



UNIVERSAL ROBOTS



Whitepaper

Der Zustimmungstaster

Notwendigkeit in der Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK)

Einleitung

Kollaborierende Roboter sind in allen Branchen der Industrie auf dem Vormarsch. Nicht nur große Konzerne, sondern auch kleine und mittelständische Betriebe setzen auf die Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK), um Prozesse zu optimieren und Mitarbeiter von ergonomisch ungünstigen Aufgaben zu entlasten. Doch noch herrscht oft Unsicherheit darüber, welche Normen und Vorschriften beachtet werden müssen, um eine sichere, schutzaunlose Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine zu realisieren. Ein gutes Beispiel hierfür ist die Frage nach der Notwendigkeit eines Zustimmungstasters¹. Dieser dient als Sicherheitsfunktion und ist bei nicht kollaborierenden Anwendungen erforderlich, um den Roboter innerhalb des Schutzauns zu bewegen. Wie sieht es jedoch bei kollaborierenden Anwendungen aus?

Gemäß der harmonisierten Norm EN ISO 10218 „Sicherheitsanforderungen von Industrierobotern“ ist die Einrichtung eines Zustimmungstasters erforderlich, wenn sich Mensch und Roboter im gleichen Arbeitsraum bewegen. Da die MRK jedoch ein noch sehr junger Technologiezweig ist, konnte die Internationale Organisation für Normung (kurz: ISO) sie bei der letzten Überarbeitung der ISO 10218 noch nicht ausreichend berücksichtigen. Seit 2016 erweitert daher die Technische Spezifikation (kurz: TS) ISO TS 15066 „Roboter und Robotikgeräte – Kollaborierende Roboter“ die geltende Norm um rund 30 Seiten. Laut dieser TS ist das „Gebot“ des Zustimmungstasters unter bestimmten Voraussetzungen außer Kraft gesetzt, was Aufwand und Kosten spart. Welche Regel gilt und vor allem, welche Voraussetzungen dafür erfüllt sein müssen, ist für Integratoren und Anwender oft nicht eindeutig. **Die teilweise vertretene Meinung, bei der MRK sei generell kein Zustimmungstaster erforderlich, greift in jedem Fall zu kurz.**

Dieses Whitepaper dient Anwendern und Integratoren als Hilfestellung für die Entscheidung über den Zustimmungstaster:

- Zunächst werden **verschiedene nicht kollaborierende und kollaborierende Anwendungsfälle** für Roboter gemäß EN ISO 10218 sowie ISO TS 15066 unter dem **Gesichtspunkt der Notwendigkeit des Zustimmungstasters** betrachtet.
- Es schließen sich **Empfehlungen** an, wie sich **bestimmte kollaborierende Anwendungen um spezielle Sicherheitsfunktionen** ergänzen und damit die **Notwendigkeit eines Zustimmungstasters vermeiden** lassen.

Damit wird eine wichtige Voraussetzung für eine sichere MRK im eigenen Betrieb geschaffen.

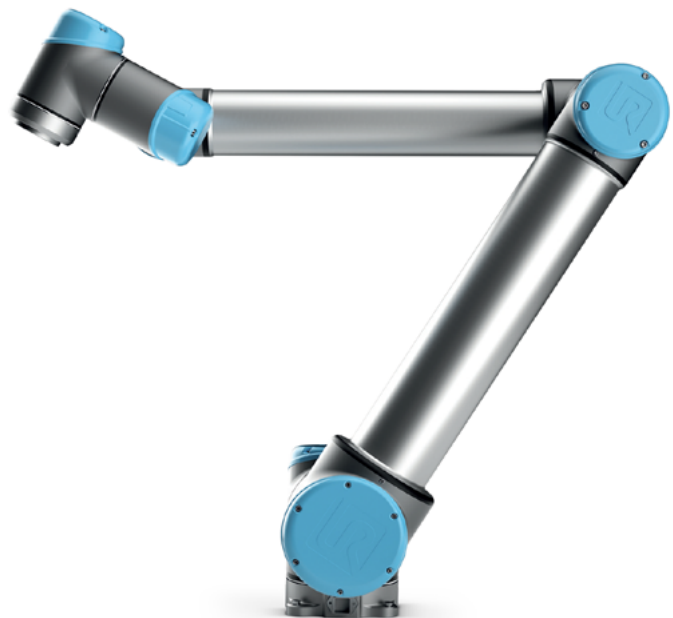
Andreas Schunkert
Head of Technical Support Western Europe
 Universal Robots (Germany) GmbH



¹ Zustimmungseinrichtung gemäß IEC 60204

Inhaltsverzeichnis

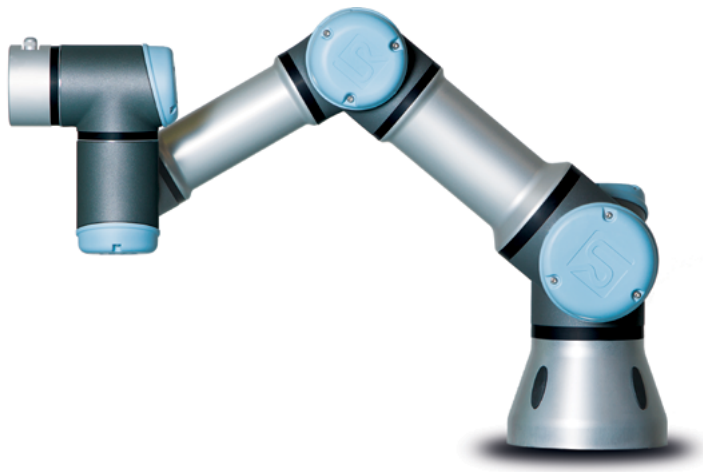
Einleitung	2
Inhaltsverzeichnis	3
Executive Summary	4
1. Notwendigkeit des Zustimmungstasters: Normative Richtlinien	5
2. Not- und Sicherheitshalt als Sicherheitsfunktionen	6
2.1. Sicherheitshalt und Zustimmungstaster bei nicht kollaborierenden Anwendungen	7
2.2. Sicherheitshalt und Zustimmungstaster bei kollaborierenden Anwendungen	8
2.2.1 <i>Geschützter Bereich beim sicherheitsbewerteten überwachten Halt</i>	10
2.2.2 <i>Geschützter Bereich bei der Kraft- und Leistungsbegrenzung</i>	10
3. Vereinfachte Risikobeurteilung bei der Kraft- und Leistungsbegrenzung	12
3.1 Kollaborationsraum – Beispiel: Aufteilung in zwei Bereiche	12
3.1.1 <i>Praktische Umsetzung</i>	13
3.2 Beschränkung des Bewegungsraums des Roboters	15
4. Übersicht: Zustimmungstaster ja oder nein?	17
5. Ausblick	18
7. Weiterführende Literatur	19
8. Anhang	20
Anhang 1: Verschiedene Stopp-Kategorien beim Sicherheitshalt	20
Anhang 2: Schmerzschwellentabelle aus Anhang A der ISO TS 15066	21
Anhang 3: Definierte Körperstellen zur Schmerzgrenzenbestimmung	22



Executive Summary

Die wichtigsten Erkenntnisse des Whitepapers in sechs Punkten:

1. Eine entscheidende Frage für die Umsetzung einer sicheren MRK ist die nach der Notwendigkeit des Zustimmungstasters. Die Aussage, dass für die MRK generell kein Zustimmungstaster erforderlich sei, greift zu kurz. Dies ist nur für bestimmte Anwendungsarten der Fall und nur unter bestimmten Voraussetzungen.
2. Ausschlaggebend für die Notwendigkeit eines Zustimmungstasters bei der EN ISO 10218-2 ist die Definition des geschützten Bereichs beziehungsweise bei der ISO TS 15066 die in der Risikobeurteilung bestätigten Sicherheitsfunktionen, die zu jeder Zeit aktiv sein müssen.
3. Für nicht kollaborierende Anwendungen ist der Zustimmungstaster gemäß EN ISO 10218 immer zwingend erforderlich.
4. Für kollaborierende Anwendungen nach EN ISO 10218-2 Abschnitt 5.10.2 - „Sicherheitsbestimmter überwachter Halt“ (zum Beispiel mittels Laserscanner) ist der Roboter nur innerhalb des Automatikbetriebs limitiert. Im Regelfall wird hier bei der Risikobeurteilung auf eine Kraft- und Druckmessung zur Bestimmung der Kollisionskräfte verzichtet. Ein Zustimmungstaster ist hier ebenso erforderlich wie bei einer eingezäunten Applikation.
5. Bei kollaborierenden Anwendungen nach EN ISO 10218-2 Abschnitt 5.10.2 - „Kraft- und Leistungsbegrenzung“ ist es möglich, ohne Zustimmungstaster zu arbeiten. Bedingung hierfür ist zum einen, dass alle im Kollaborationsraum befindlichen Klemm- und Kollisionsmöglichkeiten im Rahmen der Risikobeurteilung betrachtet werden und festgestellt wird, dass die Werte im tolerierbaren Bereich gemäß Anhang A der ISO TS 15066 liegen. Zum anderen müssen die in der Risikobeurteilung bestätigten Sicherheitsfunktionen zu jeder Zeit aktiv sein².
6. Wird der gesamte mögliche Bewegungsbereich des Roboters als Kollaborationsraum definiert, ist die Risikobeurteilung aufgrund der großen Zahl notwendiger Messungen sehr umfangreich. Es empfiehlt sich daher, den Kollaborationsraum durch raumlimitierende Sicherheitsfunktionen, wie die Aufteilung des Arbeitsraums in zwei Bereiche oder die Beschränkung des Bewegungsraums des Roboters, einzugrenzen. Im Bereich innerhalb des Kollaborationsraums kann ohne Zustimmungstaster gearbeitet werden. Im Bereich außerhalb des Kollaborationsraums ist der Taster erforderlich.



² Dies ist bei Roboterarmen von Universal Robots zu jeder Zeit gegeben.

1. Notwendigkeit des Zustimmungstasters: Normative Richtlinien

Lange Jahre arbeiteten Mensch und Roboter aus Sicherheitsgründen räumlich getrennt voneinander. Die MRK, die mittlerweile in vielen Branchen und Ländern Fuß gefasst hat, bringt Mensch und Maschine an gemeinsamen Arbeitsplätzen ohne trennende Schutzeinrichtungen zusammen. Diese Art der Zusammenarbeit bietet viele Chancen für Industrie und Produktion, verlangt aber gleichzeitig besondere Aufmerksamkeit beim Thema Sicherheit. Während beispielsweise bei klassischen Industrierobotern mit Schutzzaun der dreistufige Zustimmungstaster die Sicherheit garantiert, sobald Mensch und Roboter sich im selben Arbeitsbereich befinden, ist dieser bei der MRK nicht zwingend beziehungsweise nur unter bestimmten Voraussetzungen notwendig.

Als normative Richtlinie, die für die Sicherheit aller Industrieroboter gültig ist, dient hier zunächst die **europäische Norm (kurz: EN) ISO 10218 „Sicherheitsanforderungen von Industrierobotern“ aus dem Jahr 2011**. Sie wurde unter Berücksichtigung der von Industrierobotern und Industrierobotersystemen ausgehenden besonderen Gefährdungen erarbeitet. Die **EN ISO 10218-2 besagt im Abschnitt „4.2 – Layout Design“**, dass eine manuelle Steuerung des Roboters von außerhalb des geschützten Bereiches erfolgen sollte. Dieser wird in der EN ISO 10218-1 und -2 als der **„durch die äußeren technischen Schutzeinrichtungen begrenzte Raum“** definiert. Erfolgt eine Steuerung aus diesem Bereich heraus, was beispielsweise bei der Programmierung oft erforderlich ist, muss diese Bewegung über einen dreistufigen Zustimmungstaster erfolgen. Der Taster ist nach dieser etablierten Norm also notwendig.

Die kollaborierenden Leichtbauroboter, die sich in den vergangenen Jahren im Markt durchgesetzt haben, unterscheiden sich jedoch durch Technologie und Anwendung signifikant von herkömmlichen Industrierobotern. Eine etablierte Norm für diese neue Technik ist noch nicht vorhanden. Seit 2016 erweitert daher die **Technische Spezifikation (kurz: TS) ISO TS 15066 „Roboter und Robotikgeräte – Kollaborierende Roboter“** die geltende Norm um rund 30 Seiten. Sie unterstützt Integratoren dabei, eine Risikobeurteilung speziell bei MRK-Anwendungen durchzuführen und soll mittelfristig fest in die EN ISO 10218 integriert werden.

Laut der TS 15066 können kollaborierende Robotersysteme, die auf **Sicherheitsfunktionen wie Kraft- und Leistungsbegrenzung** basieren, nach erfolgreicher Risikobeurteilung im Sinne der ISO TS 15066 **sowohl im Hand- als auch Automatikbetrieb ohne Schutzzaun** Seite an Seite mit den Mitarbeitern arbeiten. Außerdem ist der **Zustimmungstaster für Industrieroboter im Handbetrieb** laut ISO TS 15066 für kollaborierende Systeme **nicht notwendig, vorausgesetzt, die in der Risikobeurteilung bestätigten Sicherheitsfunktionen sind zu jeder Zeit aktiv**.

Dies gilt jedoch **nicht für weitere kollaborierende Anwendungsarten** gemäß EN ISO 10218-2 Abschnitt 5.10.2 wie den **sicherheitsgerichteten, überwachten Halt, die Handführung oder die Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung**. Für diese Kollaborationsarten ist in der Regel ein **dreistufiger Zustimmungstaster erforderlich**.

Da in der Praxis bei den meisten kollaborierenden Anwendungen die **Kraft- und Leistungsbegrenzung oder der sicherheitsgerichtete, überwachte Halt** zum Einsatz kommen, konzentriert sich das Whitepaper auf die genauere Erläuterung dieser beiden Fälle. Zunächst werden dabei der **Not- und Sicherheitshalt** als allgemeine Sicherheitsfunktionen betrachtet. Im Anschluss geht das Whitepaper näher ein auf den **geschützten Bereich und den Zustimmungstaster** bei nicht kollaborierenden Anwendungen sowie beim sicherheitsgerichteten, überwachten Halt beziehungsweise bei der Kraft- und Leistungsbegrenzung. Bei letzterer liegt ein besonderer Fokus auf den **Herausforderungen der Risikobeurteilung bei der Messung von Klemmung und freier Kollision**.

Das Whitepaper **empfiehlt abschließend zwei Wege, durch zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen diese Risikobeurteilung zu vereinfachen**. Damit ist es Integratoren und Anwendern möglich, eine gute Basis für eine sichere MRK in ihrem Unternehmen zu schaffen.

2. Not- und Sicherheitshalt als Sicherheitsfunktionen

Der **Not-Halt** ist generell gemäß EG-Maschinenrichtlinie 2006/42/EG³ ein verpflichtendes Sicherheitselement für alle Maschinen und Anlagen. Die Auslösung des Not-Halts erfolgt manuell von einer Position aus, auf die der Bediener schnellen und ungehinderten Zugriff hat, und ist nur für Notfälle vorgesehen.

Für eine sichere Roboteranwendung ist es zudem unabdingbar, die Forderung der EN ISO 10218-2 nach dem sogenannten **Sicherheitshalt** zu erfüllen, der als technische Schutzmaßnahme beziehungsweise zur Risikominderung der Anwendung dient. Die Auslösung des Sicherheitshalts kann manuell erfolgen oder automatisch durch sicherheitsbezogene Funktionen ausgelöst werden. Der Sicherheitshalt muss den Stillstand aller Roboterbewegungen bewirken, dabei die Energie zu den Antrieben abschalten oder steuern und somit einen Stopp der Maschine veranlassen.

Es gibt verschiedene Stopp-Kategorien, die jeweils technisch unterschiedlich funktionieren. **Anhang 1** dieses Dokuments erläutert die einzelnen Kategorien.

Die folgende Tabelle verdeutlicht nochmals **Not- und Sicherheitshalt im Vergleich**:

Parameter	Not-Halt	Sicherheitshalt
Position der Auslösevorrichtung	Der Bediener hat schnellen, ungehinderten Zugang/Zugriff	Für nicht trennende Schutzeinrichtungen wird die Position anhand der Formeln für den (sicheren) Mindestabstand, wie in ISO 13855 beschrieben, bestimmt.
Auslösung	manuell	manuell, automatisch oder kann automatisch durch sicherheitsbezogene Funktion ausgelöst werden
Sicherheitsbezogene Leistungsfähigkeit des Steuerungssystems	muss Leistungsanforderung nach EN ISO 10218-1 Abschnitt 5.4 erfüllen	muss Leistungsanforderung nach EN ISO 10218-1 Abschnitt 5.4 erfüllen
Rückstellung	nur manuell	manuell oder automatisch
Häufigkeit der Nutzung	selten	veränderlich; von zyklisch bis selten
Zweck	Notfall	technische Schutzmaßnahmen oder andere Risikominderung
Wirkung	Wegnahme der gefährbringenden Energie	gesteuerte Beseitigung des gefährbringenden Zustands

Tabelle 2.1: Not-Halt vs. Sicherheitshalt gemäß EN ISO 10218-2⁴

³ Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Neufassung).

⁴ Quelle: EN ISO 10218-2

Der Sicherheitshalt ist zwar für nicht kollaborierende Anwendungen konzipiert. Dennoch ist er in vielen Fällen auch für kollaborierende Anwendungen, bei denen Mensch und Maschine nicht von einem Schutzzaun getrennt arbeiten, ein unabdingbarer Bestandteil des Sicherheitskonzepts.

Für jede kollaborierende Anwendung gilt es daher genauer zu betrachten, wie sich der geschützte Bereich definiert. Davon abhängig entscheidet sich die Notwendigkeit des Zustimmungstasters.

Im Folgenden werden Sicherheitshalt, geschützter Bereich und die Notwendigkeit des Zustimmungstasters für verschiedene nicht kollaborierende und kollaborierende Szenarien betrachtet.

2.1. Sicherheitshalt und Zustimmungstaster bei nicht kollaborierenden Anwendungen

Bei nicht kollaborierenden Anwendungen arbeitet der Roboter räumlich getrennt vom Menschen hinter einem Sicherheitszaun. Dieser Zaun trennt dabei gleichzeitig den geschützten vom ungeschützten Bereich. Wird nun beispielsweise die Tür zum eingezäunten Arbeitsbereich des Roboters geöffnet und damit der geschützte Bereich verletzt, aktiviert dies den Sicherheitshalt⁵.

Ist der geschützte Bereich einer nicht kollaborierenden Anwendung wie im genannten Beispiel offen und es besteht die Möglichkeit, dass sich eine Person darin befindet, darf eine Bewegung des Roboters in dem Moment nicht mehr vollzogen werden. Speziell bei der Programmierung ist dies jedoch manchmal unabdingbar. In diesem Fall ist eine weitere Sicherheitsmaßnahme erforderlich, um den Schutz des Menschen zu jeder Zeit zu gewährleisten. Hierfür wird, wie die EN ISO 10218 fordert, mit dem dreistufigen Zustimmungstaster gemäß IEC 60204-1 gearbeitet. Dieser lässt eine Roboterbewegung bei Verletzung des geschützten Bereichs nur dann zu, wenn der Taster in seiner Mittelstellung gehalten wird. Ein Loslassen oder Durchdrücken dieses Tasters führt wiederum sofort zum Stopp des Roboters.

Bei nicht kollaborierenden Anwendungen ist der Zustimmungstaster immer erforderlich. Die Steuerung erfolgt zwar generell von außerhalb des geschützten Bereichs und der Taster könnte daher theoretisch entfallen. Für die Bewegungen innerhalb des geschützten Bereichs, wie sie beispielsweise bei der Programmierung erforderlich sind, ist der Zustimmungstaster jedoch zwingend notwendig⁶.

5 Bei den Roboterarmen von Universal Robots nimmt dafür ein Schaltkontakt das bestehende HIGH Signal vom Safeguard Stop Eingang des Roboters weg und löst so einen Stopp der Kategorie 2 aus (vgl. Anhang 1). Die Gelenke werden hierbei still gesetzt, bleiben jedoch dabei unter Spannung. Gleichzeitig überwacht das mit Performance Level d (PL d) zertifizierte Sicherheitssystem, dass der Roboter auch tatsächlich stillsteht und nicht weiter- oder wieder anläuft. Tritt ein solcher Fehler auf, trennt das Sicherheitssystem den Roboterarm von der Spannungsversorgung und verursacht somit einen Stopp der Kategorie 1 oder 0.

6 Ausnahme wäre hier, wenn im Rahmen einer Risikobeurteilung ermittelt wurde, dass auch innerhalb des Schutzzauns zu keiner Zeit Kräfte oder Drücke bei einer Kollision mit dem Roboter auftreten können, welche zu einer Verletzung führen können. Diese wird aber i.d.R. nicht durchgeführt.

2.2. Sicherheitshalt und Zustimmungstaster bei kollaborierenden Anwendungen

Bei kollaborierenden Roboteranwendungen sind keine Sicherheitszäune vorhanden, die den geschützten vom ungeschützten Bereich trennen. Um daher den geschützten Bereich für eine kollaborierende Roboteranwendung zu definieren und damit zu entscheiden, ob ein Zustimmungstaster erforderlich ist, muss zunächst einmal betrachtet werden, um welche Art der Anwendung es sich handelt. Die für Sicherheitsanforderungen von Industrierobotern zuständige Norm EN ISO 10218-1:2011 beschreibt im Abschnitt 5.10 vier Arten von kollaborierenden Anwendungen:

- I. **Sicherheitsbewerteter, überwachter Halt:** Beim Zutritt eines Menschen in den Kollaborationsraum stoppt der Roboter. Dieser Stillstand hält solange an, bis der Mitarbeiter den gemeinsamen Arbeitsraum wieder verlassen hat.
- II. **Handführung:** Die Bewegungen und Kräfte, die der Mensch auf den Roboter ausübt, werden mittels Sensoren in eine Roboterbewegung umgewandelt. Der Roboter wird also komplett vom Mitarbeiter gesteuert, meist unterstützt durch eine Zustimmungseinrichtung wie einen Dreipunktschalter.
- III. **Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung:** Der Abstand von Mensch und Roboter wird konstant überwacht. Bei Unterschreitung der vorgeschriebenen Distanz, reduziert sich die Geschwindigkeit des Roboters bis auf einen Sicherheitshalt.
- IV. **Leistungs- und Kraftbegrenzung⁷ durch inhärente Konstruktion oder Steuerung:** Das Gefährdungspotenzial des Roboters wird durch die Beschränkung dynamischer Parameter minimiert. So lassen sich die Kontaktkräfte zwischen Mitarbeiter und Roboter technisch auf ein ungefährliches Maß begrenzen.

Die Fachwelt spricht nur bei der letzten Variante wirklich von einer Kollaboration im eigentlichen Sinne. In den anderen Fällen ist der Begriff einer Koexistenz angebracht, da sich Mensch und Roboter zwar im gleichen Arbeitsbereich aufhalten, aber nur einer der beiden Akteure arbeitet. Bei der Variante des sicherheitsbewerteten überwachten Halts beispielsweise hält der Roboter an, wenn eine Person in dessen Bereich eintritt.

Im Falle der Kraft – und Leistungsbegrenzung durch inhärente Konstruktion oder Steuerung arbeiten Mensch und Maschine im Fertigungsprozess direkt neben- oder miteinander, zum Beispiel an derselben Werkbank. Nur mit dieser Variante kann ein Mitarbeiter den Roboter flexibel wie ein Werkzeug in seinen Arbeitsalltag integrieren und an sich verändernde Produktionslayouts anpassen. Alle anderen Typen erfordern in der Umsetzung zusätzlichen Aufwand, der nicht der Vision einer echten MRK entspricht.

⁷ Schutzmaßnahme, die entweder Gefährdungen beseitigt oder die mit den Gefährdungen verbundenen Risiken vermindert, indem ohne Anwendung von trennenden oder nicht trennenden Schutzeinrichtungen die Konstruktions- oder Betriebseigenschaften der Maschine verändert werden.

Kraft- und Leistungsbegrenzung bei Universal Robots

Die Leichtbauroboter von Universal Robots sind mit internen Kraftregelungen und bis zu 15 individuell justierbaren Sicherheitsfunktionen ausgestattet. Dadurch können sie nach erfolgreich abgeschlossener Risikobeurteilung ohne oder nur mit minimalen Schutzvorrichtungen betrieben werden. Der Roboter überwacht fortlaufend die Ströme in seinen durch Gleichstromservomotoren angetriebenen Gelenken. Aus den jeweiligen Strömen, und noch einigen anderen gemessenen und bekannten Parametern, kann der Roboter die auf ihn wirkenden Kräfte bestimmen. Diese vergleicht er in Echtzeit mit den aufgrund der Physik erwarteten statischen und dynamischen Kräften. Kommt es doch einmal zu einer unerwarteten Kollision, stimmen diese beiden Werte durch den erhöhten mechanischen Widerstand nicht mehr miteinander überein. Der Roboter stoppt sofort. Bei den Knickarmrobotern von Universal Robots genügt je nach Einstellung und Modell bereits eine Kräfteinwirkung von lediglich 50 oder 100 Newton, um den automatischen Sicherheitsstopp einzuleiten.

In der Praxis kommen in den meisten kollaborierenden Anwendungen die Variante „sicherheitsbewerteter, überwachter Halt“ oder „Kraft- und Leistungsbegrenzung“ zum Einsatz. Daher wird im Folgenden aufgezeigt, ob und unter welchen Bedingungen der Zustimmungstaster bei diesen beiden Fällen notwendig ist.



2.2.1 Geschützter Bereich beim sicherheitsbewerteten überwachten Halt

Bei der Variante des sicherheitsbewerteten überwachten Halts stoppt der Roboter, sobald eine Person in dessen Arbeitsbereich eintritt. In der Regel wird hierbei mit einem Laserscanner oder einer Trittmatte gearbeitet, die als Barriere dienen und die Trennung zwischen geschütztem und nicht geschütztem Bereich übernehmen. So detektieren der Laserscanner oder die Sensoren der Trittmatte beispielsweise eine sich annähernde Person und schalten ihre sicheren Ausgänge auf LOW (es ist keine Spannung vorhanden⁸), wenn eine bestimmte Entfernung unterschritten wird. Dieser Ausgang ist dann in der Regel auf den Sicherheitsstopp-Eingang des Roboters geführt. Somit ersetzen Trittmatte oder Scanner den Schutzzaun und die sich darin befindliche überwachte Tür. Im Weiteren verhält es sich jedoch ähnlich wie beim Eintreten in den geschützten Bereich über eine Tür.

Muss der Programmierer beim sicherheitsbewerteten überwachten Halt für manuelle Bewegungen näher am Roboter stehen als es die Trittmatte oder der Scanner zulassen, ist es notwendig, die Bewegung des Roboters durch eine weitere Sicherheitsfunktion zu überwachen, vorübergehend freizugeben und ihn im Notfall wieder zu stoppen. Der dreistufige Zustimmaster ist also erforderlich.

2.2.2 Geschützter Bereich bei der Kraft- und Leistungsbegrenzung

Im Falle der Leistungs- und Kraftbegrenzung durch inhärente Konstruktion oder Steuerung arbeiten Mensch und Maschine im Fertigungsprozess direkt neben- oder miteinander, zum Beispiel an derselben Werkbank. Ein durch eine externe Peripherie sichergestellter geschützter Bereich existiert nicht. Die **Sicherheit wird durch die Kraft- und Leistungsbegrenzung des Roboters gewährleistet und ist dadurch zunächst nicht ortsgebunden**. Jedoch muss gemäß EN ISO 10218-2 der sogenannte **Kollaborationsraum**, in welchem Roboter und Mensch aufeinander treffen und ein physikalischer Kontakt entstehen kann, im Rahmen einer **Risikobeurteilung** untersucht werden. Hierbei wird verifiziert, dass in diesem Bereich keine Gefährdung für den Menschen besteht.

Für die Risikobeurteilung ist es erforderlich, alle möglichen Kollisionsszenarien von Mensch und Roboter wie **Klemmung** oder **freie Kollision** im Kollaborationsraum zu betrachten. Mit Messungen (bei Klemmung) oder durch Berechnung (bei freiem Einschlag) gilt es zu ermitteln, dass die Kräfte und Drücke einer Kollision **keine Verletzungen verursachen**.

Liegt eine erfolgreiche Risikobeurteilung im Sinne der ISO TS 15066 vor und sind die in der Risikobeurteilung bestätigten Sicherheitsfunktionen zu jeder Zeit aktiv, ist der Zustimmaster in diesem Fall für das kollaborierende System nicht notwendig.



8 Spannung = 0V bzw. in bestimmten Logiken auch eine negative Spannung

Exkurs: Messung von Klemmung und freiem Einschlag

Generell unterscheiden sich die potentiellen Kollisionsszenarien von Mensch und Roboter wie folgt:

- I. **Der quasi statische Kontakt:** Ein Gegenstand oder ein Körperteil erfährt eine **Klemmung**, beispielsweise wenn eine auf dem Tisch liegende Hand zwischen Tisch und Roboter eingeklemmt wird. Da kein Zurückweichen der betroffenen Körperstelle möglich ist, nimmt das Gewebe des Körperteils die gesamte kinetische Energie des Roboters auf.
- II. **Der transiente Kontakt:** Ein **freier Einschlag**, bei welchem der Roboter auf einen Gegenstand oder ein Körperteil trifft, das aufgrund des freien Einschlagimpulses zurückweichen kann. Zum Beispiel trifft der Roboter eine frei bewegliche Hand. Nur ein Teil der kinetischen Energie wird hierbei vom Gewebe aufgenommen und bis zur Entlastung in diesem als potentielle Energie gespeichert. Der Rest beschleunigt die betreffende Körperstelle und überträgt damit einen Teil der kinetischen Bewegungsenergie des Roboters als kinetische Energie auf die jeweilige Körperregion.

Die inzwischen nicht mehr gültige Vorgängerversion der EN 10218:2011 definierte in der Vergangenheit pauschal eine maximal zulässige Kontaktkraft von 150 Newton bei einer Kollision zwischen Mensch und Roboter.

Die aktuelle Norm spezifiziert sie mit einem **Hilfestellungs-Verweis auf die ISO TS 15066** genauer: Deren **Anhang A** führt ein **optionales Körperzonenmodell** ein, das 29 unterschiedliche Körperstellen sowie „Schmerzgrenzen“ definiert. Diese Werte sollen dem Integrator als Richtwerte bei einer Risikobewertung dienen. Das Modell sowie die Schmerzschwellentabelle finden sich in **Anhang 2 und 3** des vorliegenden Whitepapers.

Zur Kraft- und Druckmessung bei Klemmung und freier Kollision sei zudem das Whitepaper „Kollaborative Robotik: Handlungssicherheit in der Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) mit der ISO TS 15066“ von Universal Robots empfohlen, welches die Thematik rund um das Körperzonenmodell und dessen Gültigkeit sowie Umsetzung ausführlich beleuchtet⁹.

Wie im Exkurs gezeigt, sind speziell **Klemm- und Scherstellen bei kollaborierenden Anwendungen mit Kraft- und Leistungsbegrenzung problematisch**, da sie für den Menschen besonders gefährlich sind. Daher sollte bei der Integration eines Roboters mit Kraft- und Leistungsbegrenzung darauf geachtet werden, **potentielle Klemmstellen so gering wie möglich zu halten**. Dies ist in der Praxis jedoch oft schwer zu realisieren.

Daher empfiehlt sich die **Verwendung zusätzlicher Sicherheitseinstellungen** für den Roboter. Diese können den **Arbeitsbereich des Roboters** und somit auch den Kollaborationsraum **auf ein Minimum reduzieren**, so dass die Risikobewertung für denselben auf den kleinsten notwendigen Raum beschränkt bleibt. Im Folgenden Kapitel empfiehlt das vorliegende Whitepaper zwei Möglichkeiten, dies bestmöglich zu realisieren.

⁹ Das Whitepaper steht [hier](#) zum Download zur Verfügung.

3. Vereinfachte Risikobeurteilung bei der Kraft- und Leistungsbegrenzung

Bei der „Kraft- und Leistungsbegrenzung“ minimiert die Beschränkung dynamischer Parameter das Gefährdungspotenzial des Roboters. Um die erforderliche Risikobeurteilung bei dieser Kollaborationsform zu vereinfachen und mögliche Klemm- und Scherstellen im Kollaborationsraum von vornherein auszuschließen, empfiehlt es sich, diesen Raum auf das notwendige Minimum zu reduzieren. Das kann beispielsweise durch die Aufteilung in zwei Bereiche oder durch Beschränkung des Bewegungsraums des Roboters erfolgen. Beide Möglichkeiten werden nachfolgend erläutert.

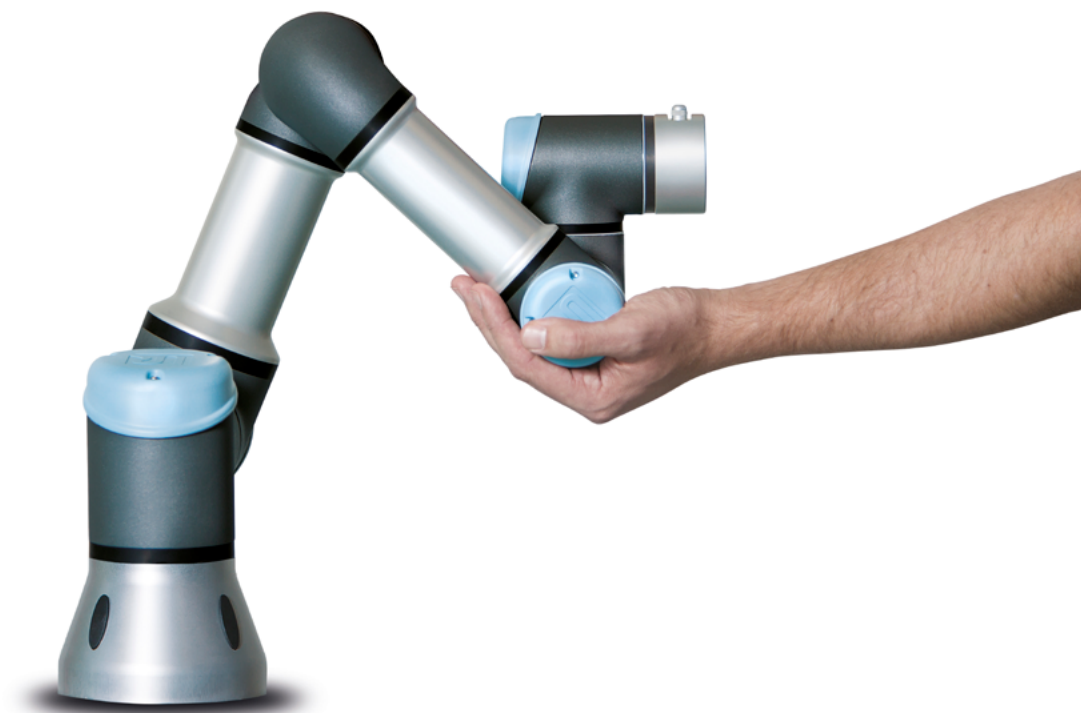
3.1 Kollaborationsraum – Beispiel: Aufteilung in zwei Bereiche

Eine gute Variante, den Kollaborationsraum von Mensch und Roboter möglichst klein zu halten, möglichst viele potentielle Klemm- und Scherstellen zu vermeiden und damit eine Applikation mithilfe von Kraft- und Leistungsbegrenzung abzusichern, ist die Aufteilung des Arbeitsraums in zwei Bereiche:

- **„Normaler Bereich“:** Hier gelten normale Sicherheitsparameter.
Der Roboter kann hier mit höheren Geschwindigkeiten arbeiten und die Abschaltung muss nicht hochsensibel eingestellt sein, da sich in diesem Bereich normalerweise keine Person befindet.
- **„Kollaborationsraum“:** Hier werden die Werte der Sicherheitsparameter (Geschwindigkeit, Kraft, Leistung usw.) reduziert.
Der Roboter arbeitet hier mit gedrosselter Geschwindigkeit und die Abschaltung erfolgt hochsensibel, sobald der Roboter eine Kollision erkennt.

Die Roboterarme von Universal Robots ermöglichen zum einen die Trennung dieser beiden Bereiche durch externe Sensoren wie zum Beispiel einen Lichtvorhang, und zum anderen durch Sicherheitsebenen, welche beim Durchfahren die Umschaltung von einem Bereich in den anderen auslösen.

Diese Möglichkeit ist besonders für Prozesse geeignet, bei denen ein Mensch mit dem Roboter an einer Stelle den Arbeitsbereich teilt, aber der Roboter ebenso eine geringe Taktzykluszeit erreichen muss.



3.1.1 Praktische Umsetzung

In Abbildung 3.1 werden die beiden Bereiche beim Durchfahren der blau dargestellten Sicherheitsebene umgeschaltet.

Die hier dargestellte Konstellation des Roboters von Universal Robots beschränkt folglich den **Kollaborationsraum von Mensch und Maschine** auf den **Bereich vor dem Lichtgitter**. In diesem Bereich müssen alle Klemmstellen und Kollisionsmöglichkeiten untersucht werden, um sicher zu stellen, dass bei einem physikalischen Kontakt keine Verletzungen auftreten können (vgl. Kapitel 2.2.2). **Sofern dies verifiziert werden konnte, ist im Kollaborationsraum kein Zustimmungstaster notwendig.**

Der **Bereich hinter dem Gitter**, also der normale Bereich, ist ein **geschützter Bereich im herkömmlichen Sinne** (vgl. Kapitel 2.1). Müssen in diesem Bereich manuelle Bewegungen vollzogen werden (beispielsweise bei der Programmierung), **ist ein dreistufiger Zustimmungstaster erforderlich**, da hier keine reduzierten Sicherheitsparameter verwendet werden und wahrscheinlich die Klemm- und Kollisionssituationen in diesem Bereich auch nicht näher untersucht wurden.

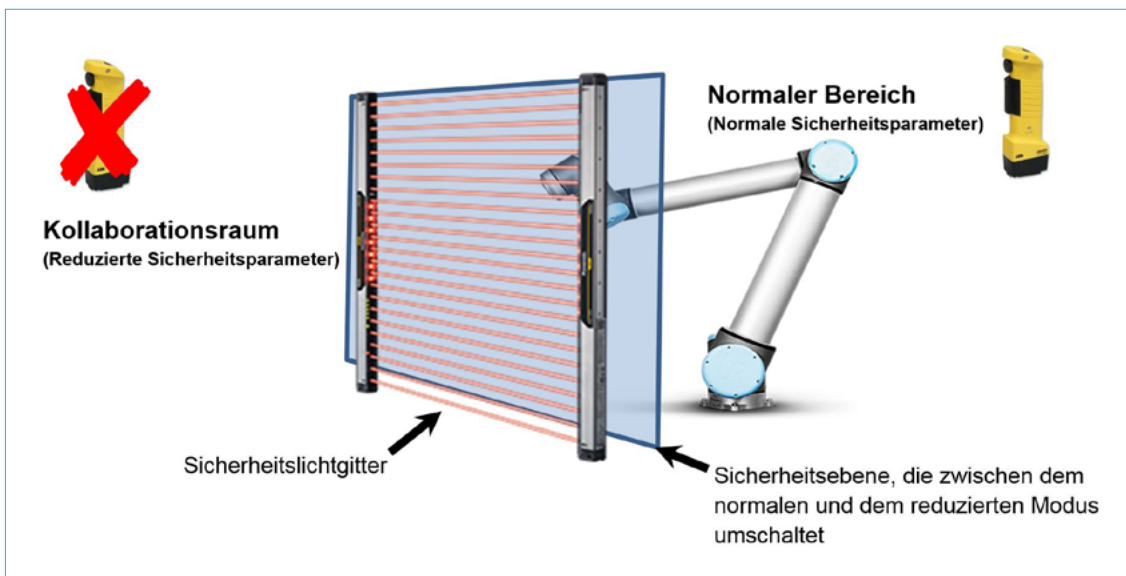


Abbildung 3.1: Roboterarm von Universal Robots mit Sicherheitsebene und Lichtgitter¹⁰

Folgende Möglichkeiten für das gemeinsame Arbeiten von Mensch und Roboter sind in Abbildung 3.1 gegeben:

Position Roboter	Position Mensch	Sicherheit
Roboter im normalen Bereich	Vor Gitter	Normale Parameter
Roboter im normalen Bereich	Durchbricht Gitter	Sicherheitsstopp
Roboter im Kollaborationsraum	Vor Gitter	Reduzierte Parameter
Roboter im Kollaborationsraum	Durchbricht Gitter	Reduzierte Parameter

Tabelle 3.1: Möglichkeiten der Kollaboration bei Aufteilung des Arbeitsraums in zwei Bereiche¹¹

¹⁰ Quelle: Universal Robots

¹¹ Quelle: Universal Robots

Wie in Abbildung 3.1 gezeigt, ist für die Trennung in einen normalen und einen kollaborativen Bereich eine Ebene zu konfigurieren, die in den Sicherheitseinstellungen auf „Auslöser reduzierter Modus“ konfiguriert wird.

In Abbildung 3.2 ist dargestellt, wie die Sicherheitseingänge und -ausgänge elektrisch verschaltet werden müssen, um das Lichtgitter und die Sicherheitsebene miteinander zu kombinieren. Ein Sicherheitsausgang wird als „nicht reduzierter Modus“ konfiguriert. Dieser Ausgang hält ein LOW Signal, wenn der Roboter im normalen Bereich arbeitet und ein HIGH Signal¹², wenn der Roboter die Ebene durchfährt und sich damit in den Kollaborationsraum bewegt. Mit Hilfe von diesem Ausgang wird über eine externe Beschaltung die Sicherheitslichtschranke überbrückt (vgl. Abbildung 3.2). Die Sicherheitslichtschranke selbst schaltet den Eingang Sicherheitshalt (bei Universal Robots Safeguard Stopp genannt) des Roboters.

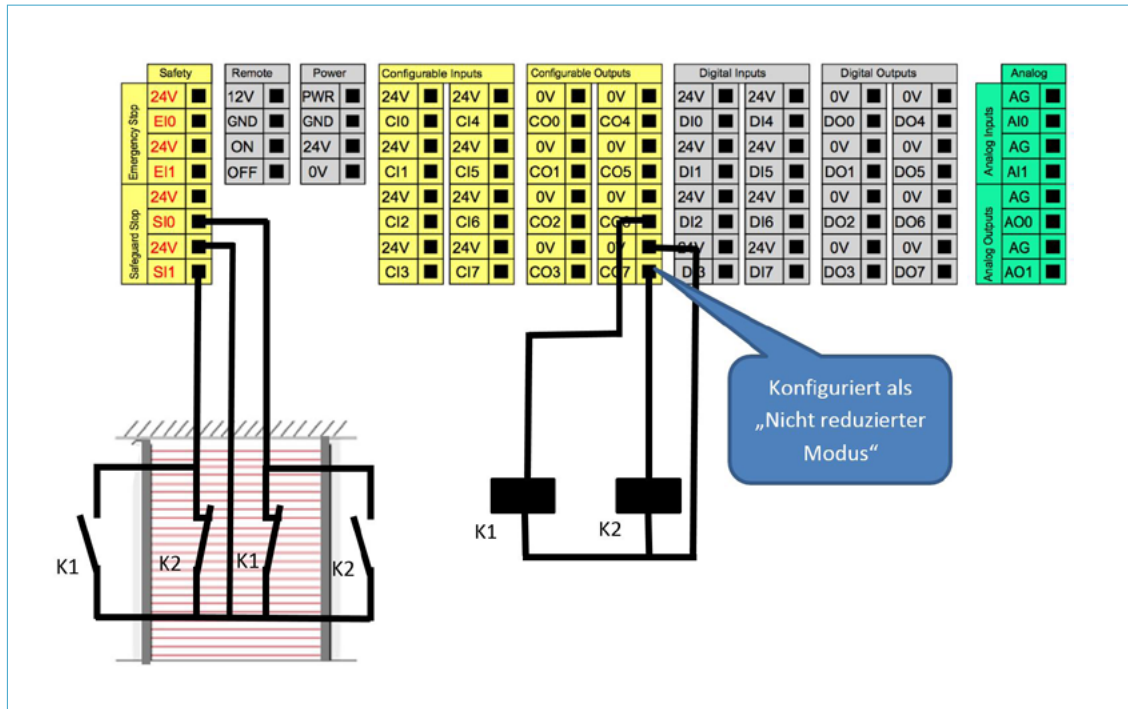


Abbildung 3.2: Anschlussplan bei Teilung in normalen Bereich und Kollaborationsraum¹³

¹² Spannung vorhanden; bei Robotern von Universal Robots beträgt diese +24V

¹³ Quelle: Universal Robots

3.2 Beschränkung des Bewegungsraums des Roboters

Eine weitere Möglichkeit, die Anzahl der notwendigen Messungen von Kraft und Druck innerhalb des Kollaborationsraums einer Applikation zu reduzieren, besteht darin, **den möglichen Bewegungsraum des Roboters auf das notwendige Minimum zu begrenzen**. Dies eignet sich besonders für Applikationen, die nicht den gesamten Arbeitsbereich des Roboters nutzen.

Wie Abbildung 3.3 zeigt, können hierfür ebenfalls Sicherheitsebenen verwendet werden, welche den Tool Center Point (TCP)¹⁴ begrenzen. Der Roboter kann sich damit nicht außerhalb dieser Sicherheitsebenen bewegen. Ergänzend oder alternativ kann der Bewegungsbereich der einzelnen Gelenke eingeschränkt werden.

Abbildung 3.3 verdeutlicht das Begrenzen des Bewegungsbereichs des Roboters durch die Verwendung von Sicherheitsebenen:

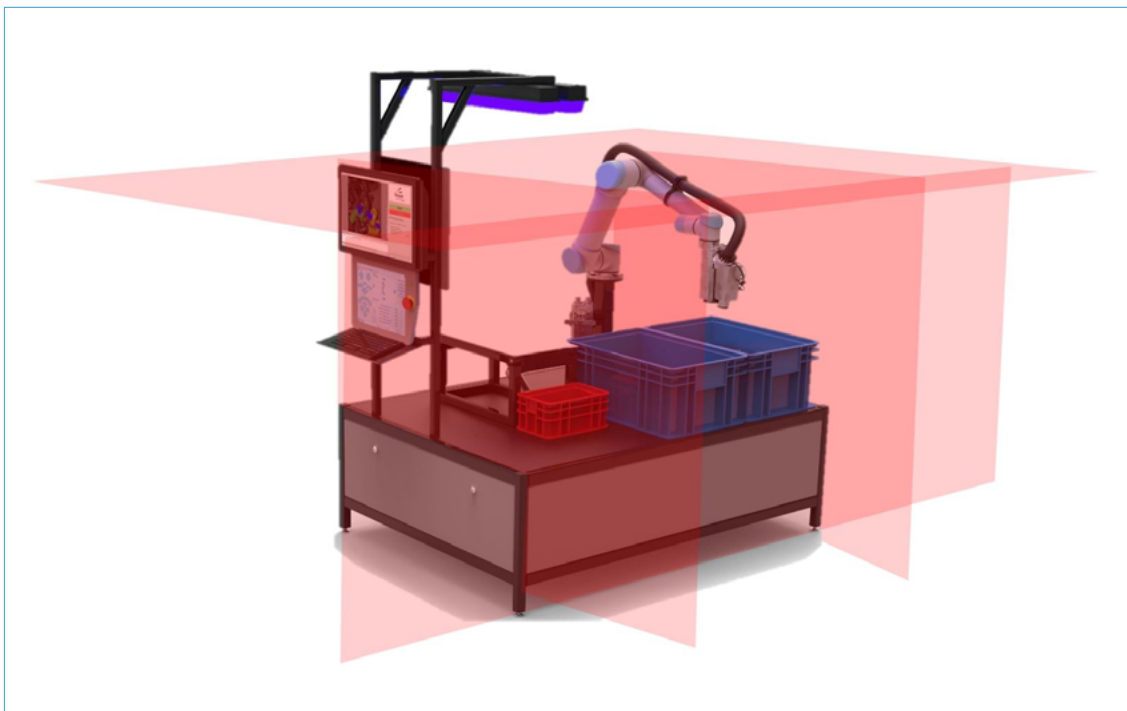


Abbildung 3.3: Roboterzelle mit mehreren virtuellen Grenzen¹⁵

Ohne diese zusätzlichen Einschränkungen durch die Sicherheitsebenen könnte sich ein Roboter in einer Anwendung theoretisch sehr weitläufig bewegen. Somit müsste dieser **gesamte mögliche Bewegungsbereich als Kollaborationsraum betrachtet** und die in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Kraft-, Druck- und Energiebetrachtungen im Rahmen einer **Risikobeurteilung** bezüglich Klemmung und freier Kollision durchgeführt werden.

In der Praxis führt der Roboter jedoch in den meisten Fällen seine Bewegungen in einem sehr reduzierten Raum aus. Das **Einziehen verschiedener Sicherheitsebenen vereinfacht die Risikobeurteilung somit erheblich**, da nun nicht mehr der gesamte Bereich des Roboters betrachtet werden muss. Nur **noch die potentiellen Klemm- und Kollisionspunkte in dem für den Roboter frei gegebenen Bereich müssen** messtechnisch beziehungsweise rechnerisch **überprüft werden**, um zu verifizieren, dass in diesem Bereich keine Kräfte und Drücke auftreten, die den Arbeiter gefährden können.

¹⁴ Gedachter Referenzpunkt am Werkzeug, welcher die Werkzeugposition eines Industrieroboters beschreibt

¹⁵ Quelle: Universal Robots

In einer konkreten Anwendung könnte das mit einem Roboter von Universal Robots beispielsweise so aussehen: Ein Mensch arbeitet mit dem Roboter in einer kollaborierenden Anwendung an einer Werkbank. Bewegt sich der Roboter zu tief, besteht die Gefahr, dass er die Hand des Mitarbeiters zwischen sich und der Werkbank einquetscht. Dementsprechend wird die Sicherheitsebene parallel zur Werkbank definiert, beispielsweise in einem Abstand von 20 Zentimeter darüber. Das bedeutet, dass die Bewegung des Roboters an der Ebene stoppt, er sich also der Werkbank nicht auf mehr als 20 Zentimeter nähern kann. So ist die potentielle Gefährdung durch Quetschung ausgeschlossen und muss in der Risikobeurteilung nicht weiter betrachtet werden.

Da die verwendeten Sicherheitsebenen sowohl im Automatik- als auch im Programmierbetrieb wirksam sind und durch den verkleinerten Bewegungsraum alle Gefahrenstellen beurteilt werden konnten, ist der Roboter nun in beiden Betriebsarten sicher. Ein Zustimmungstaster ist bei Programmierarbeiten in diesem Bereich nicht notwendig.

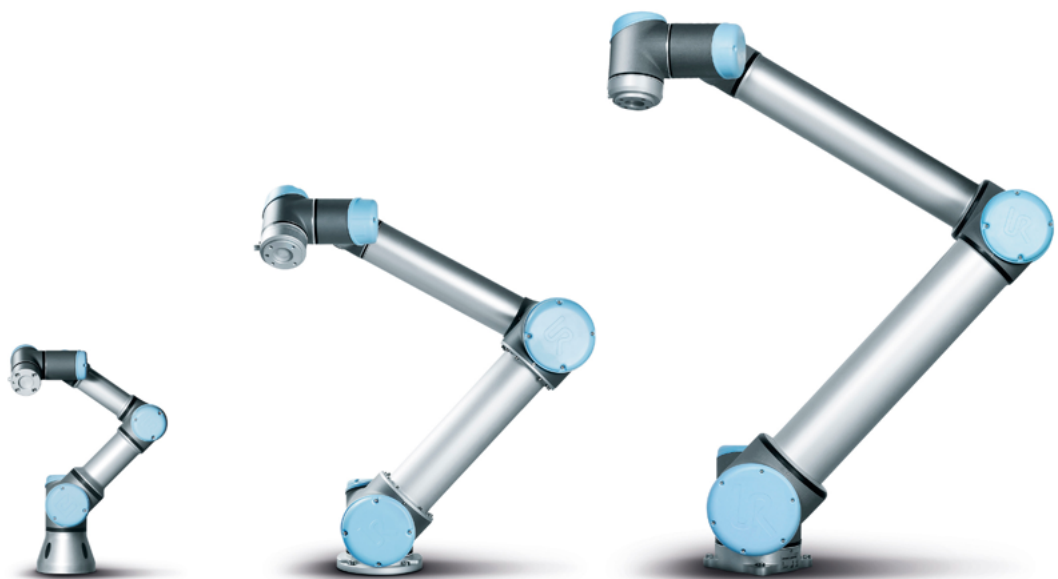


4. Übersicht: Zustimmungstaster ja oder nein?

Die untenstehende Tabelle fasst am Beispiel der Roboter von Universal Robots nochmals kurz zusammen, in welchen Applikationen der Zustimmungstaster erforderlich beziehungsweise nicht erforderlich ist. Die Angaben der Tabelle sind ohne Gewähr, da sie sich lediglich auf den Regelfall beziehen und jede Applikation individuell betrachtet werden muss. Dennoch kann die Übersicht für eine erste Einschätzung herangezogen werden, ob die eigene Anwendung einen Zustimmungstaster erfordert:

Applikationsarten von Universal Robots Robotern	Zustimmungstaster erforderlich?
Roboter in Schutzzaun eingehaust. Öffnen der Schutztür verursacht Sicherheitsstopp	ja
Roboter ohne Schutzzaun, bei Personenannäherung wird die Roboterbewegung von einem Laserscanner unterbrochen	ja
Roboter ohne Schutzzaun, bei Personenannäherung wird die Roboterbewegung von einer Trittmatte unterbrochen	ja
Roboter mit zwei Bereichen (Normaler Bereich und Kollaborationsbereich)	Teilweise (ja im normalen Bereich, nein im Kollaborationsraum, vgl. Kapitel 3.1)
Roboter ohne Schutzzaun, alle Kollisionspunkte im sicherheitstechnisch möglichen Bewegungsbereich wurden bewertet und liegen im tolerierbaren Bereich.	nein

Tabelle 4.1: Notwendigkeit des Zustimmungstasters in verschiedenen Anwendungen¹⁶

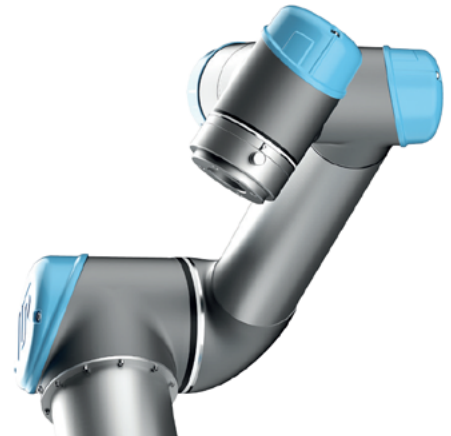


¹⁶ Quelle: Universal Robots

5. Ausblick

Die Robotik ist auf Erfolgskurs: Bis 2018 wird der Absatz von Industrie-Robotern weltweit jedes Jahr durchschnittlich um 15 Prozent wachsen und die jährlich verkauften Einheiten werden sich auf rund 400.000 Stück fast verdoppeln. Ein besonders starkes Wachstum wird für die MRK erwartet.¹⁷ Das verwundert nicht, sind doch kollaborierende Leichtbauroboter wie der UR3, UR5 und UR10 in den letzten Jahren für viele Unternehmen jeder Größe zum Schlüssel geworden, um den Herausforderungen globalisierter Märkte erfolgreich zu begegnen. Dank ihrer Flexibilität werden sich kollaborierende Roboter immer neue Anwendungs- und Einsatzgebiete erschließen und nicht mehr aus dem Produktionsalltag wegzudenken sein. Auch kleine und mittelständische Unternehmen werden künftig noch mehr auf die MRK setzen, denn sie bietet dank ihrer vielfältigen Einsatzmöglichkeiten bei überschaubaren Kosten eine gute Möglichkeit, die Wettbewerbsfähigkeit langfristig zu steigern.

Entscheidend für den Erfolg der kollaborierenden Roboter ist, dass sie ohne Schutzzaun sicher Seite an Seite mit den Mitarbeitern arbeiten können. Die ISO TS 15066 unterstützt aktuell Integratoren bei der Durchführung der Risikobeurteilung. Anhand des vorliegenden Whitepaper können sie zudem über die Notwendigkeit des Zustimmungstasters entscheiden und so eine sichere MRK realisieren. Mit der mittelfristigen Integration der TS in die EN ISO 10218 wird die MRK dann nicht nur auf Produktions- sondern auch auf Normenebene endgültig angekommen sein.



Über Universal Robots

Universal Robots wurde 2005 von Esben H. Østergaard, dem heutigen CTO des Unternehmens, mit gegründet: Seine Vision war es, Robotertechnologie, durch die Entwicklung leichter, benutzerfreundlicher sowie preisgünstiger und flexibler Industrieroboter, die ein sicheres Arbeiten ermöglichen, allen zugänglich zu machen. Seit der erste Roboter 2008 auf den Markt kam, hat das Unternehmen ein beträchtliches Wachstum erfahren und verkauft seine benutzerfreundlichen Roboterarme mittlerweile weltweit in über 50 Ländern. Universal Robots, dem Unternehmen Teradyne Inc. zugehörig, hat seinen Unternehmenssitz im dänischen Odense und verfügt zudem über regionale Niederlassungen in den USA, Spanien, Deutschland, Italien, der Tschechischen Republik, China, Singapur, Indien, Japan, Taiwan und Südkorea. Weitere Informationen finden Sie unter <http://www.universal-robots.com/de>.

Universal Robots (Germany) GmbH

Baierbrunner Str. 15
81379 München

Tel.: + 49 89 / 121 89720-0
E-Mail: ur.we@universal-robots.com
URL: www.universal-robots.de

¹⁷ World Robotics (2015) Industrial Robot Statistics. International Federation of Robotics

7. Weiterführende Literatur

Hertel, Lothar Oberbichler; Brigitte Wilrich, Thomas: *Technisches Recht. Grundlagen, Systematik, Recherche.* Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015.

Krey, Volker; Kapoor, Arun: *Praxisleitfaden Produktsicherheitsrecht. CE-Kennzeichnung, Gefahrenanalyse, Betriebsanleitung, Konformitätserklärung, Produkthaftung, Fallbeispiele.* München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014 (2. Auflage).

International Organization for Standardization (Hrsg.): *ISO 10218-1:2011. Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots – Part 1: Robots.* Hrsg. v. ISO/TC 299 Robotics (Komitee), 2011.

International Organization for Standardization (Hrsg.): *Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots – Part 2: Robot systems and integration.* Hrsg. v. ISO/TC 299 Robotics (Komitee), 2011.

International Organization for Standardization (Hrsg.): *ISO/TS 15066:2016. Robots and robotic devices – Collaborative robots.* Hrsg. v. ISO/TC 299 Robotics (Komitee), 2016.

International Organization for Standardization (Hrsg.): *ISO 12100:2010. Safety of machinery - General principles for design - Risk assessment and risk reduction.* Hrsg. von ISO/TC 199 Safety of machinery (Komitee), 2010.

International Organization for Standardization (Hrsg.): *ISO 13855:2010. Safety of machinery - Positioning of safeguards with respect to the approach speeds of parts of the human body.* Hrsg. von ISO/TC 199 Safety of machinery (Komitee), 2010.

International Electrotechnical Commission (Hrsg.): *IEC 60204-1:2016 ED6. Safety of machinery - Electrical equipment of machines - Part 1: General requirements.* Hrsg. von IEC/TC 44 Safety of machinery - Electro-technical aspects (Komitee), 2016.

Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union (Hrsg.): *Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Neufassung).* Hrsg. von Europäisches Parlament, Rat der Europäischen Union, 2006.

Schunkert, Andreas: *„Kollaborative Robotik: Handlungssicherheit in der Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) mit der ISO TS 15066“.* Hrsg. von Universal Robots (Germany) GmbH, 2017. Das Whitepaper steht [hier](#) zum Download zur Verfügung.

8. Anhang

Anhang 1: Verschiedene Stopp-Kategorien beim Sicherheitshalt

Beim Sicherheitshalt fordert die EN ISO 10218-2, dass er den Stillstand aller Roboterbewegungen bewirkt, dabei die Energie zu den Antrieben abschaltet oder steuert und somit einen Stopp der Kategorie 0 oder 1 auslöst. Weiter gibt die EN ISO 10218-2 die Möglichkeit, dieser Sicherheitsfunktion einen Stopp der Kategorie 2 „vorzuschalten“ welcher überwacht wird und beim Versagen dann den Stopp der Kategorie 0 oder 1 schaltet.

Folgende Tabelle verdeutlicht den Unterschied der jeweiligen Stopp-Kategorien:

Stopp Kategorie	Beschreibung
Stopp Kategorie 0	Ungesteuertes Stillsetzen durch sofortige (< 200 ms) Abschaltung der Energiezufuhr zur Aktorik.
Stopp Kategorie 1	Gesteuertes Stillsetzen durch Unterbrechen der Energiezufuhr. Beim Sicherheitshalt ist in diesem Fall gefordert, dass er den Stillstand aller zur Aktorik, wenn zum Beispiel der Stillstand einer gefahrbringenden Bewegung erreicht ist (= zeitverzögerte Abschaltung der Energiezufuhr).
Stopp Kategorie 2	Gesteuertes Stillsetzen. Die Energiezufuhr zu den Antriebselementen wird nicht unterbrochen. Zusätzliche Maßnahmen gemäß EN 1037 (Schutz vor unerwartetem Wiederanlauf) erforderlich, z.B. durch Einsatz eines sicherheitsgerichteten Stillstandswächters.

Tabelle 1.1: Stopp Kategorien gem. EN 60204-1 Ziffer 9.2.2¹⁸

¹⁸ Quelle: EN 60204-1 Ziffer 9.2.2

Anhang 2: Schmerzschwellentabelle aus Anhang A der ISO TS 15066

	Körperregion	Kraft [N]	Druck [$\frac{N}{cm^2}$]	Transienter Faktor
1	Stirn	130	130	1
2	Schläfe	130	110	1
3	Gesicht	65	110	1
4	Nacken oben	150	140	2
5	Nacken unten	150	210	2
6	Schulter vorne	210	160	2
7	Unterer Rücken	210	210	2
8	Solar Plexus	140	120	2
9	Brustmuskel	140	170	2
10	Bauch	110	140	2
11	Becken	180	210	2
12	Schulter seitlich	150	190	2
13	Oberarm	150	220	2
14	Ellbogen	160	190	2
15	Unterarm	160	180	2
16	Finger	140	220 bis 300	2
17	Handballen	140	200	2
18	Handflächen	140	260	2
19	Handrücken	140	200	2
20	Oberschenkelmuskel	220	250	2
21	Knie	220	220	2
22	Schienbein	130	220	2
23	Wade	130	210	2

Tabelle 2.1: Schmerzschwellen nach der Studie des arbeitsschutzmedizinischen Instituts der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz.¹⁹

¹⁹ Quelle: ISO TS 15066, Anhang A.

—●
Anhang 3: Definierte Körperstellen zur Schmerzgrenzenbestimmung

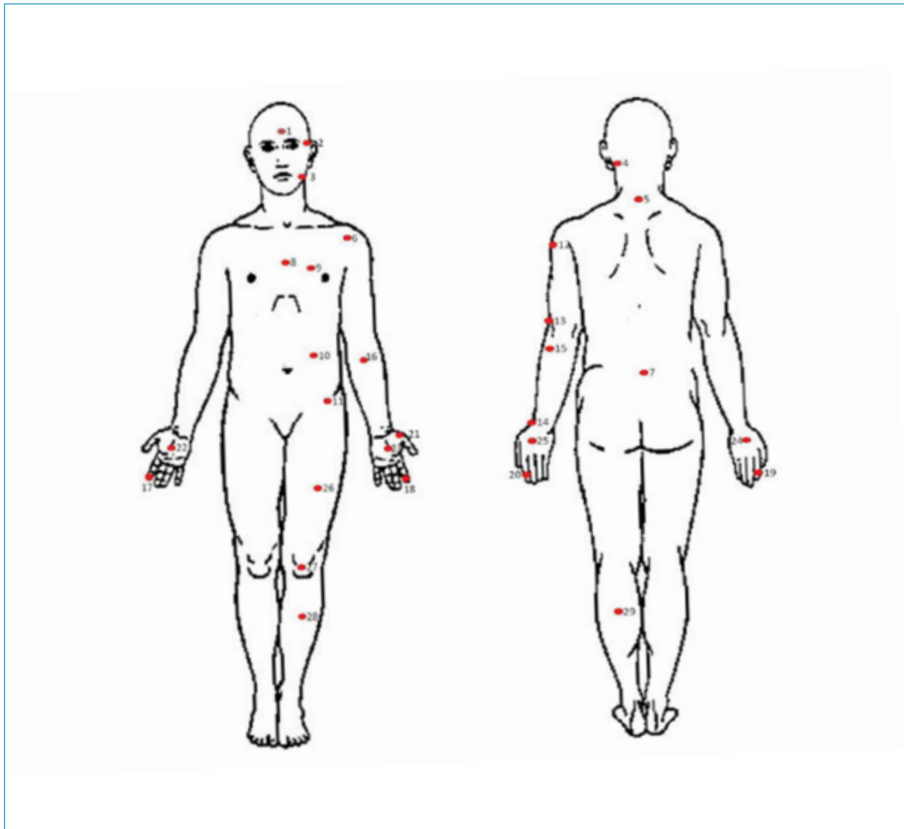


Abbildung 3.1: *Definierte Körperstellen zur Schmerzgrenzenbestimmung aus Anhang A der ISO TS 15066.²⁰*

20 Quelle: ISO TS 15066, Anhang A.