähiges, geometrisch geformtes Element, Koppelschleife, Magnet	116
Abb. 3.37	RVDT („rotary variable differential transformer“)	118
Abb. 3.38	Signale induktiver Sensoren mit drei Spulen: linke Spalte – eine Erregerspule, zwei Empfangsspulen, rechte Spalte – zwei Erregerspulen, eine Empfangsspule ...	121
Abb. 3.39	Schematische Darstellung eines bürstenlosen Resolvers: oben – Schnittbild, unten – Draufsicht	123
Abb. 3.40	Reluktanzresolver mit unterschiedlich in der Periodenstruktur konfigurierten Rotoren schematische: links – einpoliger Rotor, mitte – zweipoliger Rotor, rechts – vierpoliger Rotor	124
Abb. 3.41	Induktiver Sensor mit drei PPR (Konturen generiert mit der Software „LDC5072 Sensor Designer“ von Texas Instruments, Version 2.0); links – Spulen und Target überlagert, mitte – Target, rechts – PCBA mit Fokus auf den Spulen und deren Anschlüsse	126
Abb. 3.42	Prinzipien kapazitiver Sensoren: oben – variable Elektrodenfläche, unten – variable Permittivität	129

Abb. 3.43	Aufbau kapazitiver Drehgeber. a) 3-Platten, b) 2-Platten. (Quelle: SICK AG)	129
Abb. 3.44	Komponenten eines kapazitiven 3-Platten-Drehgebers: links – Senderplatine, mitte – dielektrischer Rotor, rechts – Empfängerplatine. (In Anlehnung an SICK AG) ...	130
Abb. 3.45	Signalverarbeitung kapazitiver Drehgeber	132
Abb. 3.46	integrierte Schirmung bei kapazitiven Drehgebern. (Quelle: SICK AG)	133
Abb. 3.47	Resistives Potenziometer: links – schematische Darstellung, rechts – Ersatzschaltbild	134
Abb. 3.48	Durchhangfehler bei resistiv-potenzimetrischen Drehgebern	136
Abb. 4.1	Schnittbild unterschiedlicher Ausführungen von Drehgeber und deren Anwendung: a) Anbaugeber mit Eigenlagerung, b) Anbaugeber mit Fremdlagerung, c) Kit→ Schnittbild Geber + Anwendung mit Indikation nach Lagern und Kupplungselementen	146
Abb. 4.2	Lagerung bei Drehgebern: oben – kleiner Lagerabstand, unten – großer Lagerabstand	149
Abb. 4.3	Schnitt durch einen Lagerflansch (in Anlehnung an Baumer AG)	149
Abb. 4.4	Arten der Wellenverlagerung: oben – radial, mitte – angular, unten – axial	153
Abb. 4.5	Bauformen von Wellenkupplungen mit drehsteifer Kopplung: von links nach rechts –Metallbalg-, Steg- und Oldham-Kupplung. (Quelle: SICK AG, mit Ausnahme der Oldham-Kupplung)	155
Abb. 4.6	Bauformen von Wellenkupplungen mit drehelastischer Kopplung: von links nach rechts – Federscheibe-, Feder-, Doppelschlaufen-, (elastische) Klauen-Kupplung. (Quelle: SICK AG)	155
Abb. 4.7	Beispiele für Statorkupplungen: von links nach rechts – Federblechstütze, kombinierte Metall-Gummi-Kupplung, Gummimomentenstütze. (Quelle: in Anlehnung an SICK AG)	158
Abb. 4.8	Schematische Darstellung eines getriebebasierten Multiturns	162

Abb. 4.9	Schematisierte Darstellung eines getriebebasierten, magnetischen Multiturns. (Quelle: in Anlehnung an SICK AG)	163
Abb. 4.10	Multiturn mit Nonius-Codierung	164
Abb. 4.11	Domänenzähler in der Anwendung	164
Abb. 4.12	Wiegand-Sensor	167
Abb. 4.13	Wiegand-Effekt-Sensor mit magnetischer Maßverkörperung, Wiegand-Sensor, Energiespeicher und Auswerte-Zählschaltung	168
Abb. 4.14	Wiegand-Sensor zur Abtastung einer großen Hohlwelle	169
Abb. 4.15	Mikrogenerator mit freischwingender Feder (eigene Darstellung in Anlehnung an [15])	170
Abb. 4.16	Mikrogenerator mit Schnappelement (eigene Darstellung in Anlehnung an [17])	171
Abb. 4.17	Mikrogenerator mit zentrischer Magnetanordnung (eigene Darstellung in Anlehnung an [18])	171
Abb. 4.18	Dynamo integriert in Drehgeber (eigene Darstellung in Anlehnung an [13])	172
Abb. 4.19	Signalverarbeitungsflussdiagramm	173
Abb. 4.20	Drehgeberankopplung am Beispiel der Antriebstechnik	176
Abb. 4.21	Schnittbilder von Drehgebern mit unterschiedlichen Wellenarten: a) Vollwelle, b) Aufsteckhohlwelle, c) Durchsteckhohlwelle	177
Abb. 4.22	Schnittbilder von Drehgebern mit unterschiedlichen Flanscharten: a) Servoflansch, b) Klemmflansch	179
Abb. 4.23	Differentielle Datenübertragung	180
Abb. 4.24	Reale Sinussignale bei Drehgebern	182
Abb. 5.1	Einordnung der Drehgeber in die Automatisierungspyramide. (Quelle: in Anlehnung an SICK AG)	190
Abb. 5.2	Konzepte zur funktionalen Sicherheit mit Drehgebern: links – extern, rechts – integriert. (Quelle: SICK AG)	196
Abb. 5.3	Oszilloskopdarstellung des Jitters bei Inkrementalgebern ...	202
Abb. 5.4	Generierung von Zählimpulsen bei Inkrementaldrehgebern	203
Abb. 5.5	Schematische Darstellung der Inkrementaldrehgeberschnittstelle	205
Abb. 5.6	Nullimpulsdefinitionen	206

Abb. 5.7	Signale bei einem Inkrementaldrehgeber mit sinusförmigen Signalen	206
Abb. 5.8	Definition von Messbereich und Einheitsbereich	207
Abb. 5.9	Blockschaltbild zur synchron-seriellen Schnittstelle (SSI)	209
Abb. 5.10	Schematische Darstellung eines Seilzug-Drehgebers	218
Abb. 5.11	Anwendungsbeispiel für einen Messrad-Drehgeber	219
Abb. 5.12	Prinzip zur Drehmomentmessung basierend auf Differenzwinkel mittels Drehgeber-Kits	221
Abb. 5.13	Servoantriebssystem mit Gebern für Winkel, Geschwindigkeit und Kommutierung	221
Abb. 5.14	Servoantriebssystem mit Motor-Feedback-System	222
Abb. 5.15	Servomotor mit Kaskadenregelung und eingebautem Motor-Feedback System (in Anlehnung an SICK AG)	222
Abb. 5.16	Lagerströme in einem Elektromotor	228
Abb. 5.17	Kugellager mit elektrischem Ersatzschaltbild	229
Abb. 5.18	Sinus-Cosinus-Auswertung in Antriebssystemen. (Quelle: in Anlehnung an SICK AG)	232
Abb. 5.19	Servoantriebssystem mit Einkabel-Technologie basierend auf einem Motor-Feedback-System	235
Abb. 5.20	Hybridkabel für die Einkabel-Technologie	239
Abb. 5.21	4-Draht (oben) und 2-Draht (unten) Implementierung für die Einkabel-Technologie	240
Abb. 5.22	Blockschaltbild eines geberlosen Antriebssystems (in Anlehnung an SICK AG)	246
Abb. 5.23	Hybrides System aus geberloser Regelung und Motor-Feedback-Infrastruktur	249

Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1	Übersicht zu Drehgeberfunktionen und -eigenschaften in einem morphologischen Kasten	4
Tab. 2.1	Fehlerquellen für Winkelabweichungen innerhalb einer Sinus-Cosinus-Periode	43
Tab. 2.2	Übersicht der Ordnungen verschiedener Winkelfehlerkomponenten	51
Tab. 2.3	Graphische Zusammenfassung gängiger Winkelfehlerursachen von Sinus-Cosinus-Signalen und deren Wirkung am Beispiel eines Systems mit $PPR = 16$...	52
Tab. 3.1	Sender-Modulator-Empfänger des nach dem Schattenbildverfahren arbeitenden optischen Drehgebers	75
Tab. 3.2	Sender-Modulator-Empfänger bei diffraktiver Drehgebersensorik	79
Tab. 3.3	Sender-Modulator-Empfänger des Moiré-Prinzips	81
Tab. 3.4	Sender-Modulator-Empfänger des Polarisationsdrehgebers	83
Tab. 3.5	Sender-Modulator-Empfänger Einordnung für magnetische Drehgebersensorik	89
Tab. 3.6	Sender-Modulator-Empfänger Einordnung für induktive Drehgebersensorik	113
Tab. 3.7	Sender-Modulator-Empfänger Einordnung für optische Drehgebersensorik	128
Tab. 3.8	Sender-Modulator-Empfänger Einordnung für resistiv-potenziometrische Drehgebersensorik	134

Tab. 3.9	Sensorische Funktionsprinzipien im Einsatz bei Drehgebern	138
Tab. 3.10	Anforderungsparameter bezüglich Drehgebersensorik (Auszug)	139
Tab. 4.1	Übersicht Eigenschaften Wellenkupplungen für Drehgeberanwendungen (in Anlehnung an 8)	156
Tab. 4.2	Eigenschaften von Multiturn-Modulen	161
Tab. 5.1	Normen zur funktionalen Sicherheit	192
Tab. 5.2	Kennwerte zur Risikobeurteilung in funktional sicheren Systemen	193
Tab. 5.3	Sicherheits-Teilfunktionen von Antrieben nach EN 61800-5-2. Beispiele	194
Tab. 5.4	Industrial Ethernet Feldbusse mit Verwendung bei Drehgebern	214
Tab. 5.5	Protokollerweiterungen für funktionale Sicherheit gängiger Industrial Ethernet Feldbusse	215
Tab. 5.6	Anwendungsbeispiele für Seilzug-Drehgeber	219
Tab. 5.7	Anwendungsbeispiele für Messrad-Drehgeber	220
Tab. 5.8	Übersicht Einkabel-Schnittstellen für Motor-Feedback Anwendungen	237



Einleitung

1

Zusammenfassung

Drehgeber und Motor-Feedback-Systeme 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 näher beschrieben werden.

Nahezu überall, wo etwas bewegt wird, drehen sich Achsen. Um diese rotatorische Bewegung steuern und regeln zu können, bedarf es Drehgeber und Motor-Feedback-Systeme. Diese wandeln den mechanischen Winkel zweier sich relativ zueinander drehbarer Objekte in ein elektrisches Signal um. Drehgeber und Motor-Feedback-Systeme unterscheiden sich dabei primär in der Anwendung und in sich daraus ergebenden Geräteanforderungen. Während Drehgeber in allgemeinen Anwendungen zur Erfassung eines Winkels einer Drehachse verwendet werden, sind Motor-Feedback-Systeme speziell für den Einsatz in Elektromotoren¹ ausgelegt. Man kann auch unterscheiden, dass ein Drehgeber als Lastgeber dient (er misst an der Lastachse) und ein Motor-Feedback-System als Motorgeber (es ist direkt im oder am Elektromotor angebracht).

¹ 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.



Abb. 1.1 Begriffe für Sensoren für die Winkellage- und Drehzahlerfassung

Neben Drehgeber 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. Der Begriff Motor-Feedback-System wird 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).² Der Sender bringt Energie in das System ein. Der Modulator verändert die eingebrachte Energie proportional zum mechanischen Winkel und 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. Drehgeber sind somit mechatronische Systeme – im Aufbau und in der Anwendung. Für die Entwicklung, Produktion und Applikation von Drehgebern bedarf es Kenntnisse in der Elektrotechnik, im Maschinenbau, in der Nachrichtentechnik und im Software-Engineering. Weiteres Spezial-Knowhow in der technischen Optik, der Magnetik, oder ganz allgemein der Physik sind für einige Fragestellungen unerlässlich.

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

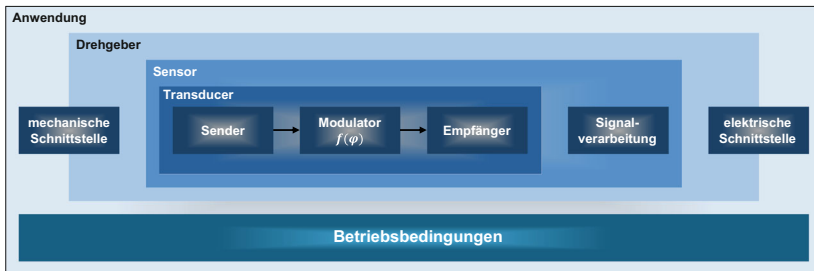


Abb. 1.2 Schematische Darstellung der Funktionsblöcke eines Drehgebers (φ : Winkel)

Diese abstrakte Betrachtungsweise hinsichtlich Sender-Modulator-Empfänger lässt sich mittels unterschiedlicher sensorischer Prinzipien umsetzen. In Drehgebern finden sich optische, magnetische, induktive, kapazitive und resistiv-potenzmetrische 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			
<i>Art der Anwendung</i>	Lagegeber (Drehgeber)	Motorgeber (Motor-Feedback-System)		
<i>Gerätetopologie</i>	Elektromechanisch	Mechatronisch		
<i>Codierung</i>	Inkremental	Absolut	Hybrid (inkremental & absolut)	
<i>Messbereich</i>	Teilkreis	Vollkreis (Singletum)	Rundachsfunktion	Mehrere Umdrehungen (Multitum)
<i>Mechanische Konfiguration des Sensorkerns</i>	Berührend	Berührungslos		
<i>Sensorisches Funktionsprinzip</i>	Optisch	Magnetisch	Induktiv	Kapazitiv
<i>Anordnung des Sensorkerns</i>	Reflexiv	Transmissiv		
<i>Energiequelle Multitum</i>	Lageenergie	Magnetische Energie	Batterie	
<i>Art der elektrischen Schnittstelle</i>	Digital parallel	Digital seriell	Analog	Hybrid
<i>Kupplungsart</i>	Wellenkupplung	Statorkupplung		

(Fortsetzung)

Tab. 1.1 (Fortsetzung)

Parameter	Ausprägung				
Art der Anwendung	Lagegeber (Drehgeber)	Motorgeber (Motor-Feedback-System)			
Lagerart	Eigengelagert	Fremdgelagert (lagerlos)			
Flansch	Servoflansch	Klemmflansch			
Wellenart	Vollwelle	Aufsteck-Hohlwelle/ Topfwelle	Durchsteckwelle/ Hohlwelle	Konuswelle	
Gerätetopologie	Gerät	Kit („Bausatz“)			
Elektrischer Abgang	Stecker radial	Stecker axial	Stecker drehbar	Kabel radial	Kabel axial
Funktionale Sicherheit (SIL und PL)	Keine/PL a	SIL1/PL b/c	SIL2/PL d	SIL3/PL e	