

# HANSER



## Leseprobe

zu

## Kollaborative Roboterapplikationen

von Andreas Schunkert und Christoph Ryll

Print-ISBN: 978-3-446-46273-1

E-Book-ISBN: 978-3-446-46540-4

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446462731>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Die Geschichte der kollaborativen Robotik	3
1.2	Arten der kollaborativen Robotik	4
1.2.1	Unterscheidung nach Norm	4
1.2.2	Unterscheidung nach Kontaktsituation	6
1.2.3	Was ist überhaupt ein kollaborativer Roboter?	7
<b>2</b>	<b>Auswahl des Roboters</b>	<b>11</b>
2.1	Technische Kennwerte	14
2.1.1	Positionsgenauigkeit vs. Positions-Wiederholgenauigkeit	14
2.1.2	Sicherheitskennzahlen	15
2.1.2.1	Der Performance Level	17
2.1.2.2	Safety Integrity Level	19
2.1.3	Geschwindigkeit	19
2.1.4	Schnittstellen	22
2.2	Programmierung und Bedienung	22
2.3	AddOns und Zusatzgeräte	24
<b>3</b>	<b>Der kollaborierende Roboter in der Normung</b>	<b>25</b>
3.1	CE-Richtlinien	26
3.2	Die Maschinenrichtlinie	28
3.3	Die Risikobeurteilung nach EN ISO 12100	33
3.3.1	Grenzen der Maschine	34
3.3.2	Identifizierung der Gefährdung	36
3.3.3	Risikoeinschätzung	38
<b>4</b>	<b>Der sichere überwachte Halt</b>	<b>49</b>
4.1	Betrachtung der Stoppzeiten und Stoppwege	53
4.2	Berechnen oder Messen	56
4.3	Sicherheitsfunktionen für Stoppzeiten und Stoppwege	57

<b>5</b>	<b>Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung .....</b>	<b>63</b>
<b>6</b>	<b>Kraft- und Leistungsbegrenzung .....</b>	<b>67</b>
6.1	Die ISO TS 15066 und ihre Anwendung .....	67
6.2	Messung der physikalischen Parameter .....	72
6.2.1	Kraft- und Druckmessung .....	72
6.2.2	Berechnung der Kollisionskräfte .....	77
6.3	Messungen in der Applikation .....	81
6.4	Bewertung der Kraft- und Druckwerte.....	84
<b>7</b>	<b>Die kollaborierende Applikation mit Handführung .....</b>	<b>89</b>
7.1	Normative Einführung .....	89
7.2	Assistierende Systeme in der Praxis .....	90
7.2.1	Roboter als Hebezeug .....	90
7.2.2	Roboter als Werkstückhalter .....	92
<b>8</b>	<b>Beispiele aus der Praxis .....</b>	<b>95</b>
8.1	Beispiele Maschinenbeladung.....	95
8.2	Beispiel Schraubanwendung.....	99
8.3	Beispiel Palettierer .....	101
8.4	Beispiel Handführungen mit dem Industrieroboter .....	107
8.4.1	Produktaufnahme handgeführt .....	107
8.4.2	Produktablage handgeführt .....	110
8.4.3	Qualitätskontrolle am Werkstück .....	111
8.5	Beispiel Klebeanwendung .....	118
8.6	Beispiel Montage.....	120
8.7	Beispiel Qualitätssicherung .....	123
8.8	Beispiel Schweißen mit dem Cobot .....	125
8.8.1	Offene Applikationen .....	125
8.8.2	Geschlossene Applikationen .....	128
8.9	Beispiel Schleifen und Polieren .....	130
<b>9</b>	<b>Der Zustimmungstaster: notwendig oder überflüssig? .....</b>	<b>133</b>
9.1	Aufgabe des Zustimmungstasters in traditionellen Anwendungen .....	133
9.2	Der Zustimmungstaster in kollaborierenden Anwendungen .....	135
9.3	Erkenntnisse zum Zustimmungstaster in kollaborierenden Anwendungen .....	138

<b>10 Regeln für die Planung und den Bau einer kollaborierenden Applikation .....</b>	<b>141</b>
10.1 Der Kollaborationsraum .....	144
10.2 Sinnvolle Verknüpfung von Sicherheitsfunktionen .....	146
10.2.1 Sicherheitskonzept – hybrides MRK-System .....	147
10.2.2 Personenerkennung zum Wechsel in Kraft- und Leistungsbegrenzung ..	149
10.2.3 Konzept Sequenzerkennung durch Scanner und Logik – Hintertretschutz	151
10.2.4 Hintertretschutz/Personendetektion durch Radar .....	152
10.2.5 Limitierung der $V_{\max}$ = Reduzierung des $S_{BWS}$ .....	153
10.2.6 Geschwindigkeitskaskaden, wenn wenig Platz vorhanden ist .....	158
10.2.7 Autonomer Wiederanlauf .....	160
10.3 Autonomer Wiederanlauf bei Kraft- und Leistungsbegrenzungen .....	163
10.4 Design des Roboters und Endeffektors .....	164
10.4.1 Kollisionsfreundlich ab Werk .....	164
10.4.2 Taktile Absicherung .....	166
10.4.3 Berührungslos wirkende Absicherung .....	167
10.5 Absicherung des Werkstücks .....	169
10.6 Schutzprinzipien .....	173
10.6.1 Inhärent sichere Konstruktion .....	174
10.6.2 Technische Schutzmaßnahmen .....	177
10.6.3 Schutzeinrichtungen des Industrieroboters .....	185
10.6.4 Not-Halt am Robotersystem .....	189
10.6.5 Betriebsanleitung des Robotersystems .....	190
10.6.6 Persönliche Schutzausrüstung (PSA) .....	193
10.6.7 Unterweisung .....	194
10.6.8 Signale und Warnungen .....	195
10.6.9 Kennzeichnung .....	196
<b>11 Ausblick auf kommende Techniken .....</b>	<b>199</b>
11.1 Vom Integrationsprojekt zur Online-Applikation .....	201
11.2 Von der Kollisionserkennung zur Kollisionsvermeidung .....	203
11.3 Simulationsbasierte Bewertung einer Kollision .....	205
<b>12 Zusammenfassung .....</b>	<b>209</b>
<b>13 Normen .....</b>	<b>211</b>
<b>Literatur .....</b>	<b>213</b>
<b>Stichwortverzeichnis .....</b>	<b>215</b>



# Vorwort

Kollaborative Robotik ist seit Jahren ein immer stärker wachsender Markt, in welchem Jahr für Jahr neue Hersteller, neue Produkte und neue Möglichkeiten hinzukommen. Viele Unternehmen sehen in dieser Sparte der Robotik die Zukunft für ihre Produktionslinien und haben hier auch schon erste Erfahrungen gesammelt. Manche Unternehmen sind hier aber auch erst ganz am Anfang. So wie es in der Anzahl der Applikationen mit kollaborativen Robotern Unterschiede von „noch gar keine“ bis hin zu über 200 Cobots in einem Firmensstandort gibt und damit einhergehende unterschiedliche Wissensstände, existiert oft auch ein völlig unterschiedliches Verständnis von dem, was diese Technologie mit sich bringt und wie man sie einsetzen kann.

In klein- und mittelständischen Unternehmen hat man oft bereits von kollaborierenden Robotern gehört und diese auch schon auf vielen Messen gesehen. Dort wird jedoch oft ein unvollständiges Bild zu der Komplexität einer kollaborativen Anwendung gezeigt, was dann in diesen Unternehmen zu überzogenen Erwartungshaltungen führt. Hier fehlt oft das Verständnis für den ganzheitlichen Sicherheitsaspekt. Manchmal hat man hier den Eindruck, es gäbe die Auffassung, dass der kollaborative Roboter alles um sich herum automatisch sicher macht, was natürlich nicht der Fall ist.

In großen Unternehmen und Konzernen hat man dagegen auch erste Erfahrungen mit kollaborativen Robotern gesammelt. In diesen Unternehmen ist dann meist auch eine Fachkraft für Arbeitssicherheit beschäftigt, welcher sich dort auch explizit um die ganzheitliche Sicherheitsthematik solcher Applikationen kümmert. Hier findet man dann oft das andere Extrem. Nämlich, dass das Risiko hier zu hoch bewertet wird und man sich dadurch in den Möglichkeiten beschneidet.

Dieses Buch soll dabei helfen, an beiden Enden dieser Kette mehr Klarheit zu schaffen, und denjenigen, die dem Risiko fälschlicherweise zu wenig Beachtung schenken, mehr Verständnis für Gefahren und Risiken geben, die auch bei einem Cobot noch vorhanden sind, wenn man ihn nicht richtig einsetzt. Aber eben auch der anderen Seite aufzeigen, dass gewisse Risiken vielleicht gar keine Risiken sind oder auch anders betrachtet bzw. bewertet werden sollten. Somit ist dieses Buch sowohl der ideale Einstieg für den Cobot-Anfänger, welcher eventuell gerade in der Planung seiner ersten kollaborativen Applikation ist. Aber eben auch das ideale Hilfsmittel für jemanden, der schon einige Erfahrungen mit kollaborativen Robotern gesammelt hat und seine Sichtweise auf seine bereits vorhandenen Applikationen, aber auch auf zukünftige Applikationen nachjustieren möchte.

Dieses Buch wird Ihnen nicht nur erläutern, wie eine allgemeine Risikobeurteilung gem. der EN ISO 12100 aufgebaut ist und welche Bestandteile eine solche Risikobeurteilung hat, sondern Ihnen auch erläutern, wie Sie die ISO TS 15066 in Ihre Risikobeurteilung mit einfließen lassen, wenn Sie eine Applikation mit Kraft- und Leistungsbegrenzung bewerten möchten. Ebenso zeigt dieses Buch auch, worauf Sie bei anderen Kollaborationsarten, wie z. B. dem sicheren überwachten Halt oder der Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung, achten müssen und wie Sie diese bewerten.

Der vordere Teil des Buches wird Ihnen notwendige Grundlagen vermitteln, welche Sie benötigen, um eine kollaborative Applikation zu verstehen und sicher umzusetzen. Der hintere Teil des Buches wird Ihnen dann viele Beispiele aus der Praxis zeigen. Diese werden Ihnen zum einen Anreize und Möglichkeiten für Ihre eigenen Applikationen geben, Ihnen aber auch erläutern, wo bei diesen Beispielen die Herausforderungen lagen, worauf geachtet werden musste und welche Lösungsansätze man verfolgt hat. Sie können diesen Teil des Buches letztlich als Leitfaden für die Umsetzung Ihrer Applikation verwenden. Damit ist dieses Buch eine mehr als wertvolle Hilfe bei der Umsetzung Ihres eigenen Cobot-Projekts.

Andreas Schunkert und Christoph Ryll,  
Juli 2022

# 1

## Einleitung



### Fragen, die dieses Kapitel beantwortet:

- Wie sieht die Geschichte der Automatisierung aus?
- Wo kommen kollaborative Roboter her und wann gibt es diese?
- Welche Arten von kollaborativen Anwendungen seit gibt es?
- Wie kann man und wie sollte man kollaborative Anwendungen unterscheiden/staffeln?
- Was ist ein kollaborativer Roboter?
- Ist es der kollaborative Roboter oder die kollaborative Applikation?

Wenn man von der industriellen Revolution spricht, dann hat man hierbei oft nur den Schritt von der einfachen Fertigung zur Fließbandfertigung im Kopf. Dieser Schritt war aber in der Geschichte der industriellen Fertigung nicht der einzige bahnbrechende Umbruch. Schon vor dem Schritt zur Fließbandfertigung hatten Dampfmaschinen Ende des 18. Jahrhunderts die Fabriken und Produktionshallen mit neuen Möglichkeiten auf die nächste Stufe der Fertigung gehoben. Wenn wir den heute oft verwendeten Begriff der Industrie 4.0 als Referenzpunkt nehmen, so war dies dann der Schritt zur Industrie 1.0.

1913 führte dann Henry Ford die Fließbandfertigung in seiner Autoproduktion ein und machte damit dann den Schritt zu Industrie 2.0. Hierbei wurde die Fertigung dahingehend umgestellt, dass ein Arbeiter nicht mehr eine Vielzahl von verschiedenen Dingen nacheinander tätigte, sondern nur noch eine spezielle Montagetätigkeit durchführte. Das Bauteil wurde dann anschließend zum nächsten Arbeiter weiter getaktet und dieser erledigte dann den nächsten Arbeitsschritt. Hierdurch war es Ford möglich, schneller und kosteneffizienter zu produzieren, was dazu führte, dass diese Methode schnell in sämtliche Sparten der Industrie kopiert wurde. Man muss der Vollständigkeit halber hier jedoch erwähnen, dass es nicht Henry Ford war, der diese Art der Fertigung erfunden hat. Bereits Ende des 15. Jahrhunderts wurden in Venedig Schiffe in einer Art Reihenfertigung gebaut. Und auch in den USA waren andere hier bereits vor Henry Ford auf die Vorteile dieser Fertigungsmethode gekommen. So wurden z. B. um das Jahr 1870 in verschiedenen Schlachthöfen in Cincinnati Transportbänder dafür eingesetzt, Schweine von einem Arbeiter zum Nächsten zu transportieren. Die Arbeiter haben dann jeweils nur spezifische Arbeitsschritte an den Schweinen durchgeführt. Dies entspricht genau dem Vorgehen, welches dann später in den Fordwerken eingeführt wurde und Ford den Ruf als Vorreiter der Fließbandarbeit beschert hat.



Mitte der Siebzigerjahre waren es dann die Computer und die Mikroelektronik, welche die Industrie in Richtung Industrie 3.0 revolutioniert hat. Speziell der Einzug der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) hat die Industrie hier maßgeblich beeinflusst. Plötzlich war nicht mehr nur der Elektriker gefragt, welcher Motoren und Schalter anschließen konnte, sondern es wurden nun auch Fachleute mit Programmierkenntnissen gesucht, um diese neue Technik einsetzen zu können. Die Urväter der SPS waren hierbei Richard E. Morley von der Firma Modicon und Odo J. Struger von der Firma Allen Bradley. Diese beiden stellten 1969 die Modicon 084 als solid-state sequential logic solver (Halbleiter-basierendes sequentielles Logiksystem) vor.

All die vorgenannten Veränderungen waren dadurch getrieben, die Fertigung schneller und kosteneffizienter zu machen. Doch im Rahmen der Industrie 3.0 kam noch ein weiterer großer Faktor dazu – Flexibilität! Während Henry Ford seine Fließbandfertigung damals so auslegte, dass er zigtausende der gleichen Autos fertigen konnte, die sich im Großteil maximal in der Farbe unterschieden, stellen Autohersteller heute jedes Auto individuell nach Kundenwunsch her. Mit Soundsystem oder ohne, Leder- oder Stoffsitzen, Schiebedach oder Glaspanoramadach usw. Dies sind nur einige Auswahlmöglichkeiten, welche der Kunde heutzutage hat, wenn er sich ein neues Auto zulegen möchte. Aber diese Vielfalt stellt natürlich enorme Ansprüche an den Hersteller und dessen Produktion. Er muss in der Lage sein, dass Fahrzeug individuell nach Kundenwunsch und dennoch schnell und kosteneffizient zu fertigen. Hierbei helfen ihm nun Roboter, die den Arbeiter an der damaligen Fließbandfertigung von Henry Ford ersetzt haben. Diesen kann die richtige Information, ob beispielsweise ein normaler Scheinwerfer oder ein Xenonscheinwerfer in die Karosse eingesetzt werden muss, in wenigen Millisekunden übermittelt werden und führt dies dann prozesssicher und richtig aus.

Der Trend ging hier also über viele Jahre in die Richtung, dass der Arbeiter von Robotern in der Fertigung „ausgebootet“ wurde und diese nach und nach die Tätigkeiten der Menschen übernommen haben. Jedoch hat man auch festgestellt, dass es eben manche Prozessschritte gibt, welche von einem Roboter niemals besser als von einem Mensch durchgeführt werden können. Es gibt daher Tätigkeiten, die ideal für einen Roboter sind, und es gibt Tätigkeiten, die ideal für einen Menschen sind. Beide haben ihre Stärken und sorgen gemeinsam für einen optimalen Prozess und einen Mix aus menschlicher Erfahrung und automatisierter Genauigkeit. Die Herausforderung der aktuellen Industrie 4.0 ist es unter anderem, die Stärken dieser beiden zu kombinieren. Und genau an dieser Stelle kommen kollaborierende Robotersysteme zum Tragen. Während herkömmliche traditionelle Roboter für einen Menschen sehr gefährlich werden können und daher hinter Zäunen operieren, um Mensch und Roboter zu trennen, sollen kollaborierende Roboter diese Barriere entfernen und ein Hand-in-Hand-Arbeiten von Mensch und Maschine ermöglichen. Die Vorteile hierbei liegen oft nicht nur in der Kombination der Stärken von Mensch und Maschine, sondern dies ermöglicht oft auch einen platzsparenden Einsatz, eine einfache Umrüstung von Handtätigkeit auf maschinelle Fertigung und nicht zuletzt auch oft eine kostengünstige Fertigung.

## ■ 1.1 Die Geschichte der kollaborativen Robotik

Besucht man heutzutage eine Messe, welche das Thema Automatisierung behandelt, dann kommt man an kollaborierenden Robotern nicht mehr vorbei. Man findet teilweise ganze Messehallen mit dieser Art von Robotern und mittlerweile hat jeder namhafte Roboterhersteller mindestens einen Roboter im Portfolio, welcher unter die Bezeichnung kollaborierender Roboter fällt. Der Einzug dieser Technik in die Produktionslinien startete zwischen 2005 und 2010, nachdem der deutsche Roboterhersteller KUKA in Kooperation mit dem Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrum (DLR) 2004 den ersten LBR 3 verkaufte und der heutige Marktführer in diesem Bereich, Universal Robots, 2008 den UR5 auf den Markt brachte. Jedoch wurde der erste kollaborative Roboter bereits 1996 von James Edward Colgate und Michael A. Peshkin im Rahmen eines von General Motors finanzierten Projekts an der US-amerikanischen Northwestern University entwickelt. Das Ziel von General Motors war, einen Roboter so sicher zu machen, dass er gefahrlos mit dem Menschen interagieren kann. Mit dem Markteintritt von KUKA und speziell von Universal Robots in diesem Segment der Robotik wurde dann 10 Jahre nach der Entwicklung des ersten Cobots (engl.: Collaborative Robot) der eigentliche Boom in den Produktionslinien ausgelöst. Mit dem Kuka LBR 3 und dem UR5 von Universal Robots waren hier dann erstmals zwei kollaborative Roboter für jedermann frei auf dem Markt erhältlich. In der nachfolgenden chronologischen Auflistung sind die wichtigsten Eckpfeiler für die Entstehung der kollaborativen Robotik aufgelistet. Zwar existieren auf dem Markt mittlerweile eine Vielzahl an Herstellern für diesen speziellen Typ Roboter, jedoch haben drei Firmen in den ersten Jahren für dieses Teilgebiet der Robotik den Grundstein mit ihrer Pionierarbeit gelegt. Die Auflistung in [Tabelle 1.1](#) beschränkt sich daher auch auf die drei Hersteller KUKA, Universal Robots und Rethink Robotics.

**Tabelle 1.1** Entstehung der kollaborativen Robotik

Jahr	Ereignis
1996	Entwicklung des ersten kollaborativen Roboters an der Northwestern University
2004	Verkauf des ersten LBR 3
2008	Markteintritt von Universal Robots und Produktlaunch des UR5
2008	Produktlaunch des KUKA LBR 4 als Nachfolger des LBR 3
2012	Produktlaunch des UR10 von Universal Robots
2012	Markteintritt von Rethink Robotics und Produktlaunch des Baxters
2012	Produktlaunch des KUKA LBR iiwa
2015	Produktlaunch des Sawyer von Rethink Robotics
2015	Produktlaunch des UR3 von Universal Robots

## ■ 1.2 Arten der kollaborativen Robotik

Spricht man von kollaborativer Robotik sollte klar sein, dass es hier verschiedene Arten gibt. Roboterapplikationen ohne einen Zaun sind nicht alle gleich. Hier gibt es erhebliche Unterschiede in den Ansätzen. Unglücklicherweise ist sich hier die Praxis und die Norm nicht ganz einig, wie man in verschiedene Arten der kollaborativen Robotik unterteilen sollte. In diesem Buch werden daher beide Ansätze erläutert, wobei mir persönlich der praktische Ansatz hier besser gefällt. Aber machen Sie sich selbst ein Bild.

### 1.2.1 Unterscheidung nach Norm

Die aktuell gültige Norm für Sicherheit bei Industrierobotern, zu denen auch die kollaborativen Roboter zählen, sofern sie für die industrielle Anwendung konzipiert sind, ist die EN ISO 10218:2011<sup>1</sup>. Diese besteht aus zwei Teilen. Der erste Teil beschreibt dem Hersteller, wie er seine Roboter bauen und welche Sicherheitsfunktionen das Produkt mitbringen sollte. Der zweite Teil ist an den Integrator gerichtet und beschreibt diesem, wie seine Roboterapplikation gestaltet sein sollte und wann welche Sicherheitsfunktionen anzuwenden sind oder benötigt werden. In diesem zweiten Teil, also der EN ISO 10218-2:2011, werden im Abschnitt 5.11 kollaborative Applikationen behandelt. Hier werden im Abschnitt 5.11.5 verschiedene Arten von kollaborativen Applikationen genannt:

#### 1. Der sichere überwachte Halt

Hier besteht zwar eine direkte Zugangsmöglichkeit in den Arbeitsbereich des Roboters, jedoch wird der Zugang dabei kontinuierlich überwacht (z. B. mittels Lichtschranke oder Laserscanner) und die Roboterbewegung wird unverzüglich gestoppt, sobald ein Mensch in den Gefahrenbereich eintritt. Die Gelenke des Roboters werden dabei meist weiter mit Spannung versorgt und eine Sicherheitsfunktion überwacht, dass keines der Gelenke plötzlich wieder anläuft, solange der Stopp durch die Zugangsüberwachung angefordert ist. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass die Stoppzeiten und Stoppwege in Kombination mit dem Annäherungsweg und der Annäherungsgeschwindigkeit des Menschen durch den Nachlauf des Roboters nicht zu einer Gefährung führen. Eine detailliertere Beschreibung des sicheren überwachten Halts finden Sie im [Kapitel 4](#).

#### 2. Handführung

Hierbei ist oft direkt am Endeffektor des Roboters ein Steuerelement zur Bewegungssteuerung angebracht. Die Bewegung kann hier z. B. über einen Kraftmomentensensor oder einen Joystick gesteuert werden. Ein Arbeiter kann damit den Roboter an seinem Tool fassen und von dort aus die Bewegung steuern. Dies wird z. B. bei einer Hebeunterstützung bei der Montage von schweren Lasten angewendet.

Hierbei gilt zu beachten, dass das Steuerelement immer einen sogenannten Zustimmungstaster beinhaltet, welcher die Bewegung des Roboters erst frei gibt. Dieser Zustimmungstaster ist hierbei als dreistufiger Taster ausgeführt (unbetätigt = Roboter darf sich nicht bewegen, Mittelposition = Roboterbewegung freigegeben, voll durchgedrückt = Roboter darf sich

<sup>1</sup> Das zuständige ISO-Gremium TC299 WG3 ist z. Z. in Erarbeitung einer Neufassung der ISO 10218, welche voraussichtlich 2021 herausgegeben wird.



**Abbildung 1.1** Handführung im Bereich Montage von Schwerlasten

nicht bewegen). Der Zustimmungstaster ist hierbei eine zwingend geforderte Sicherheitsfunktion. Weitere Informationen zum Thema Handführung finden Sie im [Kapitel 7](#).

### 3. Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung

Diese Art der Kollaboration kann man als eine Fortführung des sicheren überwachten Halts ansehen. Anders als bei diesem gibt es hier aber nicht nur den Zustand Eins und Null, also Roboter bewegt sich und Roboter ist gestoppt, sondern man verringert die Geschwindigkeit des Roboters in beliebig vielen Schritten. Je näher sich ein Mensch an den Roboter heran bewegt, desto geringer wird die Geschwindigkeit des Roboters. Bis hin zum vollen Stillstand. Wie auch beim sicheren überwachten Halt muss auch hier ein Augenmerk auf die Stoppzeiten und Stoppwege des Roboters gelegt werden. Die Geschwindigkeit muss dabei stets so verringert werden, dass Stoppzeit und Stoppweg sich der Entfernung des Menschen anpassen. Im [Abschnitt 4.1](#) wird die Berechnung von Stoppzeiten und Stoppwegen erläutert. Im [Kapitel 5](#) wird noch einmal näher auf diese Kollaborationsart eingegangen.

### 4. Kraft- und Leistungsbegrenzung

Bei der Kraft- und Leistungsbegrenzung erkennt der Roboter eine Kollision z. B. mit einem Menschen und stoppt darauf hin seine Bewegung. Hierbei muss geprüft werden, wie stark der Roboter oder eines seiner Anbauteile auf eine Körperstelle des Menschen einwirkt und dadurch keine Verletzungen entstehen können. Dies wird in [Kapitel 6](#) näher erläutert.

In der Norm werden alle vorgenannten Herangehensweisen, um Mensch und Roboter ohne Zaun (fachlich: ohne trennende Schutteinrichtung) zusammenarbeiten zu lassen als kollaborative Anwendungen bezeichnet. In der Praxis unterscheidet man diese jedoch noch etwas weiter und hat eine stufenweise Unterteilung der unterschiedlichen Möglichkeiten.

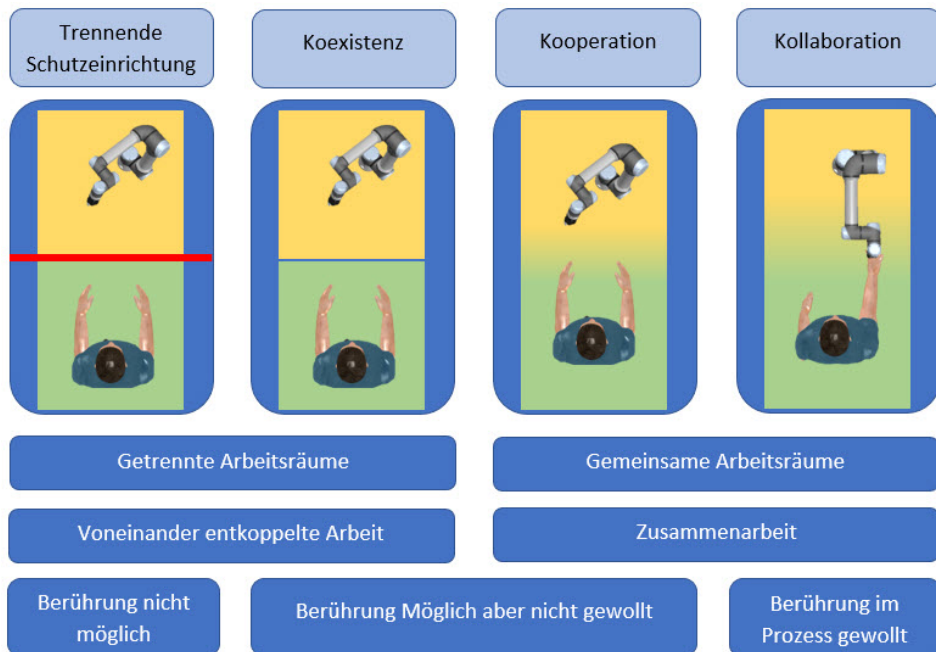
## 1.2.2 Unterscheidung nach Kontaktsituation

Während man in der Normung nur den Begriff „kollaborativ“ kennt und verwendet, wird in der Praxis bei schutzzaunlosen Roboteranwendungen immer öfter in die Begriffe

- Kollaboration,
- Kooperation,
- Koexistenz

unterteilt. Unterschieden wird hierbei anhand der Kontaktsituation zwischen Mensch und Roboter. Es wird bewertet ob diese theoretisch möglich und im Prozess gewollt ist. Hierzu sollte man sich die folgenden Fragen stellen, um zu identifizieren, welche der Applikationsarten vorliegt.

- Teilen sich Mensch und Roboter einen gemeinsamen Arbeitsraum?
- Können sich beide gleichzeitig in diesem Arbeitsraum bewegen?
- Ist ein Kontakt mit dem Roboter im Prozess beabsichtigt und eingeplant?



**Abbildung 1.2** Roboterzelle, Koexistenz, Kooperation und Kollaboration

In den Augen vieler Fachleute ist es wichtig, eine solche Unterteilung vorzunehmen, um in einer späteren Risikobeurteilung nicht den berühmten Vergleich zwischen Äpfeln und Birnen zu treffen. Man ist sich bewusst, dass das Risiko in einer Applikation, in welcher eine Kontaktsituation mit einem Roboter nur theoretisch möglich, jedoch im Prozess nicht vorgesehen ist, geringer ist als bei einer Applikation, in der eine ständige Interaktion mit dem Roboter eingeplant ist. Wir werden in einem späteren Abschnitt noch sehen, dass die Wahrscheinlichkeit einer Kollision zwischen Mensch und Roboter ein wichtiger Faktor

bei der Risikobeurteilung ist, der jedoch bei schutzzaunlosen Anwendungen sehr oft nicht beachtet wird.

Der Begriff „schutzzaunlosen Roboteranwendung“ passt eigentlich weit besser auf diese spezielle Sparte der Automatisierungstechnik. Man ist zwar weiter als bei der herkömmlichen Roboteranwendung, deren Risikominderung mittels trennender Schutzeinrichtungen (z. B. mit Schutzzaun) erwirkt wird. Jedoch hat man durch diesen Begriff noch die Möglichkeit einer Unterteilung in die in [Abbildung 1.2](#) genannten verschiedenen Konzepte.

Schaut man sich die sogenannten kollaborativen Applikationen in der Praxis einmal genauer an, so liegt nur bei einem sehr geringen Anteil ( $< 10\%$ ) tatsächlich eine Anwendung mit einer echten Kollaboration zwischen Mensch und Roboter vor. In den allermeisten Fällen teilen sich Mensch und Roboter zwar einen gemeinsamen Arbeitsraum, jedoch sind die Prozesse so ausgelegt und geregelt, dass entweder der Mensch oder der Roboter in diesem Raum arbeiten und niemals beide gleichzeitig in diesem Bereich agieren. Eine grobe Einschätzung sagt, dass mindestens 70 % der kollaborativen Anwendungen so aufgebaut sind, dass z. B. ein Laserscanner das Eintreten eines Menschen in den Arbeitsraum des Roboters überwacht und in diesem Fall dann den Roboter stillsetzt. Dies unterscheidet sich in der Regel nicht wirklich von einer traditionellen Roboterzelle, da auch in dieser der Zutritt einer Person in die Zelle möglich ist. Ein Öffnen der Tür der Zelle führt dann aber zu einem Stopp der Roboterbewegung und der Roboter wird sicher stillgesetzt. Eine Überwachung durch einen Laserscanner ist somit nicht wirklich etwas anderes als eine Zelle mit vielen Türen. Hier wird Mensch und Maschine ebenso voneinander getrennt, wie es ein Schutzzaun tun würde. Jedoch haben diese Arten der Applikation den großen Vorteil weniger Platz zu benötigen, da kein Zaun um den Roboter herum gebaut wird. Ebenso ist die Flexibilität ein Argument für diese Art der Anwendung. Beim Umbau oder der Verschiebung der Zelle muss somit kein Zaun mit versetzt werden.

Man sollte in der Praxis daher unbedingt damit beginnen zwei Dinge zu vermeiden:

1. alle schutzzaunlosen Anwendungen als kollaborative Anwendungen zu bezeichnen,
2. von kollaborativen Robotern zu sprechen, da dies unweigerlich die erste Fehlinterpretation mitverursacht.

### 1.2.3 Was ist überhaupt ein kollaborativer Roboter?

Besucht man heute eine Messe oder liest man eine Fachzeitschrift oder auch ein Fachbuch, dann findet man oft den Begriff „kollaborativer Roboter“. Aber kann man diese Bezeichnung eigentlich tatsächlich so stehen lassen?

Industrieroboter, unter welche auch die kollaborativen Roboter fallen sind zuerst einmal unvollständige Maschinen. Sie fallen unter diese Begrifflichkeit, weil sie bei Auslieferung noch keine bestimmungsgemäße Verwendung haben. Diese erhalten die Roboter erst, wenn jemand einen Greifer, eine Kamera, einen Vakuumsauger, einen Schrauber oder irgendein anderes Tool (Werkzeug) an den Roboter montiert und dazu den Roboter mit einem Programm versehen hat. Dies ist das Mindeste, um den Roboter für einen bestimmten Zweck einzusetzen. Vergleichen man dies mit einem Haushaltsroboter (z. B. einem Saugroboter), dann ist die Sachlage hier eine andere. Dieser ist bereits für eine ganz bestimmte Aufgabe vorgesehen, wenn er beim Hersteller vom Band läuft. Der Saugroboter ist eben für das

Saugen von Bodenbelägen vorgesehen, hat damit eine bestimmungsgemäße Verwendung und würde daher unter den Begriff vollständige Maschine fallen.

Aber warum ist dies so wichtig? Es zeigt, dass der Hersteller des sogenannten kollaborierenden Roboters noch gar nicht sagen kann, wie und für was dieser Roboter am Ende genau eingesetzt wird. Der Integrator kann den Roboter z. B. dafür verwenden scharfe Messer sehr schnell von Punkt A zu Punkt B zu befördern. Er könnte ihn jedoch auch dazu verwenden, um einen Werker in der Montage zu unterstützen, indem der Roboter ihm die Bauteile und/oder Werkzeuge für die nächsten Prozessschritte anreicht, damit dieser sich auf die Montage konzentrieren kann. Muss das Robotersystem sich hierbei nicht wirklich schnell bewegen, so ist diese Applikation durchaus als kollaborierende Anwendung denkbar, während sich bei der Messerapplikation besser kein Mensch den Arbeitsraum mit dem Roboter teilen sollte.

Man sieht also, es ist nicht der Roboter, der kollaborierend ist, sondern es ist die Applikation, die kollaborierend oder eben nicht kollaborierend sein kann. Die Bezeichnung „kollaborierender Roboter“ ist daher inkorrekt und hat dadurch bereits bei vielen Anwendern zu einer Fehlinterpretation der Sicherheit geführt. In der Praxis entsteht manchmal das Gefühl, dass Anwender das Verständnis haben, ein kollaborierender Roboter würde selbst die gefährlichste Anwendung sicher machen. Dieser Trugschluss kann dann zu schwerwiegenden Folgen in gesundheitlicher, aber auch in finanzieller Hinsicht führen, wenn man sich plötzlich hohen Schadensersatzforderungen gegenüber sieht.

Aber wie könnte man diese Art Roboter alternativ nennen, damit man durch die Namensgebung nicht einen falschen Eindruck oder falsche Erwartungen setzt? Zwar ist der Begriff „kollaborativer Roboter“ mittlerweile bereits so tief in den Köpfen verankert, dass es schwer werden wird, hier zu einem Umdenken zu kommen. Jedoch hilft man sich auf jeden Fall selbst, wenn die Bezeichnung im eigenen Kopf eine andere ist und man sich zumindest selbst dadurch vor Fehlinterpretationen schützt.

Lassen Sie uns einen Vergleich zu den herkömmlichen Industrierobotern ziehen. Welche Sicherheitsfunktionen haben diese traditionellen Roboter und welche zusätzlichen Sicherheitsfunktionen hat ein sogenannter „kollaboartiver Roboter“? Stellen Sie sich selbst die Frage, was für Sie den Unterschied macht. Wo hört der traditionelle Roboter auf und wo fängt der „kollaborative Roboter“ an? Und welche Forderungen stellt die Roboternorm EN ISO 10218:2011 überhaupt an Sicherheitsfunktionen eines Roboters? Was ist ein Must-have und was ist optional?

[Tabelle 1.2](#) listet die üblichsten Sicherheitsfunktionen dieser „kollaborativen Roboter“ auf. Betrachtet man die EN ISO 10218:2011, so findet sich dort im Abschnitt 5.5.1 die Forderung nach einer Sicherheitshalt-Funktion und einer unabhängigen Not-Halt-Funktion. Hierbei ist der Sicherheitshalt die Funktion, welche den Roboter z. B. beim Öffnen der Zellentür oder beim Eintritt in den Bereich eines Laserscanners sicher stoppt und den Stillstand überwacht. Im Weiteren wird in dieser Norm noch die Forderung eines Zustimmungstasters und einer Betriebsartenwahl eingebracht. Alle anderen in [Tabelle 1.2](#) genannten Sicherheitsfunktionen sind nicht gefordert und daher optional.

Bitte beachten Sie, dass es sich bei den in [Tabelle 1.2](#) genannten Sicherheitsfunktionen nicht um alle Sicherheitsfunktionen handelt, sondern hier nur die aufgelistet sind, welche bei den meisten Herstellern zur Anwendung kommen.

Welche der genannten Sicherheitsfunktionen macht nun für Sie den Unterschied zwischen kollaborativ und traditionell? Ist es die Kraftbegrenzung? Dies wäre vermutlich das Na-



**Tabelle 1.2** Auflistung verschiedener Sicherheitsfunktionen

Not-Halt	Hierbei handelt es sich um die typische Not-Halt-Funktion, welche den Roboter entweder in einem Stopp der Kategorie 0 oder 1 stillsetzt. <sup>2</sup>
Sicherheitshalt	Ist eine Halt-Funktion zum Anschluss externer Sicherheitsgeräte (z. B. eines Laserscanners). Der Stopp wird hierbei als SS1 oder SS2 ausgeführt.
Sichere Achsbegrenzung	Die maximale und minimale Gelenkstellung der einzelnen Roboter-gelenke kann definiert und überwacht werden. Eine Überschreitung dieser Begrenzung führt zu einem SS0 oder SS1.
Sichere Raumgrenzen	Es können Räume oder Ebenen definiert werden, in welche definierte Teile des Roboters nicht eindringen oder sich nicht aus ihnen herausbewegen dürfen. Eine Überschreitung dieser Begrenzung führt zu einem SS0 oder SS1.
Kraftbegrenzung	Die maximale Kraft, welche der Roboter aufbringen kann, wird begrenzt. Überschreitet der Roboter diese Kraft, wird ein Stopp ausgeführt.
Leistungsbegrenzung	Die maximale elektrische Leistung, welche der Roboter aufnehmen kann, wird beschränkt.
Sichere Achs-Geschwindigkeit	Die Winkelgeschwindigkeit der Achsen wird überwacht.
Sichere TCP-Geschwindigkeit	Die Geschwindigkeit, welche der TCP im kartesischen Raum besitzt, wird überwacht.
Impulsbegrenzung	Der Impuls ist eine Funktion aus bewegter Masse und Geschwindigkeit. Da die Masse durch das Robotersystem gegeben ist, wird die Geschwindigkeit so weit reduziert, dass der maximale Impuls nicht überschritten werden kann.
Sichere Homeposition	Der Roboter hat eine sichere Position, in welcher er z. B. vor Zutritt in eine Zelle nach Zutrittsanforderung gefahren wird. Befindet sich der Roboter in dieser Position, schaltet er einen sicheren Ausgang und kann damit z. B. den Zugang zur Zelle frei geben.
Zustimmtaster	Eine Sicherheitsfunktion, welche in der Regel als Totmannschalter (Dreistufenschalter) ausgelegt ist und die Roboterbewegung nur in der Mittelstellung frei gibt
Betriebsartenwahl	Sicheres Umschalten von Handbetrieb (Teach-Betrieb) in den Automatikmodus.

heliegende. Jedoch werden wir in einem späteren Kapitel noch sehen, dass alleine die Kraftbegrenzung oft nicht ausreicht und es in der Regel immer eine Kombination aus ver-

<sup>2</sup> Die verschiedenen Stoppfunktionen (SF) sind in EN 60204 definiert:

SF0: Nach der Stoppanforderung wird die Spannung sofort vom Antrieb genommen und dieser läuft ungeregelt aus.

SF1: Nach der Stoppanforderung wird der Antrieb zuerst geregelt runter zum Stillstand gebracht und erst nach Stillstand wird die Spannung vom Antrieb genommen.

SF2: Nach der Stoppanforderung wird der Antrieb geregelt zum Stillstand gebracht. Anschließend bleibt die Spannung weiter am Antrieb und regelt den Stillstand. Gleichzeitig wird der Stillstand überwacht und ein Verstoß führt zu einem SS0.



schiedenen Sicherheitsfunktionen ist, welche die Applikation letztlich sicher macht. Auch ist eine Kraftbegrenzung nicht immer ausreichend, um ein Risiko ausreichend zu minimieren. Stellen Sie sich vor, Sie begrenzen die Kraft, welche der Roboter aufbringen kann auf 50 Newton. Dann montieren Sie ein Skalpell am Roboter und fahren damit in Richtung Ihrer Hand. Was denken Sie, wie tief das Skalpell mit 50 N in Ihre Hand eindringt? Wenn Sie also einen kollaborativen Roboter daran festmachen, dass Sie eine Kraftlimitierung einstellen können, sollten Sie sich die Frage stellen, warum die Anwendung mit dem Skalpell jedoch nicht kollaborativ ist. Die Antwort ist einfach und Sie können sich die Frage sicherlich auch schon selbst beantworten. Es ist nicht der Roboter, der kollaborativ ist, sondern es ist die Applikation, die entweder kollaborativ ist oder es eben nicht ist. Der Roboter kann Ihnen höchstens mit erweiterten Sicherheitsfunktionen, als sie in der Norm gefordert sind, dabei helfen, das Risiko in einer Applikation so weit zu minimieren, dass Sie keine trennende Schutzeinrichtung wie z. B. einen Zaun benötigen und somit Mensch und Roboter Seite an Seite arbeiten können. Wir sollten daher nicht von kollaborativen Robotern, sondern nur von kollaborativen Applikationen und von Robotern mit erweiterten Sicherheitsfunktionen, welche einen kollaborativen Betrieb ermöglichen können, sprechen. Man benötigt damit immer zwei Dinge für eine kollaborative Applikation:

1. eine mögliche Anwendung für einen Roboter, die als kollaborative Applikation geeignet ist, und
2. einen Roboter, welcher die hierzu notwendigen Sicherheitsfunktionen mit sich bringt.

Liegt einer dieser beiden Punkte nicht vor, so wird die Umsetzung einer kollaborativen Applikation sehr schwierig, wenn nicht sogar unmöglich.

# Stichwortverzeichnis

3PE 133

## A

AddOn 24

aktive Sicherheit 142

Anhalteweg 53

Anhaltezeit 53

Anwendungsbereich 26

Arbeitsraum 6

Ausschlussbereich 26

## B

Bearbeitungszentrum 95

Belader 95

Bewertung 84

Bildverarbeitung 123

BWS 167

## C

CE-Konformität 29

CE-Konformitätserklärung 29

CE-Richtlinie 26

## D

Design 164, 174

Diagnosedeckungsgrad 18

Dokumentation 190

Druck 39

Druckmessung 72, 81

Druckverlauf 74

## E

Einbauerklärung 29

eingeschränkter Bereich 54

Eingreifgeschwindigkeit 65

Einschreitgeschwindigkeit 65

Eintrittswahrscheinlichkeit 41, 45, 46

Entstehung 3

## F

Federkonstante 73, 80

Fügen 120

## G

Gefährdung 36, 38, 85

Gefährdungsexposition 45

Gefährdungsidentifizierung 36

Gefährdungssituation 42

gefährliche Maschinen 31

Gelenkgeschwindigkeit 19, 20

Genauigkeit 13

Geschichte 3

Geschwindigkeit 19

Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung  
5, 63

## H

Handführung 4, 89, 91, 107

harmonisierte Norm 27

Hebezeug 90

HGC 91, 107

## I

interne Fertigungskontrolle 32

Inverkehrbringer 29

ISO TS 15066 29, 39

## K

Kamera 123

Kleben 118

Klemmstelle 37

Klemmung 37, 42

Koexistenz 6

Kollaboration 6

Kollaborationsarten 4

Kollaborationsraum 70, 144

kollaborativer Roboter 7

Kollision 42  
 Kollisionskräfte berechnen 77  
 Kollisionsminderung 142  
 Kollisionsszenarien 42  
 Kollisionsvermeidung 142  
 Konformität 31  
 Konformitätsbewertung 31  
 Kontaktsituation 6  
 Kooperation 6  
 Körpermasse 80  
 Körpermaße 145, 146, 176  
 Kraft 39  
 Kraft- und Leistungsbegrenzung 5, 67  
 Kraftmessgerät 75  
 Kraftmessung 72, 81  
 Kraftverlauf 74

## L

Leistungsüberwachung 143

## M

Maschinenbeladung 95  
 Maschinengrenze 34  
 Maschinenrichtlinie 28  
 maximaler Raum 54  
 Mean Time To Failure Dangerous 18  
 Möglichkeit zur Vermeidung 45, 47  
 Montage 120

## N

New Legislative Framework 26  
 Nutzlast 13

## O

Operationsbereich 54

## P

Palettieren 101  
 passive Sicherheit 142  
 Performance Level (PL) 16, 17  
 Personenerkennung 149, 151, 152  
 Polieren 130  
 Positioniergenauigkeit 14  
 Produktlebensphase 35  
 Produktsicherheitsgesetz 27  
 PSA 193

## Q

Qualitätskontrolle 123  
 Quality Gates 123

## R

Reichweite 13  
 Richtlinie 26  
 Risiko 38, 42  
 Risikoanalyse 33, 34  
 Risikobeurteilung 33  
 Risikobewertung 33, 34  
 Risikoeinschätzung 38, 45  
 Risikograph 17  
 Risikominderung 33, 37, 173  
 Roboterbereiche 64

## S

Safeguard stop 49  
 Safety Integrity Level (SIL) 16, 17, 19  
 Schleifen 130  
 Schmerzeintritt 41, 70  
 Schmerzeintrittsschwellen 70  
 Schnittstellen 22  
 Schrauben 99  
 Schweißen 125  
 Schwere der Verletzung 42  
 Schwere des Schadens 41  
 sicherer überwachter Halt 4, 49  
 Sicherheitsbereich 54  
 Sicherheitsfunktion 9, 146, 148, 151, 153, 158, 163, 167, 177, 186, 189  
 Sicherheitskennzahlen 15, 16  
 statische Kraft 70  
 statischer Druck 70  
 Stopfunktionen 9  
 Stopparten 50  
 Stoppkategorie 50  
 Stoppweg 53, 65  
 Stoppzeit 53, 65  
 Stoß 42  
 Systemarchitektur 18

## T

TCP 90, 91  
 TCP-Geschwindigkeit 19  
 Technische Unterlagen 32  
 Tool 169  
 transiente Kraft 70  
 transienter Druck 70  
 transienter Stoß 42  
 TS 15066 29, 39

## U

unvollständige Maschine 28, 29

**V**Verordnung [26](#)vollständige Maschine [28](#), [29](#)**W**Wahrscheinlichkeit des Eintretens [41](#), [42](#), [45](#)Wahrscheinlichkeitsmatrix [87](#)Werkstückhalter [92](#)Werkzeugmaschine [95](#)Wiederholgenauigkeit [13](#), [14](#)**Z**Zustimmtaster [133](#)