Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-59



Werkzeugentwicklung zur Automatisierung im Schaltschrankbau

# Automatisierte Montage vorkonfigurierter Kabel

*S. Bartelt, B. Kuhlenkötter*

**ZUSAMMENFASSUNG** Bei der Montage von Schaltschränken besteht ein hoher Bedarf, einzelne Produktionsschritte zu automatisieren. Der Beitrag fokussiert den Schritt der automatischen Verdrahtung. Essenziell ist die Entwicklung eines zuverlässigen Montagewerkzeugs. Es werden die Herausforderungen und Kriterien für die Entwicklung eines solchen Werkzeugs diskutiert. Die notwendigen Funktionen des Werkzeugs werden analysiert und darauf basierend wird ein Werkzeugkonzept abgeleitet. Das Design wird durch Tests an einem Demonstrator validiert.

STICHWÖRTER

Automatisierung, Handhabungstechnik, Montage

## Automated assembly of preconfigured wires

**ABSTRACT** There is high demand for automating individual production steps in the assembly of control cabinets. This paper focuses on the automatic wiringstep. To this end, it is essential to develop a reliable assembly tool. The paper discusses the challenges and criteria for developing such a tool. It analyzes the necessary functions of the tool and derives a tool concept on this basis. The design is validated through tests on a demonstrator.

## 1 Einleitung

Schaltschränke sind in vielen Industriebereichen unverzichtbar. Dementsprechend ist ihre Produktion von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Aufgrund des hohen Individualisierungsgrades der Schaltschränke erfolgt die Produktion jedoch immer noch manuell und mit hohem Aufwand. Gemessen an den erforderlichen Prozessschritten, nimmt die Verdrahtung einen erheblichen Teil der Produktionszeit in Anspruch. Eine automatisierte Lösung wirkt sich daher sowohl auf die Produktionskosten als auch auf die Produktionszeit positiv aus [1]. Eine Automatisierungslösung für die Verdrahtung muss verschiedene Kriterien erfüllen und es gibt derzeit keine Lösung auf dem Markt, bei der alle Kriterien als erfüllt angesehen werden können. Unter anderem müssen die folgenden Kriterien berücksichtigt werden:

- Die in einem Schaltschrank montierten Kabel unterscheiden sich in Länge, Querschnitt und Farbe. Je mehr Varianten von Leitungen verarbeitet werden können, desto höher ist die Wirtschaftlichkeit der Lösung.
- Die Einbaupositionen der Kabel liegen oft sehr dicht beieinander, sodass installierte Kabel die weitere Montage behindern können. Darüber hinaus können Einbaupositionen schwer zu erreichen sein, weil andere Komponenten oder Kabelkanäle den direkten Zugang verhindern.
- Viele Hersteller von Schaltschränken sind kleine und mittlere Unternehmen. Daher sollten die Anschaffungs- und Betriebskosten für die Automatisierung möglichst gering und die Amortisationszeit möglichst kurz sein.
- Viele Schaltschränke sind Einzelstücke. Die daraus resultierende hohe Varianz darf nicht zu einer erhöhten Rüstzeit führen, da diese sich negativ auf die Wirtschaftlichkeit der Lösung auswirkt.

Bei der Entwicklung einer Verdrahtungslösung müssen verschiedene Aspekte beachtet werden, vor allem die Steuerung, Bildverarbeitung und die mechanische Konstruktion [2].

Dieser Beitrag konzentriert sich auf die mechanische Konstruktion des Werkzeugs. Das nächste Kapitel stellt den Montageprozess dar, insbesondere die erforderlichen Prozessschritte. Anschließend wird ein kurzer Überblick über den Stand der Technik gegeben. Im Weiteren wird ein morphologischer Kasten entwickelt und ein Werkzeugdesign abgeleitet, das Werkzeug in Bezug auf die Prozessschritte validiert und die Ergebnisse diskutiert.

## 2 Problembeschreibung

Auf der Montageplatte eines Schaltschranks sind mehrere Komponenten montiert, wie Klemmenleisten, SPS-Komponenten oder Frequenzumrichter. Die Komponenten sind durch Kabel verbunden, um eine bestimmte Funktion zu realisieren. Dabei hat jede Komponente in der Regel mehrere Eingangs-/Ausgangs- oder Stromversorgungsanschlüsse. Die genaue Lage der Komponenten im Schaltschrank sowie die Kabeltypen, deren Länge und Verlegeweg werden von der Elektroplanung festgelegt. **Bild 1** zeigt beispielhaft zwei Blöcke mit Klemmen und ein exemplarisch verlegtes Kabel.

Für die Montage eines Kabels sind fünf Arbeitsschritte erforderlich, wobei die Reihenfolge der Schritte variieren kann. Das



https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-59 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

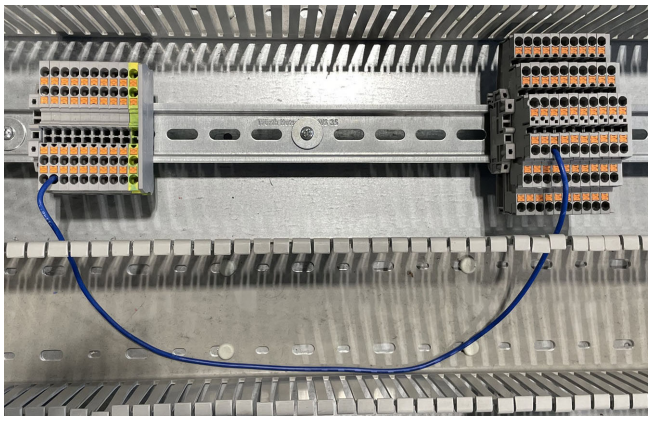

**Bild 1.** Typische Verdrahtungsaufgabe, bei der zwei Klemmenblöcke durch ein Kabel verbunden sind. Das mittlere Stück des Kabels ist durch den Kabelkanal geführt. *Foto: LPS, Ruhr-Universität Bochum*

Ende des Kabels muss am Bauteil befestigt werden. Vom Bauteil aus muss das Kabel zum nächsten Kabelkanal geführt und in diesen eingefädelt werden. Diese beiden Schritte müssen auch mit dem anderen Ende des Kabels durchgeführt werden (Schritt drei und vier). Der fünfte Schritt ist das Verlegen des Kabels innerhalb der Kabelkanäle. Außerdem muss das Kabel vor der Montage auf Länge geschnitten und gecrimpt werden. Alternativ kann das Kabel auch vorkonfektioniert und dann beispielsweise aus einem externen Magazin entnommen werden.

Ausgehend von diesen Prozessschritten lassen sich verschiedene Anforderungen definieren, die ein Werkzeug für die automatische Verdrahtung erreichen muss. Dies sind unter anderem folgende:

- Greifen von Kabeln mit unterschiedlichen Querschnitten.
- Handhabung von Kabeln mit deutlich unterschiedlichen Längen.
- Einstecken eines Kabelendes in ein Bauteil. Dabei werden in diesem Beitrag nur Push-in-Technologien betrachtet.
- Einfädeln eines Kabels in einen Kabelkanal.
- Verlegung eines Kabels innerhalb der Kabelkanäle.

## 3 Stand der Technik

Aufgrund der nicht starren Form der Kabel befassen sich viele Arbeiten mit der Bildverarbeitung. In diesem Zusammenhang gibt es zwei wesentliche Ziele: die Erkennung des Kabels und der Kabelenden sowie die Erkennung der Bauteile inklusive der Einsteckpositionen.

Die Erkennung von Kabeln – oder deformierbaren linearen Objekten (DLO) im Allgemeinen – ist aufgrund der Verdeckung durch andere Komponenten, andere Kabel oder sich selbst, ein nicht triviales Problem. Eine zuverlässige Erkennung ist jedoch wichtig, um Kabel zu greifen und sie ohne Kollisionen zu handhaben. So stellt *de Gregorio* einen Algorithmus vor, der gleichzeitig semantische Segmentierung und B-Spline-Modellierung einsetzt, um mehrere DLO gleichzeitig zu erkennen [3]. *Caporali et al.* verwendeten einen ähnlichen Ansatz, um die Form eines Kabels zu schätzen und geeignete Greifpositionen zu bestimmen [4]. Dazu werden mit einem kostengünstigen 2D-Vision-Sensor Bilder aus verschiedenen Ansichten aufgenommen und Schlüsselpunkte für die Berechnung des Kabels bestimmt [5]. Eine allgemeine Methode zur Bestimmung von Greifpunkten wird in [6] vorgestellt. Der dort beschriebene modellfreie Algorithmus bietet eine automatische Auswahl von Kontaktpunkten und ermöglicht eine stabile Objekthandhabung. Zudem haben *Palli* und *Pirozzi* ein kalibriertes Bildverarbeitungssystem entwickelt, das die physikalischen Parameter eines Kabels durch einen Trial-and-Error-Ansatz mit kontinuierlicher Optimierung bestimmen kann [7].

Die Erkennung von Bauteilpositionen ist eine weitere wichtige Funktion für die zuverlässige Automatisierung der Verdrahtung. Während sich die Sollpositionen aus der Anlagenplanung ergeben, weichen die realen Positionen aufgrund Bauteil- und Montagetoleranzen davon ab. Daher ist es notwendig, diese Toleranzen zu kompensieren. *Hefner et al.* beschreiben einen Algorithmus zur Erkennung von Bauteilen [8]. Die reale Struktur wird dabei mit einem 3D-Sensor erfasst. Die Daten werden dann mit einem 3D-Modell verglichen und die Abweichungen ermittelt. Die Methode wird sowohl für die Bauteile als auch für die Erkennung der Kabelenden verwendet. *Bründl et al.* stellten einen Ansatz vor, der CAD-Modelle von Bauteilen analysiert und automatisch deren charakteristische Merkmale extrahiert [9]. In der realen Umgebung können diese Merkmale identifiziert und ihre Position mittels KI-basierter Objekterkennung bestimmt werden. Die Position des Bauteils wird dann aus den erkannten Merkmalen abgeleitet.

Neben der Bildverarbeitung wird die Simulation als Option zum Erlernen und Testen der erforderlichen Fähigkeiten genutzt. *Alvarez* und *Yamazaki* haben zum Beispiel eine Echtzeitsimulation implementiert, welche es ermöglicht, Aktionen zu berechnen, um ein Kabel von einer Lage in eine andere zu bewegen [10]. Der Planungsalgorithmus kann dynamisch auf Veränderungen reagieren, wurde aber noch nicht in einer realen Umgebung eingesetzt. *Jaensch et al.* nutzten die Simulation einer virtuellen Inbetriebnahme zum Erlernen von Kabelhandhabungsstrategien [11].

Durch eine Kombination aus Simulation und Bildverarbeitung wird in [12] ein Ansatz vorgestellt, um mittels Reinforcement Learning das Verhalten von Kabeln zu erlernen. Über ein Bildverarbeitungsfeedback kann dann die Verformung des Kabels so gesteuert werden, dass das Kabel nicht mit umliegenden Hindernissen in Berührung kommt. Einen weiteren Ansatz zur Bestimmung der Roboterbewegung stellt [13] vor. Dabei wird eine Robotersimulation verwendet, um die geplante Bahn eines Manipulators zu analysieren und Optimierungen für den Programmiercode abzuleiten. Ein grundsätzliches Problem bei Simulationen ist aber die begrenzte Übertragbarkeit auf die reale Umgebung. Um die daraus resultierenden Abweichungen zu kompensieren, wird in [14] ein Feedback-Verfahren vorgeschlagen. Dabei werden Abweichungen von der Simulation zur realen Umgebung ermittelt und zur iterativen Verbesserung der Parameter der Simulationsmodelle genutzt.

Neben der Erkennung von Kabeln und Bauteilen ist auch die mechanische Konstruktion des Werkzeugs von entscheidender Bedeutung. Es muss sichergestellt werden, dass die Störkontur ausreichend klein ist, um eine kollisionsfreie Handhabung zu gewährleisten. *Gao et al.* entwickelten ein Werkzeugkonzept, das in der Lage ist, die einzelnen Adern eines Kabels zu greifen und zu sortieren, sodass anschließend eine korrekte Verbindung zu einer Leiterplatte oder einem Steckverbinder hergestellt werden kann [15]. Das mechanische Konzept ist aber nur bedingt übertragbar, da der Schwerpunkt auf der Sortierung der einzelnen Litzen liegt. Ein weiteres Werkzeugkonzept wird in [16] vorgestellt. Das dort entwickelte Werkzeug ist mit einer Kamera, einem



https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-59 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

**Tabelle 1.** Morphologischer Kasten für die Greiferentwicklung.

| Merkmal | Variante 1 | Variante 2 | Variante 3 |
|---|---|---|---|
| Greiferart | Parallel | Rotatorisch | |
| Greifbacken | Flach | Form | Prismatisch |
| Number of gasping units | 1 | 2 | |
| Schwenkvorrichtung | Finger | Greifer | Ohne |
| Kabelvorschub | Rad | Band | Inkrementell |
| Haltekraft für den Kabelvorschub | Passiv | Aktiv | |
| Kabelspeicher für noch nicht verlegtes Kabel | Aufgerollt | Schlauch / Röhre | |

Schraubendreher und einem Greifer mit taktilem Sensor ausgestattet. Mit diesem Werkzeug lassen sich Kabel greifen und in Schraubklemmen montieren. Toleranzen können ausgeglichen werden, und es wird eine hohe Prozesssicherheit erreicht. Allerdings ist es nicht möglich, ein Kabel mit dem Werkzeug vollständig zu montieren.

## 4 Werkzeugdesign

Die Art und Anzahl der Manipulatoren für die automatische Verdrahtung haben einen wesentlichen Einfluss auf die Konstruktion des Werkzeugs. Unabhängig von der gewünschten Einbaurichtung sind aufgrund der Rotationssymmetrie der Kabel fünf Freiheitsgrade ausreichend. Bei der Handhabung eines Kabels müssen beide Enden montiert werden. Zudem muss sichergestellt werden, dass sich die Kabel bei der Montage nicht verklemmen. Bei der Anzahl der Manipulatoren sind daher drei Varianten denkbar. In der ersten Variante werden drei Manipulatoren eingesetzt. Jeweils ein Roboter greift ein Kabelende und der dritte Manipulator sorgt für die korrekte Führung der Kabel. Bei der zweiten Variante entfällt der dritte Roboter, und das Kabel wird von einem der beiden anderen Manipulatoren einzeln oder abwechselnd geführt. Bei der dritten Variante wird nur ein Manipulator eingesetzt, um die notwendigen Aufgaben zu erfüllen. Da bei dieser Variante mehr Funktionen in das Werkzeug integriert werden müssen, erhöht sich dessen Komplexität. Dennoch wird diese Variante aufgrund der zu erwartenden geringeren Gesamtkosten bevorzugt, und im Weiteren wird nur ein Manipulator für die automatisierte Verdrahtung betrachtet. Als Manipulator wird ein Standard-Knickarmroboter verwendet. Die Größe ist so gewählt, dass alle Positionen einer typischen Montageplatte leicht erreicht werden können.

Eine weitere generelle Entscheidung ist die Verwendung von vorkonfektionierten Kabeln. Die Bereitstellung solcher Kabel ist deutlich aufwendiger als eine direkte Kabelzuführung, doch wird diese Variante aus zwei Gründen bevorzugt. Der erste Grund ist die große Vielfalt an unterschiedlichen Kabelquerschnitten und Kabeltypen. Für einen effizienten Betrieb müssen diese in geeigneter Weise dem Werkzeug zugeführt werden. Entsprechend würde eine direkte Kabelzuführung zu einem häufigen manuellen Wechsel der Kabel führen. Außerdem ist es fraglich, ob die Zuführung so gestaltet werden kann, dass eine ausreichende Anzahl verschiedener Kabelvarianten installiert werden kann. Der zweite Grund ist, dass vorkonfektionierte Kabel in den Unternehmen oft bereits im Einsatz sind. Demzufolge ist ihre Produktion bereits etabliert, und die produzierten Kabel lassen sich sowohl für die automatische als auch für die manuelle Verdrahtung verwenden.

### 4.1 Morphologischer Kasten

Die zentrale Aufgabe des Werkzeugs ist es, ein Kabel während der Handhabung und Montage zuverlässig zu halten und zu führen. Da nur ein einziger Roboter zum Einsatz kommt, gibt es zusätzliche Aspekte, die bei der Konstruktion des Werkzeugs berücksichtigt werden müssen. Insgesamt wurden sieben Merkmale festgelegt, die sich grob in Montagemerkmale und Merkmale zur Führung des Drahtes aufteilen. Für jedes Merkmal wurden verschiedene Varianten ermittelt. **Tabelle 1** gibt einen Überblick über die Merkmale und die zugehörigen Varianten.

Die Montagemerkmale bestehen aus vier Teilen. Als Grundkinematik kann zwischen einem Parallelgreifer oder einem Rotationsgreifer unterschieden werden. Bei beiden Varianten ist es möglich, das Kabel in verschiedenen Richtungen zu greifen. Die Backen der Finger müssen einen sicheren Kontakt mit dem Kabel erlauben, dürfen es aber nicht beschädigen. Zur Auswahl stehen flache, formschlüssige oder prismatische Backen. Es ist zu beachten, dass die Kabel nicht nur gegriffen und losgelassen, sondern auch geführt werden müssen, um die Verlegung in den Kabelkanälen zu ermöglichen. Zudem kann eine Ausführung mit einem oder zwei Greifmodulen realisiert werden. Ein Merkmal, das nicht zwingend erforderlich ist, ist die Schwenkbarkeit der Finger oder des gesamten Greifers. Besonders wenn nur ein Greifmodul verwendet wird, kann das Schwenken die kollisionsfreie Montage erleichtern oder in manchen Fällen sogar erst ermöglichen.

Die im Schaltschrank verbauten Kabel haben typischerweise eine Länge von bis zu zwei Metern. Während die Position des Kabels an den Greifstellen definiert ist, sorgt ein Kabelspeicher dafür, dass die Lage von nicht gegriffenen Teilen des Kabels



https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-59 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

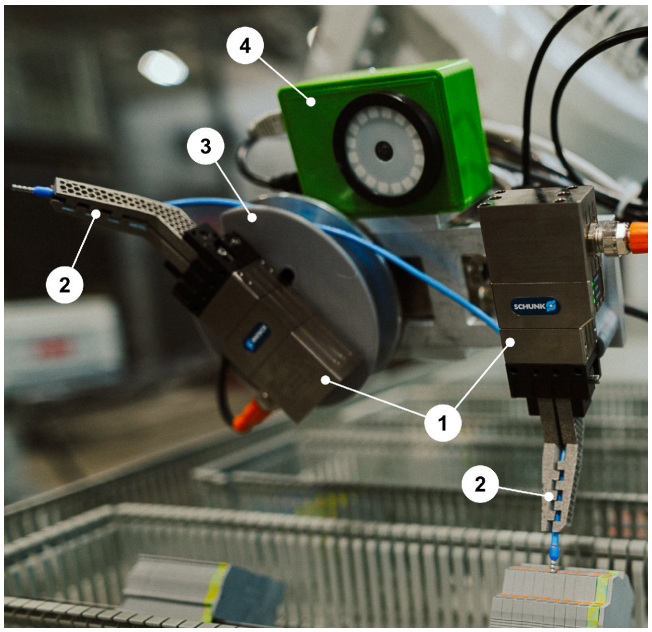


**Bild 2.** Werkzeugkonstruktion mit zwei Greifmodulen (1), Finger mit speziell angefertigten prismatischen Backen (2) und eine Dreheinheit (3) zum Aufrollen des Kabels. Zudem ist eine 3D-Kamera (4) angebracht, um die Montagepositionen zu erfassen. *Foto: LPS, Ruhr-Universität Bochum*

bestimmt ist und ein kontrolliertes Verlegen ermöglicht wird. Der Kabelspeicher kann ein Kabel dazu entweder aufrollen oder in ein Rohr oder Schlauch ziehen. Zur weiteren Unterstützung des Verlegeprozesses kann eine aktive Zuführung des Kabels vorgesehen werden. Dies kann mit einem Rad oder einer Kombination von Rädern, einem Band oder inkrementell erfolgen. Bei der inkrementellen Variante wird das gegriffene Kabel in die gewünschte Richtung bewegt, losgelassen und erneut weiter hinten gegriffen, wodurch ein schrittweiser Vorschub erfolgt. Bei den ersten beiden Varianten muss zudem eine Kraft zwischen dem Aktuator und dem Kabel erzeugt werden. Diese kann passiv, meist durch eine Feder, oder aktiv, zum Beispiel durch einen Pneumatikzylinder, erzeugt werden.

### 4.2 Werkzeugentwicklung

Für die Werkzeugkonstruktion wird eine Variante mit zwei parallelen Greifern gewählt. Dadurch können beide Kabelenden gleichzeitig gegriffen werden und eine Schwenkeinheit ist nicht erforderlich. Für die Backen der Greifer wird eine prismatische Form verwendet. Diese Form ist selbstzentrierend und verliert Kabel nicht, selbst wenn die Backen leicht geöffnet werden. Dadurch kann eine Führung des Kabels erreicht werden. Das lose Kabel wird über eine Rotationseinheit aufgerollt. Auf einen aktiven Drahtvorschub wurde aus Kostengründen vorerst verzichtet. Zusätzlich wird das Kabel aktiv abgewickelt, sodass die Rotationseinheit teilweise die Funktion des aktiven Kabelvorschubs übernimmt. **Bild 2** zeigt das entwickelte Werkzeug.

Das zweite Greifmodul ist praktisch mit der Rotationseinheit verbunden. Die Finger beider Greifmodule sind in einem 45°-Winkel modelliert, wodurch die Montagepositionen leichter erreicht werden können. Sowohl für die Greifer als auch für die Rotationseinheit werden industrietaugliche Komponenten verwendet. Bild 2 zeigt das fertig aufgebaute Werkzeug am Roboter.

## 5 Validierung

Zur Bewertung der Werkzeugkonstruktion werden mehrere Versuche durchgeführt, die typische Aufnahme- und Montageverfahren umfassen. **Tabelle 2** fasst die festgelegten Kennzahlen zur Validierung zusammen. Die vorgegebenen Ziele sind das Ergebnis einer Analyse von typischen Schaltschränken. In den nächsten Unterabschnitten werden die Ergebnisse näher erläutert.

**Tabelle 2.** Kennzahlen (KPI) für die Validierung des Werkzeugs.

| Kennzahl | Ziel | Status |
|---|---|---|
| Greifen von Kabeln mit unterschiedlichem Querschnitt. | 0,75 mm² bis 6,0 mm² | Möglich mit dem dafür entwickelten Werkzeug. |
| Handhabung von Kabeln mit signifikant unterschiedlichen Längen. | 0,10 m bis 2,00 m | Aufgrund des mechanischen Aufbaus ist eine minimale Länge von 0,30 m erforderlich. Die maximale Länge von 2,00 m kann in Anspruch genommen werden. |
| Montage eines Kabelendes in einen Anschluss einer Komponente. | Beide Enden eines Kabels können sicher montiert werden. Die Montage wird mit einem Zugtest validiert. Die Ergebnisse werden dokumentiert. | Das erste Ende des Kabels kann zuverlässig montiert werden. Die Montage des zweiten Endes ist ähnlich. Allerdings ist dieser Schritt aufgrund vorangegangener Fehler im Montageprozess noch nicht umgesetzt. |
| Verlegen eines Kabels von einer Komponente in einen Kabelkanal. | Ein Kabel wird zuverlässig durch beliebige Kabelkanäle verlegt. Der Prozess wird optisch geprüft. Alle Fehler werden dokumentiert und angezeigt. | Möglich mit den gleichen Einschränkungen wie beim oben beschriebenen Montageverfahren. |
| Verlegen eines Kabels innerhalb der Kabelkanäle. | Das Kabel muss vollständig innerhalb der Kabelkanälen verlegt werden. Überschüssiges Kabel muss so verlegt werden, dass keine Teile des Kabels außerhalb eines Kabelkanals liegen. Eine manuelle Nacharbeit kann zulässig sein. | Die Verlegung der Kabel in den Kabelkanälen funktioniert noch nicht korrekt. |



https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-59 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

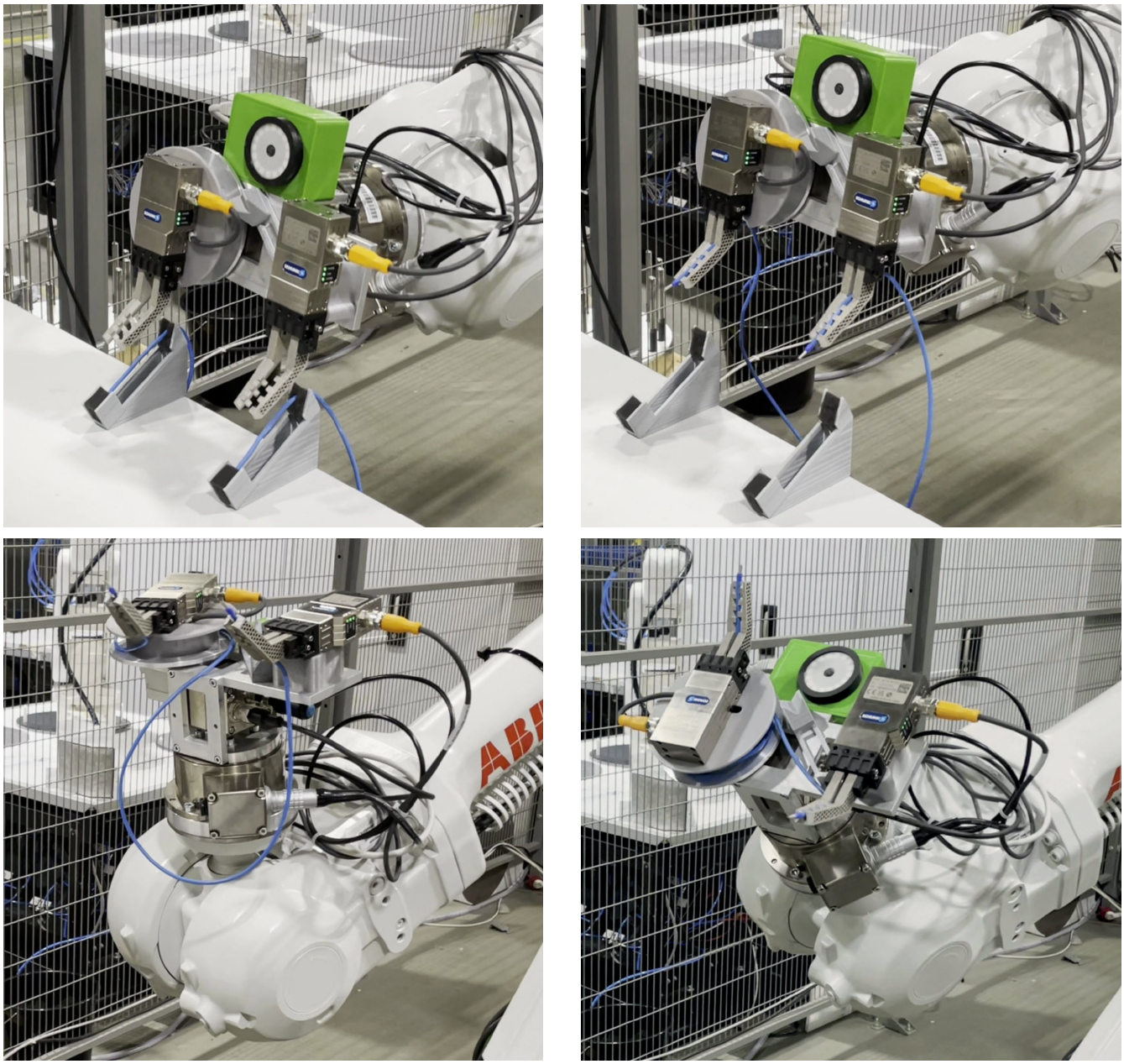

**Bild 3**. Aufnahmesequenz eines Kabels: Werkzeug fährt an das Magazin heran (a), das Kabel wird gegriffen und das Werkzeug fährt nach oben (b). Um das Kabel aufzurollen, wird die Ausrichtung geändert (c), um Fehler bei der Aufrollung zu vermeiden. Nach erfolgter Aufnahme ist eine sichere Handhabung des Kabels möglich (d). *Fotos: LPS, Ruhr-Universität Bochum*

### 5.1 Aufnahme eines Kabels

Das Verfahren zur Aufnahme eines Kabels beginnt mit der Annäherung an das Magazin, wie in **Bild 3**a dargestellt.

Die Dreheinheit muss so platziert werden, dass die Ausrichtung der beiden Greifmodule gleich ist. Außerdem müssen beide Module geöffnet werden. Danach kann das Werkzeug zum Kabel fahren und es greifen. Anschließend bewegt sich das Werkzeug vom Magazin weg (Bild 3b), um Kollisionen beim Aufrollen des Kabels zu vermeiden (Bild 3c und 3d). Die Anzahl der Umdrehungen zum Aufrollen des Kabels hängt von dessen Länge ab.

Der Aufrollvorgang wurde mehrfach getestet und mögliche Fehler identifiziert. Wenn das Kabel nicht genau im Magazin positioniert ist, reicht die Selbstzentrierung der Backen nicht aus, und das Kabel wird falsch gegriffen. Bei der anschließenden Erkennung des Kabelendes wird dies jedoch erkannt und das Kabel kann abgeworfen werden. Außerdem ist die Ausrichtung des Werkzeugs beim Aufrollen des Kabels wichtig. Das Werkzeug sollte so ausgerichtet sein, dass die Rotationsachse des Drahtspeichers nach oben zeigt. Andernfalls können Fehler beim Aufrollen entstehen.

### 5.2 Montage der Kabel

Bei der Montage eines Kabels wird zuerst das Ende, dass mit dem fixen Greifmodul gegriffen ist, montiert, wie in **Bild 4** dargestellt. Anschließend wird das Kabel in den Kabelkanal und innerhalb des Kanals zum nächsten Bauteil geführt. Die Montage



https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-59 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

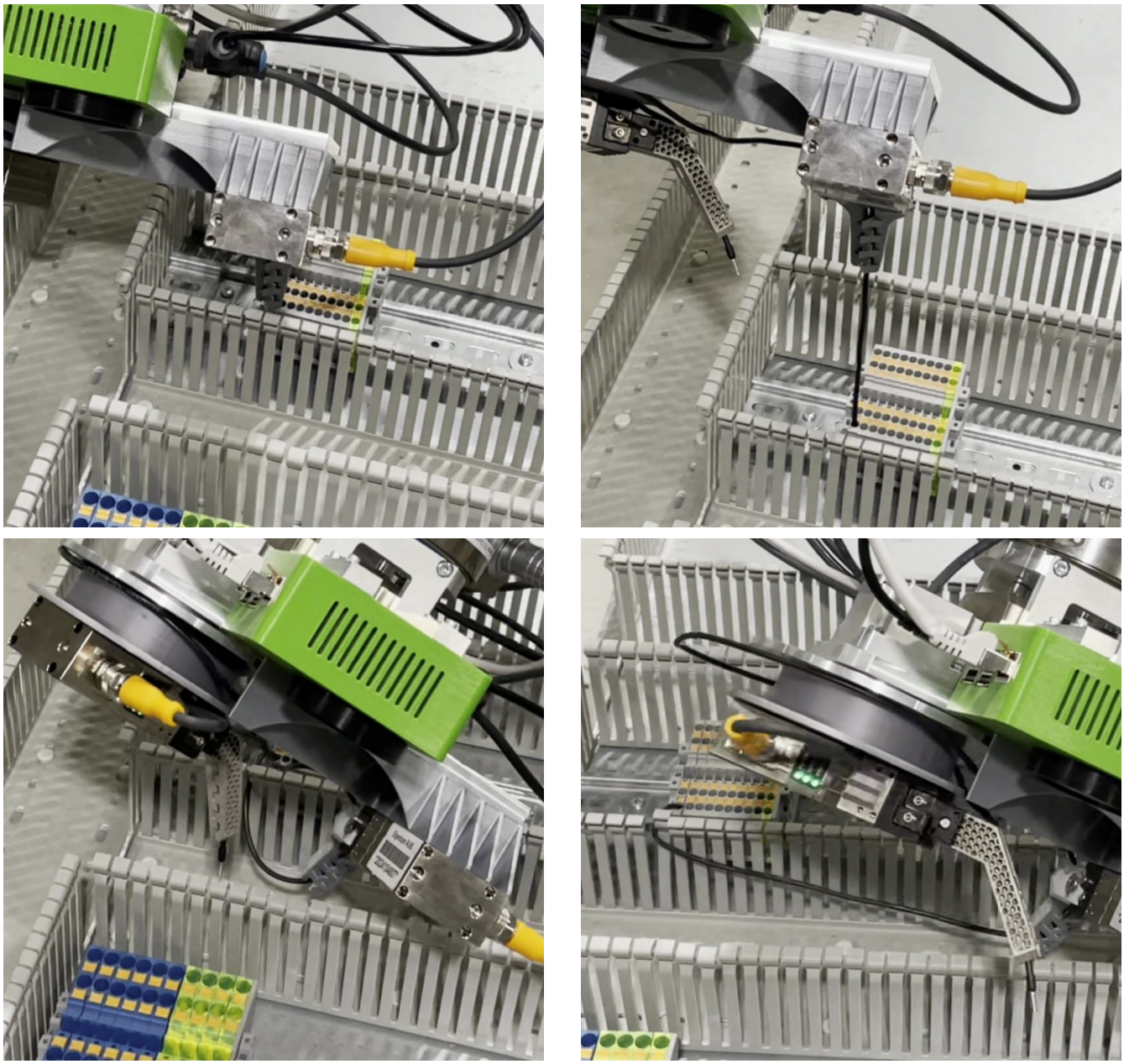

**Bild 4.** Reihenfolge der Kabelmontage: Das Kabel wird an der Klemmleiste montiert (a). Dann wird das Kabel in den Kabelkanal (b) und (c) geführt. Innerhalb des Kanals wird das Kabel zum nächsten Bauteil geführt (d). *Fotos: LPS, Ruhr-Universität Bochum*

des zweiten Kabelendes erfolgt äquivalent zu der Montage des ersten Endes.

Während die Montage und die Verlegung im Kanal recht zuverlässig sind, gibt es bei der Verlegung des Kabels durch die Kabelkanäle einige Probleme. Erstens kann das Kabel aufgrund der offenen Konstruktion des Kabelspeichers aus dem Speicher fallen, wenn die Abwicklungsgeschwindigkeit nicht ausreichend mit der Roboterbewegung synchronisiert ist. Zum anderen ist der Kabelvorschub nicht ausreichend, und das Kabel wird vor allem beim Übergang von einem Kabelkanal zum nächsten stark beansprucht. Dies kann zu einer unerwünschten Beschädigung des Kabels führen. Mögliche Ursachen sind eine unzureichende Synchronisation zwischen der Roboterbewegung und der Abrollbewegung, oder die Greifbacken sind möglicherweise zu rau.

### 5.3 Weiterentwicklung des Greifers

Eine Fehlerquelle bei der vorgestellten Konstruktion ist das Abrollen des Kabels. Das Kabel wird nicht korrekt vom Speicher durch die Greifbacken geführt, was zu den gezeigten Fehlern führt. Als Lösung soll ein aktiver Vorschub integriert werden. Zusätzlich soll der Gesamtweg im Werkzeug reduziert werden. Dies wird erreicht, indem die beiden Greifmodule durch eine Kombination aus Greifmodul und Schwenkeinrichtung ersetzt werden. Dies hat zur Folge, dass die Parallelkinematik durch einen Drehgreifer ersetzt werden muss. Außerdem führt dies zu einer erheblichen Verkleinerung, wodurch die Zugänglichkeit weiter verbessert werden kann. **Bild 5** veranschaulicht die neue Konstruktion.

Die Schwenkvorrichtung kann das Greifmodul sowohl aus der dargestellten Position in eine gerade Position als auch in eine ent-



https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-59 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

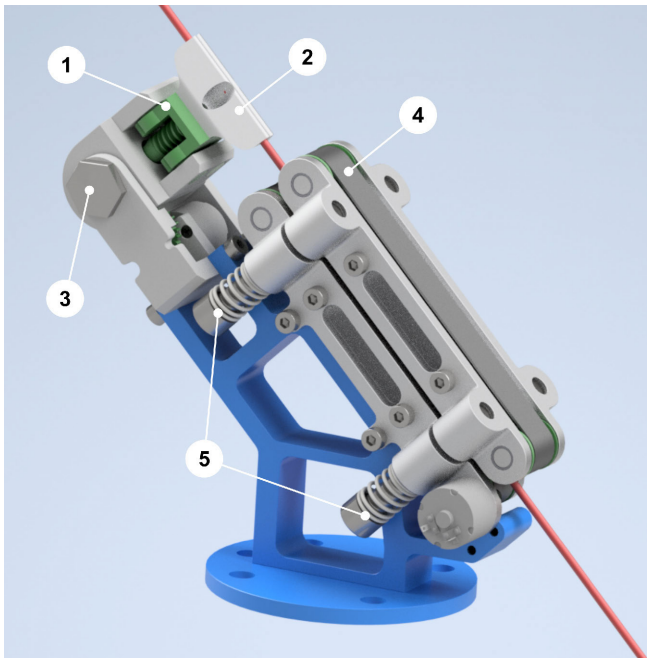


**Bild 5**. Rendering des neuen Werkzeugkonzepts mit Greifeinheit (1), Finger (2), neuer Schwenkeinheit (3) und neuem aktiven Kabelvorschub (4) und (5). *Foto: LPS, Ruhr-Universität Bochum*

gegengesetzte Position bewegen. Wenn das Greifmodul in die gerade Position gebracht wird, kann es Kabel in der Nähe eines Kabelendes aufnehmen. Anschließend wird der Greifer mit dem Kabel zum Speicher bewegt und das Kabel in diesen eingezogen. Das Kabel wird vollständig in einen Schlauch geschoben und ist dann bereit für die Montage. Durch die Ausführung des Speichers als Schlauch wird zudem verhindert, dass das Kabel durch das Aufrollen eine ungewollte Biegung erhält.

Nach der Montage und dem Durchführen durch die Kabelkanäle wird das Greifmodul in die gegenüberliegende Position gefahren, um das zweite Kabelende montieren zu können. Bei Bedarf kann die Schwenkvorrichtung auch den Vorgang des Durchführens des Kabels durch die Kabelkanäle unterstützen. Der Speicher ist nicht dargestellt, da er einfach als Schlauch ausgeführt ist, das am Ende des Vorschubs montiert ist.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Für die Entwicklung eines Werkzeugs zur automatischen Verdrahtung wurde zunächst ein morphologischer Kasten erarbeitet. Dieser wurde genutzt, um verschiedene Varianten zu identifizieren und ein vollständiges Werkzeugdesign abzuleiten. Die Varianten wurden diskutiert, und unter den Randbedingungen, dass die Automatisierungslösung nur einen Roboter einsetzt und vorkonfektionierte Kabel zu montieren sind, wurde ein geeignetes Modell erstellt. Der Entwurf implementiert die notwendigen Funktionen wie das Greifen und Montieren von Kabeln sowie das Verlegen von Kabeln in Kabelkanälen. Montageversuche in einer realen Umgebung haben aber gezeigt, dass vor allem das Verlegen von Kabeln in Kabelkanälen zu Fehlern führen kann. Über eine Analyse der Fehler wurden Optimierungen des Werkzeugs abgeleitet.

Diese sollen in nachfolgenden Arbeiten realisiert und in weiteren Experimenten validiert werden. Zusammen mit weiteren Arbeiten, wie der Erstellung eines umfassenden Datenmodells in der Planung, soll eine vollständige Automatisierung der Fertigung von individuellen Schaltschränken erreicht werden.

FÖRDERHINWEIS

Teile dieser Arbeit wurden durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 03HY113A im Rahmen des Forschungsprojekts H2Giga FertiRob gefördert. Weitere Teile wurden unter dem Förderkennzeichen ZF 4060720RP7 im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms (ZIM) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages im Forschungsprojekt RoboSchalt gefördert.

**Literatur**

[1] Tempel, P.; Eger, F.; Lechler, A. et al.: Control Cabinet Manufacturing 4.0. A study on the potential of automation and digitalisation in the manufacturing of control cabinets and switchgears in machine and systems engineering. Studie. Stuttgart: Universität Stuttgart 2017
[2] Spies, S.; Bartelt, M.; Kuhlenkötter, B.: Wiring of Control Cabinets using a Distributed Control within a Robot-Based Production Cell. 2019 19th International Conference on Advanced Robotics (ICAR), Belo Horizonte, Brazil, 2019, pp. 332–337
[3] Gregorio, D. de; Palli, G.; Di Stefano, L.: Let's Take a Walk on Superpixels Graphs: Deformable Linear Objects Segmentation and Model Estimation. In: Jawahar, C. V.; Li, H.; Mori, G. et al. (Hrsg.): Computer Vision – ACCV 2018. Cham: Springer International Publishing 2019, pp. 662–677
[4] Caporali, A.; Galassi, K.; Palli, G.: 3D DLO Shape Detection and Grasp Planning from Multiple 2D Views. 2021 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Delft, Netherlands, 2021, pp. 424–429
[5] Caporali, A.; Galassi, K.; Palli, G.: Deformable Linear Objects 3D Shape Estimation and Tracking From Multiple 2D Views. IEEE Robotics and Automation Letters 8 (2023) 6, pp. 3852–3859
[6] Nadon, F.; Payeur, P.: Automatic Selection of Grasping Points for Shape Control of Non-Rigid Objects. 2019 IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments (ROSE), Ottawa, ON, Canada, 2019, pp. 1–7
[7] Palli, G.; Pirozzi, S.: Validating DLO Models from Shape Observation. 2021 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Delft, Netherlands, 2021, pp. 430–435
[8] Hefner, F.; Schmidbauer, S.; Franke, J.: Pose error correction of a robot end-effector using a 3D visual sensor for control cabinet wiring. Procedia CIRP 93 (2020), pp. 1133–1138
[9] Bründl, P.; Scheffler, B.; Stoidner, M. et al.: Semantic part segmentation of spatial features via geometric deep learning for automated control cabinet assembly. Journal of Intelligent Manufacturing (2023), doi.org/10.1007/s10845–023–02267–1
[10] Alvarez, N.; Yamazaki, K.: An interactive simulator for deformable linear objects manipulation planning. 2016 IEEE International Conference on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots (SIMPAR), San Francisco, CA, USA, 2016, pp. 259–267
[11] Jaensch, F.; Verl, A.: Virtual Commissioning Simulation as Reinforcement Learning Environment for Robot Cable Handling. 2020 Third International Conference on Artificial Intelligence for Industries (AI4I), Irvine, CA, USA, 2020, pp. 27–31
[12] Jiao, C.; Jiang, X.; Li, X. et al.: Vision Based Cable Assembly in Constrained Environment. 2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Kuala Lumpur, Malaysia, 2018, pp. 8–13



https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-59 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

**[13]** Zhao, C.; Liu, Y.; Lu, Z.: Wiring Simulation of Electric Control Cabinet Based on Industrial Robot. In: Yang, H.; Liu, H.; Zou, J. et al. (Edit.): Intelligent Robotics and Applications. 16th International Conference, ICIRA 2023, Hangzhou, China, July 5–7, 2023, Proceedings, Part VIII. Singapore: Springer Nature Singapore; Imprint Springer 2023, pp. 454–462
**[14]** Chang, P.; Padir, T.: Sim2Real2Sim: Bridging the Gap Between Simulation and Real-World in Flexible Object Manipulation. 2020 Fourth IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC), Taichung, Taiwan, 2020, pp. 56–62
**[15]** Gao, Y.; Chen, Z.; Liu, Y.-H. et al.: Vision-Based Grasping and Manipulation of Flexible USB Wires. 2019 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Dali, China, 2019, pp. 1083–1088
**[16]** Palli, G.; Pirozzi, S.; Indovini, M. et al.: Automatized Switchgear Wiring: An Outline of the WIRES Experiment Results. In: Grau, A. (Edit.): Advances in Robotics Research. ECHORD++: Robotic Science Supporting Innovation. Cham: Springer International Publishing AG 2020, pp. 107–123

**Stefanie Bartelt, M.Sc.**
*s.bartelt@lps.ruhr-uni-bochum.de*
*Tel. +49 234-26310*
*Foto: LPS Ruhr-Universität Bochum*

**Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter**
*Foto: LPS Ruhr-Universität Bochum*
Ruhr-Universität Bochum
Lehrstuhl für Produktionssysteme
Universitätsstr. 150, 44801 Bochum
www.lps.ruhr-uni-bochum.de

LIZENZ
Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)



https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-59 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY