

Lehrstuhl für Umformtechnik

Department Product Engineering
Montanuniversität Leoben



MASTERARBEIT

**Vom Spielzeug zur Steuerung von
Umformtechnologien: Walzdrücken im Kontext von
Industrie 4.0**

Dipl.-Ing. Erhard SATTLER
Studienrichtung Montanmaschinenbau
Leoben, Februar 2014

Eidesstaatliche Erklärung

Ich erkläre es an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Affidativ

I declare in lieu of oath, that i wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

Leoben, 26. Februar 2014

Ort, Datum



Erhard Sattler

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand am Lehrstuhl für Umformtechnik an der Montanuniversität Leoben, von dem auch die für die Durchführung der Arbeit benötigten Materialien angeschafft wurden.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Bruno Buchmayr, dem Vorstand des Lehrstuhls für Umformtechnik, der mich mit dieser Arbeit betraut und als mein Betreuer dabei unterstützt hat. Seine außergewöhnliche Idee gab den Anstoß zu dieser besonderen Arbeit mit LEGO Mindstorms EV3. Bei Fragen und Problemen stand er jederzeit zur Verfügung.

Ich möchte mich ebenfalls bei Mitarbeitern des Lehrstuhls für Umformtechnik für die tatkräftige Unterstützung bei der Herstellung der Drückwerkzeuge herzlich bedanken. Meine Vorschläge wurden mit den zur Verfügung stehenden Mitteln bestmöglich und zeitgerecht umgesetzt.

Außerdem gilt mein Dank Herrn Dipl.-Ing. Mario Kuss, der mich in der finalen Phase der Arbeit mit der Durchführung einer FEM-Simulation für eines der Werkstücke unterstützt hat.

Abschließend bedanke ich mich bei allen mir nahe stehenden Menschen, insbesondere meiner Familie, die mich mein ganzes bisheriges Leben unterstützt hat und mir nach der Universität für Bodenkultur den Abschluss dieses zweiten Studiums ermöglicht.

Kurzfassung
**Vom Spielzeug zur Steuerung von Umformtechnologien:
Walzdrücken im Kontext von Industrie 4.0**

Das Ziel dieser Masterarbeit war es, den aktuellen Stand des Zukunftsprojektes „Industrie 4.0“ darzustellen und potentielle Effekte auf die Umformtechnik zu identifizieren. Außerdem wurden derzeitige Automatisierungslösungen hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit in der Umformtechnik beurteilt. Der praktische Teil der Arbeit umfasste die Konstruktion einer Modelldrückmaschine für Aluminiumbleche mit einer LEGO Mindstorms EV3 Steuerung.

Die Auswirkungen von Industrie 4.0 auf die Umformtechnik werden sich in absehbarer Zukunft vor allem in der zunehmenden Vernetzung der Produktionsanlagen, intelligentem Energiemanagement und der Assistenz der Mitarbeiter bei der Fehlerbehebung, Instandhaltung und beim Materialhandling äußern.

Das Modell soll junge technische Nachwuchskräfte motivieren und zentrale Aspekte von Industrie 4.0 demonstrieren. LEGO Mindstorms EV3 wurde auf eine handelsübliche Hobbydrehbank aufgebaut, um einen flexiblen Drückprozess zu steuern. Die Programmierung erfolgte mit der auf NI LabVIEW basierenden EV3-Software. Es können zwei verschiedene Werkstücke hergestellt werden. Die Steuerung erkennt anhand einer Farbcodierung auf der Ronde, welches Werkstück produziert werden soll und lädt das entsprechende Bearbeitungsprogramm. Anweisungen und Informationen für den Bediener werden am EV3-Stein angezeigt. Die Steuerung der Drückmaschine kann wahlweise über den EV3-Stein oder ein PC-Interface erfolgen und Prozessinformationen werden drahtlos an einen PC übermittelt.

Abstract

From a toy to the control of metal forming technologies: Metal spinning in the context of Industrie 4.0

The aim of this master thesis was to investigate the current state of the future project „Industrie 4.0“ and to identify potential effects on metal forming. In addition, current automation solutions were evaluated for their applicability in metal forming. The practical part of the work included the construction of a model machine for metal spinning of aluminum sheets with a LEGO Mindstorms EV3 control.

The effects of Industrie 4.0 on metal forming are expected for the near future especially in the increasing networking of the production facilities, intelligent energy management and employee support in troubleshooting, maintenance and with handling tasks.

The model is designed to motivate young technical trainees and demonstrate key aspects of Industrie 4.0. LEGO Mindstorms EV3 has been mounted on a standard lathe in order to control a flexible metal spinning process. Programming was done using the EV3 software based on NI LabVIEW. Two different workpieces can be produced. The control identifies the workpiece, that should be produced, by a colour code on the circular blank and loads the corresponding processing program. Instructions and information for the operator are displayed on the EV3-Brick. The spinning lathe can be controlled either via the EV3-Brick or a PC-interface and process details are wireless transmitted to a PC.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Aufgabenstellung	1
1.1	Die Industrielle Revolution	1
1.2	Aufgabenstellung	2
2	Stand der Technik	4
2.1	Cyber-Physical Systems (CPS)	4
2.1.1	Eigenschaften und neuartige Fähigkeiten von CPS	6
2.2	Das Internet der Dinge (IOT – Internet of things)	8
2.3	Automatisierungssysteme	9
2.4	Automatisierungstechnische Steuerungseinrichtungen	10
2.4.1	Kurven- und Nockenscheiben, Schrittschaltwerke	10
2.4.2	Hydraulische und pneumatische Steuerungen	12
2.4.3	Rechentchnische Steuerungen	12
2.5	Drückverfahren	15
2.5.1	Einteilung der Drückverfahren	18
2.5.2	Prozessparameter	18
2.5.3	Terminologie der Drückverfahren	21
2.5.4	Die Entwicklung der Drückmaschinen	23
2.5.5	Fehler beim Drücken	25
3	Material und Methode	26
3.1	Drehmaschine	26
3.2	LEGO Mindstorms Education EV3	28
3.2.1	LEGO Mindstorms Intelligenter EV3-Stein	29
3.2.2	LEGO Mindstorms EV3-Servomotoren	29
3.2.3	LEGO Mindstorms EV3-Farbsensor	29
3.2.4	LEGO Mindstorms EV3-Berührungssensor	33
3.2.5	LEGO Mindstorms Education EV3-Software	33
3.2.6	EV3 Messenger 1.1	37
3.3	Versuchsaufbau	38
3.3.1	Werkzeugschlittenantriebe	38
3.3.2	Drückfutter und Drückwerkzeuge	46
4	Ergebnisse und Diskussion	48
4.1	Das Zukunftsprojekt Industrie 4.0	48
4.1.1	Forschungsbereiche und Handlungsfelder	49
4.2	Industrie 4.0 in der Umformtechnik	55
4.2.1	Automatisierung in der Umformtechnik	55
4.2.2	Mögliche Auswirkungen von Industrie 4.0	58
4.3	Drückmaschine	61
4.3.1	Drückversuche	61
4.3.2	FEM-Simulation Kegel 50°	62
4.3.3	Steuerungsprogramme	72
5	Schlussfolgerungen	84

6 Zusammenfassung	85
Verwendete Literatur	88
Tabellenverzeichnis	91
Abbildungsverzeichnis	92

1 Einleitung und Aufgabenstellung

1.1 Die Industrielle Revolution

Die Industrielle Revolution bezeichnet den rapiden und sozial spannungsreichen Übergang von der Agrar- zur Industriegesellschaft ab der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts. Der Industrialisierungsprozess breitete sich, von England kommend, nach Nord- und Westeuropa und später über den Atlantik bis an die Ostküste der USA aus. Die rasche Entwicklung von Technik und Naturwissenschaften unterstützte diesen Prozess.

Kennzeichnend für den Beginn der ersten Industriellen Revolution war die Erfindung des mechanischen Webstuhls und Einführung weiterer mechanischer Produktionsanlagen, die mit Wasser- oder Dampfkraft betrieben wurden und vor allem der Textilindustrie zu massiven Wachstumsraten verhalf. Im 19. Jahrhundert waren die direkten Auswirkungen der Industriellen Revolution nicht immer so positiv. Durch die Urbanisierung und den Zustrom armer Menschen in die Städte verschlechterten sich die Lebensbedingungen für viele in Europa und führte zum Ausbruch von Krankheiten und Hungersnöten. Es kam zu Klassenkonflikten zwischen Fabrikbesitzern (Kapitalisten), die zur Steigerung ihres Profits die Kosten möglichst niedrig halten wollten, und schlecht bezahlten, ausgebeuteten Arbeitern (Proletariat) [21].

Die zweite Industrielle Revolution wurde mit der Einführung der arbeitsteiligen Massenproduktion und der Elektrifizierung der Produktionsstätten mit der Wende zum 20. Jahrhundert eingeläutet. Neue Konzepte wie der Taylorismus oder Fordismus prägten diese Zeit. Die Umgestaltung der Produktion weg von der bis dato vorherrschenden Werkstattproduktion hin zur Fließbandfertigung ermöglichte erstmals die kostengünstige Produktion großer Stückzahlen.

Ab Anfang der 1970er Jahre startete die bis heute andauernde dritte Industrielle Revolution. Mit dem Einsatz von Elektronik und Informationstechnologien (IT) wurde die Automatisierung von Produktionsprozessen weiter vorangetrieben und ein signifikanter Teil der Handarbeit sowie ein Teil der Kopfarbeit von Maschinen übernommen [17].

Aktuell wird vom Beginn der vierten Industriellen Revolution gesprochen. Begriffe wie Cyber-Physical Systems (CPS) oder das Internet der Dinge und Dienste (IOT – Internet of things) werden in diesem Zusammenhang genannt. Die Revolution in der Produktion soll in der Smart Factory realisiert werden.

Der Kern der Umwälzung besteht in der vollständigen Durchdringung der Industrie, ihrer Produkte und ihrer Dienstleistungen mit Software bei gleichzeitiger Vernetzung der Produkte und Dienste über das Internet und andere Netze. Nachdem Büros vollständig informatisiert wurden, sieht die IKT-Branche ein großes Potential in der Industrie. Diese Veränderung führt zu neuen Produkten und Diensten, die das Leben und Arbeiten aller Menschen verändern wird, und natürlich erst recht auch ihren Umgang mit Produkten, Technik und Technologien. Sie verlangt aber auch eine grundlegende Veränderung und Anpassung der industriellen Produktentwicklung und Produktion, um die neuen Technologien qualitativ hochwertig einzusetzen und wirtschaftlich nutzbringend umzusetzen. Rechtliche Fragen und Aspekte der Sicherheit müssen geklärt und entsprechende industriepolitische Rahmenbedingungen geschaffen werden. Dadurch soll die Individualisierung (Losgröße 1) von Produkten möglich werden, ohne etwas von der Wirtschaftlichkeit einer Großserienfertigung zu opfern.

Dass sich Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) in der Industrie verbreiten werden, besteht kein Zweifel – es hat bereits begonnen.

Abbildung 1.1 zeigt die zeitliche Einordnung der Stufen der Industriellen Revolution mit den für die jeweilige Stufe charakteristischen technologischen Errungenschaften.

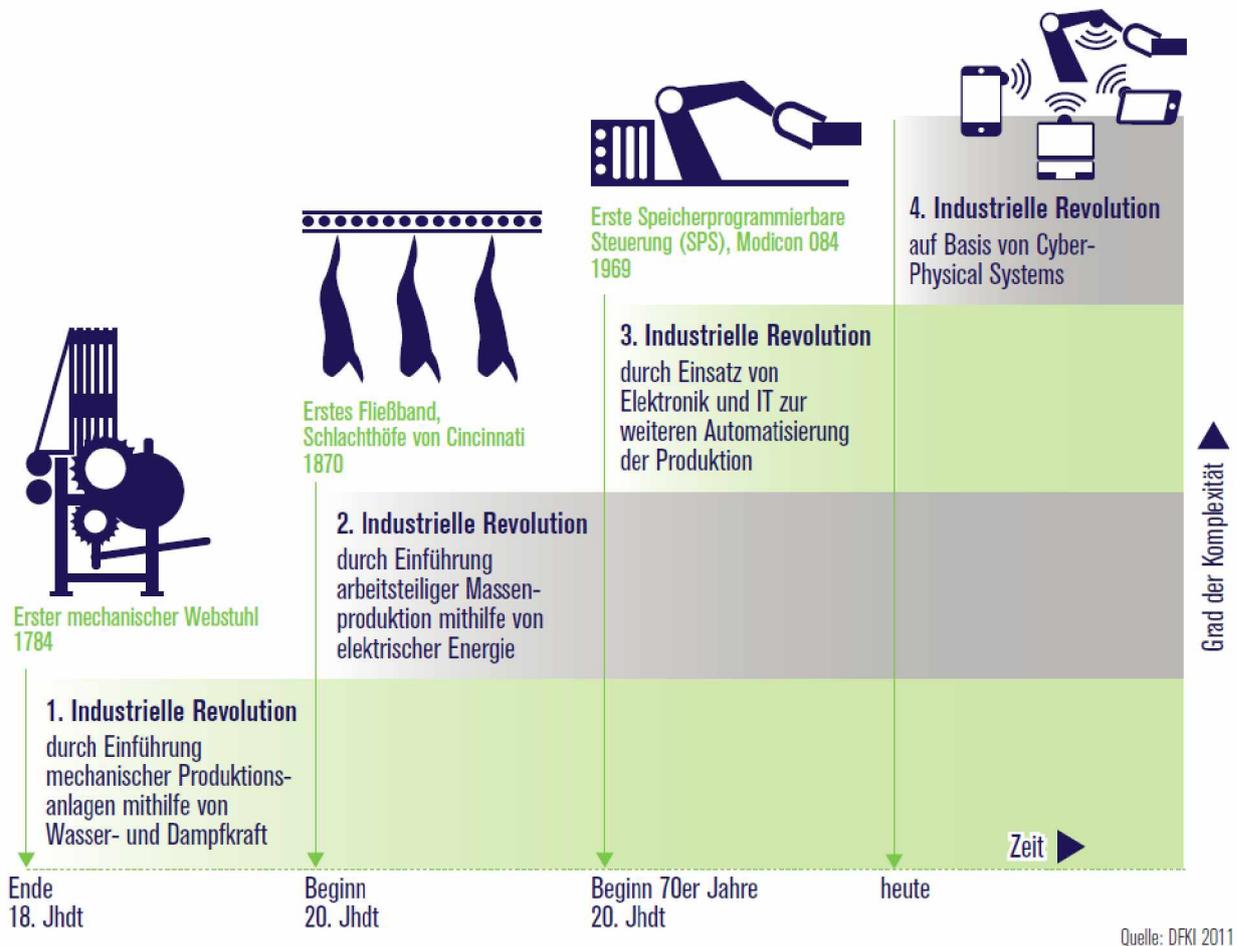


Abb. 1.1: Die vier Stufen der Industriellen Revolution (Quelle: DFKI 2011)

1.2 Aufgabenstellung

Die Wirtschaft steht an der Schwelle zur vierten Industriellen Revolution. Durch das Internet getrieben, wachsen reale und virtuelle Welt immer weiter zu einem Internet der Dinge zusammen. Die Kennzeichen der zukünftigen Form der Industrieproduktion sind die starke Individualisierung der Produkte unter den Bedingungen einer hoch flexibilisierten (Großserien-)Produktion, die weitgehende Integration von Kunden und Geschäftspartnern in Geschäfts- und Wertschöpfungsprozesse und die Verkopplung von Produktion und hochwertigen Dienstleitungen, die in sogenannten hybriden Produkten mündet. Deutschland treibt mit dem Zukunftsprojekt Industrie 4.0 im Rahmen der Hightech-Strategie der Bundesregierung voran, um die vierte Industrielle Revolution aktiv mitzugestalten zu können [3].

Das Ziel dieser Strategie ist es, die Zukunft Deutschlands als Produktionsstandort zu sichern und dass Deutschland zu einem Leitmarkt und zum Leitanbieter von intelligenten tech-

nischen Systemen wird. Wenn man die Entwicklungen des Umsatzes im Maschinenbau in Abbildung 1.2 betrachtet, besteht akuter Handlungsbedarf. 2006 lag der Umsatz von China im Maschinenbau noch hinter dem von Deutschland. Bis 2011 hat die der Umsatz Chinas mit 563 Milliarden Euro mehr als verdreifacht und liegt nur mehr knapp hinter den Umsätzen der gesamten EU. 2012 lag der chinesische Umsatz mit Maschinen bereits bei 678 Milliarden Euro. Bei den einfachen Standardmaschinen hat China dem Rest der Welt bereits den Rang abgelassen. Damit die Produktion in Hochlohnländern wie Deutschland und Österreich weiter bestehen kann, sind also Maßnahmen gefragt, um sich von der Billigkonkurrenz aus Fernost abheben zu können. Neben dem bundesdeutschen Projekt Industrie 4.0 wurden auch ähnliche Initiativen in den USA und China angestoßen. So strebt China bereits für 2015 eine grundlegende Infrastruktur für das Internet der Dinge an.

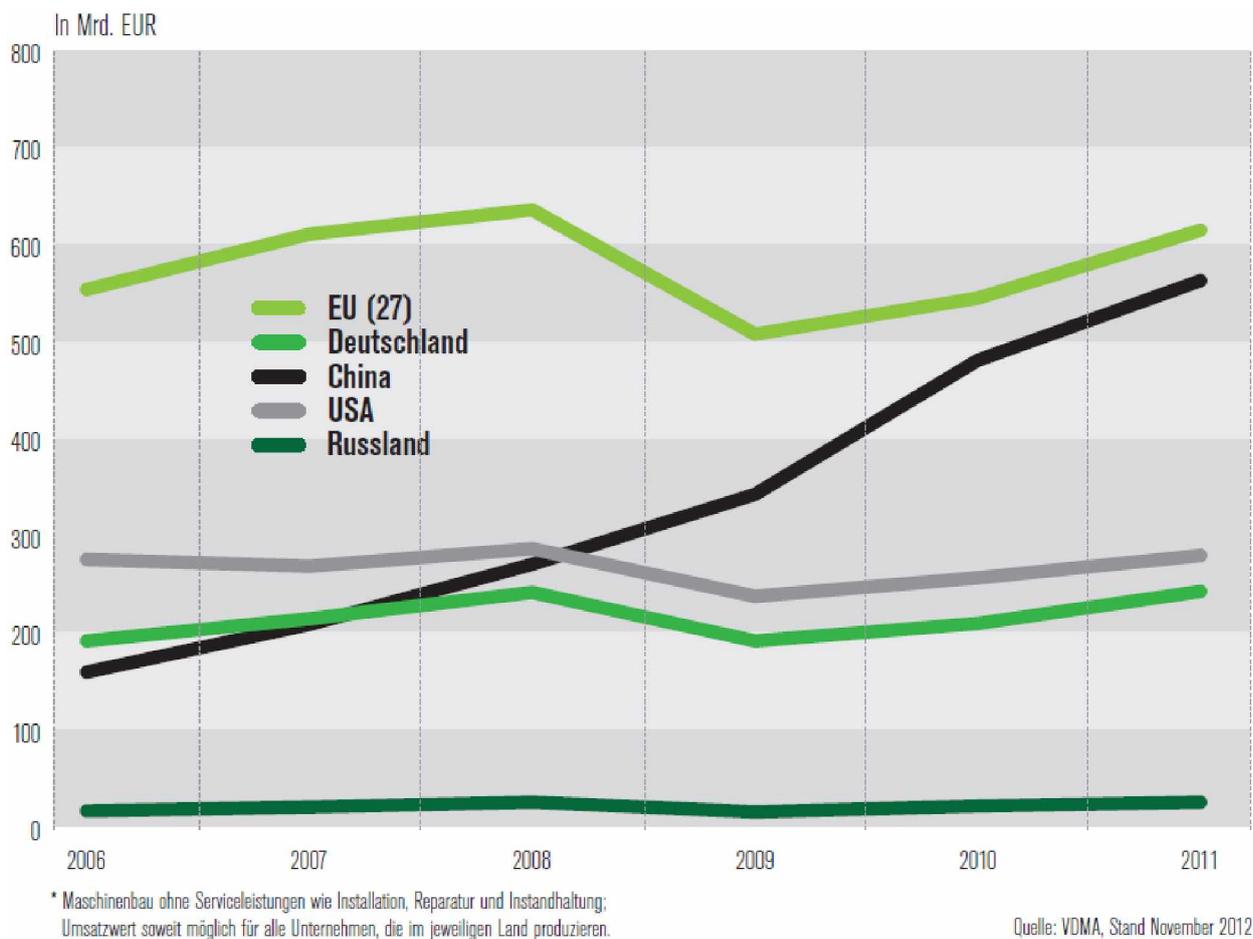


Abb. 1.2: Umsatz im Maschinenbau in ausgewählten Ländern (2006–2011) ([17])

Was aktuell unter dem Begriff „Industrie 4.0“ aufgegriffen wird, ist nicht alles vollkommen neu. Entwicklungen in diese Richtung und Insellösungen für bestimmte Bereiche existieren bereits jetzt. Das Internet, standardisierte Datenverbindung für Industrieanlagen und Simulationssoftware sind schon heute Standards in der Industrieproduktion. Bis die Smart Factory Realität wird, besteht jedoch noch einiger Forschungsbedarf.

Ziel dieser Masterarbeit ist es, den aktuellen Stand des Zukunftsprojektes Industrie 4.0 abzubilden und anhand dieser Informationen potentielle Effekte auf die Umformtechnik in der Smart Factory darzustellen. Dafür ist es auch notwendig, derzeitige angewendete Automa-

tisierungslösungen zu betrachten. Im praktischen Teil dieser Arbeit soll eine umformtechnischer Modellprozess mit Hilfe von LEGO Mindstorms EV3 erstellt werden. Der Weg vom technischen Spielzeug zur Steuerung von Fertigungsprozessen ist nicht allzu weit und soll helfen junge technische Nachwuchskräfte zu motivieren. Dieses Modell soll Studenten und Interessierten auf einfache Art und Weise die Möglichkeit einer Automatisierungslösung in Kombination mit Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) demonstriert und das Interesse an Technologien abseits der klassischen Ingenieurdisziplinen geweckt werden. Das Wissen über Mikroprozessoren, embedded systems bis hin zum Konzept der Industrie 4.0 ist heute und in Zukunft unverzichtbar.

Konkret ergeben sich damit für die Aufgabenstellung folgende Punkte:

- Darstellung des aktuellen Standes des Zukunftsprojektes Industrie 4.0 und Identifikation potentieller Effekte auf die Umformtechnik
- Einteilung derzeitiger Automatisierungslösungen hinsichtlich der Anwendbarkeit in der Umformtechnik
- Konstruktion einer Modellmaschine für das Drücken von Aluminiumblechen mit LEGO Mindstorms EV3

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel werden Cyber-Physical Systems als Grundlage für Industrie 4.0 und das Internet der Dinge definiert. Anschließend werden die technologischen Grundlagen für das Metalldrücken, die für die Modelldruckmaschine erforderlich sind, besprochen.

2.1 Cyber-Physical Systems (CPS)

Die rasanten Fortschritte der Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) haben dazu geführt, dass Rechenleistung und Netzwerkbandbreite praktisch im Überfluss zur Verfügung stehen und Informationstechnologie überall einsetzbar wird. IT ist allgegenwärtig, die Vision vom Ubiquitous Computing ist Wirklichkeit geworden [10].

Der Begriff „Cyber-Physical Systems“ (CPS) wurde erstmalig im Jahr 2006 von der National Science Foundation (NSF), der US-amerikanischen Forschungsgesellschaft, verwendet. Cyber-physikalische Systeme sind demnach definiert als ein Netzwerk interagierender Elemente mit physikalischem In- und Output, in Abgrenzung zu nicht vernetzten Standalone-Geräten, aber auch in Abgrenzung zu reinen Netzwerken ohne physikalische Ein- und Ausgabe. Das bekannteste und bereits millionenfach verbreitete Beispiel eines solchen Systems ist das Smartphone [12, 20].

Das Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO definiert Cyber-Physical Systems als mit einer eigenen dezentralen Steuerung (engl. embedded systems) versehene intelligente Objekte, welche in einem Internet der Daten und Dienste miteinander vernetzt sind und sich selbstständig steuern. 60% der befragten deutschen Unternehmen kennen den Kernbegriff der Industrie-4.0-Debatte, Cyber-Physische Systeme (CPS), nur unvollständig.

Gerade einmal 4,2% der Befragten stellen Produkte mit integrierten CPS her – oder wissen nicht, dass sie dies tun [9]. CPS sind offene soziotechnische Systeme und ermöglichen eine Reihe von neuartigen Funktionen, Diensten und Eigenschaften, die über die heutigen Fähigkeiten eingebetteter Systeme mit kontrolliertem Verhalten weit hinausgehen.

CPS werden zu einer Schlüsseltechnologie in der Fabrik der Zukunft – im Sinne einer so genannten „enabling technology“. Für den zukünftigen Geschäftserfolg von Maschinen- und Anlagenbauern genügt nicht mehr, hochproduktive und zuverlässige Maschinen und Anlagen zu liefern, mit denen weltweit qualitativ hochwertige Produkte hergestellt werden. Anwender kaufen vielmehr den Nutzen, im Extremfall nur noch das mit der Maschine oder Anlage hergestellte Produkt. Damit rücken für Maschinen- und Anlagenbauer produktbegleitende Dienstleistungen rund um die eigentliche Maschine in den Fokus (Abbildung 2.1). Der Schlüssel zu solchen neuen produktbegleitenden Dienstleistungen sind CPS. Sie durchdringen den traditionellen Maschinen- und Anlagenbau immer stärker und schaffen Potentiale für innovative Dienstleistungen.

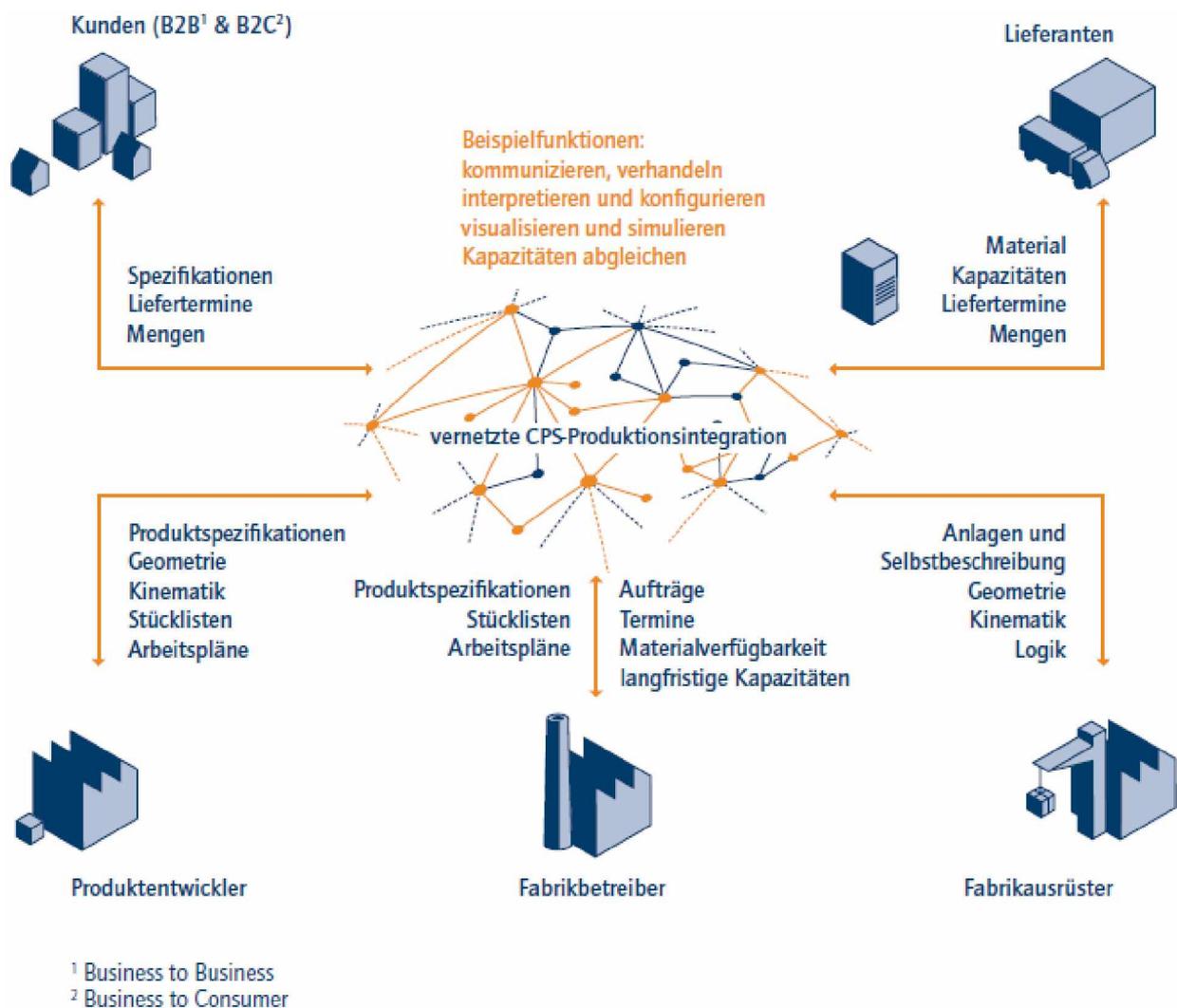


Abb. 2.1: Beispiele für ausgetauschte Informationen der Beteiligten in der Produktion [10]

Allerdings sind viele Maschinen- und Anlagenbauer auf die neuen CPS-basierten Leistungen noch nicht systematisch vorbereitet: Nach einer Studie des Fraunhofer IAO hat nur ein

Viertel der Maschinenbauer eine explizite Strategie dazu, welche internetbasierten Dienstleistungen sie auf- und ausbauen wollen und nur ein Fünftel dieser Unternehmen verfügt über ein passendes Geschäftsmodell. Hier besteht also akuter Handlungsbedarf, zumal Software zukünftig zum eigenständigen Bestandteil des Produktportfolios wird – mit den Herausforderungen eines professionellen Softwareentwicklungsprozesses, Qualitätssicherung und Lebenszyklusmodellen für Software bis hin zur Anpassung der Vertriebsorganisation, die CPS-basierte Produkte und deren Nutzen verkaufen kann [23]. Die Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, acatech, rechnet damit, dass die neuen Fertigungsverfahren zu einer Produktivitätssteigerung der Industrie von etwa 30 Prozent führen werden [6].

CPS-Szenarien entwickeln sich nicht isoliert, sondern stehen im Rahmen übergreifender Nutzungsszenarien in vielfältigen Beziehungen, Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zueinander. Sie können ihr Potenzial in vielerlei Szenarien entfalten, wie beispielsweise einer in Abbildung 2.2 dargestellten „Smart City“. Smart Factory und Smart Grid sind beispielsweise eng miteinander verbunden: Die Smart Factory mit vernetzter und flexibel integrierter Produktion möchte energieintensive Produktionsschritte in Zeiten mit niedrigen Stromkosten verlegen. Im Gegenzug hat das Starten, Stoppen oder Verlegen von Produktionsschritten eine rückkoppelnde Wirkung auf das Smart Grid. Die Verbindung der Smart Factory zu den Kunden erfolgt über die Smart Logistics.

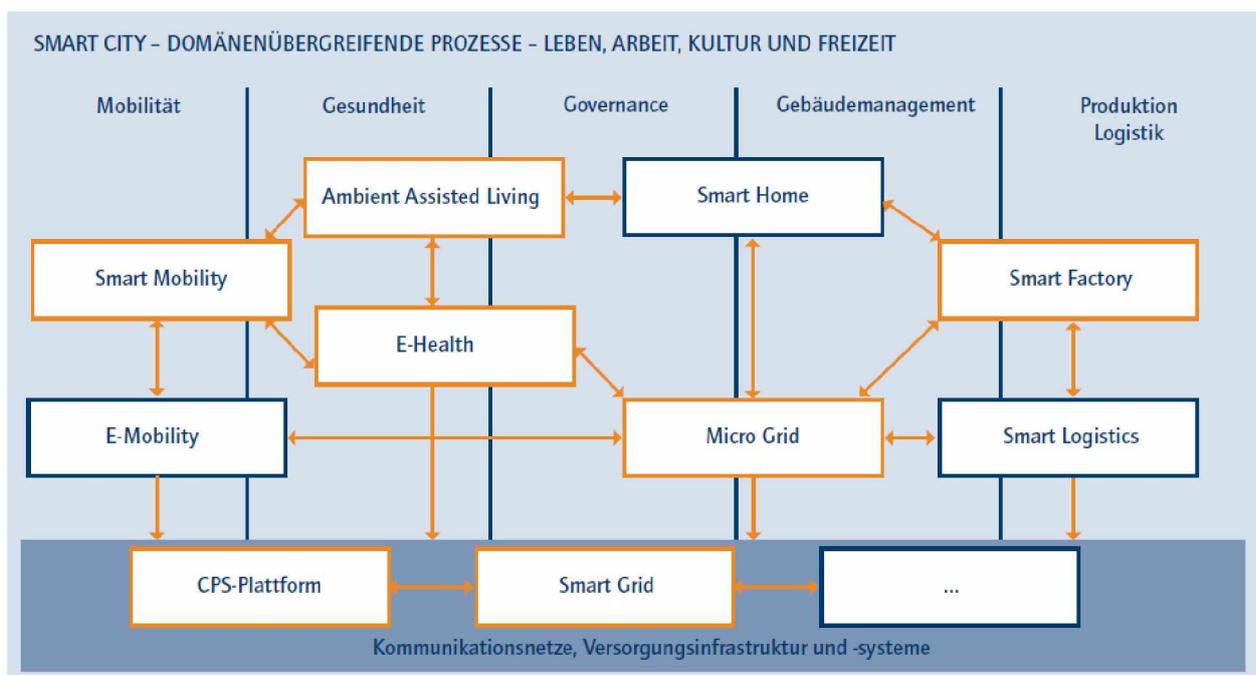


Abb. 2.2: Ineinandergreifende CPS-Anwendungsbereiche und übergreifende Nutzungsprozesse ([10])

2.1.1 Eigenschaften und neuartige Fähigkeiten von CPS

Die „Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems“, kurz agendaCPS [10], charakterisiert Cyber-Physical Systems in fünf aufeinander aufbauenden Dimensionen, die mit jeder Stufe eine zunehmende Öffnung, Komplexität, (autonome) Intelligenz und Vernetzung aufweisen:

(1.) Verschmelzung von physikalischer und virtueller Welt

Rasante Fortschritte der Steuerungstechnik und in den IKT ermöglichen eine lokale und globale physikalische Situationserkennung (Physical Awareness) und entsprechende Echtzeitsteuerung von Systemen und Komponenten. In diesem Zusammenhang müssen kontinuierliche Systeme aus der Regelungs- und Steuerungstechnik sowie diskrete Systeme aus der Informatik miteinander kombiniert werden.

CPS zeichnen sich also dadurch aus, dass sie eine Vielzahl von parallel arbeitenden und vernetzten Sensoren, Rechnern und Maschinen umfassen, die Daten erfassen und interpretieren, auf dieser Grundlage entscheiden und physikalische Prozesse der realen Welt steuern können.

(2.) System of Systems mit dynamisch wechselnden Systemgrenzen

Beim multifunktionalen Einsatz von Geräten und Systemen werden Dienste und weitere CPS-Komponenten dynamisch genutzt und eingebunden, also mit anderen Systemen, Teilsystemen oder Diensten der Umgebung. Unterschiedliche CPS bilden für eine begrenzte Zeit ein „System of Systems“. Dabei handelt es sich um einen temporären Verbund von Systemen, die einem gemeinsamen Zweck dienen und aufgrund ihres Zusammenspiels erweiterte Funktionalitäten anbieten.

In der Smart Factory binden Produktionsanlagen beispielsweise aktualisierte Firmware-Versionen von Anlagenkomponenten direkt in das Produktions-CPS ein und informieren bei Bedarf überlagerte IT-Systeme über Änderungen, etwa von Steuerungsvariablen.

(3.) Kontextadaptive und ganz oder teilweise autonom handelnde Systeme

Basierend auf einer umfassenden Kontexterfassung, detaillierten Domänenmodellen und abhängig von festgelegten Zielen, kann sich das Systemverhalten an wechselnde (auch unvorhergesehene) Nutzungssituationen und Ereignisse anpassen.

(4.) Kooperative Systeme mit verteilter, wechselnder Kontrolle

Das Verhalten eines CPS ist das Ergebnis einer vielfachen Interaktion und Koordination zwischen autonom handelnden Akteuren, Teilsystemen und angebundenen Diensten.

(5.) Umfassende Mensch-System-Kooperation

CPS können den emotionalen und physischen Zustand und sogar die Absichten der menschlichen Nutzer werden erfassen und interpretieren. Die Umsetzung der Wünsche führt zu einer Mensch-Maschine-Kooperation. Die Interaktion zwischen Mensch und Maschine passt sich dabei an den Menschen an, unter anderem über die Art der Informationsdarstellung.

In Stress-Situationen könnte ein System die Zahl der angebotenen Entscheidungsalternativen bei Maschinenausfällen oder anderen schwerwiegenden Störungen in der Produktion reduzieren.

2.2 Das Internet der Dinge (IOT – Internet of things)

Der Begriff „Internet der Dinge“ (IOT – Internet of things) wurde 1999 erstmalig von Kevin Ashton verwendet, zu diesem Zeitpunkt Mitarbeiter bei Procter & Gamble (USA). Die technologischen Wurzeln von IOT liegen im Auto-ID-Center des Massachusetts Institute of Technology (MIT), wo sich zum gleichen Zeitpunkt eine von Ashton mitgegründete Arbeitsgruppe mit RFID und Sensortechnologien beschäftigte [12].

Heute sind Computer, und damit das Internet, fast völlig abhängig von den Menschen, um Informationen zu erhalten. Fast alle der rund 50 Petabyte (ein Petabyte sind 1.024 Terabyte) an Daten im Internet wurden erstmals erfasst und erstellt von Menschen – durch die Eingabe über die Tastatur, ein digitales Bild oder Scannen eines Strichcodes. Das Problem ist, Menschen haben limitierte Zeit, Aufmerksamkeit und Genauigkeit. Das bedeutet, dass sie nicht sehr gut für die Erfassung von Daten in der realen Welt geeignet sind. Die derzeitige Informationstechnologie ist so abhängig von durch den Menschen generierten Daten, dass unsere Computer mehr über Ideen als Dinge wissen. RFID und Sensortechnologien befähigen Computer die Welt ohne die Limitierungen der durch Menschen eingegebenen Daten zu beobachten, identifizieren und verstehen [1].

Das IOT stellt ist eine umfassende Erweiterung des klassischen Internets dar: Während das Internet auf den Austausch von Daten und Dokumenten verschiedener Medientypen beschränkt ist, adressiert das Internet der Dinge die Vernetzung von und mit Alltagsgegenständen. Damit hebt es die Trennung zwischen virtueller und realer Welt weitestgehend auf. Eindeutig identifizierbare physische Objekte (things) werden mit eingebetteten Systemen ausgestattet, erhalten eine virtuelle Repräsentation und kommunizieren über das Internet [12].

Diese Verknüpfung von realen Objekten mit Internetdiensten wird ein breites Spektrum von neuen Anwendungen ermöglichen. Die automatische Identifikation von physikalischen Objekten mittels Auto-ID und RFID-Technologie wird häufig als wichtige Grundlage angesehen. Mit Near Field Communication (NFC) steht eine RFID-Technologie bereit, die den Einsatz von mobilen Endgeräten besonders flexibel und leicht möglich macht [28].

Wenn in einem zukünftigen Internet der Dinge Alltagsgegenstände über das Internet ansprechbar und kontrollierbar werden, dann sollten sie eine IP-Adresse bekommen und zur Kommunikation mit anderen smarten Objekten und Netzknoten das Internet Protocol (IP) implementieren – und zwar aufgrund der großen Zahl benötigter Adressen gleich in der neueren IPv6-Version mit 128-Bit-Adressen. Derzeit muss bei RFID auf spezielle Kommunikationsprotokolle zurückgegriffen werden.

Die Vorteile IP-fähiger Dinge liegen auf der Hand, selbst wenn die Objekte nur in einem kontrollierten Intranet zum Einsatz kommen: Es kann unmittelbar auf vorhandene Grundfunktionalität wie globale Interoperabilität, netzweite Datenpaketzustellung (forwarding, routing), Datentransport über ganz unterschiedliche physikalische Medien, Namensverwaltung

(URL, DNS) oder Netzmanagement aufgebaut werden. Die Nutzung vorhandener Internetdienste und Anwendungen durch smarte Objekte wird einfach, umgekehrt können diese als vollwertige Internetteilnehmer auch von überall her angesprochen werden. Wichtige Protokolle höherer Schichten wie beispielsweise HTTP lassen sich einfach realisieren. IPv6 bietet auch die interessante Möglichkeit der automatischen Adresskonfiguration, sodass sich smarte Objekte in autonomer Weise selbst eine Adresse zuweisen können [14]. Neben den genannten Vorteilen des Internet Protocol (IP) muss man aber auch dessen Nachteile in Kauf nehmen.

Hinter dem Internet der Dinge steht nicht eine einzelne Technologie oder eine spezifische Funktionalität; vielmehr tragen mehrere sich ergänzende sowie teilweise konvergierende Technikentwicklungen zu einem Funktionsbündel bei, welches in seiner Gesamtheit eine neue Qualität hervorbringt [8]. Zu diesen Funktionen gehören [14]:

Kommunikation und Kooperation: Objekte können sich mit Ressourcen im Netz vernetzen oder sogar untereinander, um Daten und Dienste gegenseitig zu nutzen und ihren Zustand zu aktualisieren. Relevant sind vor allem funkbasierte Technologien wie GSM oder UMTS, Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee und deren Weiterentwicklungen, insbesondere im Bereich der Wireless Personal Area Networks (WPAN).

Adressierbarkeit: Objekte im IOT können über einen Discovery-, Look-up- oder Namensdienst gefunden, angesprochen und damit aus der Ferne abgefragt oder beeinflusst werden.

Identifikation: Objekte sind eindeutig identifizierbar (RFID, NFC, optisch erkennbare Strichcodes). Die Identifikation ermöglicht die Verknüpfung des Objekts mit zugehörigen Informationen.

Sensorik: Objekte sammeln Informationen über ihre Umgebung, zeichnen diese auf und melden sie weiter oder reagieren direkt darauf.

Effektorik: Objekte im Internet der Dinge können mit z. B. Aktuatoren ferngesteuert über das Internet auf Prozesse der Realität einwirken.

Eingebettete Informationsverarbeitung: Ein Prozessor oder Mikrocontroller sowie Speicherkapazität sind in smarten Objekten eingebettet und können dadurch beispielsweise sensorische Daten verarbeiten und interpretieren.

Lokalisierung: Dinge kennen ihren physischen Aufenthaltsort und sind für andere lokalisierbar (GPS, Mobilfunknetz, RFID-Lesegerät mit bekannten Koordinaten etc.).

Benutzerschnittstelle: Smarte Objekte können in geeigneter Weise mit Menschen kommunizieren (direkt oder auch indirekt, etwa via Smartphone). Innovative Methoden aus den Bereichen Sprach-, Bild- und Gestenerkennung sind ebenfalls relevant.

2.3 Automatisierungssysteme

Die produzierende Industrie ist mit rasch veränderlichen globalen Märkten konfrontiert, die einen schnellen Wechsel von Produkten und Produktvarianten fordern. Die Produktionsprozesse in der Umformtechnik sind zudem äußerst vielfältig, von der Fertigung tonnenschwerer Einzelteile bis zur Großserienfertigung kleinster Blechteile. Diesem Umstand entsprechend

sind nicht alle Automatisierungslösungen für jeden Anwendungsfall gleich gut geeignet bzw. sinnvoll anwendbar.

Eine wichtige Frage ist hierbei die nach der Automatisierungsfähigkeit eines Prozesses. Automatisierungsfähig sind Prozesse und Aufgaben,

- die nicht von Menschen ausgeführt werden sollen,
- die besser, schneller und präziser, d. h. wirtschaftlicher von Maschinen ausgeführt werden sollen,
- die so häufig, so ähnlich oder identisch sind, dass sie besser von Maschinen ausgeführt werden können.

Der Anteil von Maschinen ausgeführten Funktionen am gesamten Funktionsumfang wird als (statischer) Automatisierungsgrad ausgedrückt; er liegt zwischen null und eins [25].

Die Strukturen industrieller Systeme sind meist sehr ähnlich. Abbildung 2.3 zeigt einen typischen Aufbau eines industriellen Automatisierungssystems.

Die Zustandsgrößen des technischen Prozesses werden von Sensoren erfasst und über ein Kommunikationssystem an Automatisierungsrechner weitergeleitet. Die darauf laufenden Automatisierungsprogramme verarbeiten die sensorischen Informationen und erzeugen daraus Handlungsentscheidungen, die über die Aktorik Einfluss auf den technischen Prozess nehmen. Die Rechnebene ist ihrerseits über ein Kommunikationssystem mit einer übergeordneten Leitebene verbunden. An wohldefinierten Stellen besteht für den Mensch die Möglichkeit, Informationen über den Systemzustand abzurufen und gegebenenfalls korrektiv einzuwirken. In der Praxis muss der Mensch häufig auch direkt in den Prozess eingreifen, um Störungen zu beheben oder vor Ort Analysen, Messungen oder Qualitätskontrollen durchzuführen.

Bei der Auswahl der geeigneten Aktorik für eine Automatisierungsaufgabe müssen die Kenngrößen Stellgeschwindigkeit, Stellkraft, Genauigkeit, Wirkungsgrad und die Integration von Zusatzfunktionen beachtet werden [7].

2.4 Automatisierungstechnische Steuerungseinrichtungen

Entsprechend der historischen Nutzung der verschiedenen physikalischen Prinzipien hat sich eine nahezu technikgeschichtliche Gliederung der Automatisierungseinrichtungen ergeben (Tabelle 1). Im Anschluss werden einige dieser Automatisierungseinrichtungen [25] näher charakterisiert.

2.4.1 Kurven- und Nockenscheiben, Schrittschaltwerke

Diese Steuerungen verwenden die Grundprinzipien der Mechanik mittels Funktionen $\mathbf{x} = f(y)$ mit $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots)$. Die x_i sind bei Nocken oder Kurvenscheiben reelle Zahlen, haben einen kontinuierlichen Signalverlauf und Zeit- oder Zustandsabhängigkeit, während die x_i bei Schrittschaltwerken zur Menge der dualen Zahlen gehören.

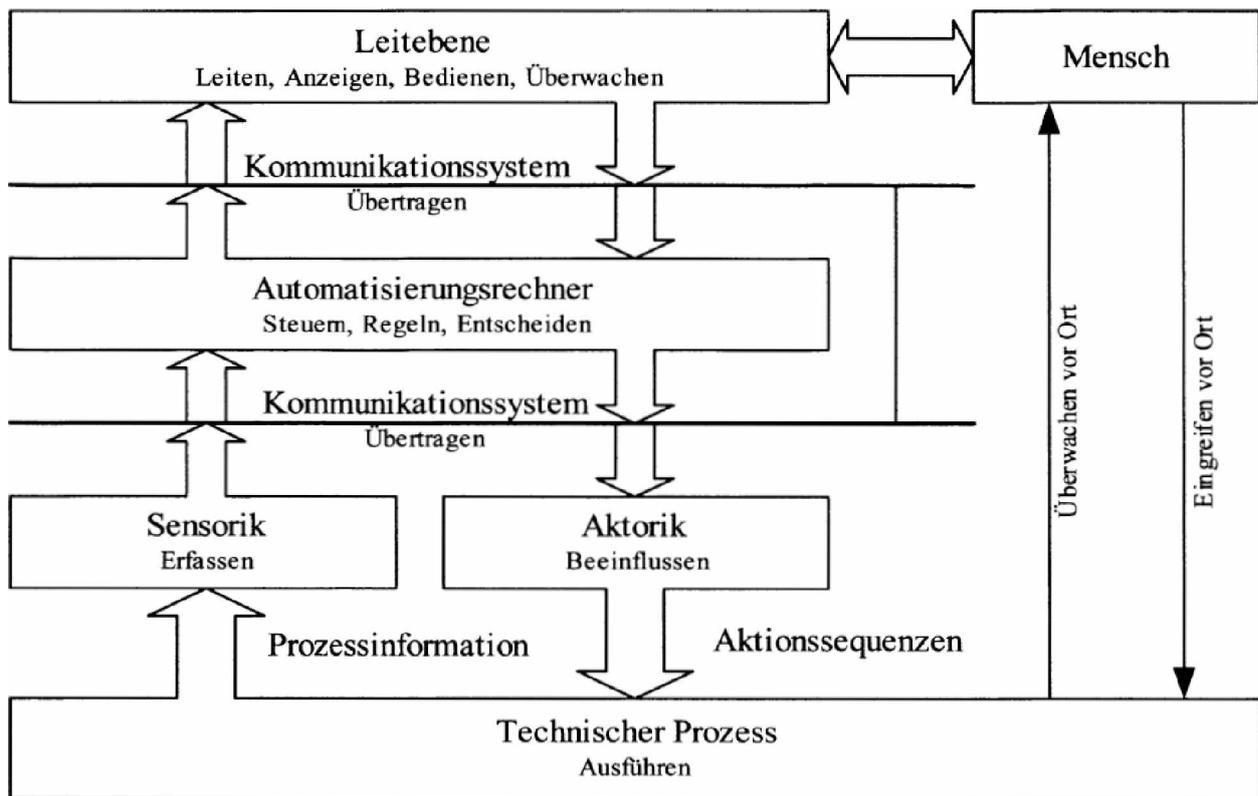


Abb. 2.3: Generischer hierarchischer Aufbau eines industriellen Automationssystems ([7])

Tab. 1: Gliederung der Automatisierungseinrichtungen ([25])

Art der Steuerung	Beispiel
mechanische Steuerungen	Kurvenscheibe Nockenwellen Schrittschaltwerke
fluidische Steuerungen	hydraulische Steuerung pneumatische Steuerung
elektromechanische Steuerungen	Relais Schütze motorisch angetriebene Schaltkontakte
elektronische Steuerungen	diskrete Bauelemente verbindungsprogrammierbare Steuerungen integrierte Schaltkreise
rechentechnische Steuerungen	Prozessrechner speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) Mikrorechner und -controller Personal Computer Prozessleitsysteme

Die maximale Grenzfrequenz liegt für Nockenwellen bei etwa 18000 min^{-1} und die maximal übertragbare Leistung beträgt etwa 1 kW. Die Komplexität ist gering und man verfügt nur über mechanische Zustandssignale, die aber mit elektromechanischen Schaltern wandelbar sind. Außerdem verfügt man über eine hohe Auflösung und große Leistungsdichte. Verwendung finden sie im Motorenbau, Haushaltsgeräten, Stanzautomaten, mechanischen Pressen und dergleichen.

2.4.2 Hydraulische und pneumatische Steuerungen

Mit hydraulischen und pneumatischen Steuerungen sind Funktionen $x = f(y)$ realisierbar, wobei x z. B. für Weg oder Durchfluss und y beispielsweise für Wege oder Spannungen steht. x kann Element der dualen Zahlen (Schaltventile) oder der reellen Zahlen (Proportionalventile) sein, y ist meist zustandsabhängig und höchstens mittelbar zeitabhängig.

Die Schaltfrequenz umfasst einige 100 Hz und die Leistungsdichte ist bei der Hydraulik konkurrenzlos hoch, wenn auch oft mehrere Leistungsstufen notwendig sind. Die Ansteuerung erfolgt elektrisch oder mechanisch, danach arbeitet man mit rein fluidischer Energie.

Fluidtechnische Aktoren können in folgende Klassen eingeteilt werden [7]:

Unstetige Ventile (Wegeventile, Schaltventile) gibt es ausschließlich zum Ein- oder Ausschalten von Fluidströmen.

Stetige Ventile (Servoventile, Proportionalventile) dienen der kontinuierlichen Verstellung des Massestroms (Durchfluss und Druck).

Fluidtechnische Motoren werden zur Umwandlung hydraulischer oder pneumatischer Energie in mechanische Energie eingesetzt (servopneumatische Linearantriebe, pneumatische Greifer, servohydraulische Zylinder etc.). Fluidtechnische Motoren gibt es in Ausführungen für Translations- oder Rotationsbewegungen.

2.4.3 Rechentechnische Steuerungen

Vor der allgemeinen Verfügbarkeit der Mikroprozessortechnik für Steuerungsaufgaben wurden festverdrahtete, verbindungsprogrammierte Steuerungen (VPS) eingesetzt, deren Komponenten aus elektromechanischen Relais oder Halbleiterbauelementen bestanden. Eine Veränderung des Programms war mit hohem Aufwand verbunden, da das Programm durch die Verdrahtung der Schaltelemente definiert wurde. Diese elektromechanischen bzw. elektronischen Steuerungen wurden durch wesentlich flexiblere Mikroprozessorsysteme abgelöst.

Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)

Heute kommen hauptsächlich speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) zum Einsatz. Die Hardware einer SPS ist meist modular aufgebaut. Prozessorkarten, Netzteile, E/A-Karten und Busanschlusskarten können in dafür vorgesehenen Steckplätzen aufgenommen und Bedieninterfaces angeschlossen werden. Programme werden im Speicher der Steuerung abgelegt und sind bei Bedarf leicht modifizierbar.

Der prinzipielle Aufbau einer SPS ist in Abbildung 2.4 ersichtlich. Ein- und Ausgabeeinheiten dienen zum Transfer von analogen und digitalen Sensor- und Aktorsignalen. Neben der Stromversorgung enthält der Kern Programm- und Arbeitsspeicher, ein Steuer- und Rechenwerk, einen oder mehrere Timer und Echtzeituhren sowie Schnittstellen zur Anwenderkonsole und zu Kommunikationssystemen der Automatisierungsanlage (Feldbus- oder Ethernetschnittstelle). Ein systeminterner Bus stellt den Datenaustausch sicher.

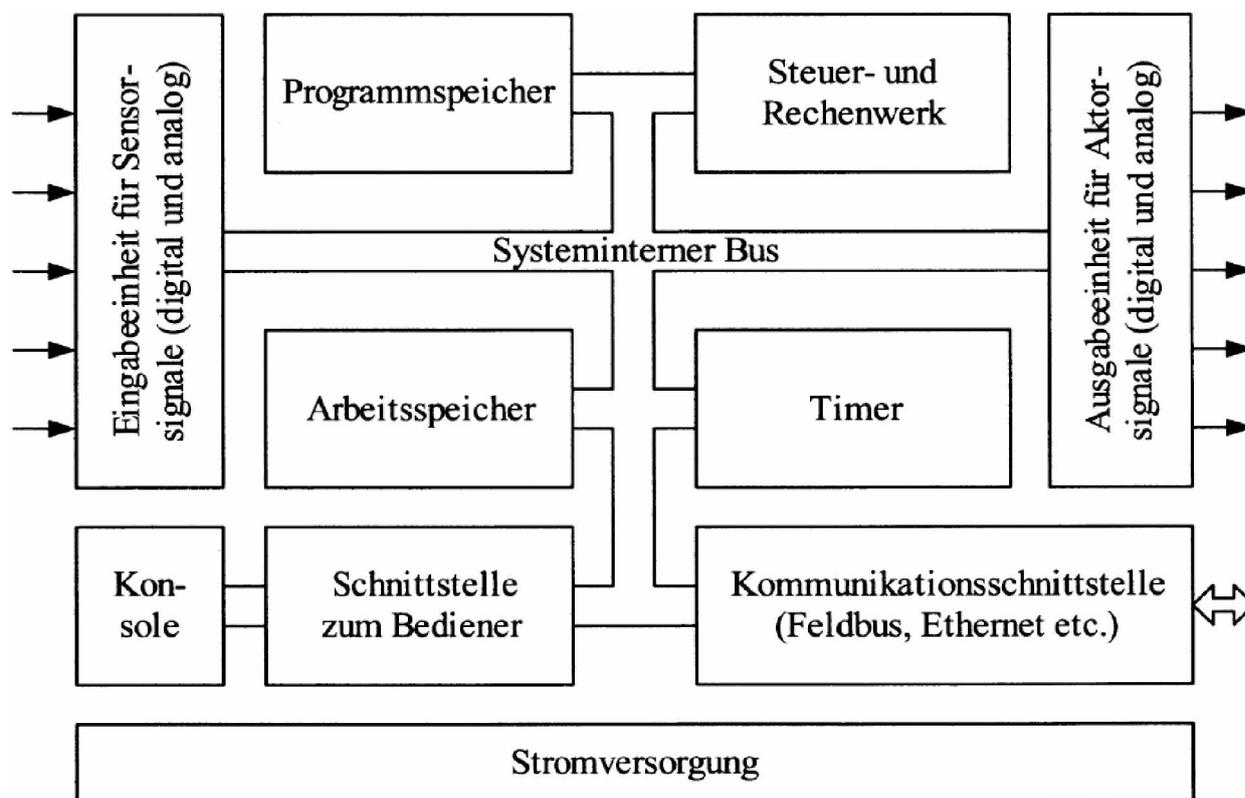


Abb. 2.4: Prinzipieller Aufbau einer SPS ([7])

Eine SPS arbeitet Programme zyklisch ab und unterscheidet sich dadurch von einem Mikrocontroller oder IPC. Sensorsignale werden an den Eingängen abgefragt und stellen eine Momentaufnahme des Prozesses dar, da sich die Zustandsgrößen des technischen Prozesses ständig ändern. Mit dem Daten dieses Prozessabbildes wird der Steuerungsalgorithmus abgearbeitet und die Ergebnisse in ein Ausgangsregister geschrieben. Am Zyklusende werden die Daten im Ausgangsregister von der Ausgabeeinheit dem technischen Prozess zur Verfügung gestellt. Die Zykluszeiten sind in der Regel nicht konstant, da unterschiedliche Prozesszustände verschieden lange Programmausführungszeiten bewirken können. Die zyklische Arbeitsweise verhindert das Auftreten von logischen Fehlern in der Programmabarbeitung durch veränderliche Prozesszustände während der Abarbeitung und erleichtert die Strukturierung des Anwenderprogramms.

Mit einer SPS können folgende prozessnahe Funktionen realisiert werden:

- Messwertaufnahme und -verarbeitung
- Steuern
- Regeln

- Rechnen
- Durchführen systemnaher Dienste (Diagnose, Konfiguration, Notfallsprozeduren)

Für SPS-basierte Automatisierungslösungen hat sich der international verbindliche Standard IEC 61131 weitestgehend durchgesetzt. Der Standard fasst die Anforderungen an die Programmiersprache und an die Hardwarestruktur zusammen. Als Nachfolgenorm für verteilte Systeme kann die IEC 61499 angesehen werden, deren Programmparadigma auf Funktionsblöcken aufbaut.

Industrie-PC

Der Industrie-PC (IPC) wird vorwiegend als Ersatz für die SPS eingesetzt. Im Gegensatz zum Office-PC muss ein IPC zusätzliche Merkmale betreffend der Robustheit gegen

- mechanischen Belastungen (Vibrationen, Stöße),
- Temperaturschwankungen und erhöhte Umgebungstemperaturen,
- Staub,
- Feuchtigkeit,
- elektromagnetischen Einwirkungen sowie die
- Eignung zum Dauerbetrieb aufweisen.

Weitere Anforderungen für den Einsatz in Automatisierungssystemen beziehen sich auf die Verwendung von Standards (SPS Normen), eine ausbaufähige Schutzart (IP-Klasse), das Betriebssystem (Multitasking; Echtzeitfähigkeit, falls erforderlich) und die Möglichkeit der Kommunikation mit anderen Systemkomponenten (Interfacekarten, Feldbus).

Computer Numerical Control (CNC)

Moderne Werkzeugmaschinen werden auf Basis digitaler Computerprogramme gesteuert. Ein CNC-System besteht aus einem Computer in der Nähe der Werkzeugmaschine und aus einem Aktorsystem, das die Achsen der Werkzeugmaschine entsprechend der NC-Programmbefehle ansteuert. Das zu fertigende Werkstück wird auf einem CAD-System entworfen und aus den CAD-Daten die Steuerdaten für die Aktoren der Werkzeugmaschine generiert. Die Programmierung von NC-Maschinen ist nach DIN 66025 normiert.

SPS werden vornehmlich für Verknüpfungs-, Ablaufsteuerungen und Regelungen eingesetzt. Der Einsatzbereich der CNC liegt bei der automatischen Ansteuerung von Werkzeugmaschinen und bietet Funktionen zur Bearbeitungssimulation, Systemdiagnose, Korrekturfunktionen und Messen. Der schematische Aufbau der beiden Steuerungstypen ist in Abbildung 2.5 gegenübergestellt.

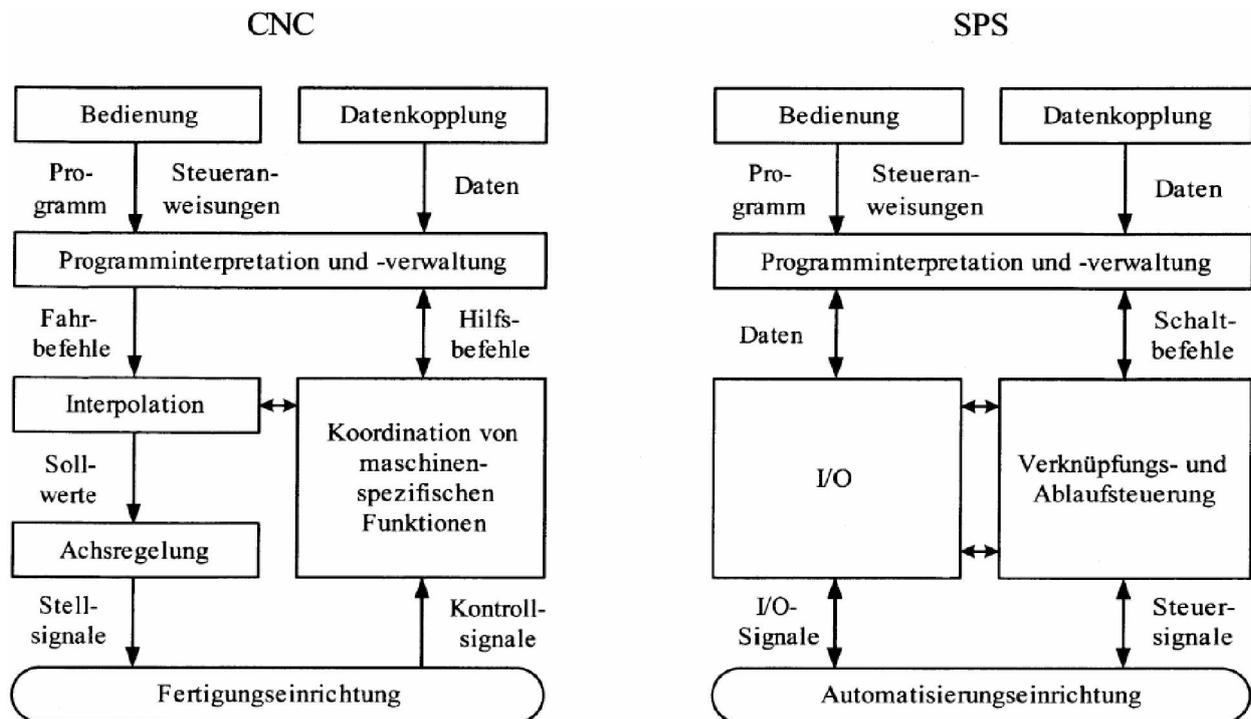


Abb. 2.5: Blockdiagramm von CNC und SPS ([7])

2.5 Drückverfahren

Drückverfahren gehören zu einer Gruppe von Umformprozessen zur Herstellung hohler, axialsymmetrischer Blechbauteile. Drücken ist eines der ältesten spanlosen Fertigungsverfahren, das aber im Laufe der Jahre gegenüber anderen Umformprozessen wie Schmieden oder Tiefziehen an Bedeutung verloren hat. Allerdings verfügt dieser Prozess über eine Reihe von Besonderheiten, die ihm in den letzten Jahren zu einer Renaissance verholfen und Drücken zu einem vielseitigen Verfahren zur Herstellung von Leichtbau-Komponenten machte. Der Trend in der Industrie geht in Richtung endkonturnaher Fertigung dünnwandiger Leichtbau-Komponenten [30].

Die angesprochenen Besonderheiten gegenüber alternativen Fertigungsverfahren für axial-symmetrische Blechkomponenten wie Tiefziehen sind:

Geringe Umformkräfte: Es erfolgt nur eine lokale Deformation im Bereich des Drückwerkzeuges. Durch die lokale Umformung ergeben sich vergleichsweise geringe Umformkräfte, die sich durch geeignete Wahl der Prozessparameter auf ein Minimum reduziert werden können.

Einfache Werkzeuge: Einfache und unspezifische Werkzeuge gewährleisten Flexibilität und ermöglichen endkonturnahe Formgebung.

Hohe Oberflächenqualität: Mit Drückverfahren sind ausgezeichnete mechanische Eigenschaften und eine hohe Oberflächenqualität erreichbar.

Bei der grundlegenden Technik des Drückens wird eine Blechrunde zentrisch gegen ein von einer Antriebsspindel aufgenommenes Drückfutter (engl. Mandrel) auf einer Drückmaschi-

ne gespannt und in Drehbewegung versetzt. Das vom Drückfutter über Reibschluss mitgenommene rotierende Blech wird mit einem Drückwerkzeug allmählich auf die Kontur des Drückfutters angeformt, entweder in nur einem Schritt oder mit mehreren Zwischenschritten. Metalldrücken erfolgt üblicherweise im kalten Materialzustand. Um die Umformkräfte bei besonders dicken und harten Materialien zu reduzieren, kann das Werkstück mit Laser oder Heißluft erwärmt werden [15].

In Abbildung 2.6 ist das Prinzip des Metalldrückens mit einem Rollenwerkzeug auf einem Kreuzsupport samt Zusatzeinrichtungen schematisch dargestellt [15, 19].

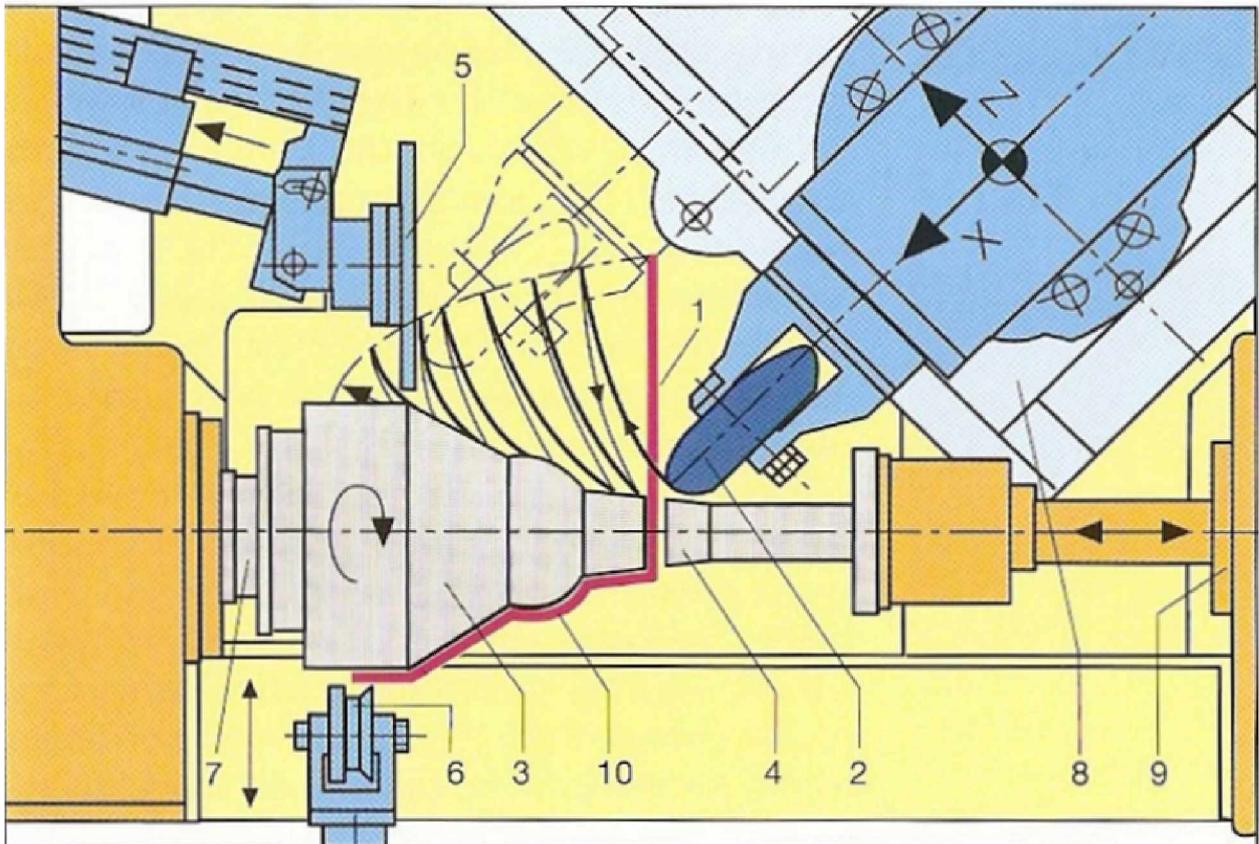


Abb. 2.6: Schema des Drückens sowie an der Umformung beteiligte Komponenten. 1 Ronde, 2 Drückrolle, 3 Drückfutter, 4 Andrückscheibe, 5 Rondengegenhalter, 6 Beschneideeinrichtung, 7 Hauptspindel, 8 Kreuzsupport, 9 Reitstock [19]

Abbildung 2.7 zeigt die typische Ausbildung der Umformzone und Werkstoffbeanspruchung in den Zwischenstadien des Drückens. Dabei muss zwischen den Bewegungen in Richtung Rondenaußenrand und in Richtung Drückfutter unterschieden werden. Bei der Rollenbewegung in Richtung Rondenrand wird der Werkstoff zusätzlich zugbeansprucht. Neben der bereits erwähnten Form der Bahnkurve hat auch der Arbeitsradius der Drückrolle einen Einfluss auf die Höhe der Zugbeanspruchung. Die Bewegung der Drückrolle in Richtung Drehmitte bewirkt dagegen im Material eine quasi allseitige Druckbeanspruchung. Es bildet sich, mit Ausnahme des Randbereichs, vor der Rolle eine Materialwelle aus, die die Formstabilität erhöht und der Faltenbildung entgegenwirkt. Dieses Bewegungsstadium ist daher weniger versagenskritisch [19].

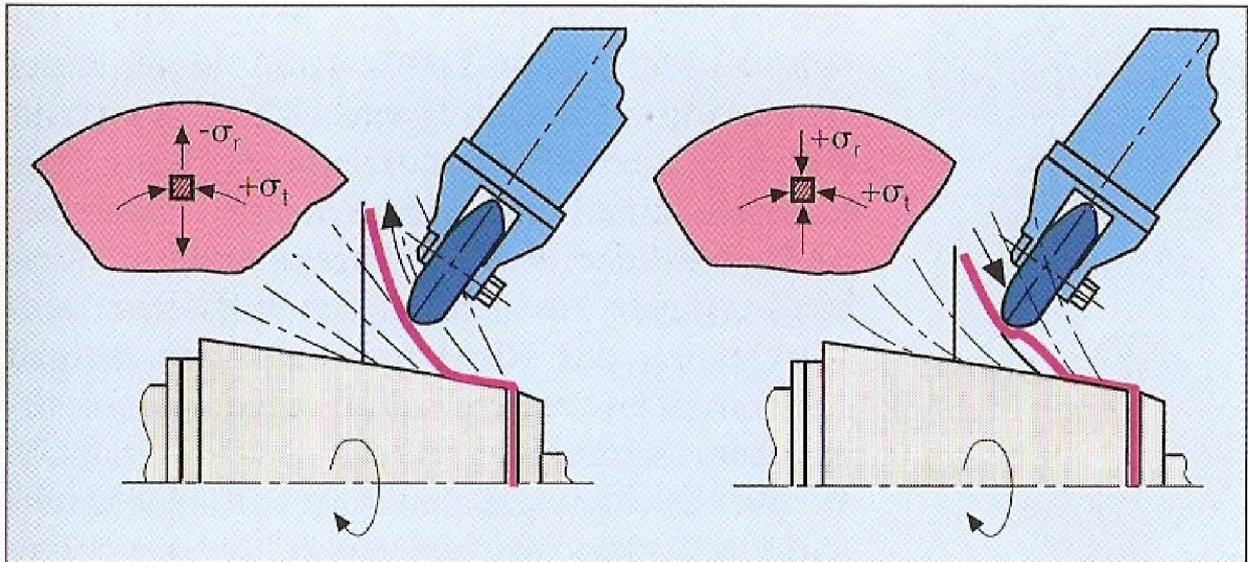


Abb. 2.7: Ausbildung der Umformzone und Werkstoffbeanspruchung in den Zwischenstadien des Drückens. $+\sigma_t$ tangentielle Druckspannung, $-\sigma_r$ radiale Zugspannung, $+\sigma_r$ radiale Druckspannung [19]

Das Rollenwerkzeug verursacht nur eine lokale Deformation, die vergleichsweise geringe Umformkräfte zur Folge hat. In Abbildung 2.8 ist die Vergleichsspannung in einer Ronde dargestellt, die mit einem Rollenwerkzeug umgeformt wird. Die höchsten Spannungen treten erwartungsgemäß in der lokalen Umformzone und auf einem Kreisring auf, wo die Rolle das Werkstück berührt. Hohe Vergleichsspannungen treten auch noch nahe der Einspannung auf, wo die Ronde über das Drückfutter geformt wird. Bei ungeeigneter Parameterwahl ist oft dieser Bereich versagenskritisch, da es dort zu Materialausdünnung und in der Folge zu Rissbildung kommen kann.

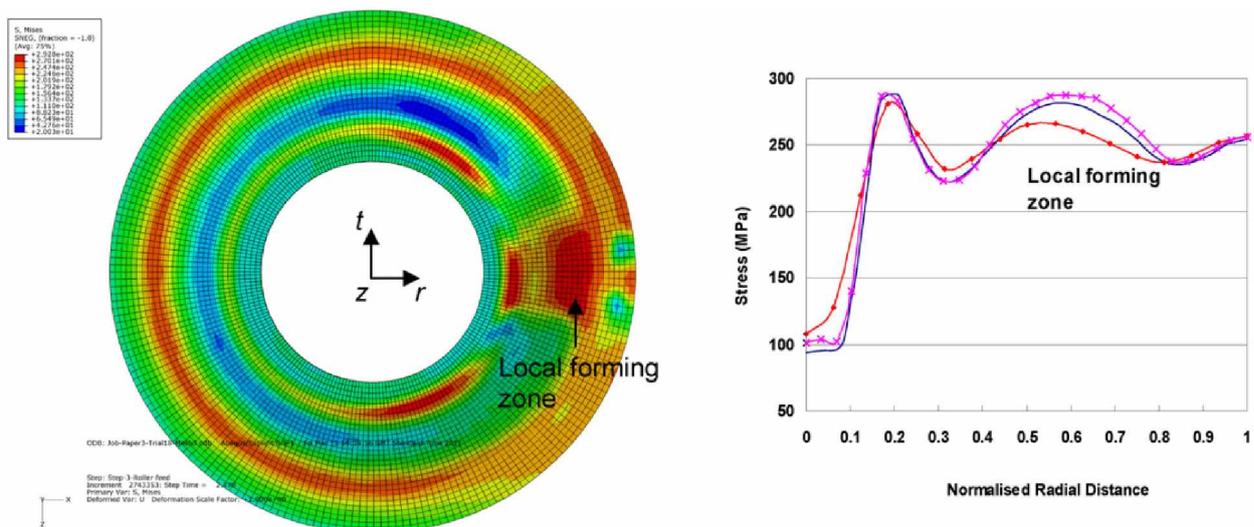


Abb. 2.8: Von Mises Spannungen in einer Blechronde beim ersten Umformschritt mit einem Rollenwerkzeug [29]

2.5.1 Einteilung der Drückverfahren

Die Unterteilung der Fertigungsverfahren in sechs Hauptgruppen erfolgt in der DIN 8580. Das Fertigungsverfahren Drücken wird als Untergruppe 2.2.3 in das Ordnungssystem nach DIN 8580 eingeordnet und gehört zur Gruppe 2.2 – Zugdruckumformen, die wiederum zur Hauptgruppe 2 – Umformen gehört (Abbildung 2.9). Drücken ist demnach ein Prozess, bei dem die Umformung durch eine Kombination von Zug- und Druckbeanspruchungen erfolgt. Das Drückwalzen ist ein dem Drücken sehr ähnliches Verfahren mit reiner Druckbeanspruchung und wird daher in die Untergruppe 2.1.2 – Walzen der Gruppe 2.1 – Druckumformen klassifiziert (DIN 8583-2).

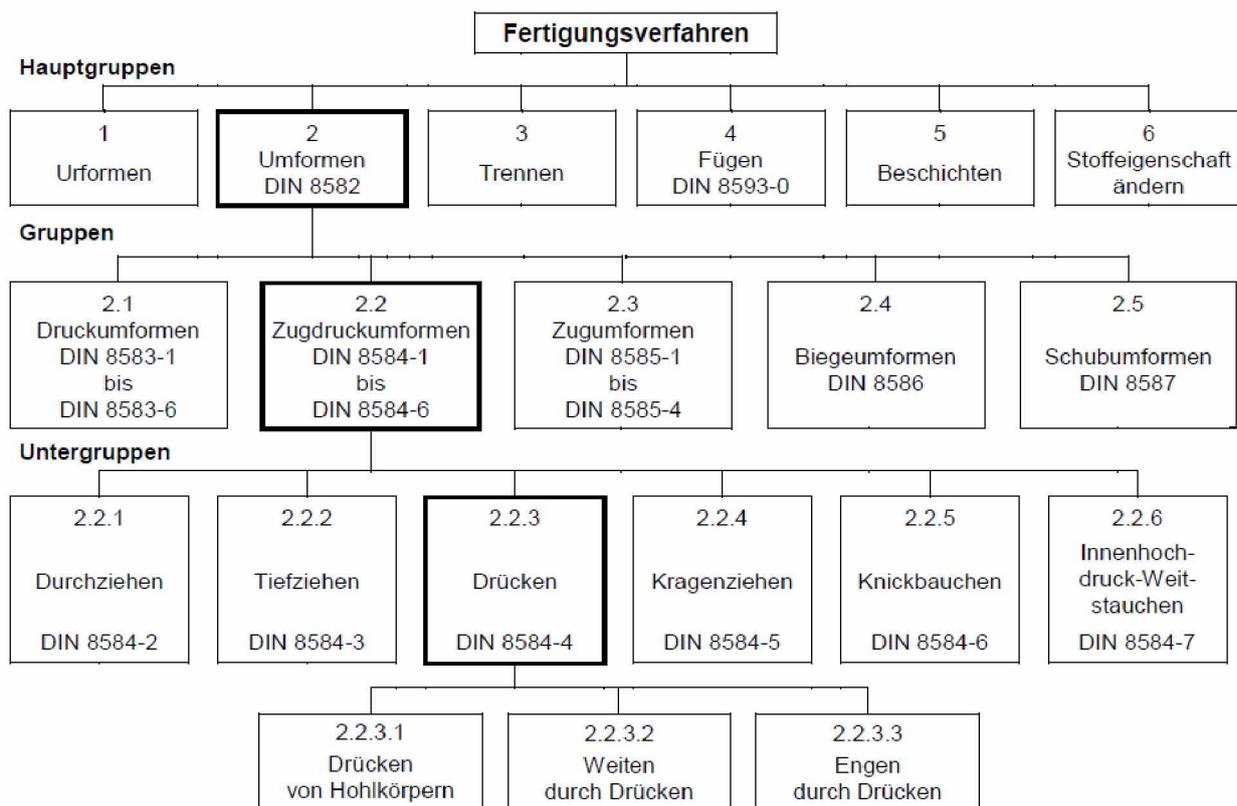


Abb. 2.9: Übersicht der Umformverfahren [5]

Beim Drücken ändert sich vom Anfangsdurchmesser der Blechrunde auf den Enddurchmesser des Stützdornes, es findet jedoch keine beabsichtigte Reduktion der Blechdicke des Ausgangsmaterials statt. Beim Drückwalzen hingegen ist die Änderung der Blechdicke beabsichtigt, der Außendurchmesser der Blechrunde bleibt konstant. Die Unterscheidung der Drückprozesse nach ihren Spannungsarten ist in Abbildung 2.10 ersichtlich.

2.5.2 Prozessparameter

Es gibt eine Fülle von Prozessparametern, die einen entscheidenden Einfluss auf die erfolgreiche Herstellung eines Drückwerkstückes haben. Obwohl sich Drücken und Drückwalzen bezüglich der Verformungscharakteristik unterscheiden, beeinflussen diese Parameter auch die Qualität von Drückwalzprodukten.

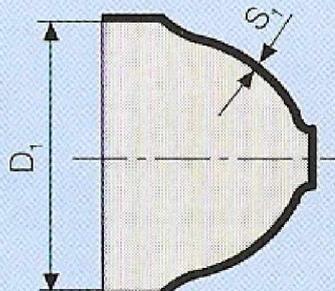
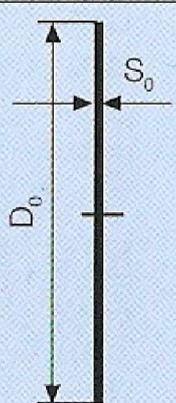
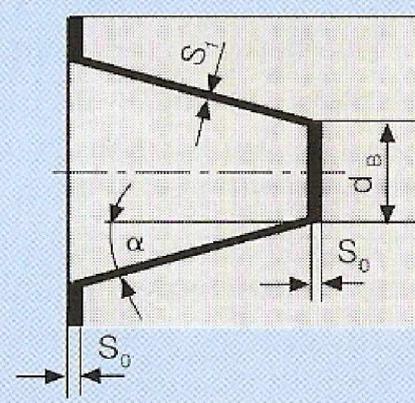
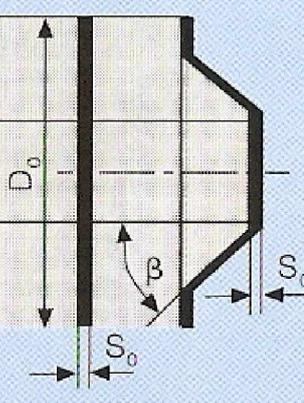
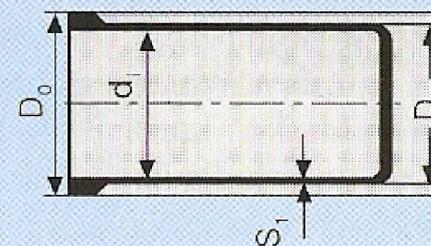
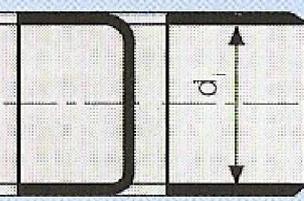
Norm	Verfahren	Ausgangsteil	Wanddicke
Zugdruckumformen DIN 8582	Drücken 	 Ronde $D_0 > D_1$	etwa gleichbleibend $S_1 = S_0$
Druckumformen DIN 8582	Projizier-Drückwalzen 	Ronde oder Vorform 	im Boden: $S_1 = S_0$ im umgeformten Bereich $S_1 = S_0 \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$
	Zylinder-Drückwalzen 	Napf oder Büchse 	in der umgeformten Zarge: $S_1 = \frac{1}{2} (D_1 - d_i)$

Abb. 2.10: Unterscheidung der Drückprozesse nach Spannungsarten. D_0 Durchmesser des Ausgangsteiles, D_1 Durchmesser des Fertigteil, d_B Bodendurchmesser, d_i Innendurchmesser, S_0 Ausgangswanddicke, S_1 Endwanddicke, α Projizierwinkel, β Verformungswinkel [19]

Abbildung 2.11 zeigt eine Übersicht über die vielfältigen Einflussparameter auf das Druckergebnis.

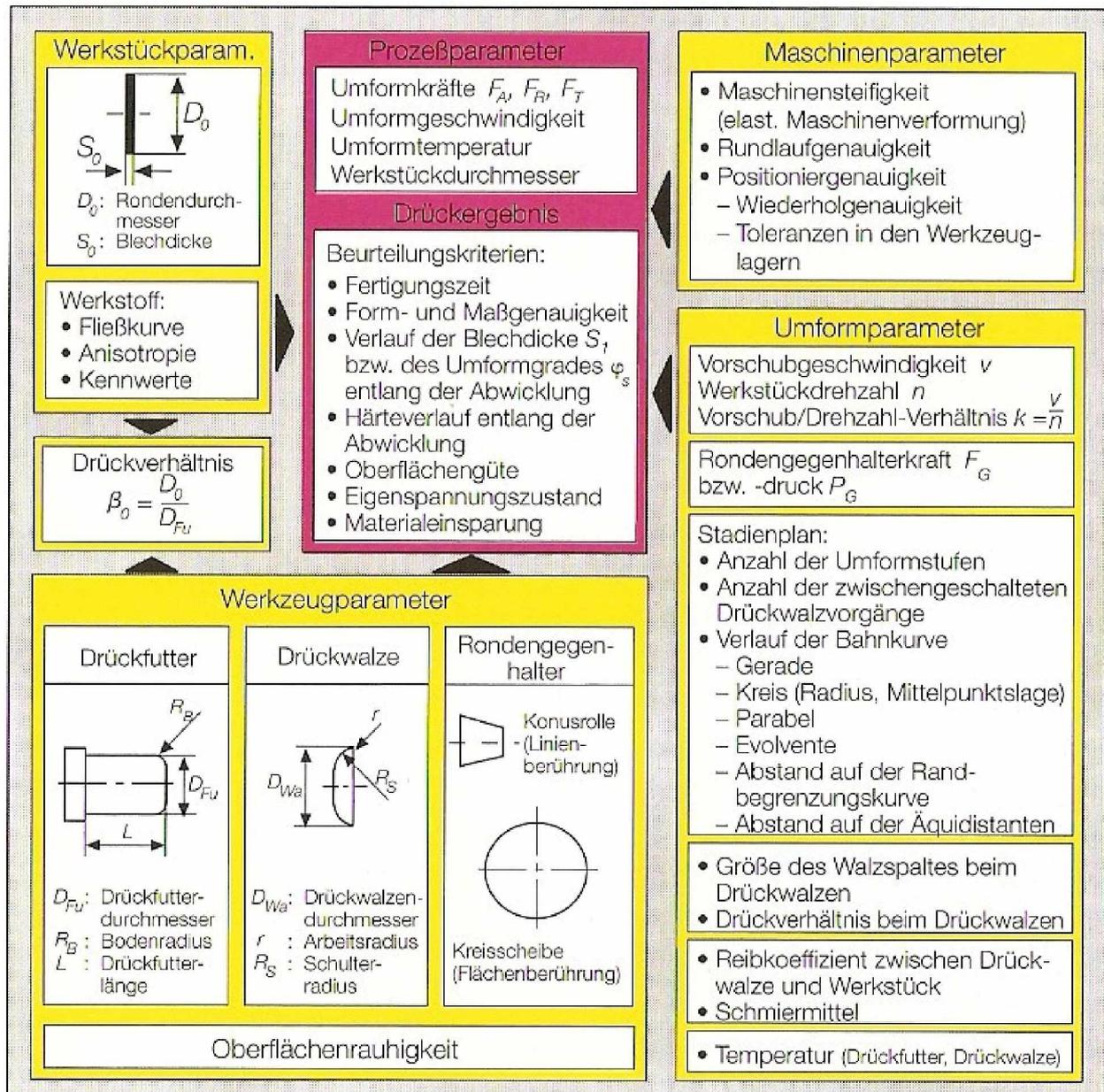


Abb. 2.11: Parameterübersicht für das Fertigungsverfahren Drücken [19]

Werkzeugweg

Im Mittelpunkt des Drückens steht das Problem, Werkstoffbereiche der Ronde hin zu kleineren Durchmessern umzuformen, bis der durch das Drückfutter vorgegebene Durchmesser erreicht wird. Das ist nur durch tangentielle Druckbeanspruchung des Materials möglich. Der Werkstoff wird infolge dieser Beanspruchung besonders im Randbereich der Ronde gestaucht. Damit bei diesem Stauchprozess die Knickstabilität durch zu hohe Druckbeanspruchung nicht

überschritten wird und es zur Faltenbildung kommt, müssen enge Verfahrensgrenzen eingehalten werden. Die Ronde wird deshalb meist nicht in einem Durchgang, sondern Stufe für Stufe umgeformt [19].

Der Werkzeugweg bzw. der Verlauf der Bahnkurve ist Teil des Stadienplans, in dem auch die Anzahl der Umformstufen festgelegt wird (Abbildung 2.11). Damit der Werkstoff größere Druckbeanspruchungen aushalten kann, wird die Bewegungsbahn des Werkzeuges so gesteuert, dass in den Zwischenstadien gewölbte Konturen entstehen, die eine höhere Formstabilität gegen Ausknicken aufweisen [19]. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Wahl einer konvexen oder zykloidalen Bahnkurve die niedrigsten Umformkräfte bewirkt und die Wanddicke weitestgehend unverändert bleibt. Eine konkave Bahnkurve hingegen bewirkt vergleichsweise hohe Umformkräfte und hohe Radialspannungen im Blech, was ein stärkeres Ausdünnen des Werkstoffes zur Folge hat. Die Wahl der Bahnkurve beeinflusst das Verhältnis maximaler Axialkraft zur maximalen Tangentialkraft, hat aber keinen Einfluss auf das Verhältnis zwischen Tangential- zu Radialkräften. Die Axialkraft ist immer die größte Komponente der Umformkraft [29].

Vorschub/Drehzahl-Verhältnis

Das Vorschub/Drehzahl-Verhältnis ist definiert als das Verhältnis der Werkzeugvorschubgeschwindigkeit zur Antriebsspindeldrehzahl. Solange das Vorschubverhältnis konstant bleibt, hat eine Änderung der Spindeldrehzahl oder der Werkzeugvorschubgeschwindigkeit keinen Einfluss auf die Produktqualität. Ein gewisses Verhältnis sollte dennoch eingehalten werden, denn ein zu hohes Vorschubverhältnis generiert höhere Umformkräfte und die Gefahr der Rissbildung steigt. Ein zu geringes Vorschubverhältnis bewirkt hingegen einen verstärkten Materialfluss nach außen, was die Bearbeitbarkeit erschwert und die Wanddicke verringert [19].

Rollendesign

Um beim Drücken Materialausdünnung wegen zu hoher radialer Zugspannungen und Faltenbildung zu vermeiden, sollte ein Werkzeug mit großem Rollendurchmesser und großem Arbeitsradius verwendet werden. Ein großer Arbeitsradius wirkt sich zudem positiv auf die Oberflächenqualität des Werkstückes aus. Werden aus optischen oder funktionellen Gründen besonders glatte Oberflächen verlangt, so setzt man Rollen aus Spezialkunststoff auf Phenolharzbasis für möglichst weiche Bleche mit maximal 2 mm Ausgangswanddicke ein [19]. Einige gängige Rollenausführungen sind in Abbildung 2.12 dargestellt.

2.5.3 Terminologie der Drückverfahren

Die Bezeichnungen der Drückverfahren variieren in der Industrie und der akademischen Literatur. Bisher wurde kein allgemein gültiges Vokabular für Drückprozesse eingeführt [15]. Der Großteil der verfügbaren Literatur zum Thema Drücken stammt aus dem englischen Sprachraum. Die darin verwendeten Ausdrücke und gängige Alternativbezeichnungen in Industrie und Literatur sind Tabelle 2 samt Kurzbeschreibung zu entnehmen.

Tab. 2: Terminologie der Drückverfahren [15]

Bezeichnung	Alternativen	Beschreibung
Conventional spinning (Drücken)	Multi-pass spinning, deep-drawing spinning, spinning, simple spinning (spinning in a single pass)	Drückprozess, bei dem ein ebenes Blech in eine gewünschte axialsymmetrische Form gebracht wird, ohne dabei die Wandstärke zu ändern und eine absichtliche Durchmesserreduktion über die gesamte Länge oder in spezifischen Bereichen erfolgt.
Shear spinning (Drückwalzen)	Shear forming, flow forming, shear/flow turning, power spinning, hydrodynamic spinning	Drückprozess, bei dem ein ebenes Blech mit einem Rollenwerkzeug in eine axialsymmetrische Form mit gewünschter Dickenverteilung gebracht wird. Die Blechdicke wird absichtlich auf die gewünschte Stärke reduziert, der Durchmesser der Teiles bleibt dabei konstant.
Mandrel	Chuck	Steifes axialsymmetrisches Werkzeug mit dem Profil des Fertigteiles. Stützt das Blech während der Deformation.
Roller	-	Steifes Rollenwerkzeug, mit dem das Blech über den Stützdorn geformt wird.
Tailstock	-	Kreisscheibe, die das Blech gegen den Stützdorn klemmt. Eben oder gekrümmt an Stützdorn angepasst. Stützt Blech bei der Umformung.
Roller feed rate	Feed rate	Vorschubgeschwindigkeit des Rollenwerkzeuges in mm/s
Mandrel speed	Rotational speed	Drehzahl des Stützdornes in min^{-1}
Feed ratio	Feed per rotation	Verhältnis von Werkzeugvorschubgeschwindigkeit zu Stützdorndrehzahl in mm/Umdrehung
Wall angle	Half included angle, shear angle	Winkel zwischen der Drehachse und der Wand des umgeformten Teiles.
Roller nose radius	corner radius, edge radius	Übergangsradius zwischen den parallelen Flächen und der äußeren Oberfläche des Rollenwerkzeuges.
Spinnability	-	Maximale prozentuelle Durchmesserreduktion, die ein Material vor dem Bruch beim Drückwalzen ertragen kann.
Spinning ratio	Forming ratio	Verhältnis zwischen Anfangs- und Enddurchmesser beim konventionellen Drücken.
Over-spinning	Over-reduction	Drücken auf eine geringere Dicke als nach dem Sinussatz erwartet.
Under-spinning	Under-reduction	Drücken auf eine größere Dicke als nach dem Sinussatz erwartet.

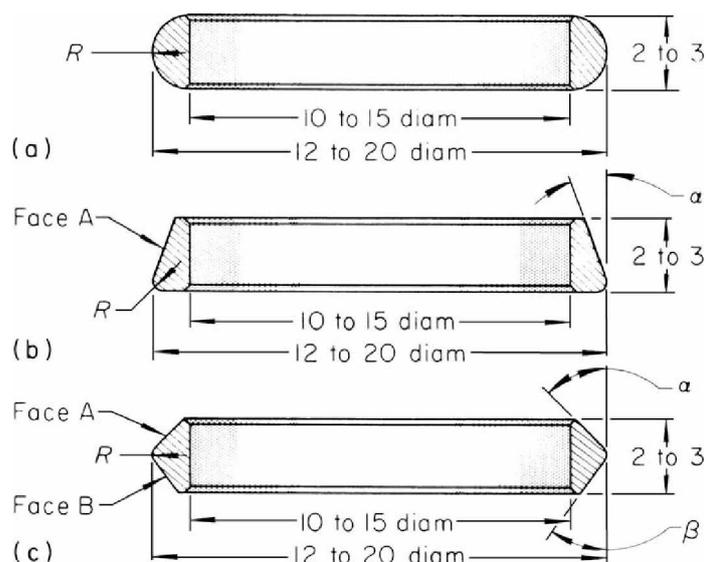


Abb. 2.12: Typische Rollendesigns zum Drücken von Kegeln und Schalen. (a) Vollradius-Rolle. (b) Profilierte Rolle zum Eckenformen. (c) Rolle zur Reduktion der Wanddicke. Abmessungen in Inch [2]

2.5.4 Die Entwicklung der Drückmaschinen

Das Fertigungsverfahren Drücken ist ein gutes Beispiel, um zu zeigen, wie sich der Prozess im Laufe der Zeit mit neuen technischen Möglichkeiten weiterentwickelt hat. Bereits im Mittelalter wurde auf Drückmaschinen aus Holz mit einem stockähnlichen Werkzeug gearbeitet. Angetrieben wurde der Stützdorn mit dem Werkstück durch ein großes Schwungrad, bedient von einer zweiten Person, wie in Abbildung 2.13.

Auf den ersten elektrisch betriebenen Drückmaschinen wurde das rotierende Werkstück mit Hilfe eines Formwerkzeugs aus Stahl von Hand umgeformt. Dieses Werkzeug wurde um Stifte geschwenkt und entlang geschoben, die entlang einer Reihe von Löchern auf einem Werkzeugträger (T-rest) versetzt werden konnten, um die Kraft des Bedieners bestmöglich auf das Werkstück zu übertragen. Um Faltenbildung bei großen Werkstückdurchmessern zu vermeiden, wurde von der Rückseite ein weiterer Stock gegen das Werkstück gedrückt. Später wurde eine komplexere Hebeltechnik mit einem Rollenwerkzeug entwickelt, um größere und dickere Bleche manuell bearbeiten zu können (Abbildung 2.14). Die Bewegungen ließen sich beliebig ausbilden, Grenzen waren alleine durch die Muskelkraft gesetzt.

Richtig leistungsfähig wurden die Drückmaschinen erst mit der Entwicklung der Automatisierungstechnik. Erste Maschinen für die Massenproduktion arbeiteten noch mit Nachformsteuerungen, die aber den Bewegungsspielraum wegen ihrer direkten Abhängigkeit von Kopierschablonen einengten. Die Weiterentwicklungen der Steuerungen hatte das Ziel, wegen der hohen Komplexität des Umformvorganges wieder das handwerkliche Können mit in den Prozess einfließen zu lassen. Aus dieser Forderung resultierten Playbacksteuerungen in Kombination mit CNC-Steuerungen, die auch heute noch den Stand der Technik bei den Drückmaschinen darstellen [19]. Bei Playbacksteuerungen wird der Werkzeugweg von einem erfahrenen Metalldrucker manuell vorgegeben und von der Steuerung aufgezeichnet. Der optimierte aufgezeichnete Prozess wird anschließend in Maschinencode umgesetzt und die Massenfertigung erfolgt dann mit diesem CNC-Programm vollautomatisch.



Abb. 2.13: Drückmaschine aus Holz mit manuellem Schwungradantrieb [30]

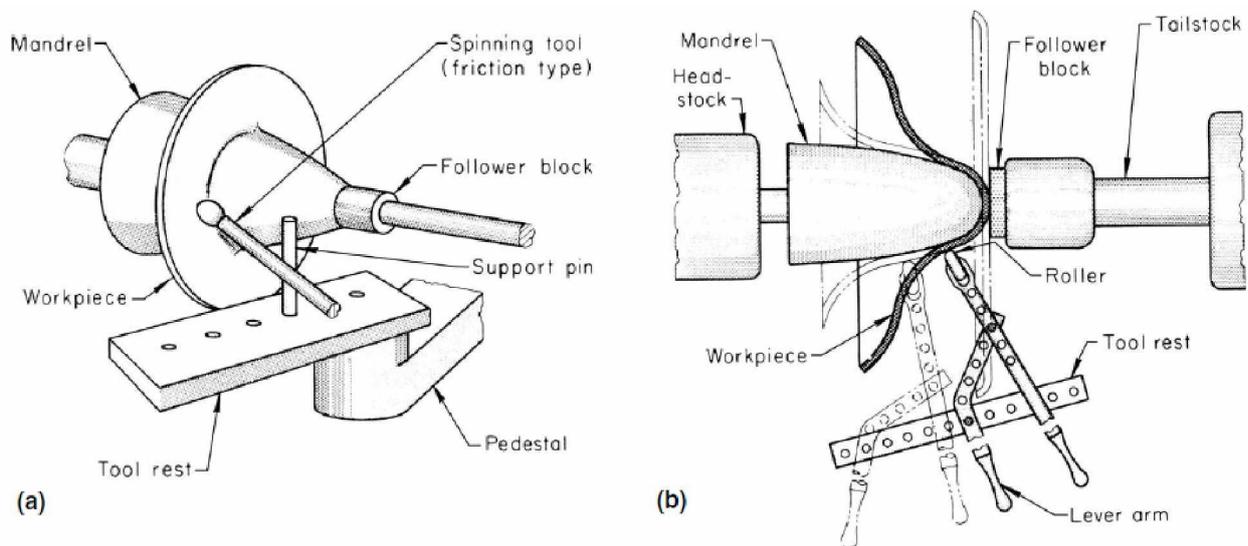


Abb. 2.14: Typische Anordnungen für das manuelle Drücken mit einer Drehmaschine. (a) Simpler Aufbau mit einem reibungsbehafteten Drückwerkzeug (b) Komplexere Anordnung mit Hebeln und einem Rollenwerkzeug [2]

Neue Spinning Center wie in Abbildung 2.15 bieten neben der Playback-CNC-Steuerung noch einige programmierbare und elektrisch verstellbare Zusatzeinheiten für kombinierte Fertigung. Zu diesen gehören Rondenzentriervorrichtungen, Schälmesser und zusätzliche Bearbeitungseinheiten. Werkzeugrevolver und Werkzeugwechseleinrichtungen erhöhen die Flexibilität zusätzlich und verkürzen Rüstzeiten auf ein Minimum. Maschinen für besonders große Werkstückabmessungen haben kein Maschinenbett sondern werden mit Zusatzeinrichtungen auf einem Plattenfeld angeordnet (Abbildung 2.16).



Abb. 2.15: Spinning Center Leifeld-SC-310 mit Playback-CNC-Steuerung (Quelle: Leifeld Metal Spinning AG)

2.5.5 Fehler beim Drücken

Abbildung 2.17 zeigt die typischen Defekte, die beim Drücken auftreten können. Am häufigsten tritt dabei die Faltenbildung auf. Um die Blechronde vom Ausgangsdurchmesser auf den Durchmesser des Drückfutters ohne Faltenbildung zu reduzieren, muss eine Kombination von radialen Zugspannungen und tangentialen Druckspannungen allmählich in das Material eingebracht werden. Das wird üblicherweise durch mehrere Umformschritte erreicht, um das Werkstück faltenfrei herstellen zu können (siehe dazu Kapitel 2.5.2). Zu hohe Spannungen in beiden Richtungen sind unerwünscht, da sie die Bildung von Falten und umlaufenden Rissen begünstigen. Die Neigung zur Faltenbildung hängt grundsätzlich vom Verhältnis des jeweiligen Rondenüberstands (nicht eingespannter, umformbarer Bereich der Ronde) zur Blechdicke ab. Materialkennwerte wie die Festigkeit haben ebenfalls Einfluss auf die tangentialen Grenzlast. Die Rissbildung in Umfangsrichtung tritt hauptsächlich in Drückfutternähe infolge zu großer Zugbeanspruchung auf. Radiale Risse sind ein seltener auftretendes Problem, da sie erst auftreten, wenn bereits stärker ausgeprägte Falten weiter mit dem Werkzeug überarbeitet werden. Rondengegenhalter, die von hinten großflächig an das Werkstück angelegt werden, sind eine geeignete Maßnahme um eine beginnende Faltenbildung hinauszuzögern [19].

Xia et. al. (2005) berichteten über einen Einfluss des Vorschub/Drehzahl- und Drückverhältnisses auf die beim Drücken auftretenden Fehlerarten:

- bei hohen Drückverhältnissen treten Einschnürung und Bruch am Rand des Gegenhalters auf



Abb. 2.16: Leifeld-SC-235 in Modulbauweise bis 3,5 m Rondendurchmesser (Quelle: Leifeld Metal Spinning AG)

- niedrige Drückverhältnisse begünstigen die Faltenbildung

Abbildung 2.18 zeigt, dass es im Parameterraum von Vorschub/Drehzahl-Verhältnis und Drückverhältnis einen Bereich gibt, der die Herstellung fehlerfreier Teile ermöglicht. Es gilt also einen Kompromiss zwischen diesen beiden Parametern zu finden – ein hohes Drückverhältnis erfordert ein niedriges Vorschub/Drehzahl-Verhältnis und umgekehrt [15].

3 Material und Methode

In diesem Kapitel werden die für die Konstruktion der Modelldrückmaschine benötigten Komponenten beschrieben. Dazu gehören eine Drehmaschine, LEGO Mindstorms Education EV3 Bausätze und die zugehörige LEGO Mindstorms Education EV3 Software.

3.1 Drehmaschine

Die Drehmaschine in Abbildung 3.1 ist eine handelsübliche Präzisions-Drehmaschine, die üblicherweise für den Modellbau und Feinmechanik verwendet wird. Über die Leitspindel kann der Bettschlitten mit dem Vorschubgetriebe angetrieben werden. Die Zustellung der Werkzeugschlitten erfolgt manuell mit Handrädern. Die Wahl fiel auf eine Standarddrehmaschine, da eine spezielle Drück- bzw. Drechselbank weniger universell einsetzbar ist und die Drehmaschine eventuell auch für nachfolgende Projekte verwendet werden sollte. Die

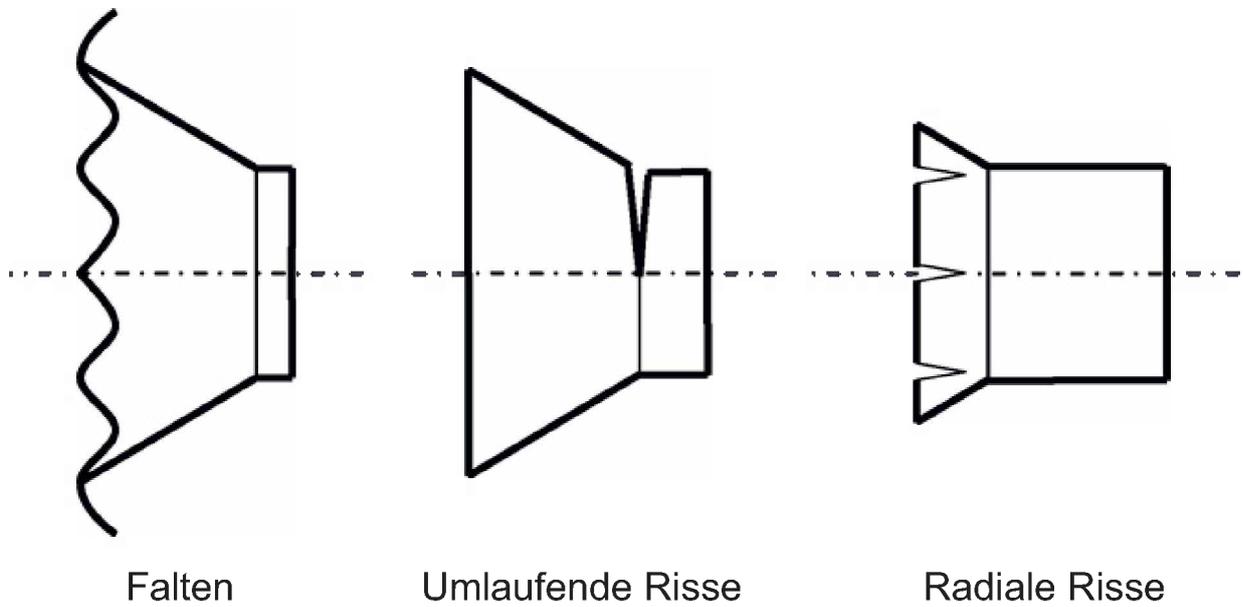


Abb. 2.17: Typische Fehlerarten beim konventionellen Drücken (verändert nach [15])

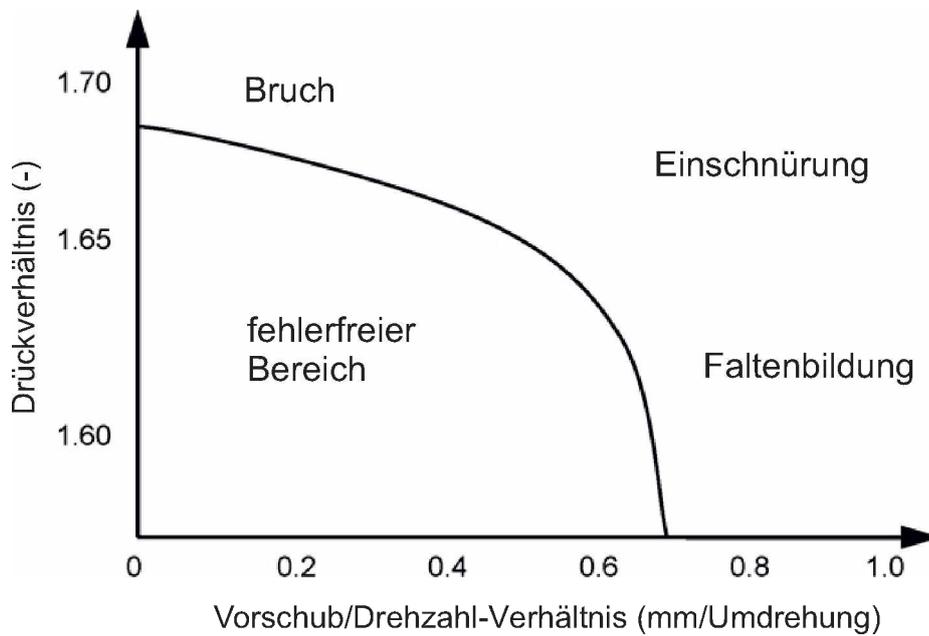


Abb. 2.18: Drückverhältnis vs. Vorschub/Drehzahl-Verhältnis für 2 mm dicken Baustahl (verändert nach [31])

Maschine verfügt über eine stufenlose Drehzahlverstellung für die Hauptspindel und ist mit einer Motorleistung von 250 W für die Aufgabe ausreichend dimensioniert. Die technischen Daten der Erba Compact C300 sind in Tabelle 3 angeführt.

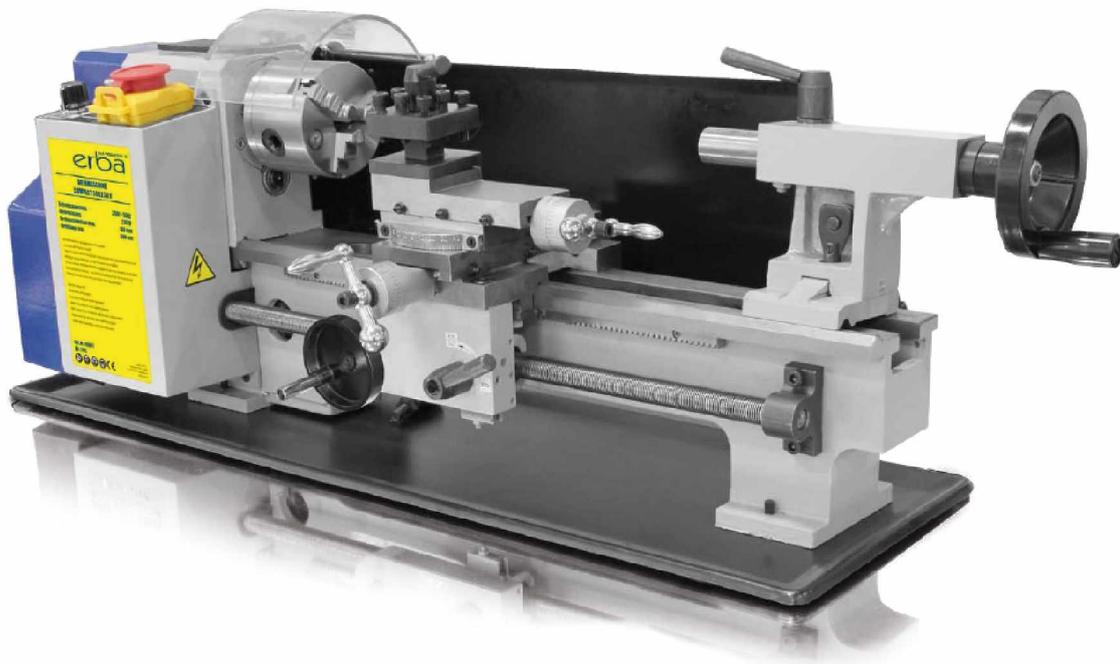


Abb. 3.1: Erba Compact C300 (Quelle: Erba)

Tab. 3: Technische Daten Erba Compact C300

Produkt	Erba Compact C300
Betriebsspannung	230 V 50 Hz
Max. Bearbeitungsdurchmesser über Bett	180 mm
Spitzenweite	300 mm
Spindeldurchlass Spindelstock/Reitstock	20 mm
Morsekegel der Arbeitsspindel	MK3
Morsekegel der Reitstockspindel	MK2
Spindelgeschwindigkeiten	100–1100/200–2500 min ⁻¹
Meißelschaftquerschnitt	8x8 mm
Motorleistung	250 W
Schutzklasse	IP20
Gewicht	39 kg

3.2 LEGO Mindstorms Education EV3

Die Wahl der Automatisierungslösung für die Modelldrückmaschine fiel auf LEGO Mindstorms EV3. Das System ist dem LEGO-Prinzip entsprechend höchst flexibel und kann rasch ohne eine lange Einarbeitungsphase verwendet werden. Außerdem verfügt der EV3-Stein über zahlreiche Kommunikationsmöglichkeiten, die dem Anspruch von Industrie 4.0

nach der Integration von IKT-Technologien in die Produktion gerecht werden. Die Leistung der 9 V Motoren sollte für die Umformung weicher Metalle ausreichend sein.

LEGO Mindstorms Education EV3 ist die Weiterentwicklung des bekannten Roboterbausatzes LEGO Mindstorm NXT. Die Education EV3 Version wird seit August 2013 ausgeliefert und unterscheidet sich von der später in den Handel gebrachten Home Edition hinsichtlich der enthaltenen Bauteile und der Software. Die für diese Arbeit verwendeten LEGO-Produkte und Zubehör sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Tab. 4: Verwendete LEGO Mindstorms Produkte

Produktnummer	Produktname
45544	LEGO Mindstorms Education EV3 Basis-Set
45560	LEGO Mindstorms Education EV3 Ergänzungsset
2000045	LEGO Mindstorms Education EV3 Software
45501	LEGO Mindstorms Education EV3 Akkumodul
8887	10 V Gleichstrom-Ladegerät

3.2.1 LEGO Mindstorms Intelligenter EV3-Stein

Der programmierbare, intelligente Stein ist das Herzstück von LEGO Mindstorms Education EV3. Er verfügt über ein 6-Tasten Interface, das die Hintergrundbeleuchtung in Abhängigkeit von dessen Aktivität ändert. Programmier- und Dataloggingfunktionen können direkt am Stein ausgeführt werden. Der Stein verfügt über vier Eingänge und vier Ausgänge, USB-Port und miniSD-Kartenleser. Die Kommunikation mit anderen Geräten kann über USB, Bluetooth oder über einen WiFi-Dongle erfolgen und auch Android und iOS werden unterstützt. In Abbildung 3.2 ist der intelligente EV3-Stein mit einer Kurzbeschreibung der Interface-Tasten zu sehen und Tabelle 5 enthält die technischen Daten des EV3-Steins.

3.2.2 LEGO Mindstorms EV3-Servomotoren

An der Drehmaschine werden die in Abbildung 3.3 dargestellten großen EV3-Servomotoren als Antriebsmotoren für die Schlittenverstellung verbaut. Der große EV3-Servomotor verfügt über einen Rotationssensor mit einer Messgenauigkeit von 1 Grad, wodurch er für genaue Positionieraufgaben geeignet ist. Dadurch lassen sich auch zwei Motoren synchron betreiben. Der Motor verfügt auch über einige Löcher und Kreuzlöcher, mit deren Hilfe schnell stabile Verbindungen für Drehmomentstützen und Getriebeübersetzungen angebaut werden können. Der mittlere EV3-Servomotor (Abbildung 3.4) reagiert schneller und baut kleiner, verfügt aber über ein sehr geringes Drehmoment und ist deshalb für die Aufgabe nicht geeignet. Die technischen Daten der EV3-Servomotoren sind in den Tabellen 6 und 7 angeführt.

3.2.3 LEGO Mindstorms EV3-Farbsensor

Beim Farbsensor in Abbildung 3.5 handelt es sich um einen digitalen Sensor, der die Farbe oder die Stärke des Lichts erkennen kann. Der Sensor arbeitet mit einer Abtastrate von 1 kHz und kann in drei verschiedenen Modi betrieben werden:

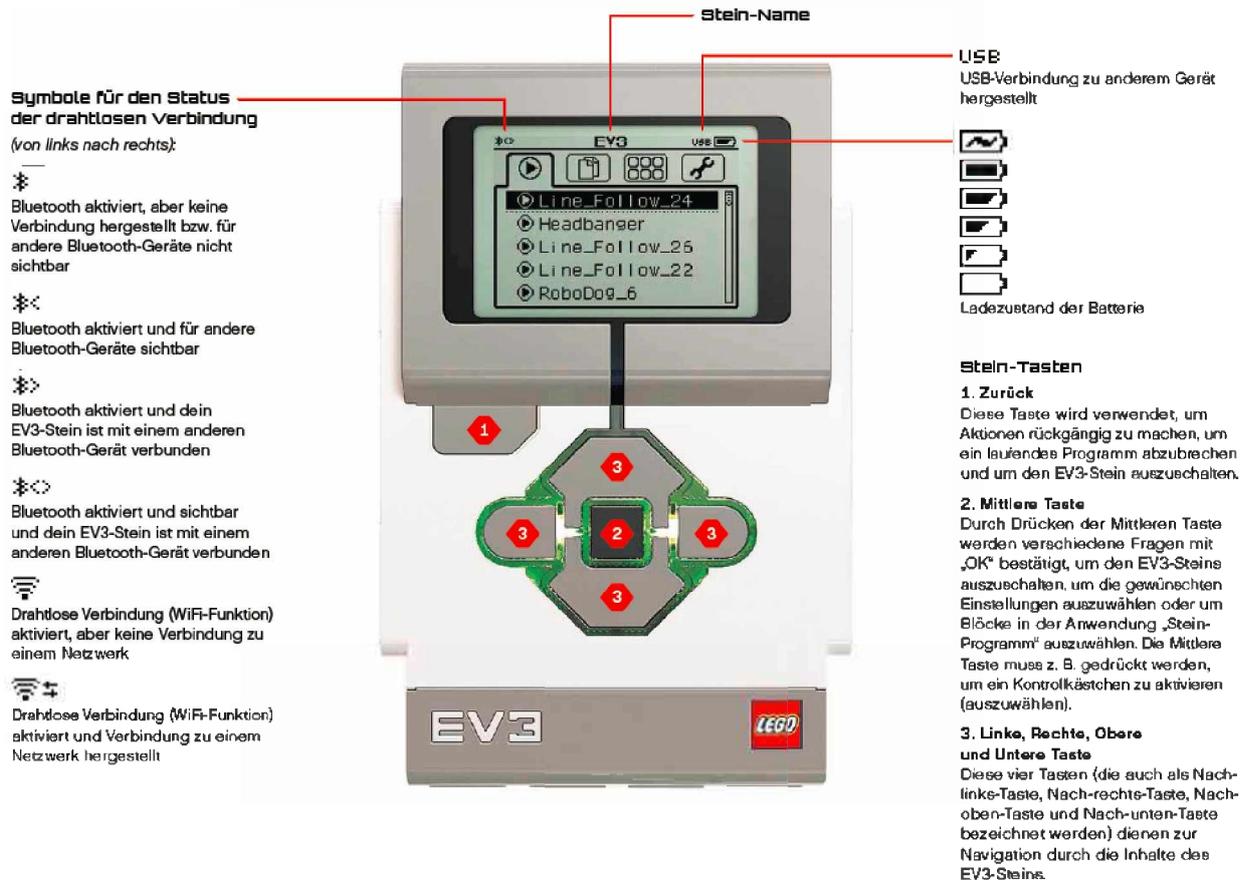


Abb. 3.2: LEGO Mindstorms Intelligenter EV3-Stein



Abb. 3.3: LEGO Mindstorms Großer EV3-Servomotor (Quelle: LEGO)

Tab. 5: Technische Daten LEGO Mindstorms Intelligenter EV3-Stein

Produkt	Intelligenter EV3-Stein
Prozessor	ARM9 300 MHz
Flash-Speicher	16 MB Flash
RAM	64 MB RAM
Betriebssystem	Linux-based
Display	LCD Matrix, Schwarz-Weiß 178 x 128 Pixel
Motorports	4 Ausgänge
Sensorports	4 Eingänge analog digital 460 Kbit/s
Sensor Abtastrate	max. 1000 Messungen/Sekunde
Stecker	RJ12
Kommunikation mit Host-PC (USB 2.0)	High speed (480 Mbit/s)
USB 2.0-Host	Daisy-chain (3 Levels) WiFi-Dongle USB-Stick
miniSD Karte	Unterstützt SDHC bis max. 32 GB
Verbindung zu Smart Devices	iOS Android
Bedienfeld	6 Tasten Beleuchtungsfunktion drei Farben für Statusanzeige
Kommunikation	Bluetooth 2.1
Stromversorgung	Lithium-Ionen-Akku oder 6 AA Batterien

Tab. 6: Technische Daten LEGO Mindstorms Großer EV3-Servomotor

Produkt	Großer EV3-Servomotor
Messgenauigkeit Rotationssensor	1 Grad
Drehzahl	max. 160 bis 170 U/min
Nennmoment	0,21 Nm
Anfahrmoment	0,42 Nm
Gewicht	76 g

Tab. 7: Technische Daten LEGO Mindstorms Mittlerer EV3-Servomotor

Produkt	Mittlerer EV3-Servomotor
Messgenauigkeit Rotationssensor	1 Grad
Drehzahl	max. 240 bis 250 U/min
Nennmoment	0,08 Nm
Anfahrmoment	0,12 Nm
Gewicht	36 g



Abb. 3.4: LEGO Mindstorms Mittlerer EV3-Servomotor (Quelle: LEGO)

Farbmodus: Der Farbsensor kann sieben Farben unterscheiden: Schwarz, Blau, Grün, Gelb, Rot, Weiß, Braun sowie „Keine Farbe“.

„Stärke des reflektierten Lichts“: Der Farbsensor misst die Stärke des reflektierten Lichts, das von einer Rotlichtlampe ausgestrahlt und dann von Objekten reflektiert wird. Der Sensor arbeitet mit einer Skala von 0 (sehr dunkel) bis 100 (sehr hell).

„Stärke des Umgebungslichts“: Der Farbsensor misst die Stärke des Lichts, das aus der Umgebung durch das Fenster des Sensors dringt. Hierbei könnte es sich um Sonnenstrahlen oder den Lichtkegel einer Taschenlampe handeln. Der Sensor arbeitet mit einer Skala von 0 (sehr dunkel) bis 100 (sehr hell).



Abb. 3.5: LEGO Mindstorms EV3-Farbsensor (Quelle: LEGO)

3.2.4 LEGO Mindstorms EV3-Berührungssensor

Der analoge EV3-Berührungssensor in Abbildung 3.6 ist ein einfacher analoger Sensor, der auf Be- oder Entlastung des Tasters an der Front reagiert. Der Berührungssensor kann drei Zustände unterscheiden: gedrückt, ausgelassen und angestoßen (gedrückt und wieder ausgelassen). Zudem erkennt er einmaliges Drücken oder zählt, wie oft die Taste gedrückt wurde. Für die Drückmaschine werden zwei Berührungssensoren als Endschalter für die Referenzfahrt verwendet.



Abb. 3.6: LEGO Mindstorms EV3-Berührungssensor (Quelle: LEGO)

3.2.5 LEGO Mindstorms Education EV3-Software

Die EV3-Software für die Programmierung und Messwerterfassung basiert auf LabVIEW von National Instruments. LabVIEW ist eine führende Systemdesignsoftware, die von Wissenschaftlern und Ingenieuren in aller Welt verwendet wird. Die EV3-Software wurde speziell auf den Unterrichtseinsatz zugeschnitten und setzt auf intuitives Softwaredesign, das auch von Schülerinnen und Schülern ohne Programmiererfahrung leicht erlernbar sein soll.

Beim Programmieren mit der EV3-Software werden Symbole per Drag & Drop zu einer Befehlssequenz angeordnet (Abbildung 3.7). Mit dem Inhaltseditor kann die Arbeit direkt dokumentiert werden. Die in die Software integrierte Messwerterfassungsfunktion ermöglicht rasch das Erfassen, Anzeigen, Analysieren und Verarbeiten von Sensordaten und die Darstellung in interaktiven Graphiken.

Im Anschluss sind einige wichtige Programmblöcke für das Steuerungsprogramm der Drückmaschine beschrieben, das in Kapitel 4.3.3 detailliert erläutert wird. Weitere Informationen sind der Hilfe der EV3-Software zu entnehmen.

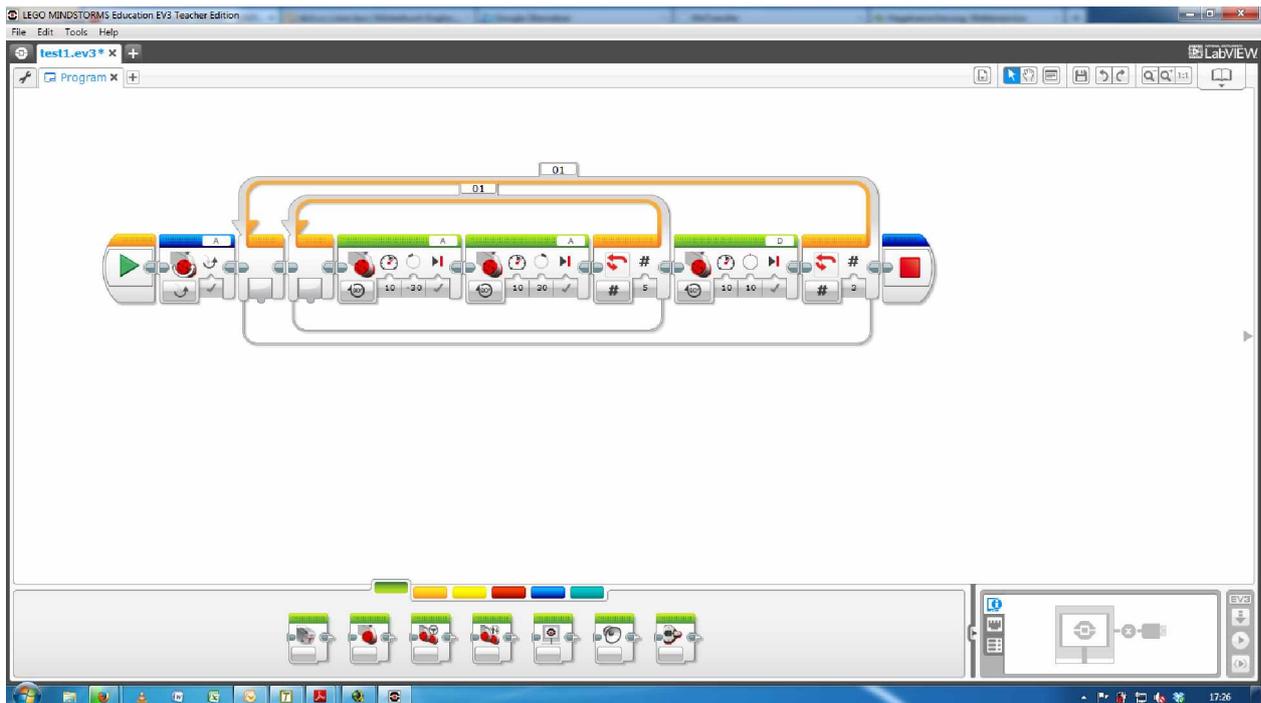


Abb. 3.7: Arbeitsoberfläche der LEGO Mindstorms Education EV3-Software (Quelle: LEGO)

Wait Block

Der Wait Block hält die Programmsequenz so lange an, bis die eingestellte Bedingung erfüllt wird. Je nach Einstellung wird auf die Betätigung eines Buttons, eine Zustandsänderung an einem Sensor oder den Eingang einer bestimmten Nachricht gewartet (Abbildung 3.8). Es kann auch ein einfacher Timer ablaufen, bevor das Programm weiter läuft.

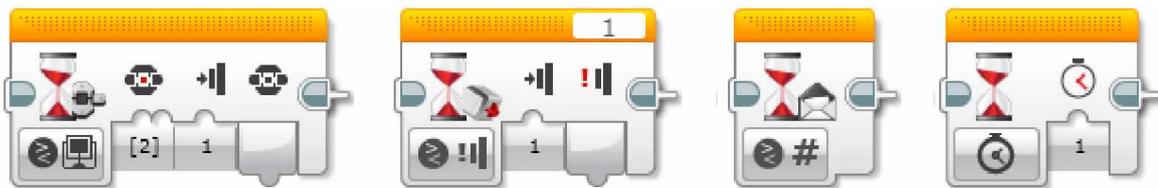


Abb. 3.8: Wait Programmblock. 1 Buttonbetätigung, 2 Tasterbetätigung, 3 Nachrichteneingang, 4 Timer (Quelle: LEGO)

Variablen Block

Mit dem Variablen Block können Variablen geschrieben und ausgelesen werden (Abbildung 3.9), die zuvor mit Bezeichnung und Datentyp erstellt wurden. Es werden folgende Datentypen unterstützt: Text, numerisch, logisch und numerische/logische Arrays. Werte können direkt eingegeben oder mit einer Kabelverbindung von anderen Blöcken übertragen werden.

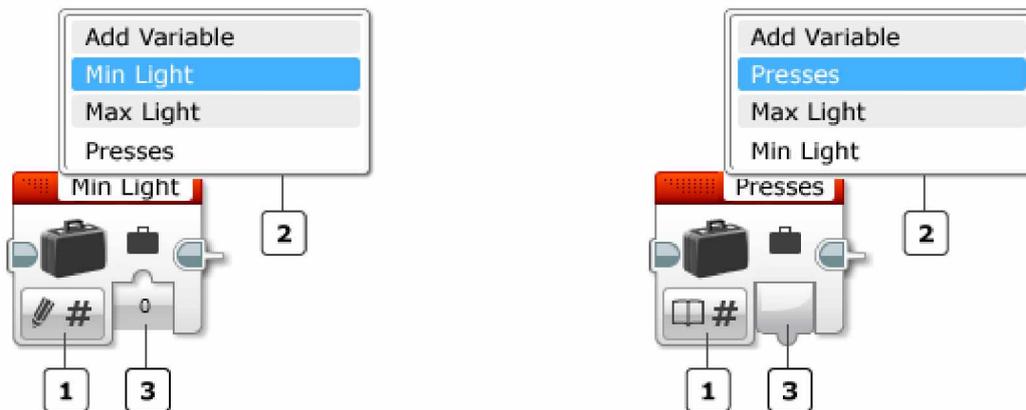


Abb. 3.9: Schreiben und Auslesen von Variablen. 1 Mode Selector, 2 Variablenauswahl, 3 Werteingabe/-ausgabe (Quelle: LEGO)

Sensor Block

Sensorblöcke lesen den Zustand des am gewählten Port angeschlossenen Sensors aus und ermöglichen die Speicherung und Weiterverarbeitung der Sensordaten. Sensorblöcke gibt es für alle verfügbaren Sensoren sowie die Buttons am EV3-Stein. Die Inputs und Outputs unterscheiden sich je nach Sensor und ausgewähltem Mode. Der in Abbildung 3.10 dargestellte Sensorblock vergleicht beispielsweise den Zustand des Tasters (gedrückt oder losgelassen) an Port 1 mit dem eingestellten Zustand und gibt das Ergebnis am Output aus.

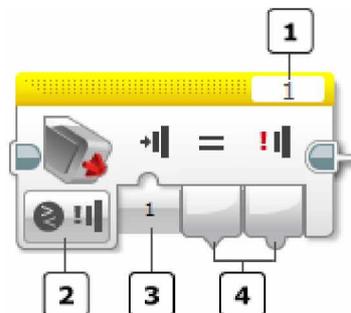


Abb. 3.10: Move Tank Programmblock. 1 Port Selector, 2 Mode Selector, 3 Inputs, 4 Outputs (Quelle: LEGO)

Loop und Switch Block

Schleifen und Switch-Blöcke (Abbildung 3.11) strukturieren den Programmablauf. Programmsequenzen in Schleifen werden für eine bestimmte Anzahl von Durchgängen, unendlich lange oder bis eine Abbruchbedingung erfüllt wird, durchlaufen. Der Start einer Schleife kann auch an Bedingungen geknüpft werden. Switch-Strukturen enthalten zwei oder mehrere Programmsequenzen (Cases). Ein Test am Anfang (z. B. ob ein Taster betätigt ist oder nicht) des Switch-Blockes entscheidet, welcher Case ausgeführt wird. Bei einem Switch-Durchlauf wird nur ein Case ausgeführt.

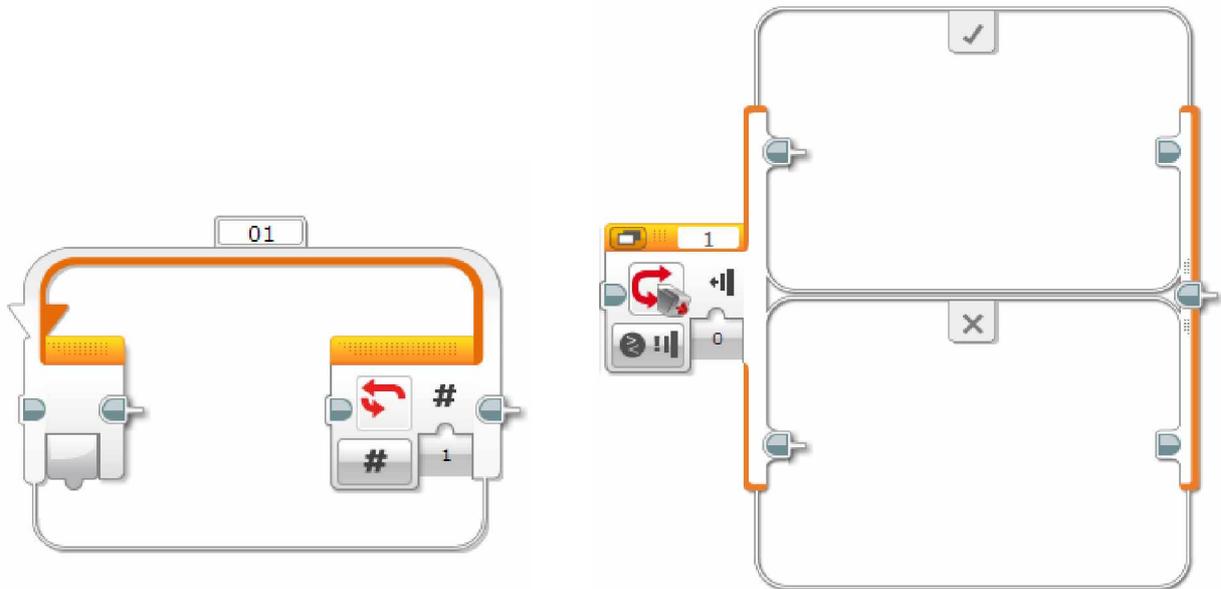


Abb. 3.11: Loop und Switch-Programmblock (Quelle: LEGO)

Move Tank Block

Zur Steuerung der EV3-Motoren wird der „Move Tank“ Programmblock genutzt (Abbildung 3.12). Dieser ermöglicht den synchronen Betrieb von zwei Motoren, was eine Voraussetzung für die Schlittenantriebe mit je einem Doppelantrieb ist. Im Port Selector werden die Motoren ausgewählt, die miteinander gekoppelt werden sollen. Im Block in Abbildung 3.12 werden die Motoren an den Ports B und C synchron betrieben. Am Mode Selector wird ausgewählt, ob der Motor dauerhaft oder für eine bestimmte Anzahl von Umdrehungen in Betrieb gehen soll.

Bei den Inputs wird zunächst die Leistung (0–100) der beiden Motoren eingestellt. Wird ein Leistungswert positiv und der zweite negativ eingestellt, laufen die Motoren gegensinnig. Weitere Inputs sind noch die Anzahl der Umdrehungen, die zurückgelegt werden sollen und ob der Motor an der Endposition gebremst werden soll oder nicht. Für eine exakte Positionierung muss diese Option gesetzt werden.

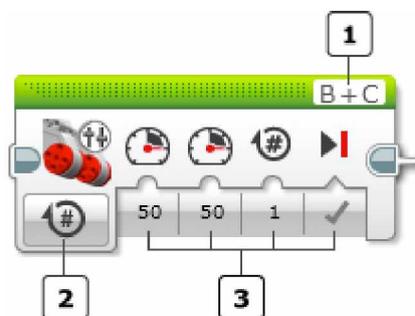


Abb. 3.12: Move Tank Programmblock. 1 Port Selector, 2 Mode Selector, 3 Inputs (Quelle: LEGO)

Messaging Block

Der Messaging Block in Abbildung 3.13 wird verwendet, um Nachrichten zwischen EV3-Steinen über Bluetooth auszutauschen. Dafür muss zuvor eine Bluetooth Verbindung erstellt werden. Für die Kommunikation zwischen dem EV3-Stein und einem PC muss der EV3-Messenger aus Kapitel 3.2.6 verwendet werden. Dessen Funktion wird in Kapitel 4.3.3 im Detail erläutert.

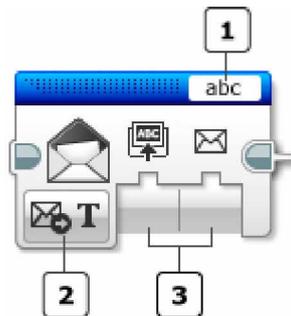


Abb. 3.13: Messaging Programmblock. 1 Port Selector, 2 Mode Selector, 3 Inputs (Quelle: LEGO)

Display Block

Um Textmeldungen am Display auszugeben, gibt es den Display Block in Abbildung 3.14. Im Mode „Text - Raster“ wird der Text in Zeilen und Spalten angeordnet und im „Block Textfeld“ wird der auszugebende Text eingegeben. Mit den Inputs „x“ und „y“ wird die Anfangszeile und -spalte des Textes festgelegt. Die Positionierung ist in der Displayvorschau ersichtlich.

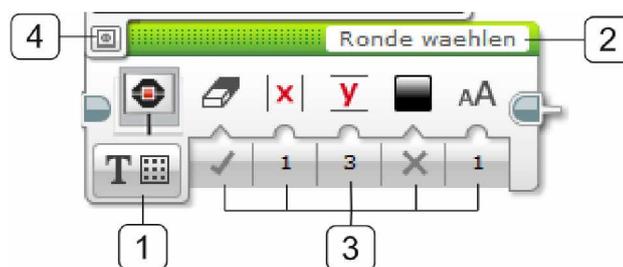


Abb. 3.14: Display Programmblock. 1 Mode Selector, 2 Block Textfeld, 3 Inputs 4 Displayvorschau (Quelle: LEGO)

3.2.6 EV3 Messenger 1.1

Der EV3-Stein kann über eine Bluetooth Verbindung Nachrichten senden und empfangen. Aktuell ist die Kommunikation aber nur zwischen EV3-Steinen möglich d.h. es können nur

EV3-Steine untereinander Nachrichten austauschen, wenn sie Daisy-chained oder über Bluetooth miteinander gekoppelt sind. Ein Master-Stein kann bis zu sieben Slave-Steine ankopeln. Die Freigabe des Bluetooth Protokolls für die Kommunikation mit anderen Geräten soll laut LEGO zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen.

Um die Kommunikation zwischen EV3-Stein und PC über Bluetooth zu ermöglichen, wird das C# Projekt EV3-Messenger 1.1 von Joeri van Belle (<http://ev3messenger.codeplex.com/>) verwendet. Über das in Abbildung 3.15 dargestellte User Interface können nach Herstellung einer Bluetooth Verbindung zwischen EV3-Stein und PC einfach Nachrichten gesendet und empfangen werden.

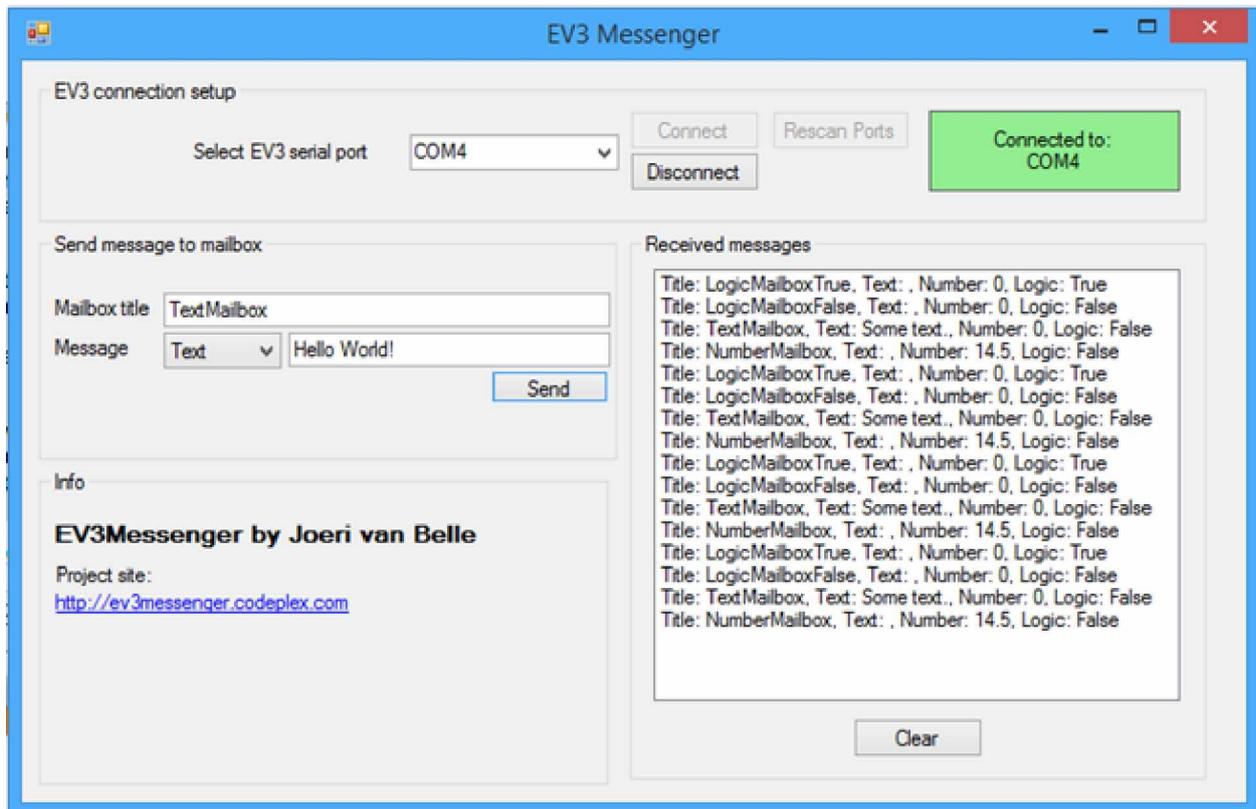


Abb. 3.15: EV3-Messenger 1.1 (Quelle: Joeri van Belle)

3.3 Versuchsaufbau

In diesem Kapitel wird zunächst der Aufbau der in Kapitel 3.2 angeführten LEGO-Komponenten auf die zunächst manuell betriebene Drehmaschine beschrieben. Im Anschluss sind die produzierten Drückfutter und Drückwerkzeuge angeführt.

3.3.1 Werkzeugschlitzenantriebe

Zunächst stellte sich die Frage, ob die Leistung der EV3-Servomotoren ausreichen würde, um die Spindeln der Werkzeugschlitzen unter der Wirkung der Umformkräfte anzutreiben,

oder ob ein separater Aufbau für die Werkzeugsteuerung nötig wäre und die Drehmaschine nur für den Antrieb des Werkstückes verwendet werden könnte. Ein weiteres Problem war, eine möglichst stabile Verbindung zwischen dem LEGO-Aufbau und der Drehmaschine herzustellen.

Nach einigen Versuchen gelang es letztendlich, das LEGO für den Antrieb von Quer- und Oberschlitten auf der Drehmaschine zu montieren. Als sehr nützliches Bauteil erwies sich dabei der neue LEGO Mini-Drehkranz in Abbildung 3.16, durch dessen Ausnehmung in der Mitte eine M4 Gewindestange passt.

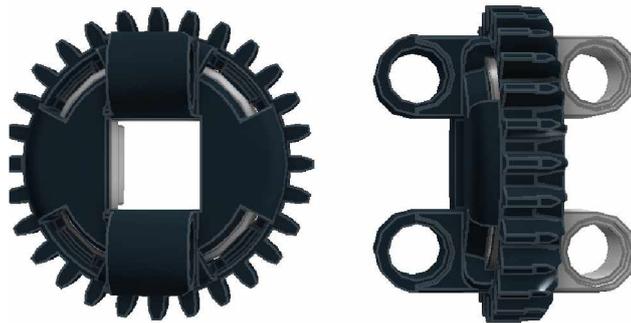


Abb. 3.16: LEGO Mini-Drehkranz

Die Handräder zur Schlittenverstellung wurden abgeschraubt und statt dessen Gewindestangen M4 in die Spindeln eingeschraubt und mit Sechskantmuttern festgeklemmt. Zwei weitere Sechskantmuttern wurden auf die Breite des Zwischenraumes der Mini-Drehkränze abgeschliffen und diese mit Kontermuttern an der Position der Mini-Drehkränze auf den Gewindestangen gesichert (Abbildung 3.17). Am Oberschlitten musste die Blattfeder, die den Skalenring auf der Spindel und deren axiale Lage sicherte, entfernt werden. Statt dessen wurden LEGO-Elemente mit Scheiben positioniert, um ein Ausdrehen der Spindel aus dem Schlitten zu verhindern und den LEGO-Aufbau stirnseitig gegen den Schlitten abzustützen (Abbildung 3.17 rechts).

Ausgehend von den Mini-Drehkränzen als Verbindungs- und Antriebselemente wurden dann steife LEGO-Rahmen konstruiert, die die Antriebsmotoren mit den Untersetzungsgetrieben aufnehmen. An diese Rahmen wurden weitere LEGO Stütz- und Klemmelemente angebaut, um die Trägerrahmen mit den Werkzeugschlitten zu verbinden und das Antriebsdrehmoment abzustützen.

Für die erste Antriebsversion wurde jeweils ein großer EV3-Servomotor pro Antriebsachse verwendet, wie in Abbildung 3.18 ersichtlich. Die Schlittenverstellung ohne Betriebsbelastung funktionierte problemlos. Bei den ersten Testläufen mit Blechchondren aus Al 99,5 (Stärken 1 mm und 0,5 mm) erwies sich dieses Konzept aber leider als ungeeignet. Der zusätzliche Widerstand an den Schlittenspindeln durch die Umformkräfte überforderte einerseits die Leistungsfähigkeit der Motoren und andererseits die LEGO Konstruktion selbst. Das zu hohe Drehmoment in der letzten Getriebestufe führte zum Abgleiten und unzulässigen Verformungen an den Zahnrädern.

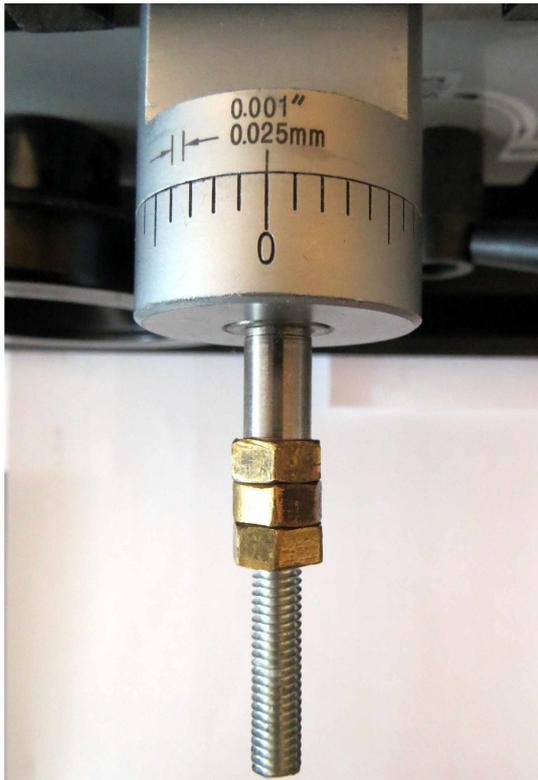


Abb. 3.17: Links: Gewindestange mit Muttern für Querschlittenantrieb, Rechts: Gewindestange mit Kleinteilen und LEGO-Elementen für Oberschlittenantrieb



Abb. 3.18: Erstes Antriebskonzept

Bei der Neukonstruktion wurden jeweils zwei große EV3-Servomotoren für beide Werkzeugschlitten vorgesehen. Dank der Rotationssensoren konnten zwei große EV3-Servomotoren mit einem Softwareblock synchron betrieben werden, was eine einfache Verdoppelung der Antriebsleistung ermöglichte. Allerdings benötigen die großen EV3-Servomotoren so viel Strom, dass der Akku nur maximal drei davon gleichzeitig mit ausreichend Strom versorgen kann. Daher kann mit dem verstärkten Konzept mit vier Motoren nicht mit beiden Achsen gleichzeitig verfahren werden.

Da die Drehzahl des großen EV3-Servomotors zu hoch und das Nennmoment für den Schlittenantrieb zu niedrig war, musste ein Untersetzungsgetriebe eingebaut werden. Die Servomotoren sind mit je zwei Getriebestufen, aber bauraumbedingt mit unterschiedlichen Übersetzungen, an die Verstellspindeln angebunden. Die erste Getriebestufe ist geradzahnt, in der zweiten wird das Drehmoment über ein Kegelrad auf den Mini-Drehkranz übertragen. In Tabelle 8 sind die Zähnezahlen der verwendeten Zahnräder angegeben. Laut Tabelle 9 beträgt die Gesamtübersetzung für den Querschlitten 7,00 und für den Oberschlitten 3,89. Der Vorschub beträgt demnach für den Querschlitten 0,15 mm/U und für den Oberschlitten 0,25 mm/U. Mit der Verwendung von zwei Servomotoren pro Achse konnte auch die Drehmomenteinleitung und Laufruhe verbessert werden, da das Drehmoment in der am höchsten belasteten Getriebestufe mit zwei gegenüberliegenden Kegelrädern in den Mini-Drehkranz eingeleitet wird und so einseitige Belastung und das Auseinanderdrücken der Zahnräder vermieden werden kann.

Tab. 8: Zähnezahlen der Untersetzungsgetriebe

Bezeichnung	1. Stufe	2. Stufe
Querschlitten		
Rad 1	12	12
Rad 2	36	28
Oberschlitten		
Rad 1	24	12
Rad 2	36	28

Tab. 9: Übersetzungen der Getriebestufen

Bezeichnung	1. Stufe	2. Stufe	Gesamt	mm/U
Querschlitten	3,00	2,33	7,00	0,15
Oberschlitten	1,66	2,33	3,89	0,25

In den Abbildungen 3.19 bis 3.21 ist das neue, gegenüber der ersten Version verstärkte Antriebskonzept zu sehen. Die Abbildungen 3.22 bis 3.25 zeigen die mit dem LEGO Digital Designer (LDD) erstellten Ansichten der LEGO-Anbauten für den Quer- und Oberschlittenantrieb. Darin ist auch die Einbaulage der Berührungssensoren für die Referenzfahrt ersichtlich. Der LDD ermöglicht neben der virtuellen Modellplanung auch die Erstellung von Bauanleitungen.

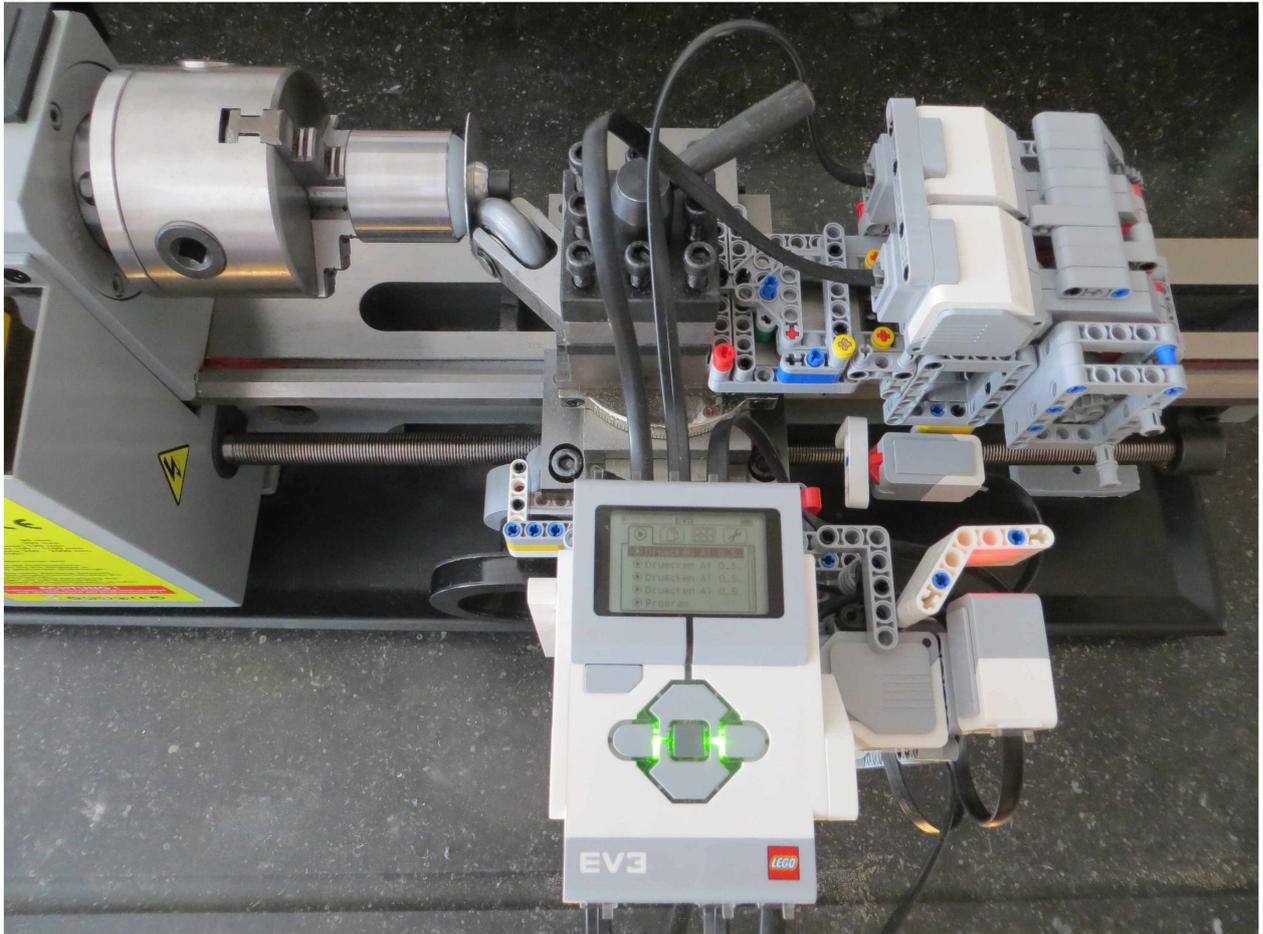


Abb. 3.19: Erba C300 mit LEGO Mindstorms EV3 und wälzgelagertem Rollenwerkzeug

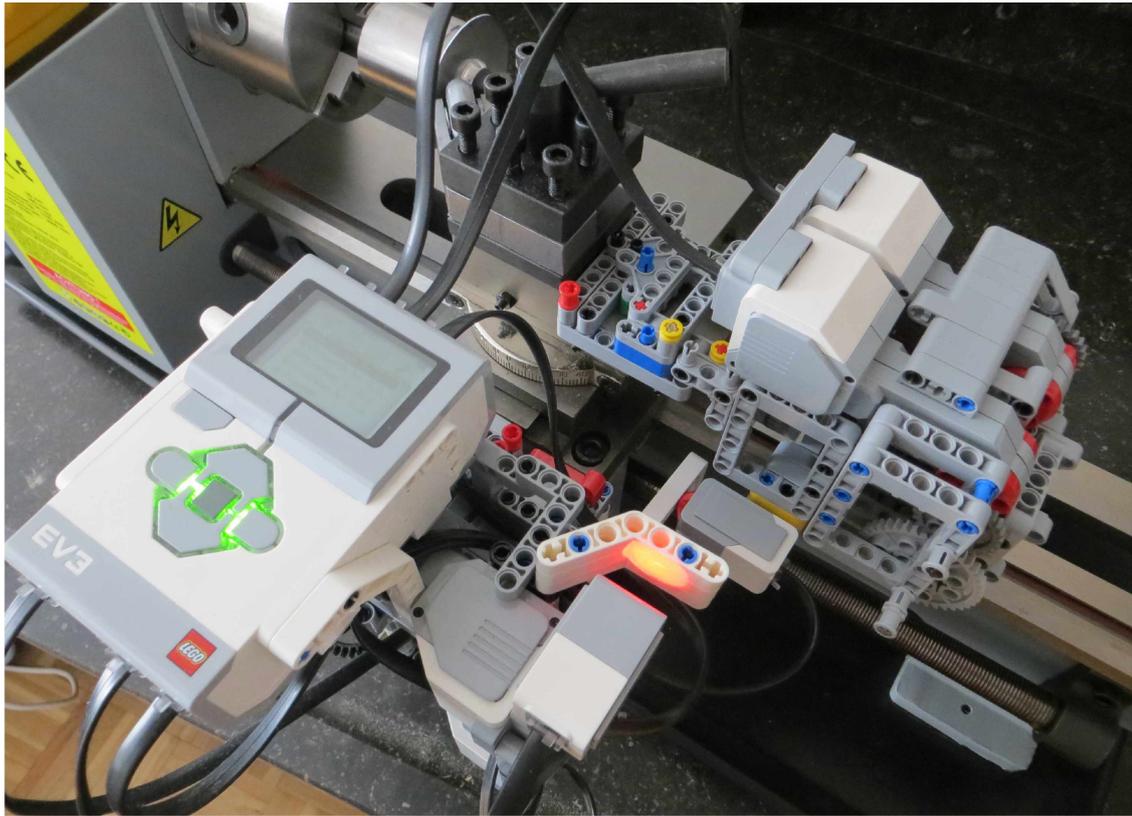


Abb. 3.20: Erba C300 mit LEGO Mindstorms EV3 und wälzgelagertem Rollenwerkzeug (2)

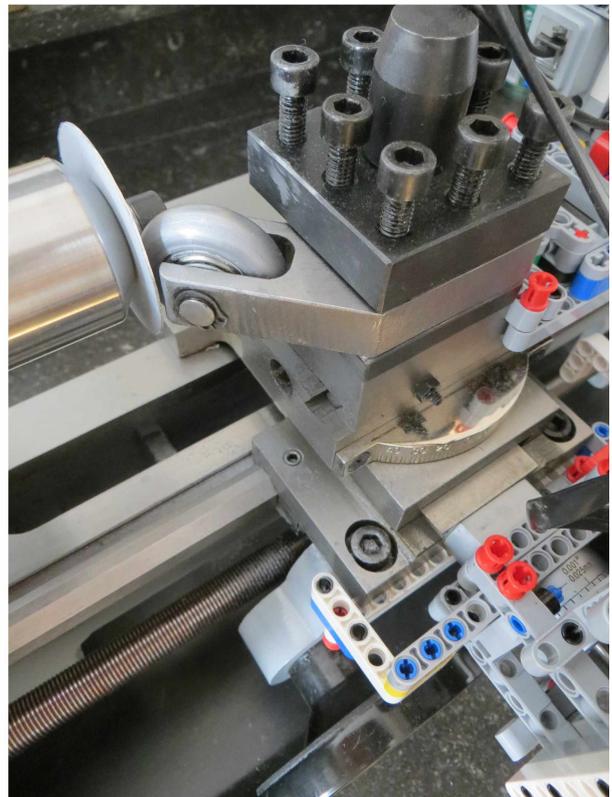
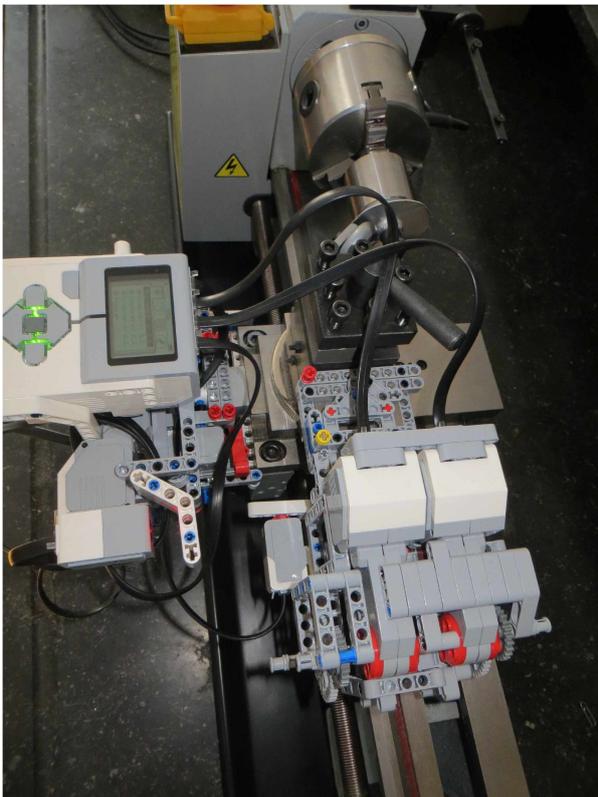


Abb. 3.21: Erba C300 mit LEGO Mindstorms EV3 und wälzgelagertem Rollenwerkzeug (3)

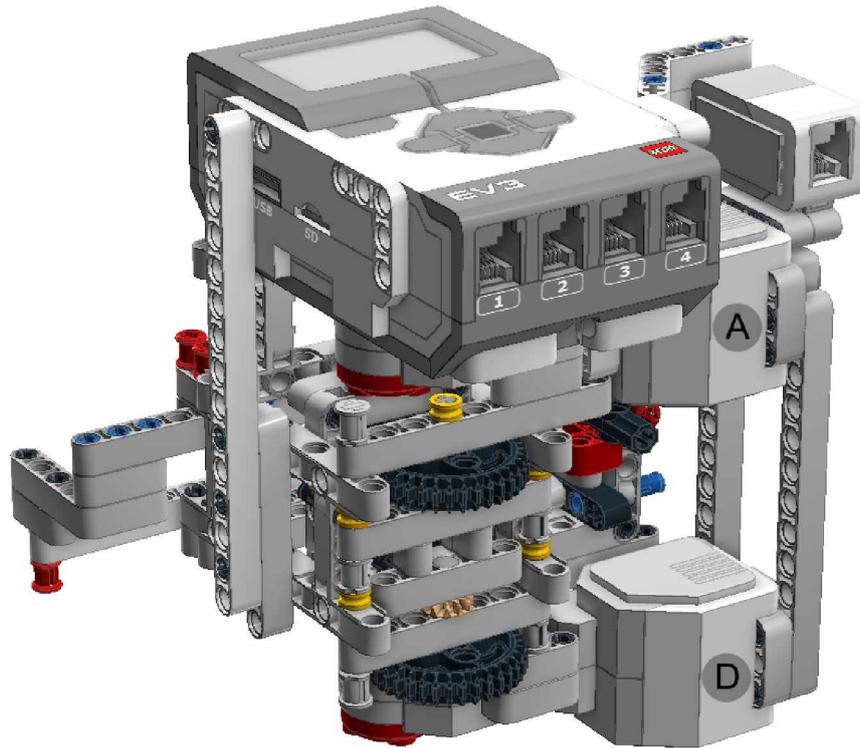


Abb. 3.22: Querschlittenantrieb mit LEGO Mindstorms EV3-Stein (Vorderansicht)

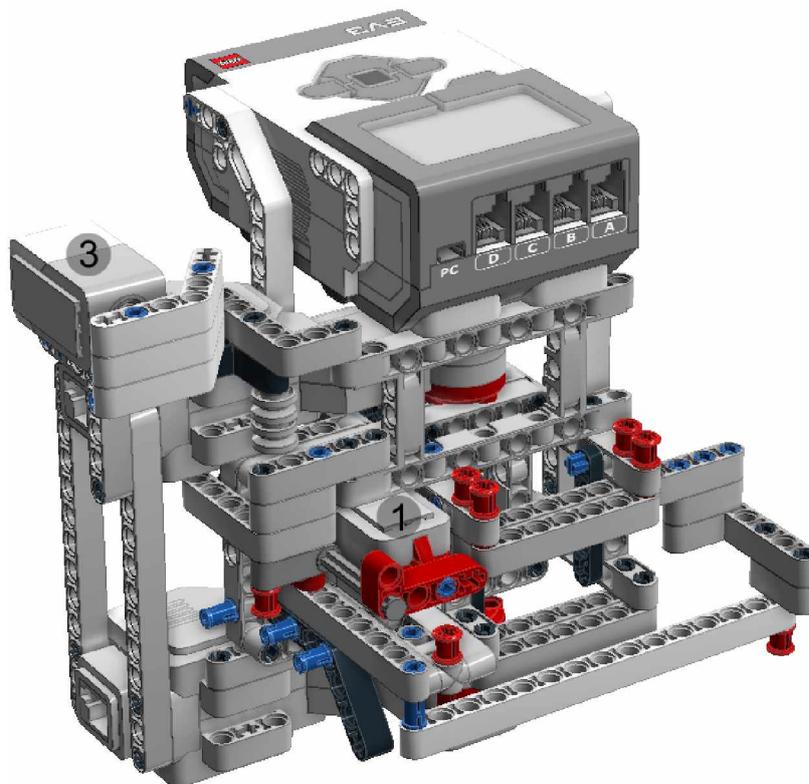


Abb. 3.23: Querschlittenantrieb mit LEGO Mindstorms EV3-Stein (Rückansicht)

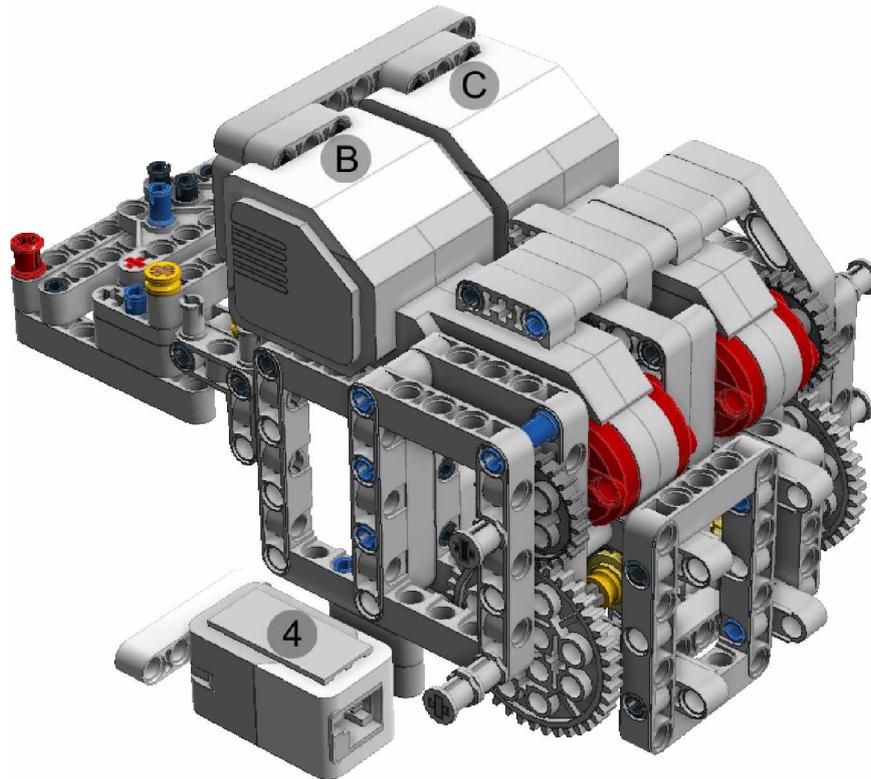


Abb. 3.24: Oberschlittenantrieb (Vorderansicht)

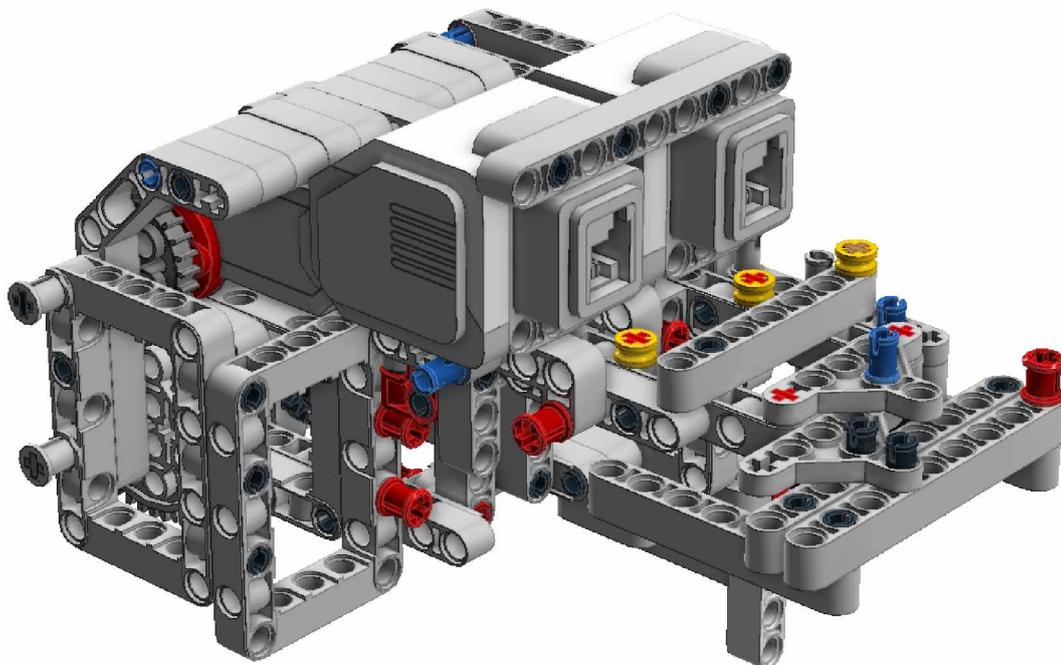


Abb. 3.25: Oberschlittenantrieb (Rückansicht)

3.3.2 Drückfutter und Drückwerkzeuge

Die Blechronden werden mit einer Imbusschraube und einem Druckstück gegen das Drückfutter gespannt. Das ist zwar eine einfache Lösung, hat aber den Nachteil, dass die Werkstücke eine Bohrung in der Mitte haben müssen. Für die Versuche wurden mehrere kegelförmige Drückfutter mit zylindrischem Schaft und stirnseitigem Innengewinde angefertigt, die im Dreibackenfutter der Drehmaschine eingespannt werden (Abbildung 3.26). Beim 50 Grad Kegel beträgt der Rondendurchmesser 50 mm und für den 15 Grad Kegel werden Ronden mit 35 mm Durchmesser verwendet. Bei handelsüblichen Drückmaschinen wird das Drückfutter meist direkt mit der Kopfplatte der Spindel verschraubt. Die Blechronden werden mit einer mitlaufenden Reitstockpinole und einem passenden Druckstück unter Reibschluss gegen das Drückfutter gespannt.

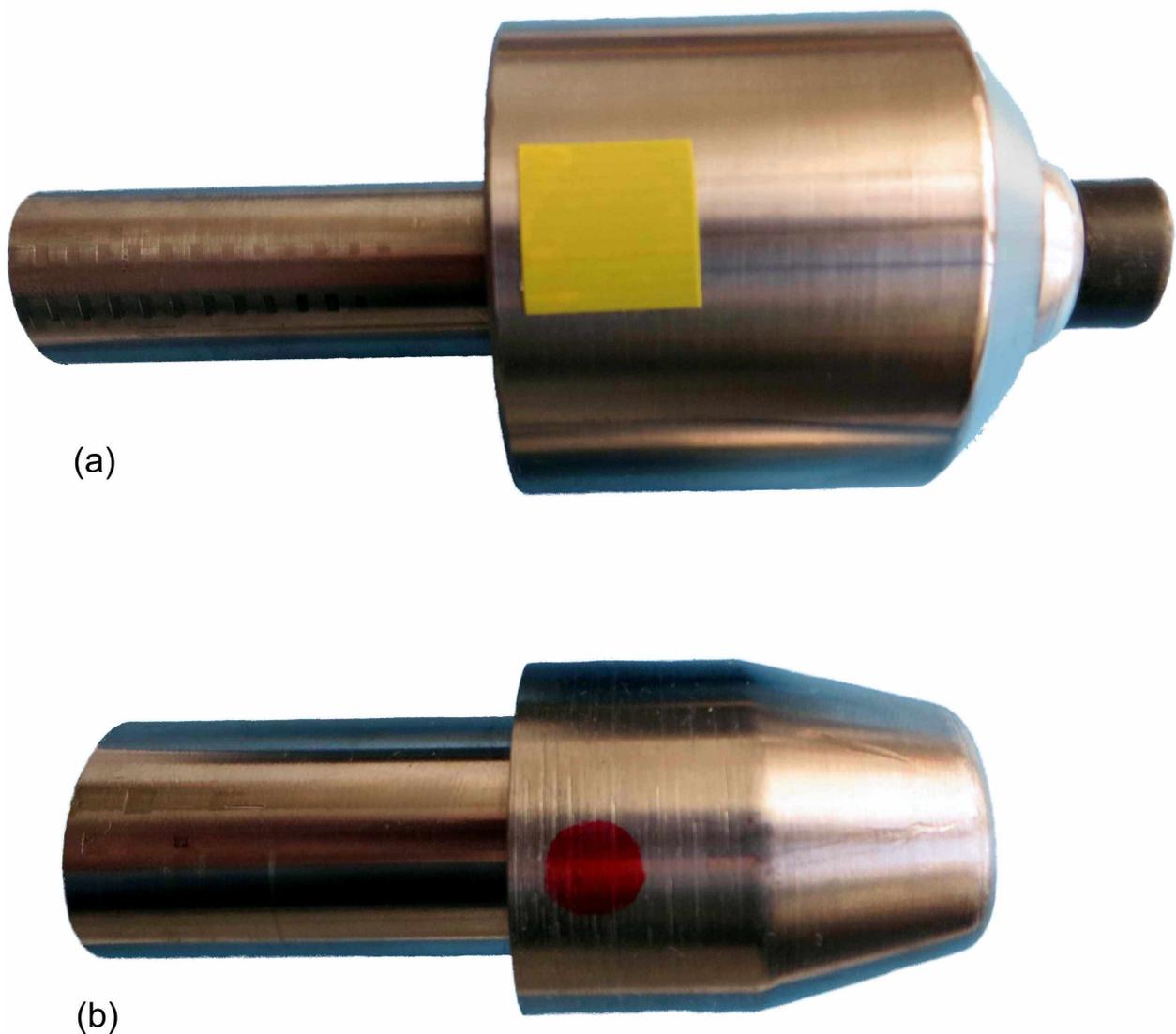


Abb. 3.26: Verwendete Drückfutter. (a) Kegel 50 Grad, Außendurchmesser 40 mm, Gesamtlänge 41 mm (b) Kegel 15 Grad, Außendurchmesser 29,5 mm, Gesamtlänge 38 mm

Während die Werkzeuge für das händische Drücken meist stabförmig in diversen Formen geschmiedet (poliert und gehärtet) sind, sind beim maschinellen Drücken überwiegend Rol-

lenwerkzeuge in Verwendung. Für die Modelldrückmaschine wurden unter anderem wegen der geringen Leistungsfähigkeit der LEGO-Motoren Rollenwerkzeuge gewählt, da mit diesen der Reibungswiderstand und damit die Bearbeitungskräfte verringert werden können.

Für die ersten Versuche wurde ein Bolzen auf einen abgewinkelten Flachstahl geschweißt und die Stahlrolle mit 29 mm Außendurchmesser und 2,5 mm Arbeitsradius mit einem Seegerring auf dem Bolzen gesichert (Abbildung 3.27 a). Dieses Werkzeug erwies sich als zu simpel, da die Rolle sich auf dem Bolzen durch die schräg zur Drehachse der Rolle auftretende Belastung verkantete. Folglich drehte sich die Rolle nicht mit und arbeitete wie ein gewöhnliches, reibungsbehaftetes Stabwerkzeug.

Mit den Erkenntnissen aus den ersten Versuchen wurden die anderen beiden Werkzeuge in Abbildung 3.27 erstellt. Diese haben einen gefrästen Halter mit einer Ausnehmung für eine eindeutige Positionierung im Werkzeughalter (wichtig bei Werkzeugwechsel). Die Stahlrollen haben einen Außendurchmesser von 35 mm mit 5 mm Arbeitsradius und sind mit einem Rillenkugellager 608 ZZ auf dem Bolzen gelagert. Der Winkel zwischen Rollenachse und Drehachse des Drückfutters beträgt 45 Grad. Das geänderte Rollendesign wirkt sich zudem positiv auf den Drückprozess aus (siehe Kapitel 2.5.2).

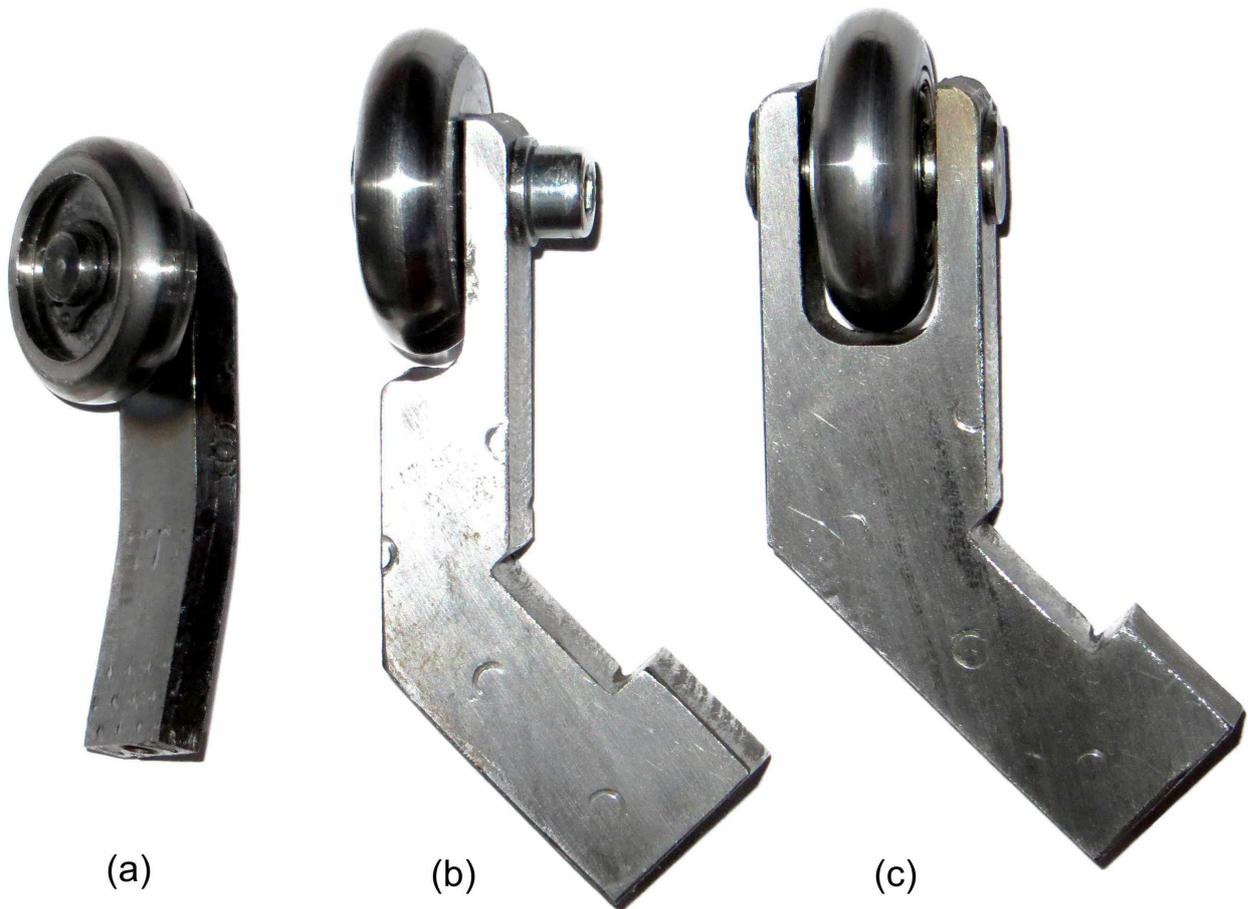


Abb. 3.27: Rollenwerkzeuge: (a) Testwerkzeug, (b) und (c) Wälzgelagerte Rollenwerkzeuge

4 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel wird das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 vorgestellt und in weiterer Folge derzeitige und in Zukunft mögliche Entwicklungen und deren Auswirkung auf die Produktion der Zukunft diskutiert. Im Anschluss daran wird die Modelldrückmaschine, die damit durchgeführten Versuche und erstellten Programme detailliert beschrieben.

4.1 Das Zukunftsprojekt Industrie 4.0

Die deutsche Bundesregierung führt in ihrer Hightech-Strategie unter dem Punkt „Industrie 4.0“ ein Zukunftsprojekt an, um seine Führungsposition in der Produktionstechnik zu halten und weiter auszubauen. Um die Transformation der industriellen Produktion hin zu Industrie 4.0 voranzutreiben, empfiehlt die Promotorengruppe Kommunikation der Forschungsunion Wirtschaft – Wissenschaft eine duale Strategie: Die deutsche Ausrüsterindustrie soll weiterhin führend auf dem Weltmarkt bleiben, indem sie durch das konsequente Zusammenführen der Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) mit ihren klassischen Hochtechnologieansätzen zum Leitanbieter für intelligente Produktionstechnologien wird. Gleichzeitig sind neue Leitmärkte für CPS-Technologien und -Produkte zu gestalten und zu bedienen. Industrie 4.0 ertüchtigt Cyber-Physical Systems zur Anwendung in der produzierenden Industrie.

Das Fraunhofer IAO [9] geht von weitreichenden Veränderungen für die Produktionsarbeit der Zukunft aus. Zukünftig könnte sich ein durch den Kunden ausgelöster Produktionsauftrag selbstständig durch die Wertschöpfungskette steuern. Dabei reserviert er Bearbeitungsschritte, Anlagen und Materialien und kontrolliert die Ausführung automatisch. Er erkennt drohende Verzögerungen der Lieferung, organisiert soweit möglich zusätzlich benötigte Kapazitäten und meldet unvermeidbare Verzögerungen direkt dem entsprechenden Kunden. Die verwendeten Produktionsanlagen tauschen untereinander Zeichnungen aus und organisieren ihre Auftragsreihenfolge sowie Wartungs- und Instandhaltungsbedarfe untereinander.

Feldgeräte, Maschinen und Anlagen sollen sich in Zukunft ohne weitere Parametrierung oder Programmierung zu Produktionssystemen zusammenschließen lassen, so wie man heute verschiedene Geräte über einen USB-Anschluss mit dem PC verbindet. Viele der Technologien, die für Industrie 4.0 notwendig sind, wie das Internet, Profinet als standardisierte Datenverbindung für Industrieanlagen oder Simulationssoftware, gibt es bereits [16]. Bis diese Vision aber tatsächlich Realität wird, gibt es noch einigen Handlungsbedarf.

Die zentralen Aspekte von Industrie 4.0 können anhand von drei Paradigmen verdeutlicht werden: das intelligente Produkt („Smart Product“), die kommunizierende Maschine („Smart Machine“) und der assistierte Bediener („Augmented Operator“).

Bei der Idee des intelligenten Produkts wird das Produkt bzw. Werkstück selbst zum handelnden Akteur im Produktionsprozess. Produkte tragen ein Gedächtnis mit hinterlegten Auftrags- und Produktionsdaten und bestimmen damit, welche Bearbeitungsschritte ausgeführt werden sollen. Dadurch wird die Individualisierung (Losgröße 1) zu den ökonomischen Konditionen eines Massenherstellers Realität. Langwieriges umprogrammieren von Maschinen für Produktvarianten vereinfacht sich, da die Maschine selbst anhand der Informationen am Werkstückträger (RFID oder ähnliche Technologie) entscheidet, was zu tun ist. Solche

digital veredelte Produkte in Premiumqualität zu entwickeln und dabei die hohe Variantenvielfalt in Entwicklung und Produktion zu beherrschen, sind einige der Herausforderungen für die Zukunft.

Durch das Paradigma der kommunizierenden Maschine werden Anlagenkomponenten zu CPS und Produktionsanlagen zu Cyber-Physical Production Systems (CPPS). Alle Abläufe sind transparent, sodass Unternehmen jederzeit den Überblick behalten, flexibel agieren und Produktionsprozesse standortübergreifend optimieren können. Wer schneller und wandelbarer auf volatile Märkte reagieren kann, wird damit in Zukunft Geld verdienen.

Der Kernaspekt des assistierten Bedieners zielt darauf ab, den Menschen im Zentrum der Fabrik durch kontextsensitive Informationsbereitstellung zu unterstützen. Die Datenflut komplexer Systeme soll gefiltert werden und der Bediener bei der Entscheidungsfindung unterstützt werden.

4.1.1 Forschungsbereiche und Handlungsfelder

Die Umsetzung von Industrie 4.0 wird weitgehend durch die Industrie selbst erfolgen. Grundlegender Forschungsbedarf ist dennoch gegeben. Revolutionären Anwendungen werden vorrangig durch die Kooperation der IKT, der Produktions- und der Automatisierungstechnik erwartet. Für die Verbreitung von Industrie 4.0 ist jedenfalls ein Ausbau der Breitband-Internet-Infrastruktur notwendig. Um die genannten Ziele der dualen CPS-Strategie zu erreichen, wurden fünf zentrale Forschungsbereiche [17] definiert:

- Horizontale Integration über Wertschöpfungsnetzwerke
- Digitale Durchgängigkeit des Engineerings über die gesamte Wertschöpfungskette
- Vertikale Integration und vernetzte Produktionssysteme
- Neue soziale Infrastrukturen der Arbeit
- Technologie Cyber-Physical Production Systems (CPPS)

Nachfolgend werden einige der konsolidierten Forschungsbedarfe, die im Rahmen des Arbeitskreises Industrie 4.0 erhoben wurden, angeführt und diskutiert.

Horizontale Integration über Wertschöpfungsnetzwerke

Die Geschäftsstrategie eines Unternehmens und neuartige Wertschöpfungsnetze sowie vollständig neue Geschäftsmodelle sollen durch CPPS unterstützt werden. Diese Aufgabenstellung betrifft Forschungs-, Entwicklungs- und Anwendungsbereiche gleichermaßen (Abbildung 4.1). Existierende Ansätze von Geschäftsmodellen erfordern Vereinheitlichung und Konsolidierung. Best Practices und Erfahrungen sind systematisch zu erfassen, insbesondere auch aus anderen Branchen, sowie eine Übertragung auf die Produktion und die Analyse der sich daraus ergebenden Konsequenzen.

Methodiken zur Analyse und Bewertung der wirtschaftlichen und technologischen Potenziale von CPPS sind zu entwickeln, um Aussagen darüber treffen zu können, unter welchen

Bedingungen sich der Einsatz von CPPS wirtschaftlich rechnet. Erarbeitete Konzepte sind unter Einbeziehung von Kunden, Lieferanten, Partnern und Markt praktisch zu beleuchten und Businesspläne zu erarbeiten.

Dem Schutz des eigenen Wissens kommt eine besondere Bedeutung zu. Es müssen adäquate, zuverlässige und wirtschaftliche Lösungen für den Schutz von Wissen entwickelt und etabliert werden (Zukunftsprojekt „Sichere Identitäten“).

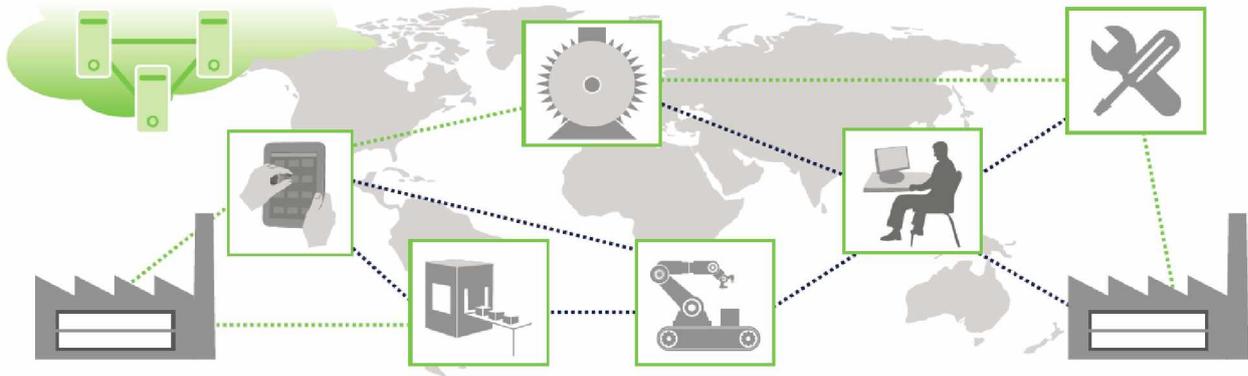


Abb. 4.1: Horizontale Integration über Wertschöpfungsnetzwerke (Quelle: Siemens 2012)

Interoperabilität

Die Interoperabilität spielt im Kontext des Daten- und Informationsaustausches und damit dem zentralen Forschungsbereich „Horizontale Integration über Wertschöpfungsnetzwerke“ eine große Rolle. Damit ein durchgängiger Datenaustausch in der Fabrik reibungslos funktioniert und jeder den anderen verstehen kann, werden Standards zur sicheren Kommunikation benötigt. Eine firmenübergreifende Vernetzung und Integration über Wertschöpfungsnetzwerke wird nur mit Standards gelingen. Es ist daher eine Standardisierung notwendig, in der die Mechanismen der Zusammenarbeit und die auszutauschenden Informationen festgelegt werden. Für deren technische Beschreibung und Umsetzung ist eine Referenzarchitektur notwendig.

Im Sinne einer Bottom-up-Strategie wurde die Diskussion über eine Standardisierung für Industrie 4.0 initiiert. Vor kurzem wurde vom DKE die deutsche Normungs-Roadmap Industrie 4.0 [27] veröffentlicht, welche die Anforderungen an Normen und Spezifikationen für Industrie 4.0 darstellt, notwendige Handlungsfelder aufzeigt und entsprechende Empfehlungen abgibt. Zudem bietet sie eine Übersicht über Normen und Spezifikationen in diesem Umfeld. Des Weiteren wird empfohlen, eine Industrie 4.0 Arbeitsgruppe Standardisierung als Top-down Institution einzusetzen, die offen und transparent organisiert ist und aus einer ganzheitlichen Betrachtung heraus ein Big Picture der Standardisierung moderiert, Empfehlungen ausspricht und über Branchen und Projektgrenzen hinweg Standardisierungsaktivitäten evaluiert und kommuniziert sowie durch Innovationsübertragung weitere Innovationen stimuliert [17].

Bei der Interoperabilität lassen sich verschiedene Ausbau- und Realisierungsstufen unterscheiden. Die Basis ist der physikalische Datenaustausch, der gewährleistet werden muss und in der Produktion bereits erreicht ist.

Des Weiteren müssen die Daten in eine für alle Kommunikationspartner verständliche Form gebracht werden, was als syntaktische Interoperabilität bezeichnet wird [24].

OPC ist ein weltweit etablierter, erfolgreicher und bewährter Standard für den Austausch von Echtzeitdaten, das Überwachen von Ereignissen und den Zugriff auf historische Daten. Er ist seit mehr als 15 Jahren in vielen Millionen Installationen in der Fertigungs- und Prozessindustrie im Einsatz. Die klassische OPC-Technologie beinhaltet jedoch eine Reihe von Einschränkungen, die einem noch umfassenderen Einsatz entgegen stehen. Dazu zählt vor allem die enge Bindung an das Betriebssystem Windows von Microsoft und die darin enthaltene Basistechnologie COM/DCOM ((Distributed) Component Object Model). Aus der Industrie gibt es weitere Wünsche und Anforderungen an die OPC-Technologie, wie z. B. die Unterstützung von Sicherheitsvorkehrungen, den Schutz vor Datenverlust, die Möglichkeit von Redundanzfestlegungen oder die Unterstützung komplexer Datentypen.

Als Antwort darauf hat die OPC Foundation mit OPC Unified Architecture (OPC UA) eine komplett überarbeitete und erweiterte Version des OPC-Standards verabschiedet, welche die Schwachstellen der klassischen OPC-Technologie beseitigt und um wesentliche Eigenschaften, wie die Plattformunabhängigkeit, die Skalierbarkeit, die Hochverfügbarkeit oder die Internetfähigkeit erweitert. OPC UA erlaubt die Implementierung von Servern in embedded-Systemen. Embedded Feldgeräte, Prozessleitsysteme, Speicherprogrammierbare Steuerungen, Gateways oder Operator Panels können schlanke OPC UA Server Implementierungen enthalten, die direkt auf Betriebssysteme wie embedded Linux, VxWorks, QNX, RTOS oder andere portiert wurden (Abbildung 4.2). Damit lassen sich nun ganz neue, kostensparende Automatisierungskonzepte realisieren [13]. Der OPC UA Standard wurde außerdem in den Stand einer IEC-Norm (IEC 62541) erhoben, was dessen schnelle Verbreitung vorantreiben wird.

Letztendlich muss das in den strukturierten Daten enthaltene Wissen (ohne vorherige Absprachen) für alle Kommunikationspartner nutzbar sein, was als die semantische Interoperabilität bezeichnet wird. Ein aktueller XML-basierter Standard ist AutomationML (IEC 62714). Eine semantische Interoperabilität basierend auf Standards kann durch eine Kombination aus den beiden Standards OPC UA und AutomationML erreicht werden.

Sicherheit und Datenschutz

Wenn in Zukunft Daten in firmenübergreifenden Wertschöpfungsnetzwerken ausgetauscht werden sollen, muss den Themen Sicherheit und Datenschutz besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Sicherheitsmechanismen wie Authentifizierung und Autorisierung bzw. Rechteverwaltung sind bei der Gestaltung von CPS-basierten Systemen von vornherein in die Architektur zu integrieren. Sensible Daten sollen dadurch im frühestmöglichen Stadium gegen Angriffe durch Abhören und Modifikation geschützt sein. Die Sicherheit für vertrauenswürdige CPS-Mechanismen kann nur auf der Basis geschützter und eindeutig identifizierbarer Komponenten erreicht werden. Dafür sind standardisierte Security-Mechanismen wie Verschlüsselung, Datensignierung sowie die Authentifizierung von Datenobjekten und Steuerungskomponenten erforderlich, damit sich nur autorisierte Komponenten in das Produktionssystem integrieren dürfen [22]. Die Anwendung bewährter Internetprotokolle (TCP/IP) hat zwar viele Vorteile, man übernimmt damit aber auch deren Schwächen bei der IT-Sicherheit. Es wird empfohlen, die Automatisierungsbereiche in Zellen mit unterschiedlichen

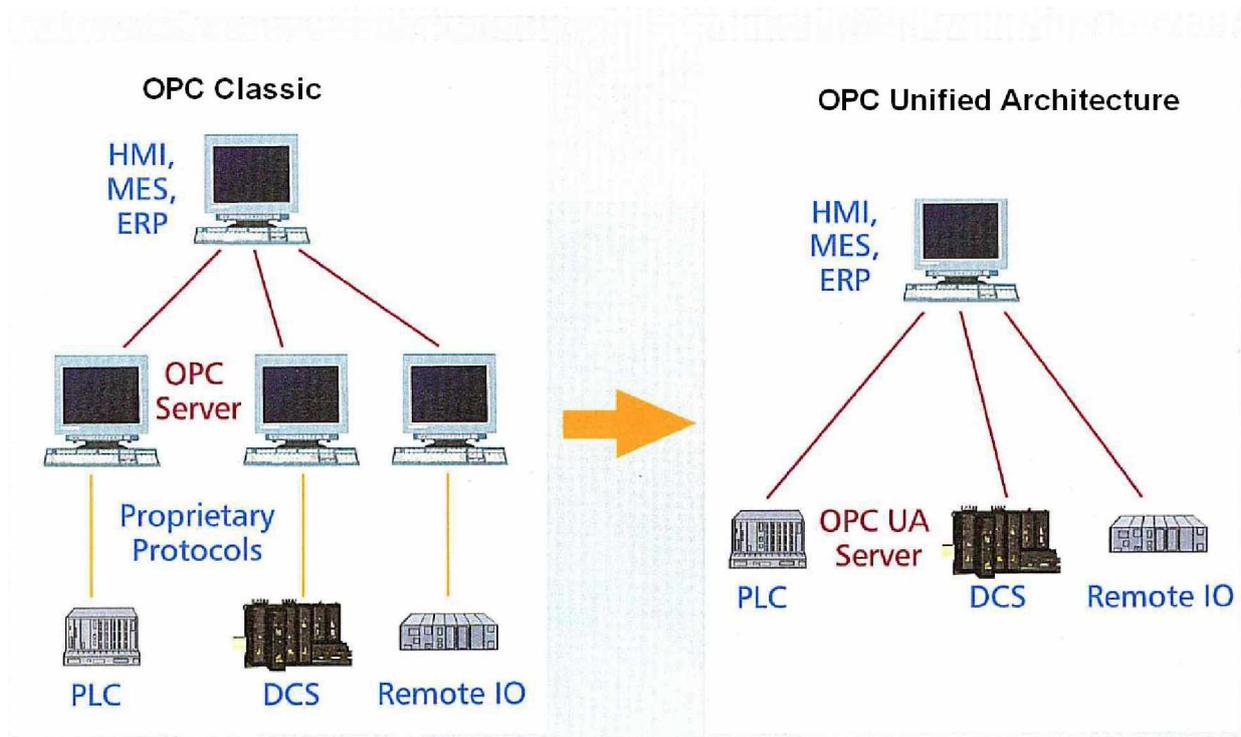


Abb. 4.2: OPC UA-Architektur ([13])

Sicherheitsstufen einzuteilen und nach dem sogenannten Zwiebelmodell zu schützen: empfindliche Zonen stark und weniger sensible Bereiche kaum oder gar nicht. Die Vernetzung zwischen den Produktionsstätten und die Übergänge zu den einzelnen Zonen können mit Firewalls und Antiviren-Gateways der klassischen IT abgesichert werden. Die einzelnen Automatisierungskomponenten für Industrial-IT sollten direkt über eine Verschlüsselung gesichert werden [26].

Neben der Anwendungssicherheit ist auch unter dem Aspekt stetig wachsender Produktpiraterie und Diebstahl geistigen Eigentums ein weiterer wichtiger Forschungsbereich, um das Kopieren bzw. Reverse Engineering von CPS- und CPPS-Produkten durch technische Konzepte für Kapselung und Schutz von Wissen und Information zu verhindern [17]. Komplexe Produkte sind ohnehin schwieriger nachzuahmen.

Digitale Durchgängigkeit des Engineerings über die gesamte Wertschöpfungskette

Der Engineering Workflow soll mithilfe von CPPS durchgängig gestaltet werden. Die Modellierung soll zur Beherrschung der zunehmenden Komplexität der technischen Systeme beitragen. IT-Systeme müssen die gesamte Wertschöpfungskette von der Produktentwicklung über das Engineering des Produktionssystems bis hin zur Produktion und dem Service durchgängig unterstützen (Abbildung 4.3).

In Zukunft werden produktlebenszyklus-übergreifende Wissensmodelle benötigt. Das wissenschaftliche Fundament soll eine produktionstechnische Modellierungstheorie für den Maschinen- und Anlagenbau liefern. Die technische Verschmelzung der digitalen und physischen Welt erfolgt bidirektional. Einerseits durch Planungsmodelle, um die kreative Wertschöpfung von

Ingenieuren transparent zu machen und komplexe Systeme erstellen zu können und andererseits mit Hilfe von Erklärungsmodellen, um komplexe Systeme zu analysieren und Design-Entscheidungen von Ingenieuren zu validieren. Die Entwicklung von Produkten soll durch mehr Virtualität statt Prototypenbau flexibler, die Produktionskosten durch Fehlervermeidung geringer und Projektlaufzeiten im Anlagen-Engineering kürzer werden. System Engineering ist eine ganzheitliche Betrachtung über die verschiedenen Fachdisziplinen hinweg. Die Ausbildung und entsprechende Qualifizierungsmaßnahmen für Ingenieure müssen entsprechend gestaltet werden.



Abb. 4.3: Durchgängigkeit des Engineering über die gesamte Wertschöpfungskette (Quelle: Siemens 2012)

Vertikale Integration und vernetzte Produktionssysteme

Die Forschungsempfehlungen zur vertikalen Integration zielen darauf ab, Produktionssysteme unter Nutzung von CPPS flexibel und rekonfigurierbar zu gestalten. Durch CPPS wird eine signifikante Steigerung des Einsatzes von zusätzlicher Sensorik aber auch neuer Aktorik in Produktionssystemen erwartet. In der zukünftigen Smart Factory werden die Produktionsstrukturen nicht mehr von vornherein konkret und fest vorgegeben, sondern informationstechnische Konfigurationsregeln definiert, aus denen automatisiert eine fallspezifische Topologie abgeleitet wird (Abbildung 4.4).

Forschungsbestrebungen müssen in Bezug auf eine Ad-hoc-Verteilung und -Vernetzung von Sensorik initiiert werden, um Eigenparametrierung und -diagnose durch die Erkennung von kontextbehafteten Zusammenhängen und bildgestützte Auswertung in der Produktion zu forcieren. Weitere Schwerpunkte sollten die systematische Bestimmung von Lebensdauermodellen für CPPS und softwareseitige Methoden zur Informationsfilterung und -aufbereitung durch Sensoren sein. Um die Flexibilität und Rekonfigurierbarkeit von CPPS erreichen zu können, müssen Konzepte zur Modularisierung und Wiederverwendung erarbeitet werden. Ein optimaler Grad an Dezentralisierung der Automatisierung ist zu ermitteln. Die Konzepte und Methoden sind in praxisrelevanten Anwendungsfällen zu erproben und langfristig neue Steuerungsstrategien für wandelbare Produktionssysteme, insbesondere unter den Aspekten der Dezentralisierung, der (Re-)Konfiguration und der Ad-hoc-Vernetzung, zu entwickeln.

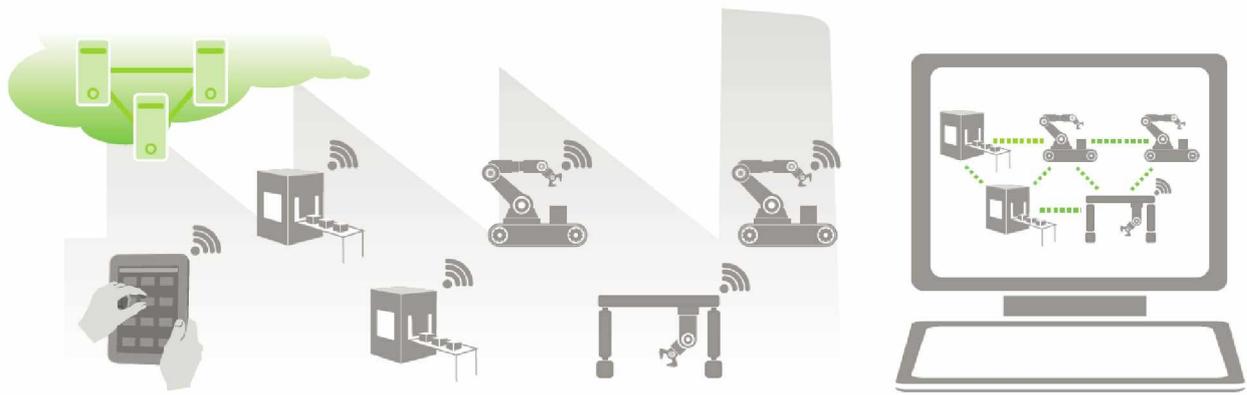


Abb. 4.4: Vertikale Integration und vernetzte Produktionssysteme (Quelle: Siemens 2012)

Neue soziale Infrastrukturen der Arbeit

In der Produktionsarbeit wurden in den vergangenen Jahrzehnten wiederholbare und automatisierbare Aufgaben mit steigender Komplexität automatisiert und fast flächendeckend robuste und ganzheitliche Produktionskonzepte (GPS) im Sinne des Toyota Produktionssystems eingeführt. Mit Mass Customization und der daraus resultierenden späten Variantenbildung wurden flächendeckend Losgrößen und Durchlaufzeiten reduziert. Mit Industrie 4.0 wird der Komplexitätsgrad zunehmen und die Fertigungstiefe weiter abnehmen. Das Prinzip Just-in-Time bzw. Just-in-Sequence wird sich weiter verschärfen [9].

CPS erfordern daher neue Arbeitsstrukturen, die die Leistungsfähigkeit der Beschäftigten fördern und andererseits die lebenslange Entwicklung der Individuen durch die betrieblichen Strukturen unterstützen. Offene, virtuell gestaltete Arbeitsplattformen und umfassende Mensch-Maschine und Mensch-System-Interaktionen werden Arbeitsinhalte, -prozesse und -umgebungen deutlich verändern. Die Arbeit in Industrie 4.0 wird mit hoher Wahrscheinlichkeit die subjektiven Fähigkeiten und Potenziale der Beschäftigten stärker fordern und Chancen auf qualitative Anreicherung der Arbeit, interessante Arbeitszusammenhänge, zunehmende Eigenverantwortung und Selbstentfaltung bieten. Der Anteil an einfachen, manuellen Tätigkeiten wird weiter abnehmen. Die Qualität der Arbeit der Zukunft wird durch Wissenschaftler und Manager bestimmt, welche die Smart Factory modellieren und umsetzen. Die Systemauslegung kann sowohl als restriktive, kontrollierende Mikrosteuerung als auch als offenes Informationsfundament konfiguriert werden, auf dessen Basis der Beschäftigte Entscheidungen trifft.

Eine Smart Factory braucht breitqualifizierte Beschäftigte, die als Entscheider und Steuerer in hochkomplexen, wandlungsfähigen und flexiblen Systemen agieren können. Eine erweiterte Produktionsflexibilisierung muss möglich werden, aber auch eine realistische Work-Life-Balance-Option eröffnet werden. Die interdisziplinäre Produkt- und Prozessentwicklung kann vollständig neue Qualifikationen erfordern. Die relevanten Lerninhalte für Industrie 4.0 müssen daher identifiziert und adäquat didaktisch und methodisch aufbereitet werden. In fachlicher Hinsicht werden verstärkt interdisziplinäre Kompetenzen gefordert sein und soziale Kompetenzen durch den erhöhten Interaktionsbedarf einen erhöhten Stellenwert erlangen.

Technologie Cyber-Physical Production Systems (CPPS)

Heutige Produktionssysteme bieten nur eine signifikant eingeschränkte Anzahl von Schnittstellen an, die eine noch geringere Anzahl informationstechnisch beeinflussbarer Optimierungskriterien für die Produktionsplanung liefern. In der Vergangenheit konnten aufgrund fehlender Vernetzungsmöglichkeiten und fehlender angepasster IKT-Basistechnologien in der Produktion diskutierte Konzepte des Computer Integrated Manufacturing (CIM) nicht industrialisiert werden. Anforderungen wie eine firmenübergreifende Vernetzung von Fertigung, Agilität und Flexibilität bezüglich Fertigungsänderungen wegen nicht vorhandener Daten- und Prozessdurchgängigkeit in den unterschiedlichen Ebenen der Produktion sind nur in aufwändigen manuellen Änderungsprojekten möglich. Das führt typischerweise zu längeren Stillstandszeiten und hohen Umstellungskosten. Diesen Umständen sollen CPPS im Rahmen von Industrie 4.0 gerecht werden.

Dafür ist es notwendig, Basistechnologien der Informatik für den unmittelbaren Einsatz in der Automatisierungs- bzw. Produktionstechnik konzeptionell zu überdenken. Für die Produktion wird eine verteilte dienstorientierte Architektur (service-orientierte Architektur, SOA) benötigt, die Enterprise Resource Planning (ERP), Fertigung und Logistik über definierte Services und eine offene Datenbasis verknüpft. Um hochgradig verteilte Systeme umzusetzen, bedarf es der Erarbeitung von Referenzarchitekturen und einer geeigneten produktionstechnischen Serviceplattform als Teil der Referenzarchitektur.

4.2 Industrie 4.0 in der Umformtechnik

In der Umformtechnik wie auch in anderen Industriezweigen wird an neuen Maschinenkonzepten gearbeitet, um den Anforderungen nach höherer Energieeffizienz, kürzeren Taktzeiten, normgerechter Sicherheit und durchgängigen Automatisierungslösungen gerecht werden zu können. Nachfolgend werden Automatisierungslösungen und aktuelle Entwicklungen in Richtung Industrie 4.0 und deren Nutzen für Prozesse in der Umformtechnik diskutiert. Man kann nicht davon ausgehen, dass diese Entwicklungen erst mit dem offiziellen Aufruf zur vierten Industriellen Revolution aufgenommen wurden, sondern eine logische Konsequenz des technologischen Fortschritts sind und diese evolutionären Entwicklungen den Antrieb für eine neuerliche Industrielle Revolution darstellen.

4.2.1 Automatisierung in der Umformtechnik

Der Automatisierungsgrad in der Umformtechnik reicht von 0 (z.B. händisches Schmieden) bis 1, beispielsweise bei vollautomatischen Transferpressen in der Automobilindustrie. Dementsprechend heterogen sind auch die eingesetzten Automatisierungslösungen und automatizationstechnischen Steuerungseinrichtungen. In diesem Kapitel werden gängige Automatisierungslösungen im Hinblick auf deren Einsatz in der Umformtechnik charakterisiert. Auch das für diese Arbeit verwendete LEGO Mindstorms wird hier mit einbezogen.

Pneumatische Antriebe finden im Bereich der Produktionstechnik hauptsächlich in den Bereichen Materialfluss, Handhabung und Montage Anwendung. Sie werden als Folge der fortschreitenden Automatisierung in immer größeren Stückzahlen eingesetzt. Pneumatische An-

triebssysteme sind einfach und kostengünstig aufgebaut und zeichnen sich vor allem durch eine hohe Bewegungsgeschwindigkeit aus. Dadurch können kurze Taktzeiten bei der Beschickung von Pressen und dergleichen realisiert werden. Sie arbeiten problemlos bei schlechten Betriebsbedingungen (Staub, Feuchtigkeit) oder in explosionsgefährdeter Umgebung. Da in Produktionsbetrieben meist ein Druckluftnetz vorhanden ist, können diese Antriebe mit wenig Aufwand angeschlossen werden. Pneumatikantriebe bauen tendenziell kleiner und leichter als elektrische Antriebe vergleichbarer Kraft und Leistung. Sie sind aber wesentlich größer als kräftemäßig vergleichbare hydraulische Antriebe. Hinsichtlich der Investitionskosten liegen pneumatische Antriebe deutlich unter vergleichbaren elektrischen und hydraulischen Antrieben, die Energiekosten sind jedoch höher. Für Anwendungen mit geringem Kraft- und Leistungsbedarf lassen sich mit pneumatischen Antrieben besonders einfache, anwendungsoptimierte und kompakte Lösungen realisieren.

Der Großteil der pneumatischen Antriebe wird für gesteuerte Bewegungen von Anschlag zu Anschlag eingesetzt, deren Endlagen durch Sensoren erfasst werden. Bei rein pneumatischen Steuerungen sind Endlagensensorik, Signalverarbeitung und Aktorik durch pneumatische Bauelemente realisiert. Elektropneumatische Steuerungen arbeiten hingegen mit elektrischer bzw. elektronischer Sensorik und Signalverarbeitung, die aus den in Kapitel 2.4 genannten Gründen hauptsächlich als rechnerbasierte Steuerungen ausgeführt sind. Die Signalverarbeitung erfolgt mit handelsüblichen SPS. Es werden meist vorgesteuerte Wegeventile verwendet, die sich wegen der niedrigen elektrischen Leistungsaufnahme direkt mit SPS- bzw. Feldbusausgängen schalten lassen. Die Systeme werden aus möglichst wenigen, einfach zu kombinierenden Modulen aufgebaut [11].

Führend im Bereich der pneumatischen Antriebskonzepte ist die Firma FESTO. Anwendung finden sie beispielsweise bei der Werkstückhandhabung in Presswerken der Automobilindustrie. Bleche werden mit Portalsystemen aufgestapelt und mit Sauggreifern in die Presse eingelegt. Pneumatische Spannzylinder fixieren Bleche präzise und Sauggreifertransfers sorgen für einen schnellen Weitertransport bzw. Entnahme und Ablage ohne Beschädigung, Fingerabdrücke und dergleichen.

Lange Zeit stellten reine Hydrauliklösungen wegen ihrer konkurrenzlos hohen Leistungsdichte und Robustheit den Stand der Technik als Antriebstechnologie für Pressen dar. Diese Vorteile mussten sich allerdings mit einem hohen Energieverbrauch erkaufen werden. Die aus diesem Umstand resultierten rein elektrischen Maschinenkonzepte können zwar energieeffizienter sein, genügen aber in anderen Bereichen nicht den Anforderungen, wie sie mit Hydrauliklösungen erfüllt werden können. Bosch Rexroth setzt daher auf hybride Automatisierungslösungen, die die Vorteile der Hydraulik und Elektrik miteinander verbinden sollen. Elektrohydraulische Achslösungen ermöglichen dezentrale Antriebsstrukturen an Arbeitsmaschinen. Hybride Lösungen mit drehzahlvariablen Pumpenantrieben können den Energieverbrauch hydraulischer Anwendungen um bis zu 80 Prozent reduzieren und gleichzeitig die mittleren Geräuschemissionen deutlich herabsetzen [4].

Ob elektrische, hydraulische oder hybride Antriebskonzepte an Maschinen zum Einsatz kommen, hängt vom konkreten Anwendungsfall ab. Eine generell bessere oder schlechtere Lösung gibt es nicht. Die Hydraulik kann ihre Vorteile bei einer sehr hohen erforderlichen Kraftdichte ausspielen, da dementsprechend hohe Kräfte große Getriebemotoren erfordern, die kostenmäßig über den Hydrauliklösungen liegen. Elektrische Antriebe haben bei geringeren Kräften ihre Vorteile. Während der Marktanteil der elektrischen Blechbearbeitungsmaschinen

noch unter 5 % liegt, erreichen nach Angaben der Rosenberger AG vollelektrisch betriebene Rohrbiegemaschinen bis 20 mm Durchmesser einen Marktanteil von 40 % und bis 80 mm Rohrdurchmesser noch 30 % Marktanteil, mit steigender Tendenz.

Mechanische Steuerungselemente kommen beispielsweise noch bei Exzenterpressen zum Einsatz. Stanzbiegeautomaten von Bihler verfügen über Schlittenaggregate mit Kurvenscheiben (Abbildung 4.5). Kurvenscheiben sind als Steuerungselemente sehr zuverlässig und kostengünstig für beliebige Kurvengeometrien herstellbar. Maschinen von Bihler sind modular aufgebaut und dadurch höchst flexibel. Durch das Versetzen oder Verdrehen der Schlittenaggregate und Wechsel der Kurvenscheiben kann in kurzer Zeit auf ein anderes Produkt umgestellt werden. Die Weiterentwicklung dieser Maschinen stellen die noch flexibleren servogesteuerten Stanzbiegeautomaten dar.

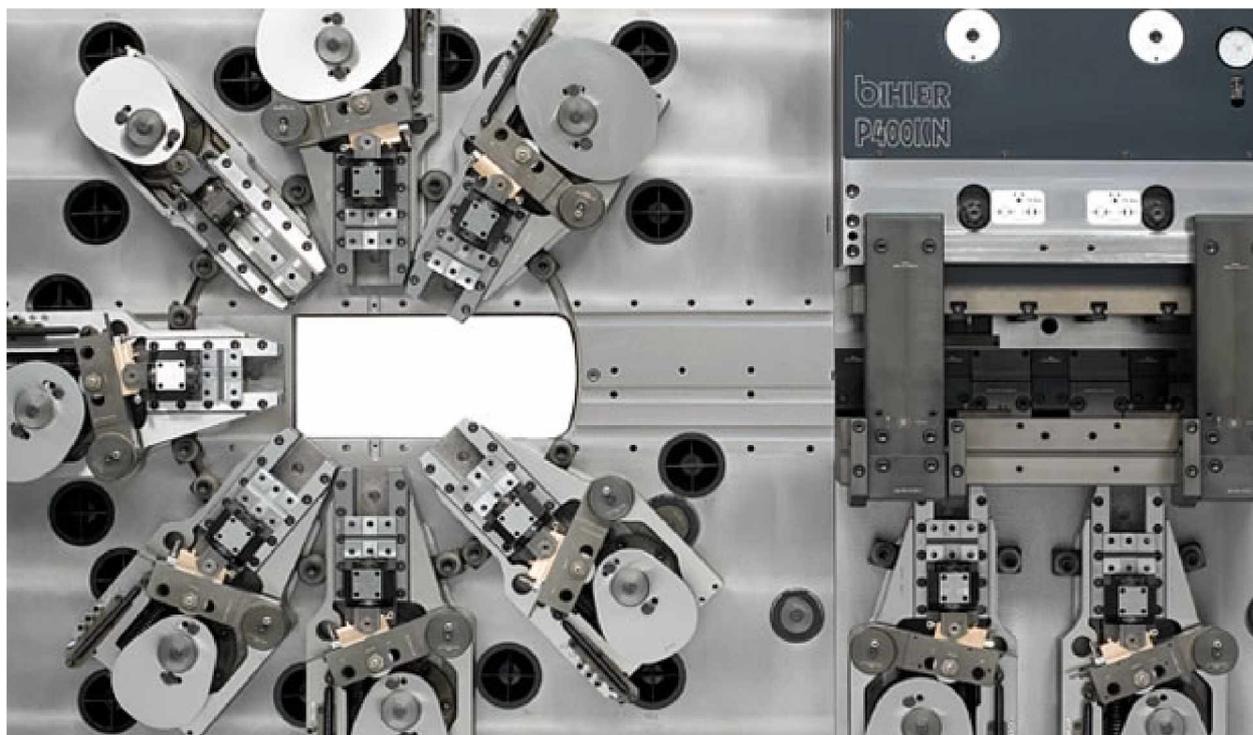


Abb. 4.5: Bihler GRM 80P Stanz-Biegeautomat (Quelle: Bihler)

LEGO Mindstorms EV3 ist als Roboterbausatz für Jugendliche konzipiert und eigentlich nicht für den industriellen Einsatz vorgesehen. LEGO Mindstorms ist durch das Baukastenprinzip höchst flexibel einsetzbar. Der EV3-Stein ermöglicht eine dezentrale Automatisierungsstruktur sowie die drahtlose Kommunikation zu anderen EV3-Steinen und übergeordneten Systemen. Die 9 V LEGO-Motoren können nur sehr geringe Kräfte erzeugen, erreichen aber eine hohe Positioniergenauigkeit. Mit der auf NI LabVIEW basierenden Software können Steuerungsprogramme per Drag & Drop ohne besondere Programmierkenntnisse erstellt und ausprobiert werden. Industrielle SPS liegen preislich zwar nicht wesentlich höher als der EV3-Stein, deren Anwendung erfordert aber fortgeschrittene Kenntnisse.

4.2.2 Mögliche Auswirkungen von Industrie 4.0

Das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 ist bereits jetzt keine reine Zukunftsvision mehr. Für Teilbereiche gibt es bereits jetzt Lösungen. Die IKT-Integration in die Automation ist auch kein wirklich neues Thema. PC-basierte Automation ist heute Stand der Technik und die Einführung von Echtzeit-Ethernet und Wireless voll im Gange [12]. Die Durchdringung der gesamten produzierenden Industrie mit Industrie 4.0 wird jedoch aus den in Kapitel 4.1.1 genannten Gründen noch einige Zeit dauern. Außerdem sind speziell in der Umformtechnik mitunter Maschinen mit vorgesehenen Einsatzdauern von mehreren Jahrzehnten im Einsatz. Ein rascher Umbruch zu neuen Technologien in allen Bereichen ist also kaum zu erwarten, sondern eher ein fließender Übergang durch Ergänzung bestehender Anlagen mit neuen Modulen bzw. sukzessiver Errichtung von Neuanlagen.

Diverse Firmen beschäftigen sich intensiv mit dem Thema Industrie 4.0. Einige zukünftige oder bereits in der Umsetzung befindliche Konzepte werden nachfolgend beschrieben. Der heute eingesetzten Automatisierungstechnik fehlen Mechanismen für die Selbstkonfiguration, Selbstoptimierung und Selbstdiagnose, die von Industrie 4.0 aufgegriffen werden.

Vernetzte Produktion [17]

Komplexe Produktionsabläufe mit starker Individualisierung erfordern eine adäquate Planung und Steuerung, um organisatorische Verluste zu vermeiden. Mit intelligenten und vernetzten Produktionsressourcen und Produkten können Produktionsabläufe auf Basis des Echtzeitabbildes der Fabrik geplant und gesteuert werden. Neben dem aktuellen Zustand, Ort und den Fähigkeiten eines Produktionsmittels werden auch relevante Zustandsinformationen von Partnerfirmen im Liefernetzwerk berücksichtigt. Ein Maschinenausfall oder Produktspezifikationsänderungen bei bereits laufender Produktion werden ad hoc identifiziert und das intelligente Planungs- und Steuerungssystem nimmt selbstständig durch einen Anforderungs-Fähigkeits-Abgleich eine Umplanung vor. Im Gegensatz zu ERP-Systemen, die einen gemeinsamen und optimierten Produktionsplan im Voraus berechnen, verfolgen dezentrale Steuerungen eine lokale Optimierung der Aufgaben und Auftragsreihenfolge [9]. Die klassische Automatisierungspyramide wird durch die Einführung von vernetzten, dezentralen Systemen schrittweise aufgelöst.

Intelligente Produkte sind durch ihre Ad-hoc-Vernetzungsfähigkeit und die Mitführung einer digitalen Produktbeschreibung in der Lage, sich eigenständig durch die Produktion zu steuern. Um ihren Zielzustand zu erreichen, initiieren die Produkte dezentrale ad hoc aufgebaute Regelschleifen und verlagern dadurch viele Entscheidungen direkt auf die Werkstattebene.

Intelligentes Energiemanagement

Heute laufen Anlagen und Anlagenteile in Pausen und oft auch in Leerschichten und am Wochenende mit hohem Energieverbrauch weiter und sorgen für eine permanent hohe Grundlast. Um die Grundlast in den Fabriken zu reduzieren, werden Roboter (beispielsweise Pressentransfers) künftig in produktionsfreien Zeiten (auch bei kurzfristigen Stillständen) zunächst stillgesetzt. Bei längeren Pausen werden sie in eine Art Stand-by-Modus versetzt (Wake-On-LAN-Zustand) [17]. Absauganlagen werden mit drehzahl- und damit bedarfsgeregelten Motoren anstelle von ungesteuerten Motoren deutlich effizienter. Pressen mit hydraulischen oder pneumatischen Antrieben können durch elektrische oder servohydraulische Konzepte ersetzt werden, die nur Energie verbrauchen, wenn sie auch arbeiten und die Antriebsmotoren

nicht permanent laufen. Koordiniertes An- und Abschalten von Anlagenkomponenten kann die Energieeffizienz erhöhen und sollte bei Neuanlagen zum technischen Standard werden.

Einer der wichtigsten Hebel zur Senkung des Energieverbrauches sind die Antriebe. Etwa zwei Drittel des Stromverbrauches einer Fabrik entfallen auf große und kleine Elektromotoren. Viel lässt sich durch moderne Motortechnik einsparen. Mit modernen Antrieben steigt auch die Effizienz des Presswerkes oder anderer umformtechnischer Maschinen. In der Automobilindustrie bewegen sich riesige Werkzeuge und pressen Bleche mit einer Kraft von einigen tausend Tonnen Bleche zu Türen, Motorhauben und Dächern. Sobald sich das Werkzeug nach oben bewegt, greifen Transfers das Blech und bringen es zur Nachbarpresse. Oft werden alle Bewegungen von einer durch ein Schwungrad gespeisten Hauptantriebswelle angetrieben. Siemens hat bei Volkswagen bei alten Pressenlinien die Transfers von der Hauptantriebswelle entkoppelt und diese bewegen sich nun über elektronische Servomotoren. So lassen sich die Transfers präziser und effizienter steuern und die optimale Einstellung aller Bewegungen erfolgt über die Pressenlinien-Simulation(PLS). Werkzeugwechsel gehen mithilfe von PLS ebenfalls schneller, denn die simulierten Bewegungsabläufe werden direkt auf die Steuerung der Presse übertragen. Durch die verbesserte Verfügbarkeit kann die Zahl der Pressenlinien laut Siemens bei VW langfristig von 17 auf acht sinken. Durch intelligentes Motormanagement wird die beim Abbremsen freigesetzte Energie für die Beschleunigung anderer Antriebe verwertet, was die Pressenlinien nun 30 bis 40 Prozent energieeffizienter macht [18].

Neue Pressen für Fabriken werden meist als Servopressen konzipiert. Die Auf- und Abbewegungen der Presse werden individuell eingestellt, es ist kein fester Takt wie bei einem Schwungradantrieb vorgegeben. Die Anschaffungskosten für Servopressen sind zwar höher, es sind aber oft kürzere Taktzeiten realisierbar. Servopressen erfordern intelligentes Energiemanagement, da der Energieverbrauch sonst gegenüber einer Schwungradpresse deutlich höher wäre. Moderne Servoantriebslösungen lassen sich zudem einfach in die Fabrikautomatisierung integrieren und ermöglichen Features zur Fernwartung und -diagnose.

Assistierte Bediener

Bisher arbeiten Roboter in abgesperrten Bereichen ohne menschliche Beteiligung. In Zukunft wird auch die aktuatorisch unterstützte Assistenz der Beschäftigten durch Roboter ein Thema sein. Eine neue Generation von Leichtbau-Robotern soll es ermöglichen, dass Fachkräfte gefahrlos arbeiten und Roboter als „Dienstleister“ unter der Leitung der Beschäftigten zusätzliche dynamisch adressierbare Hilfen anbieten [17]. Das kann die Hilfe bei der Manipulation schwerer Teile sein oder beispielsweise das Einlegen und Entnehmen von Teilen in Gesenkschmiedepressen.

Augmented Reality

Unter Augmented Reality versteht man die computergestützte Erweiterung der Realitätswahrnehmung, beispielsweise durch die Anzeige von Zusatzinformationen als Hilfestellung bei komplexen Aufgaben. Tritt an einer komplexen Industrieanlage ein Defekt auf, muss dieser schnellstmöglich lokalisiert und behoben werden, um unproduktive Stillstandszeiten auf ein Minimum zu reduzieren. Die Fehlersuche in vernetzten Automatisierungssystemen ist heute bereits sehr aufwendig, da der Ort eines Fehlersymptoms häufig nicht dem Ort der Fehlerursache entspricht [12]. Augmented-Reality-Lösungen sollen in Zukunft für solche Szenarien raschere Abhilfe schaffen. Bei einem Defekt an einem Roboter oder Antrieb erhält

der Servicetechniker zukünftig durch einen Tablet-PC sofort online Informationen, um welches Gerät es sich handelt und alle wichtigen Informationen für eine rasche Fehlerbehebung. Der Servicetechniker betrachtet durch die Kamera des Tablet-PCs die Roboterzelle (Abbildung 4.6). Die Software erkennt die fehlerhafte Maschine, zeigt auf dem Bildschirm über das Internet direkt die komplette Historie des Roboters wie Typ, Liefertermin, Ansprechpartner oder den letzten Servicetermin und informiert den Techniker damit über die bisherige Beanspruchung und Verfügbarkeit des Robotersystems.



Abb. 4.6: ABB Augmented Reality (Quelle: ABB)

Fernwartung und -diagnose für Motoren, Antriebe und Roboter

Ein Industrie-4.0-Schlüsselprodukt von ABB in der Fabrikautomation ist die Software RobotStudio, mit der Programme für Industrieroboter vorab simuliert werden können. Durch die Anbindung an den Automation Builder, die Engineering Suite von ABB, können Maschinenbauer und Systemintegratoren ihre Anlagen komplett virtuell planen, warten und auch deren Energieeffizienz verbessern.

Remote Services tragen zu einem störungsfreien Betrieb von Anlagen bei und helfen Ausfallzeiten drastisch zu reduzieren. Die Advanced-Remote-Diagnostic-Technologie ermöglicht nicht nur die Ferndiagnose, sondern realisiert auch eine proaktive (vorausschauende) Wartung von Robotern. Robotersysteme werden ständig überwacht; so können bis zu 50 Prozent aller ungeplanten Stillstände vermieden werden.

Für Antriebe bietet ABB mehrere Möglichkeiten des Fernzugriffs, wie etwa eine Webserverbasierte Ferndiagnose mittels einer Hardwarelösung, den direkten Zugriff auf Umrichter zur Parametrierung und Diagnose über ein Engineeringtool oder indem Antriebsdaten auf einer SPS gespeichert und via Internet abgerufen werden können. Der „Drive Manager“ ermöglicht beispielsweise die Fernkonfiguration und Online-Diagnose von ABB Frequenzumrichtern über das SPS-Netzwerk, was die Inbetriebnahme und Diagnose des Gesamtsystems beschleunigt.

4.3 Drückmaschine

In diesem Kapitel werden die mit der in Kapitel 3.3 vorgestellten Drückmaschine durchgeführten Versuche beschrieben und die dafür erstellten Programme erläutert.

Den Ausführungen in den vorangegangenen Kapiteln ist zu entnehmen, dass Produktionsprozesse immer komplexer werden. Bevor man es wagt, ganze Fabriken nach Industrie 4.0 Visionen aufzubauen, sollte man Erfahrungen mit Modellanlagen und -prozessen sammeln. Mit Demonstrationsanlagen können IKT und deren Einsatz in einer realitätsnahen industriellen Produktionsumgebung getestet und weiterentwickelt werden. Die Erprobung der Funktionssicherheit sollte oberste Priorität haben. Die Folgen für die Verbreitung von Industrie 4.0-Technologien wären fatal, wenn Unfälle darauf zurückzuführen wären.

Neben dem Forschungs- und Entwicklungszweck können einem breiten interessierten Publikum neue Technologien bzw. neue Anwendungen von Technologien vorgeführt und die Verbreitung von Industrie 4.0 gefördert werden. Ein Beispiel dafür ist die herstellerunabhängige Demonstrations- und Forschungsplattform *SmartFactory^{KL}* am Deutschen Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI). Ein weiteres Beispiel ist die Lemgoer Modellfabrik des Fraunhofer IOSB-INA.

Aus einem didaktischen Gedanken heraus ist auch die Idee entstanden, die LEGO Mindstorms EV3-Drückmaschine zu bauen. LEGO Mindstorms EV3 ermöglicht bereits Schülkindern, sich spielerisch mit Technik zu befassen und weitergehendes Interesse für die spätere Berufswahl zu entwickeln. In den nächsten Jahren werden viele Ingenieure die Pension antreten und die Zahl der Technikabsolventen ist nach wie vor verhältnismäßig gering. Es sollte also ein Low-cost Projekt umgesetzt werden, das Jugendliche und andere interessierte ansprechen und motivieren soll, sich mit technischen Disziplinen zu befassen. Die LEGO Mindstorms EV3-Drückmaschine demonstriert die Automatisierungs- und IKT-Technologien an einem realen Fertigungsprozess auf anschauliche Art und Weise.

4.3.1 Drückversuche

Man stelle sich den fiktiven Produktionsprozess wie folgt vor: Ein Kundenauftrag über 100 Stück Kegel 50° aus Aluminium und 50 Stück aus Stahl sowie 80 Stück Kegel 15° aus Aluminium geht an der Produktionsanlage ein. Die verschiedenen Ronden werden ausgestanzt und auf Werkstückträger abgelegt, die über alle für das Werkstück notwendigen Informationen verfügen (RFID Tags oder ähnliche Technologien). Kommt ein Werkstückträger bei der Drückmaschine an, identifiziert das RFID-Lesegerät die Ronden. Anhand der ausgelesenen Informationen über das Werkstück spannt das automatische Werkzeugwechselsystem das passende Drückfutter in die Hauptspindel ein. Ein Mitarbeiter oder Roboterarm spannt die Ronde in die Drückmaschine ein und das Bearbeitungsprogramm wird automatisch aus dem Programmspeicher aufgerufen. Der CNC-Kreuzsupport verfügt über einen Werkzeugrevolver, der das benötigte Werkzeug einschwenkt und die Bearbeitung beginnt. Das fertige Werkstück wird entnommen und wieder auf dem Werkstückträger abgelegt. Ist das Los abgearbeitet, wird das nächste identifiziert und die Maschine entsprechend konfiguriert. Für den 50° Stahlkegel muss lediglich ein den geänderten Umformeigenschaften entsprechendes Bearbeitungsprogramm geladen werden. Für den 15° Kegel wird auch das Drückfutter umgespannt.

Auf der Drückmaschine können mit den beiden Drückfuttern aus Abbildung 3.26 zwei verschiedene kegelförmige Werkstücke hergestellt werden (Abbildung 4.8). Der EV3-Stein entscheidet anhand der zu bearbeitenden Blechrunde, welches Drückfutter dafür eingespannt werden soll und lädt das entsprechende Bearbeitungsprogramm. Die Werkstückerkennung erfolgt dabei mit Hilfe des EV3-Farbsensors und die Drückfutter sind ebenfalls farblich gekennzeichnet. Die Zuordnung der Blechrunden zu den Drückfuttern und die entsprechenden Farben sind in Tabelle 10 angeführt und die Abmessungen in Abbildung 4.7 ersichtlich. Die Mensch-Maschine-Kommunikation erfolgt über das Display und Bedieninterface des EV3-Steins und einen mittels Bluetooth gekoppelten Windows-PC.

Tab. 10: Kennzeichnung der Werkstücke und Werkzeuge

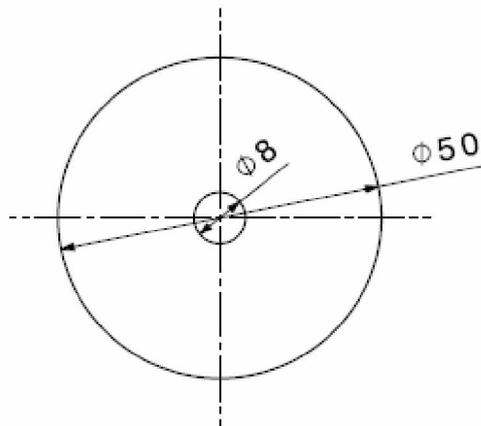
Bezeichnung	Farbe
Kegel 50 Grad	
Ronde \varnothing 50 mm	Blau
Drückfutter 50°	Gelb
Kegel 15 Grad	
Ronde \varnothing 35 mm	Grün
Drückfutter 15°	Rot

4.3.2 FEM-Simulation Kegel 50°

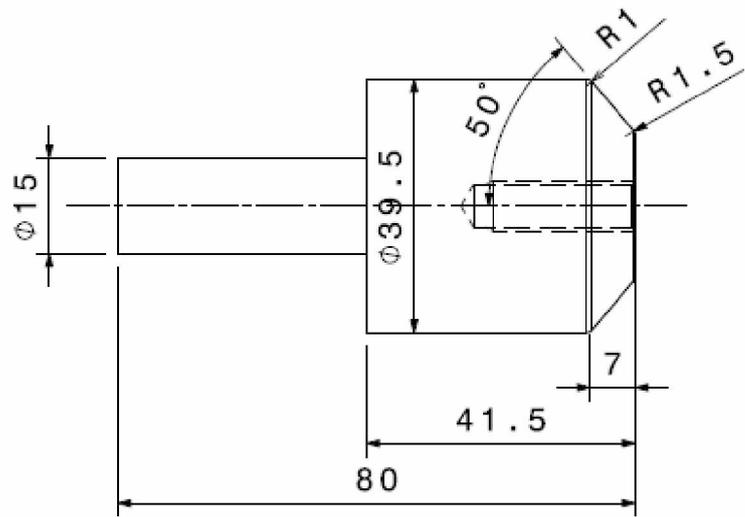
Für den 50° Kegel wurde auch eine FEM-Umformsimulation mit der Software Simufact von Herrn Dipl.-Ing. Mario Kuss am Lehrstuhl für Umformtechnik durchgeführt. Dafür musste die Werkzeugkinematik der Drückmaschine aufgezeichnet werden (Abbildung 4.9). Da die EV3-Software entsprechende Softwareblöcke zur Messdatenerfassung enthält, war die Integration der Werkzeugwegerfassung in das Programm kein Problem. In Abbildung 4.10 ist die für die Drücksimulation verwendete Werkzeugkinematik dargestellt. Bei dieser wurde die Werkzeugbewegung vom Rondenaußenrand Richtung Zentrum entfernt, da bei dieser Bewegung keine Zustellung erfolgt. Die Rechenzeit konnte dadurch deutlich reduziert werden, ohne die Ergebnisse wesentlich zu beeinflussen.

Simufact ist ein modulares System, in dem verschiedene Applikationsmodule für unterschiedliche Fertigungsbereiche bereit stehen: Massivumformung, Blechumformung, mechanisches Fügen und Schweißtechnik. Diese können flexibel im Leistungsumfang skaliert oder durch Zusatzmodule für Spezialanwendungen ergänzt werden (Abbildung 4.11). Die Drücksimulation wurde mit dem Modul Simufact.forming durchgeführt, das speziell für die umformende Industrie entwickelt wurde.

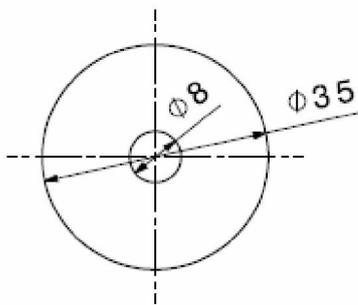
Die Modellierungs- und Prozessdaten der FEM-Simulation sind Tabelle 11 zu entnehmen. Der reale Drückprozess läuft mit einer Spindeldrehzahl von ca. 250 min^{-1} . In der Simulation wurde die Drehzahl auf 1/10 der Originaldrehzahl (25 min^{-1}) gesenkt, da diese in der ersten Umformstufe starke Faltenbildung bewirkte, was im realen Prozess nicht zu beobachten war. Der Grund für die Unterschiede liegt wahrscheinlich bei der Rondenerstellung durch die Bearbeitung des Rondenaußendurchmessers mit der Blechschere und die leichte Vorbiegung des Bleches nach dem Lochen der inneren Bohrung.



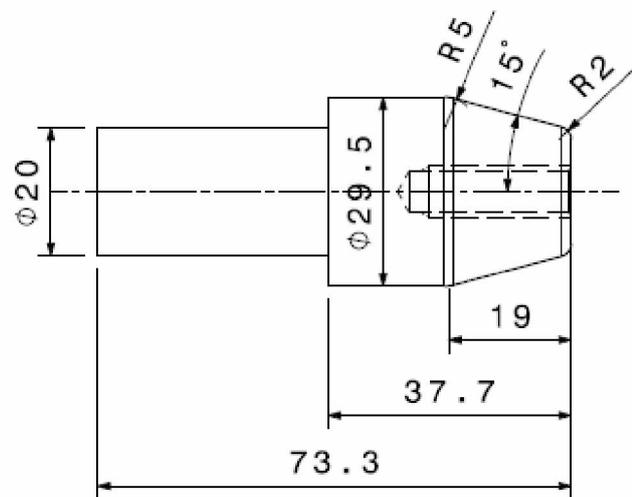
Ronde Kegel 50°
Al 99,5 (t=0,5mm)



Drückfutter Kegel 50°



Ronde Kegel 15°
(Al 99,5 t=0,5mm)



Drückfutter Kegel 15°

Abb. 4.7: Abmessungen der Ronden und Drückfutter



Abb. 4.8: Herstellbare Werkstückvarianten (Links: Kegel 50°, Rechts: Kegel 15°)

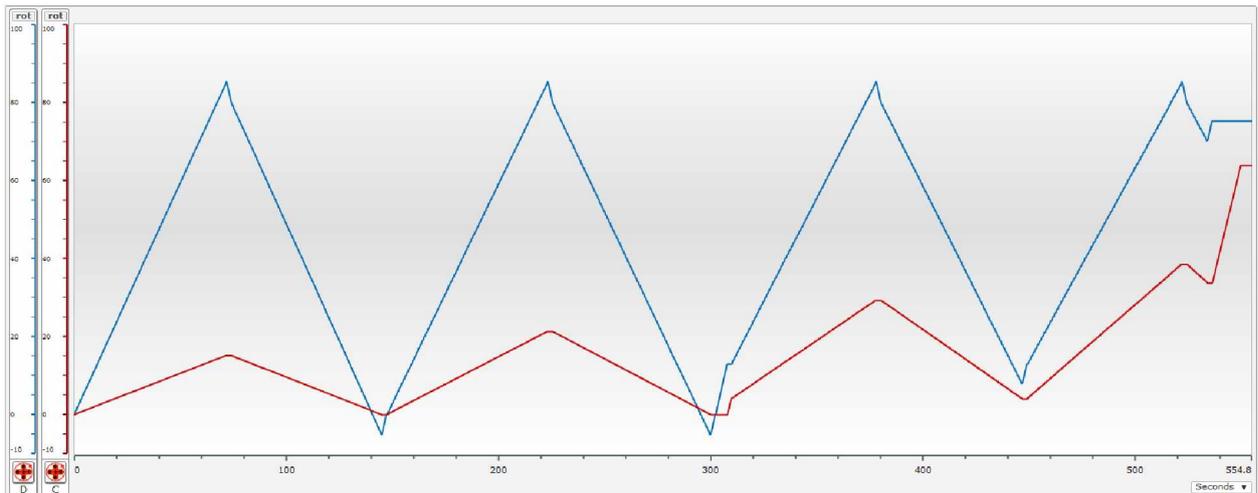


Abb. 4.9: Von der EV3-Software aufgezeichnete Werkzeugkinematik

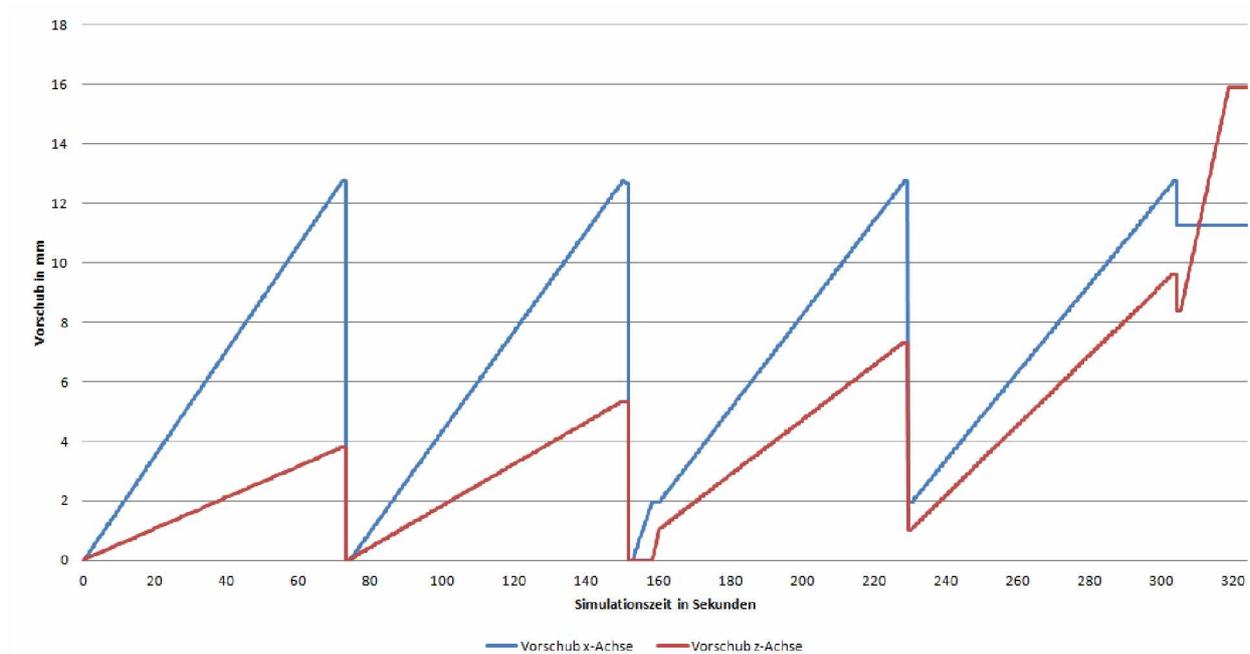


Abb. 4.10: Werkzeugkinematik für die Drucksimulation

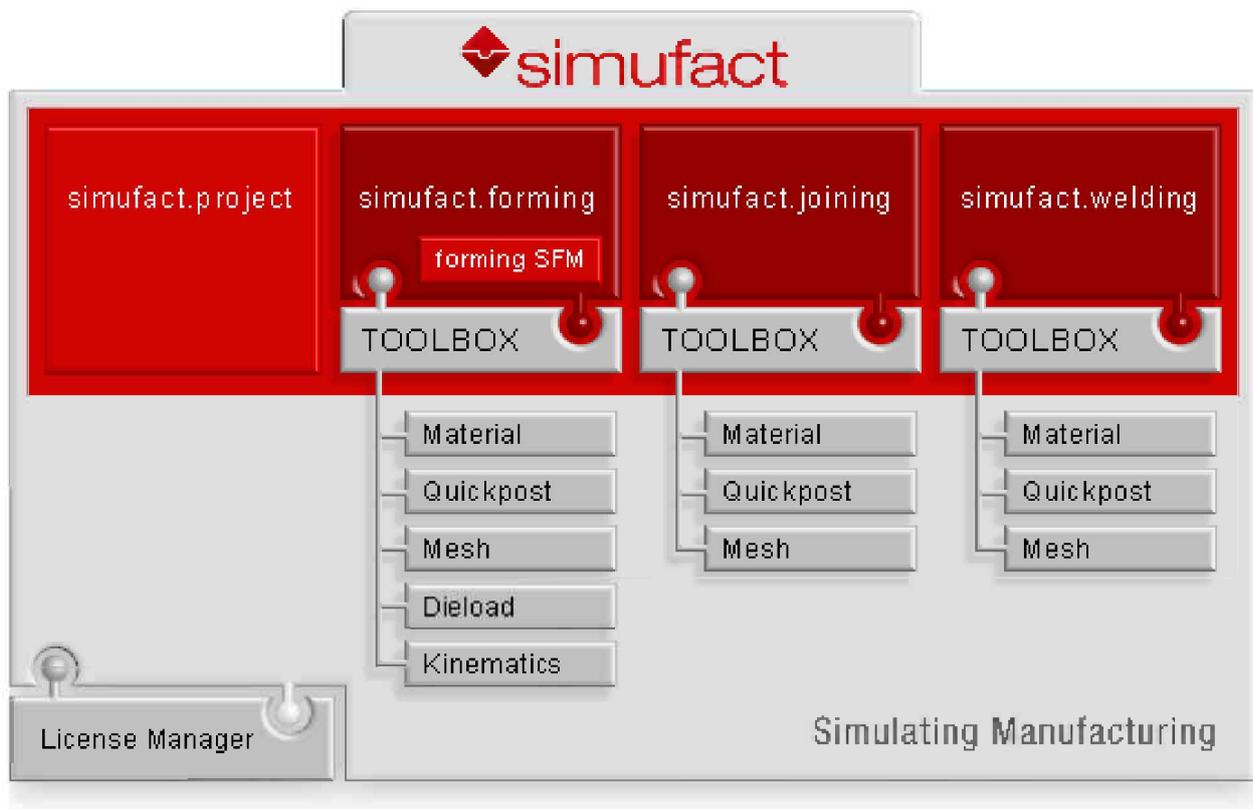


Abb. 4.11: Simufact Umgebung (Quelle: Simufact)

Tab. 11: Modellierungs- und Prozessdaten der FEM-Simulation

Bezeichnung	Eigenschaft
Prozess	
Typ	Walzen
Umformprozess	kalt
Simulation	3D
Solver	FE
Umgebungstemperatur	293,15 K
Prozesszeit	324 s
Ronde	
Typ	Werkstück
Material	Al 99,5
Vernetzertyp	Sheetmesh (3D)
Elementtyp	Hexaeder
Elementgröße	1,2 mm
Elemente	5181
Drückfutter, Gegenhalter, Rolle	
Typ	Starrkörper ohne Wärmeleitung
Material	H-13
Drehzahl Drückfutter	25 min ⁻¹
Reibungsobjekt	Coulomb
Reibkoeffizient	0,02

In Abbildung 4.12 ist die Blechdickenverlauf nach dem vierten Umformschritt der Simulation zu sehen. Die Ausgangsblechdicke von 0,5 mm wurde durch die Umformung nicht verändert, was charakteristisch für das Drücken ist und es vom Walzdrücken unterscheidet, bei dem eine Veränderung der Blechdicke beabsichtigt ist (siehe dazu Kapitel 2.5.1). Die am Rand des Bleches sichtbaren Beulen sind auf numerische Rechenfehler zurückzuführen.

Da es für LEGO Mindstorms EV3 noch keine kompatiblen Kraftsensoren gibt, ist kein Vergleich mit den errechneten Kräften aus der Simulation möglich. Die ermittelten Kräfte am Rollenwerkzeug fallen erwartungsgemäß gering aus, da durch die begrenzte Belastbarkeit des LEGO-Systems nur mit sehr kleinen Vorschüben gearbeitet werden kann. In Tabelle 12 sind die Maximalwerte der Axial-, Radial- und Tangentialkraftkomponente am Rollenwerkzeug für die vier simulierten Umformstufen ersichtlich. Das Koordinatensystem dazu ist in Abbildung 4.13 dargestellt. Die Werte weisen wegen der abwechselnden stufenförmigen Zustellung der beiden Achsen eine relativ große Streuung auf.

Betrachtet man die Kraftkomponenten, so fällt die Axialkraft am größten aus, wie bereits in Kapitel 2.5.2 erwähnt. In der ersten Stufe, bei anfangs noch ebener Ronde, sind die anderen Kraftkomponenten gegenüber der Axialkraft vernachlässigbar klein. Während der fortschreitenden Umformung verlagert sich ein Teil der Axialkraft mit flacher werdendem Kegelwinkel in die Radialkraftkomponente. Die Umformkraft steigt auch mit jedem Umformvorgang weiter an. Das hat zwei Gründe: Zum einen verfestigt sich das Material durch die Kaltumformung. Die Kaltverfestigung ist bei Al 99,5 jedoch vergleichsweise gering. Den größeren Einfluss hat der Geometrieeffekt, denn die Napfform hat eine versteifende Wirkung. Bei ähnlichen Versuchen mit einem zylindrischen Stahlzapfen wurde ein Verhältnis der maximalen

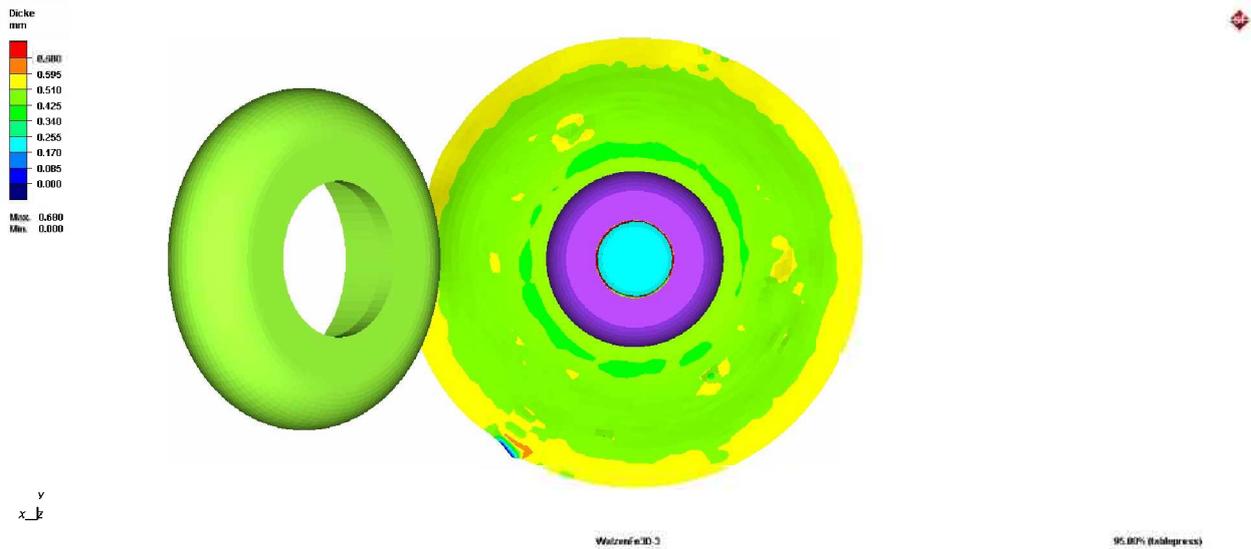


Abb. 4.12: Verlauf der Blechdicke nach der vierten Umformstufe

Kraftkomponenten $F_a:F_r:F_t$ von etwa 15:5:1 ermittelt [29]. Diese Kraftverhältnisse stellen sich auch bei diesem Beispiel mit zunehmender Umformung ein. Die Tangentialkraftkomponente ist für Rollenwerkzeuge sehr klein, da nur der Rollreibungswiderstand überwunden werden muss.

Tab. 12: Maximalwerte der Umformkräfte an der Rolle

Umformstufe	F_a in N (-z)	F_r in N (x)	F_t in N (y)	$F_a:F_r:F_t$
1	137	15	7	20:2:1
2	152	40	14	11:3:1
3	266	96	17	16:6:1
4	257	144	20	13:7:1

Die Abbildungen 4.13 bis 4.20 zeigen für jede der vier gerechneten Umformstufen den Verlauf von Umformgrad und Vergleichsspannung in der Ronde in radialer Richtung. Da die Umformung durch die Drückrolle lokal begrenzt erfolgt, sind die höchsten Beanspruchungen im Material im unmittelbaren Kontaktbereich der Rolle zu finden. Die Vergleichsspannung erreicht im Bereich der höchsten Beanspruchung unter dem Werkzeug Werte um 130 MPa. Die Radialspannungen sind dabei ringförmig verteilt, wie in Abbildung 2.8 dargestellt.

Anhand der Abbildungen ist ein geringer Umformgrad je Stufe erkennbar. Das liegt aber nicht nur an der geringen Leistung der LEGO-Motoren. Das 0,5 mm dünne Material reagiert auf zu hohe Spannungen sehr empfindlich. Bei Versuchsdurchgängen mit höheren Vorschüben kam es spätestens in der vierten Umformstufe zur Faltenbildung aufgrund zu hoher Tangentialdruckspannungen im Material. Auch der Einfluss des Verhältnisses zwischen Blechdicke und Rondenüberstand (Kapitel 2.5.5) konnte praktisch erprobt werden. Mit 50 mm Rondendurchmesser konnte der 50° Kegel fehlerfrei hergestellt werden. Versuche mit 60 mm Durchmesser endeten mit den gleichen Parametern jedoch immer mit Falten- und Rissbildung.

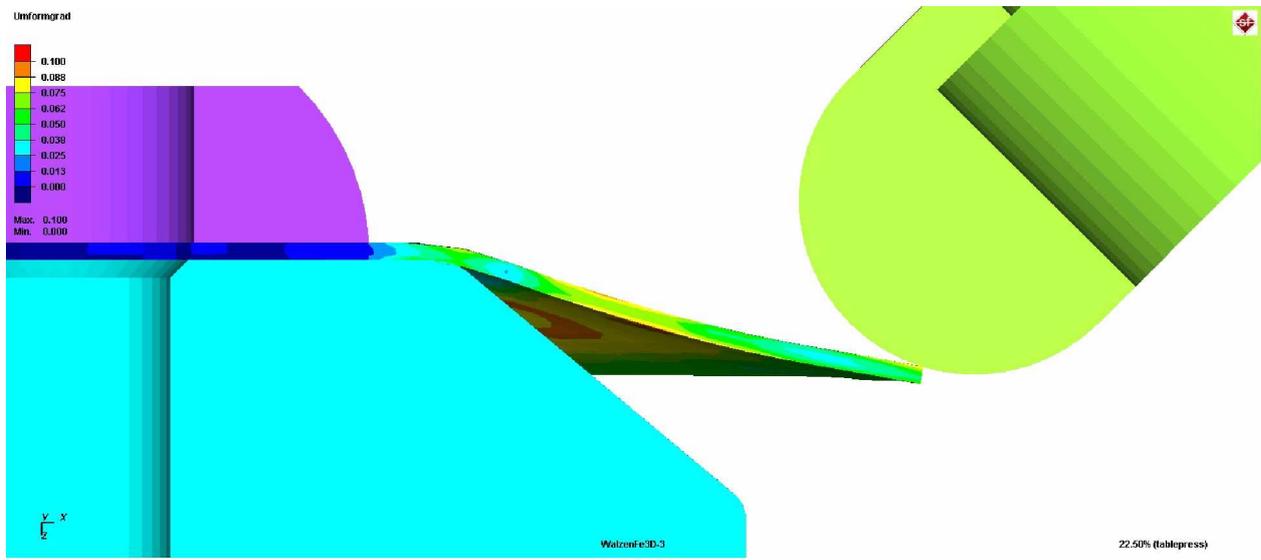


Abb. 4.13: Umformgrad erste Stufe

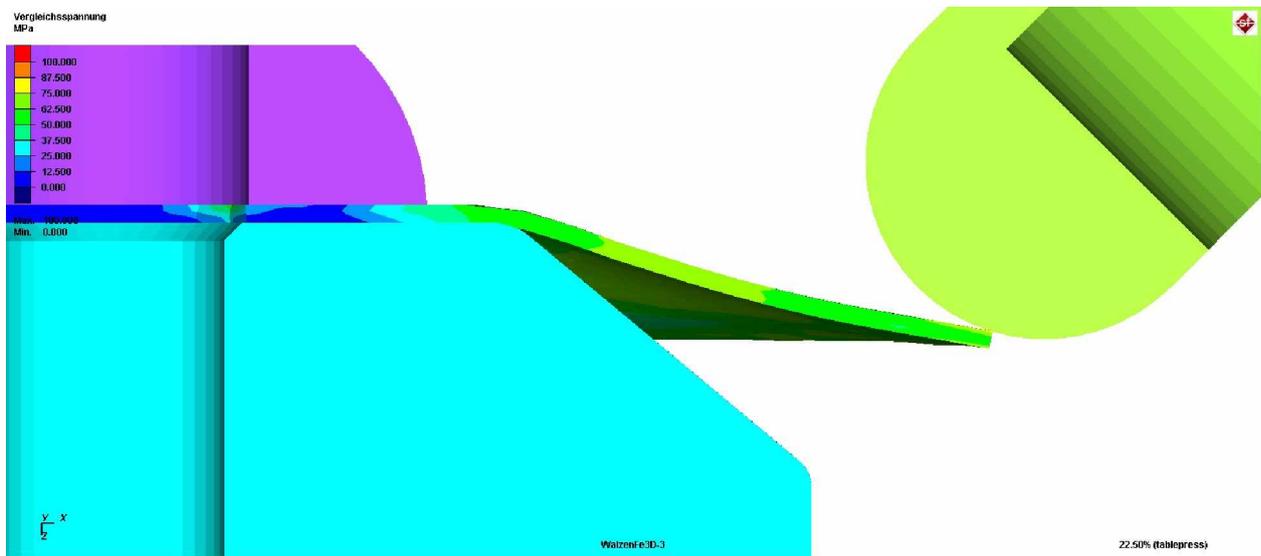


Abb. 4.14: Vergleichsspannung erste Stufe

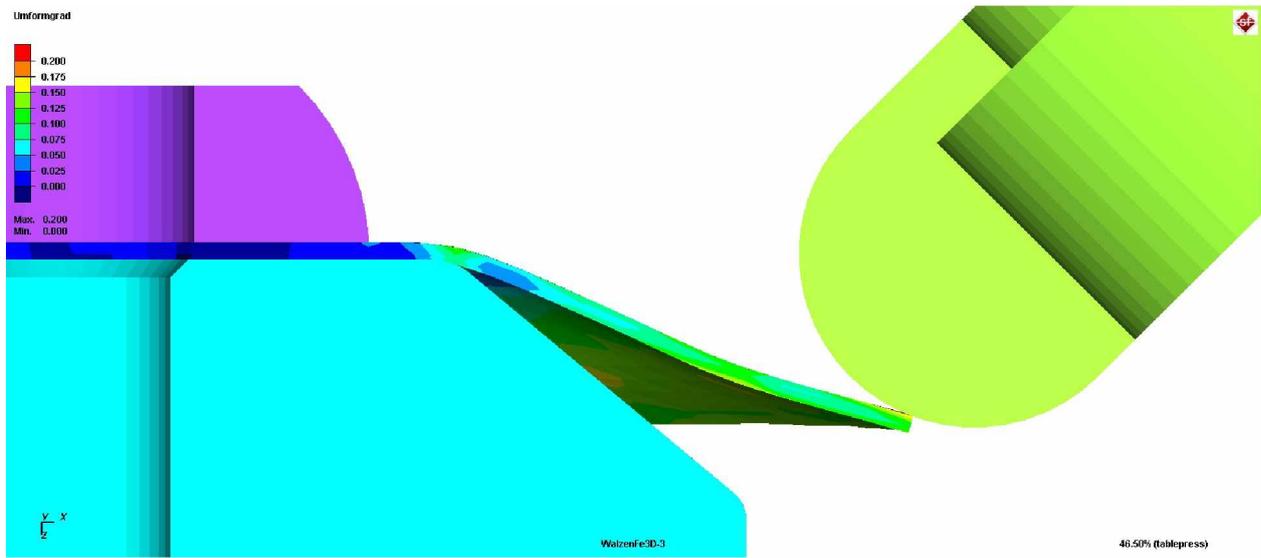


Abb. 4.15: Umformgrad zweite Stufe

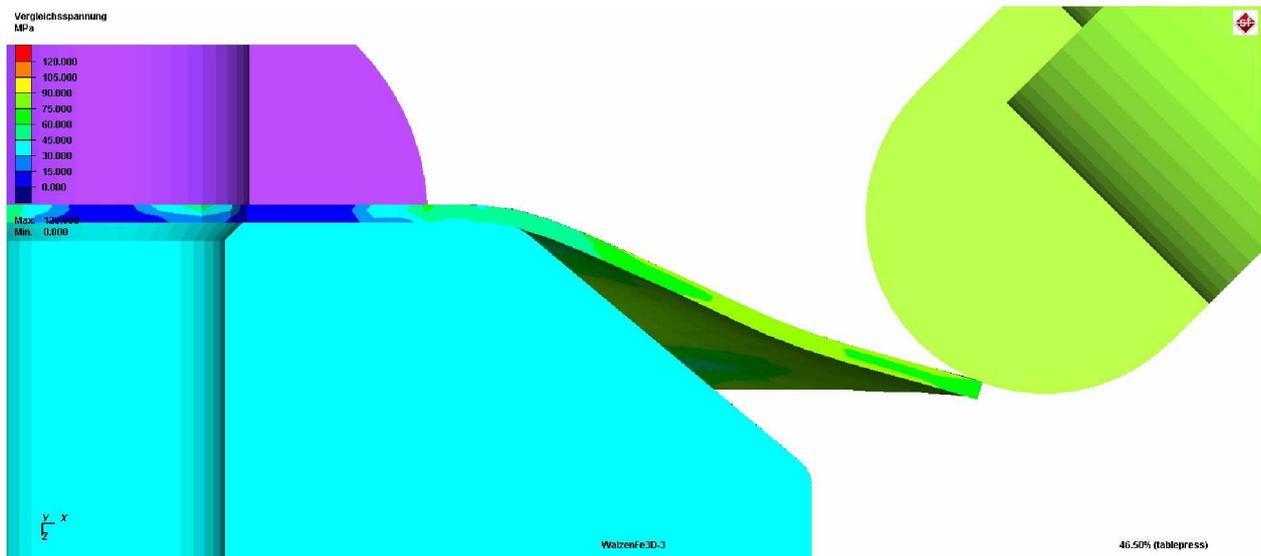


Abb. 4.16: Vergleichsspannung zweite Stufe

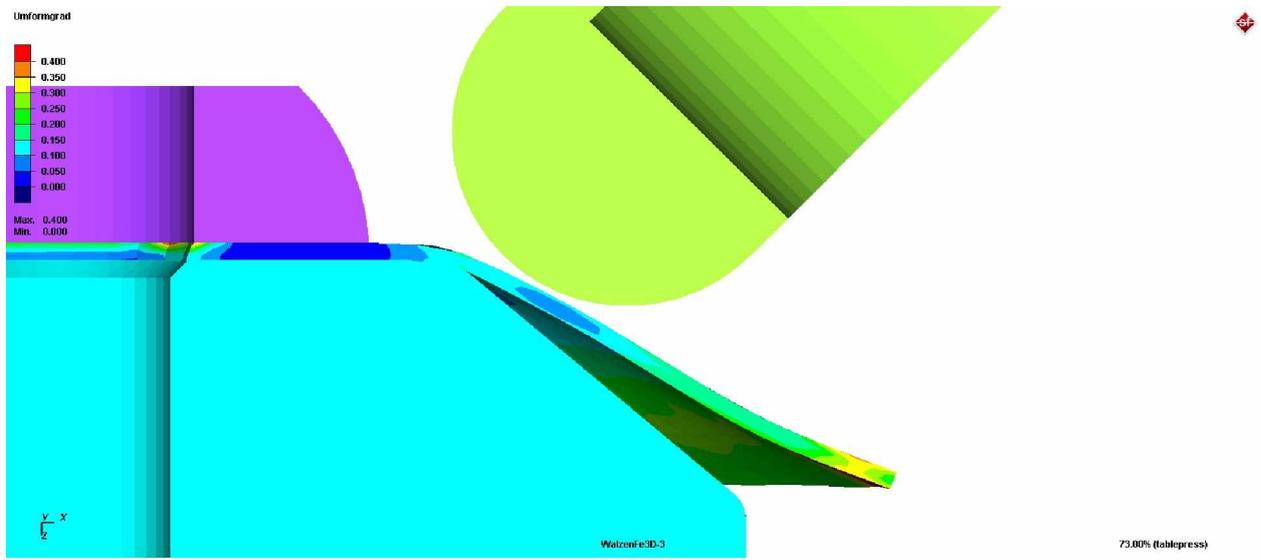


Abb. 4.17: Umformgrad dritte Stufe

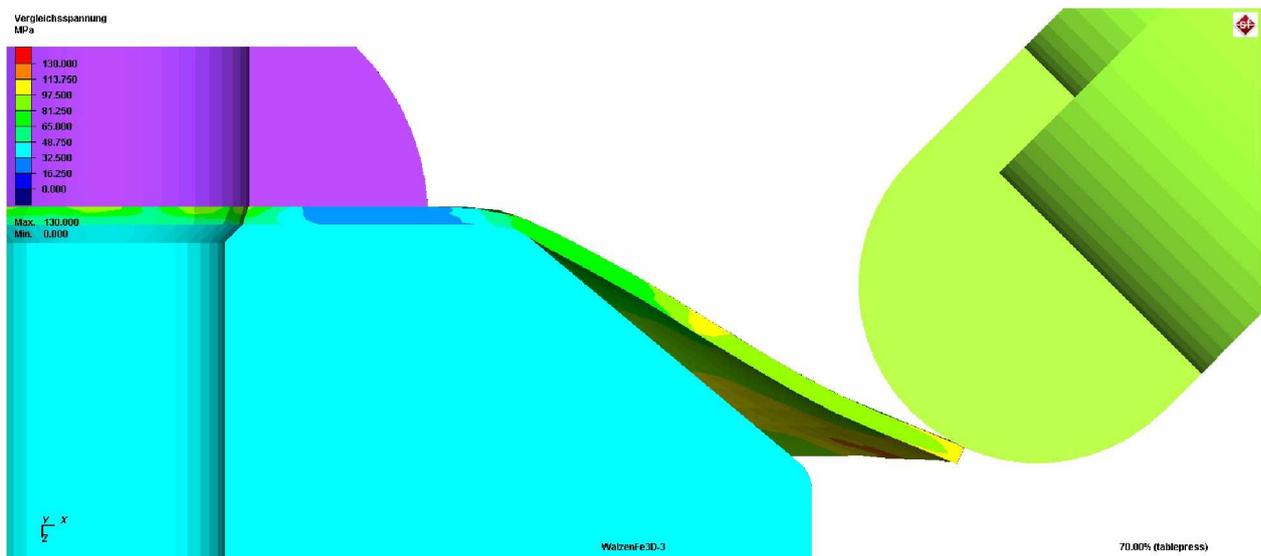


Abb. 4.18: Vergleichsspannung dritte Stufe

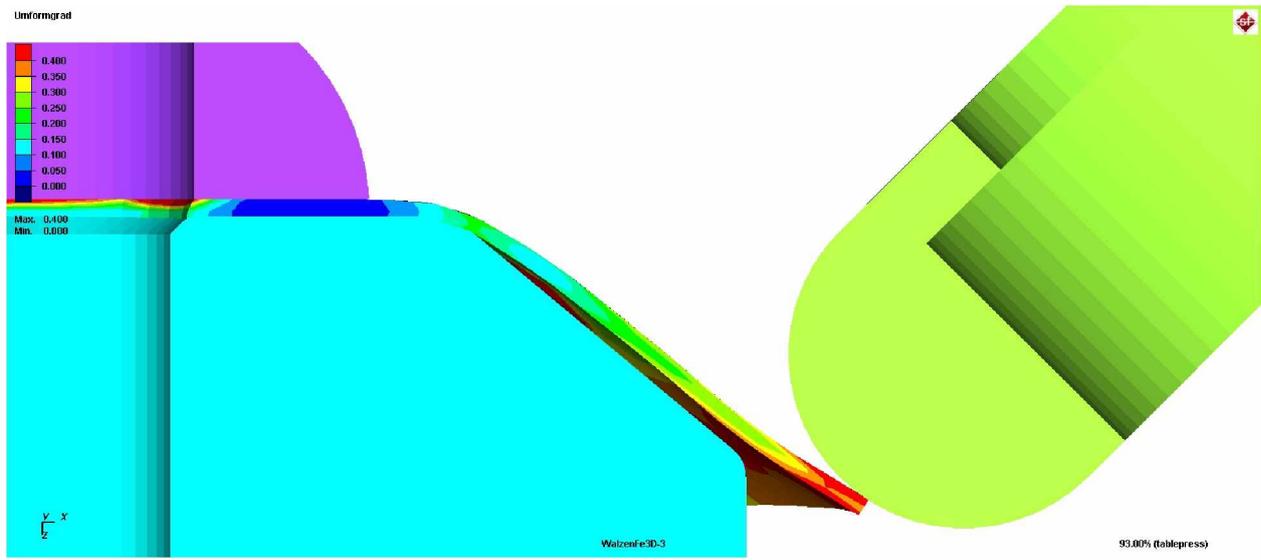


Abb. 4.19: Umformgrad vierte Stufe

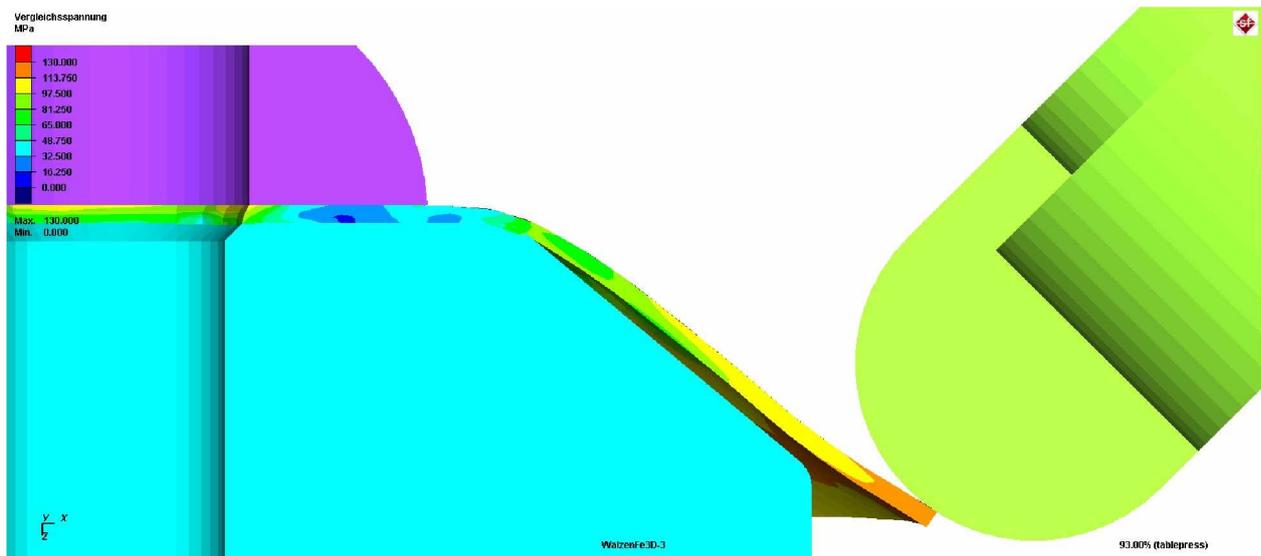


Abb. 4.20: Vergleichsspannung vierte Stufe

4.3.3 Steuerungsprogramme

Die Steuerungsprogramme für die EV3-Drückmaschine wurden mit der in Kapitel 3.2.5 vorgestellten LEGO Mindstorms Education EV3-Software erstellt. Für die Kommunikation mit einem Windows-PC muss der EV3-Messenger aus Kapitel 3.2.6 installiert sein. Um eine Bluetooth-Verbindung zum EV3-Stein herzustellen, sind folgende Schritte notwendig:

- Erstellen einer Bluetooth Verbindung zwischen PC und EV3-Stein über Windows (nicht über die EV3-Software)
- Überprüfen, welcher serielle Port von der Verbindung genutzt wird (Dienste in Eigenschaften unter Start - Geräte und Drucker)
- Starten des EV3-Messenger, auswählen des ermittelten seriellen Ports und betätigen des Connect-Buttons
- Zum Senden von Befehlen an den EV3-Stein ist als Mailbox title „EV3“ einzutragen und bei Message der Datentyp im Dropdown-Menü auf „Number“ zu ändern

Ist der EV3-Messenger verbunden und konfiguriert, werden vom EV3-Stein gesendete Meldungen im Fenster „Received messages“ angezeigt. Befehle vom PC können im Feld „Send message to mailbox“ eingetragen und mit einem Druck auf den Send-Button an den EV3-Stein gesendet werden.

In Tabelle 13 ist die Anschlussbelegungen der Ein- und Ausgänge am EV3-Stein angeführt. Vor dem Programmstart ist unbedingt zu kontrollieren, ob die Motoren und Sensoren richtig verkabelt sind. Die Motoren und Sensoren sind mit ihren Anschlussbezeichnungen in den Abbildungen 3.22 bis 3.25 markiert. Bei vertauschten Motoranschlüssen laufen die falschen Motoren synchron und die Drehrichtung stimmt nicht, was die Verformung oder Zerstörung der LEGO Zahnräder zur Folge hat.

Tab. 13: Anschlussbelegungen am EV3-Stein

Eingang	Sensor
1	Tastensensor
2	leer
3	Farbsensor
4	Tastensensor
Ausgang	Motor
A	großer Motor
B	großer Motor
C	großer Motor
D	großer Motor

Wie bereits erwähnt, basiert die EV3-Software auf der grafischen Programmiersprache LabVIEW von National Instruments. In Kapitel 3.2.5 sind die Funktionen der wichtigsten Programmbausteine kurz beschrieben. Detaillierte Informationen dazu sind der Hilfe in der EV3-Software zu entnehmen. Abbildung 4.21 zeigt einen vereinfachten Programmablaufplan für das Drückprogramm. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind nur die wichtigsten Ein- und

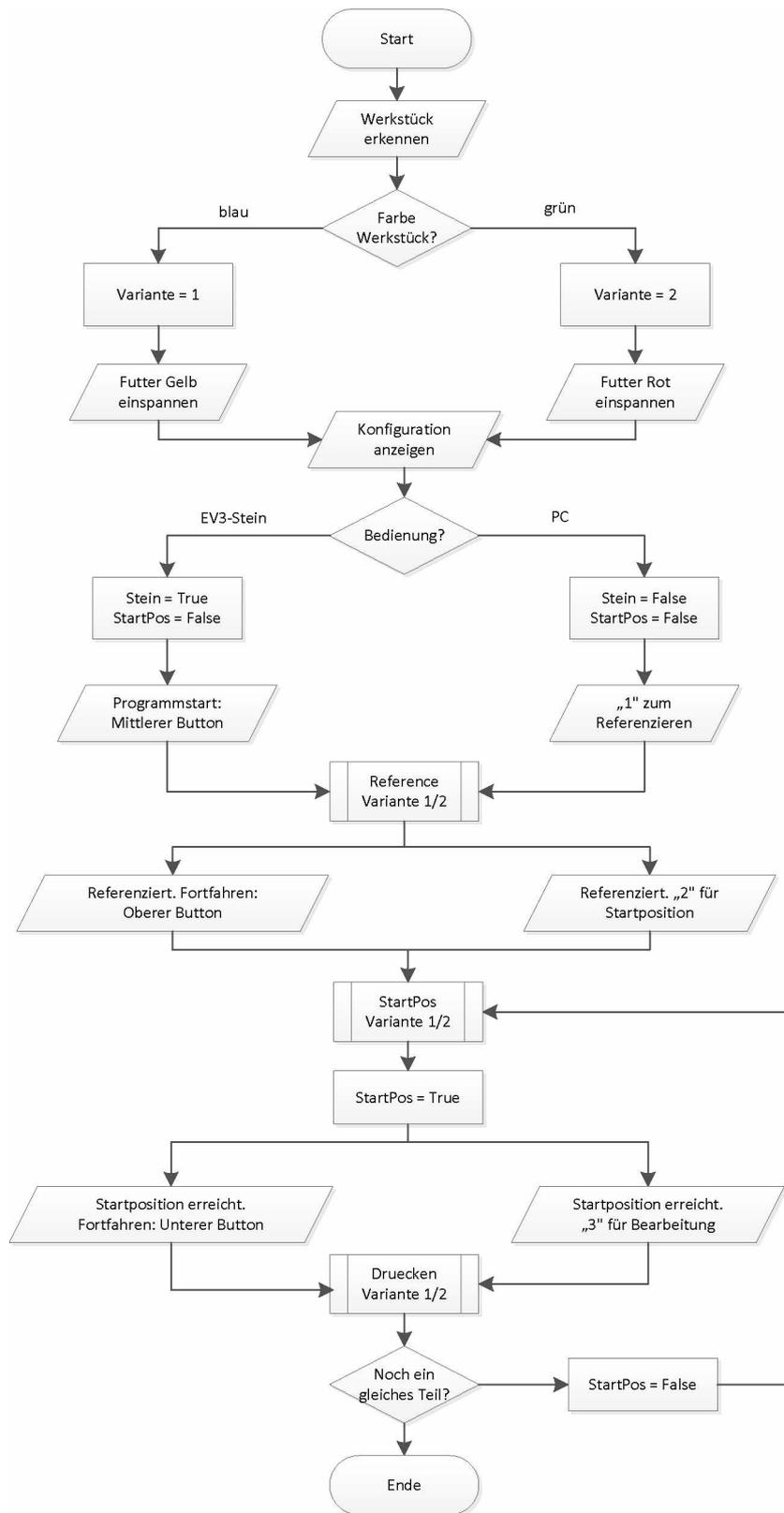


Abb. 4.21: Vereinfachter Programmablaufplan

Ausgaben, Variablen und die Aufrufe der Unterprogramme im Hauptprogramm angeführt. Details sind im Anschluss mit dem EV3-Programmcode beschrieben.

Das Hauptprogramm *Al05_4M.ev3p* in den Abbildung 4.22 bis 4.24 wird auf dem EV3-Stein oder aus der EV3-Software heraus gestartet. Es erscheint auf dem Display die Nachricht „Ronde waehlen“ (Abbildung 4.25). Wird nun eine farblich markierte Ronde vor den Farbsensor gehalten, bestätigt der EV3-Stein die gewählte Farbe akustisch und gibt auf dem Display eine Meldung über das Drückfutter für die gewählte Ronde aus. Das Drückfutter muss ebenfalls vom Farbsensor erkannt und akustisch bestätigt werden, bevor es eingespannt werden kann. Die gewählte Variante wird auch via Bluetooth an den EV3 Messenger am PC gesendet. Der Programmablauf geht erst weiter, wenn das für die gewählte Ronde passende Futter erkannt wurde. Nachdem Ronde und Drückfutter ordnungsgemäß erkannt wurden, fragt der EV3-Stein den Benutzer, ob er den weiteren Programmablauf mit dem Stein (linke Stein-Taste) oder über den PC (rechte Stein-Taste) steuern möchte.

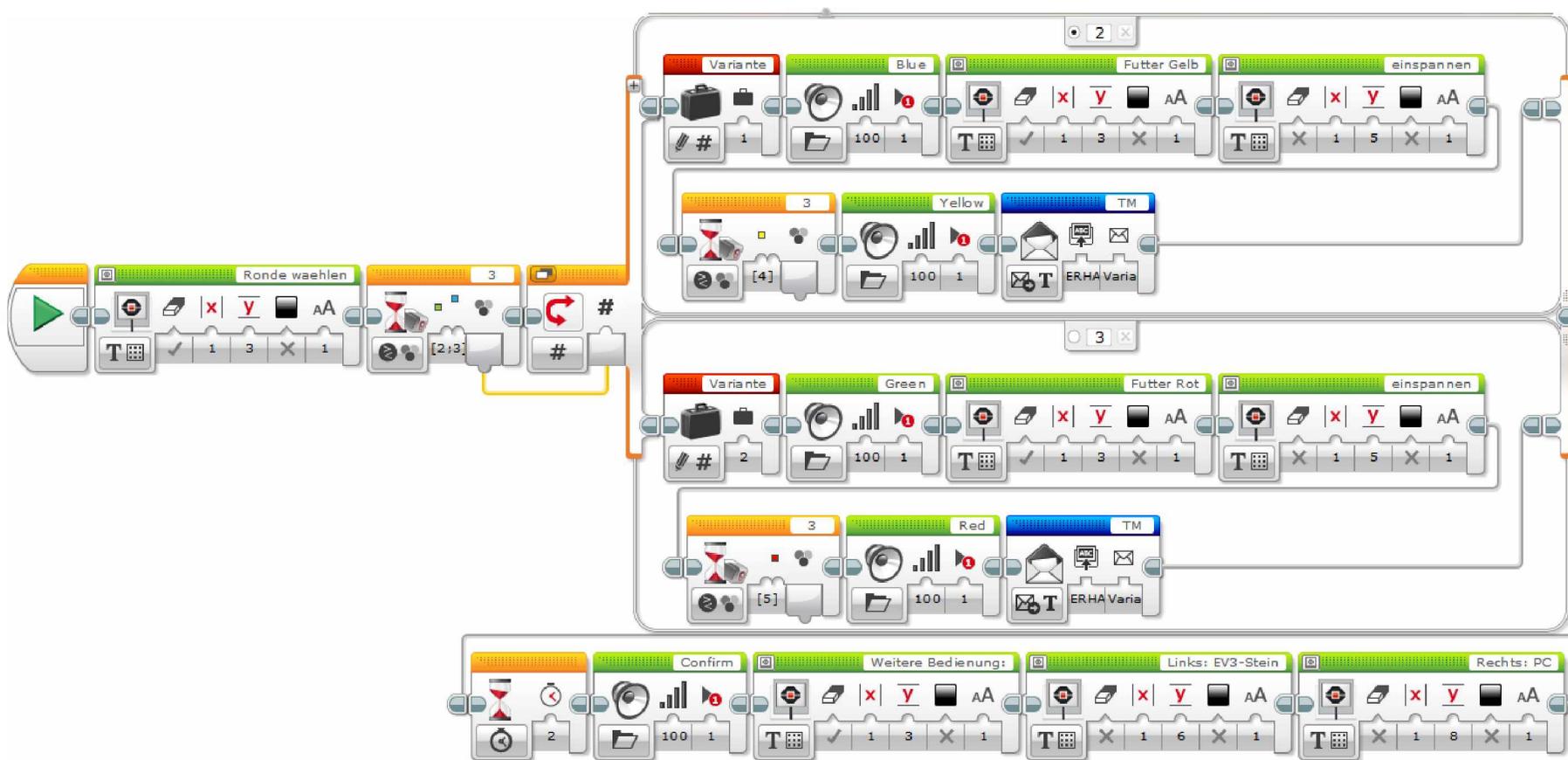
Der Programmablauf wird hier für den Fall der Stein-Steuerung beschrieben und anschließend die Variante mit PC-Steuerung erläutert. Im Fall der Stein-Steuerung fordert eine Displaynachricht zum Drücken der mittleren Stein-Taste auf, um die Referenzfahrt zu starten (Abbildung 4.25).

Mit einem Druck auf mittleren Button wird die Referenzfahrt mit dem Unterprogramm *Reference.ev3p* in Abbildung 4.26 gestartet. Sind die Endschalter nicht betätigt, wird erst der Quer- und anschließend der Oberschlitten so lange in Richtung des Endschalters verfahren, bis dieser betätigt wird. Sind beide Endschalter gedrückt, ist die Referenzfahrt abgeschlossen und es erfolgt eine Meldung am Display und an einen über Bluetooth gekoppelten PC. Danach erfolgt die Aufforderung am Display, den obere Interfacebutton zum Fortfahren zu betätigen (Abbildung 4.27).

Sobald der obere Interfacebutton betätigt wird, setzt das Programm mit dem Anfahren der Startposition (Unterprogramm *StartPos.ev3p* in Abbildung 4.28) des Werkzeugs für das eingespannte Drückfutter fort. Ist die Startposition erreicht, wird eine Statusmeldung am Display und via Bluetooth ausgegeben und auf das Drücken der Nach-unten Taste gewartet (Abbildung 4.29). Die Zählerstände der Rotationssensoren werden zurückgesetzt. Die Drehmaschine ist von der Bedienperson einzuschalten und die Drehzahl für das Drückfutter mit dem Potentiometer auf etwa 250 min^{-1} einzustellen.

Wenn die untere Stein-Taste gedrückt wird, startet der eigentliche Bearbeitungsvorgang sowie ein Timer für die Bearbeitungszeit. In den Unterprogrammen *motion_curve_V1* bzw. *motion_curve_V2* werden die in zahlreichen Versuchen empirisch ermittelten Werkzeugbahnen nacheinander abgefahren und die Ronde dabei schrittweise umgeformt. In den Abbildungen 4.31 bis 4.35 sind die Programmsequenzen für die fünf Umformstufen des 50° Kegels zu sehen. Der Programmablauf ist für den 15° Kegel bis auf die Startposition und die Bewegungskurven identisch und wird daher nicht gesondert angeführt. Während des Bearbeitungsvorganges informiert das Display mit einem Fortschrittsbalken über den Gesamtfortschritt des Drückvorganges. Der EV3-Messenger am PC erhält detailliertere Informationen: Neben dem aktuellen Bearbeitungsschritt wird auch die Bearbeitungszeit je Umformschritt gesendet.

Ist das Werkstück fertig, wird der Benutzer über das Programmende informiert und kann auswählen, ob ein weiteres gleiches Werkstück produziert oder das Programm beendet wer-

Abb. 4.22: Hauptprogramm *AI05_4M.ev3p*

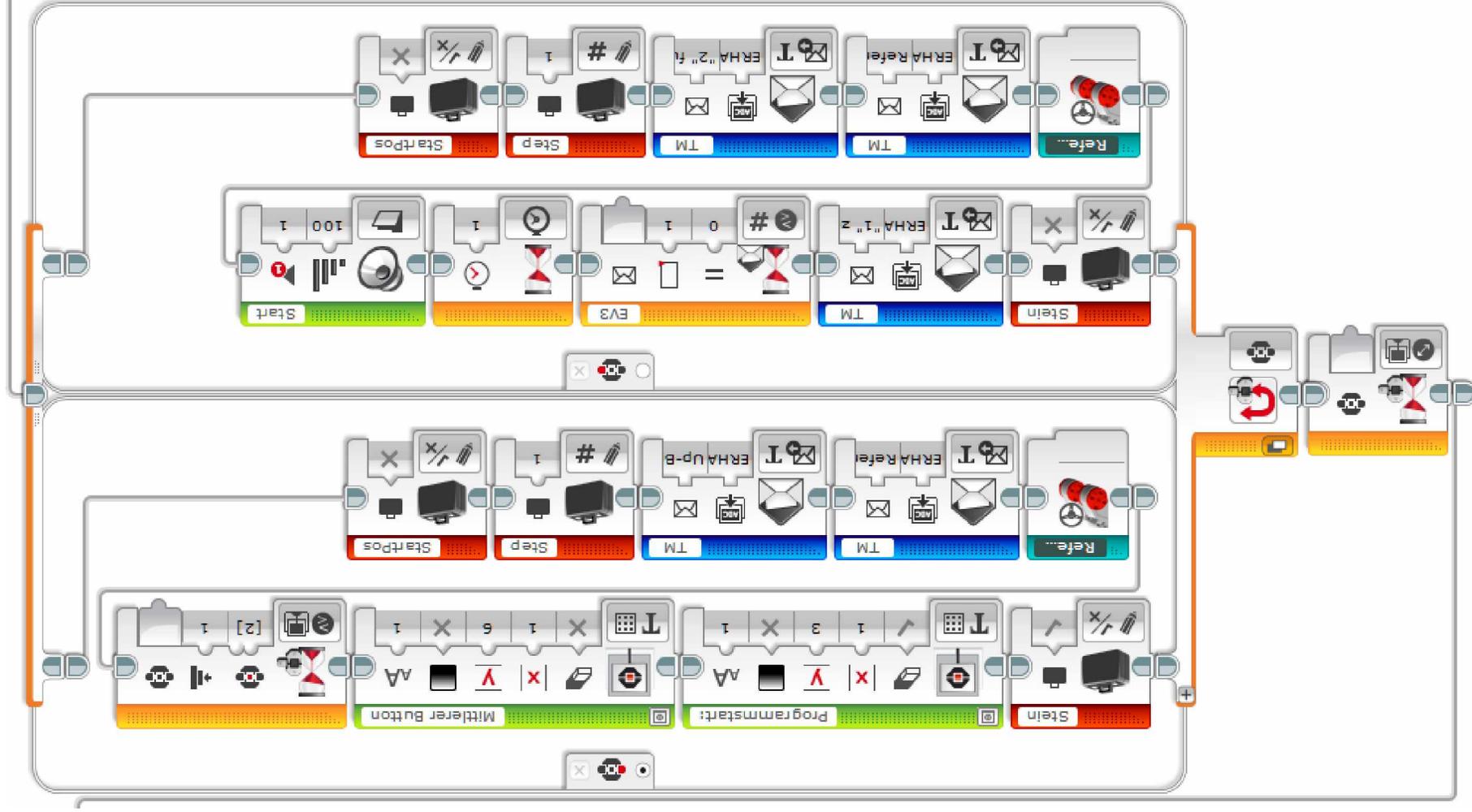


Abb. 4.23: Hauptprogramm A105_4M.ev3p (2)

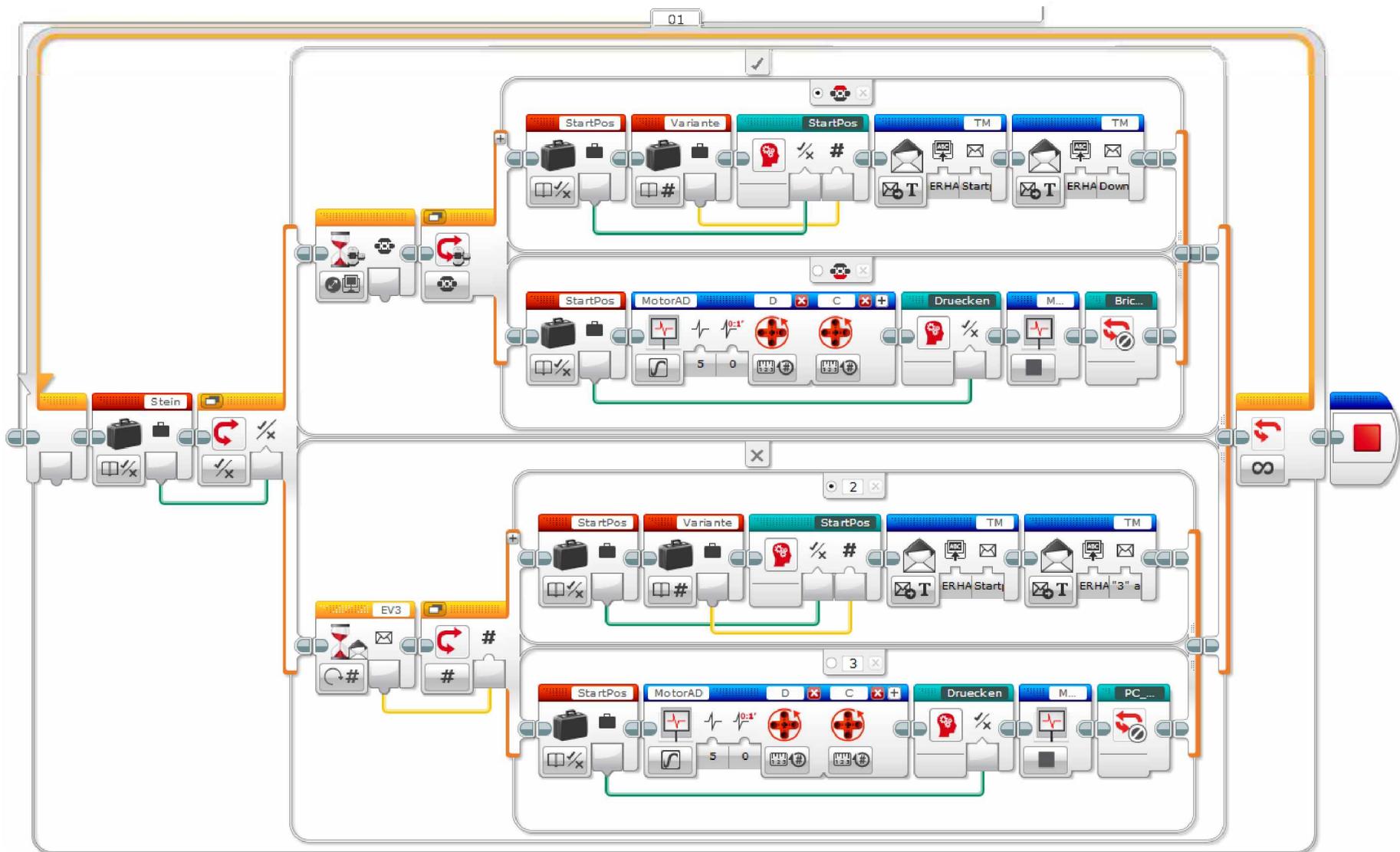


Abb. 4.24: Hauptprogramm *Al05_4M.ev3p* (3)



Abb. 4.25: Displaymeldungen nach dem Programmaufruf

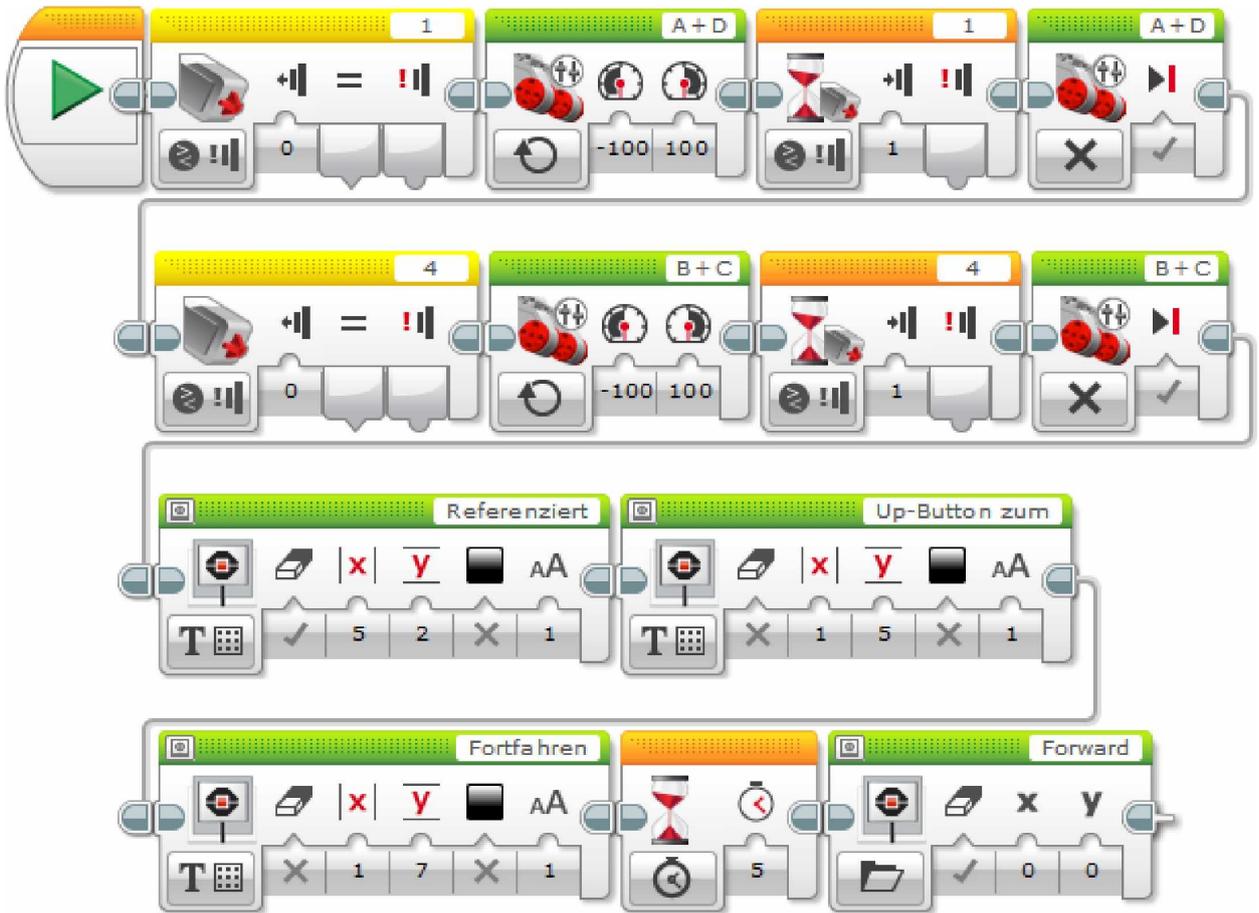


Abb. 4.26: Unterprogramm *Reference.ev3p*

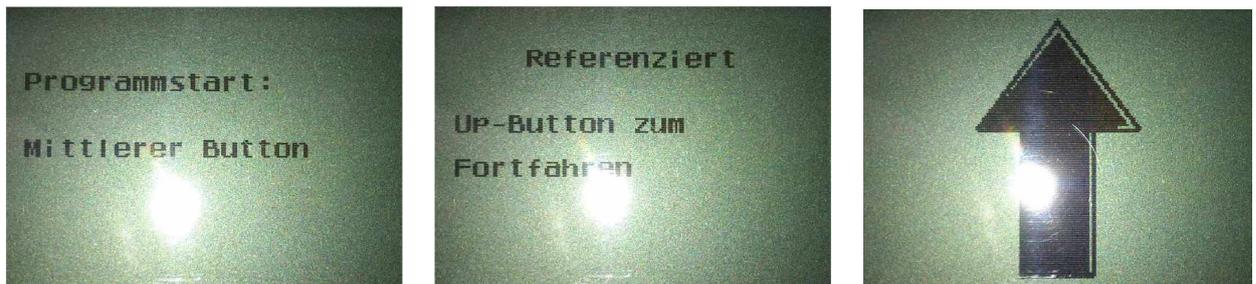


Abb. 4.27: Displaymeldungen bei der Referenzfahrt

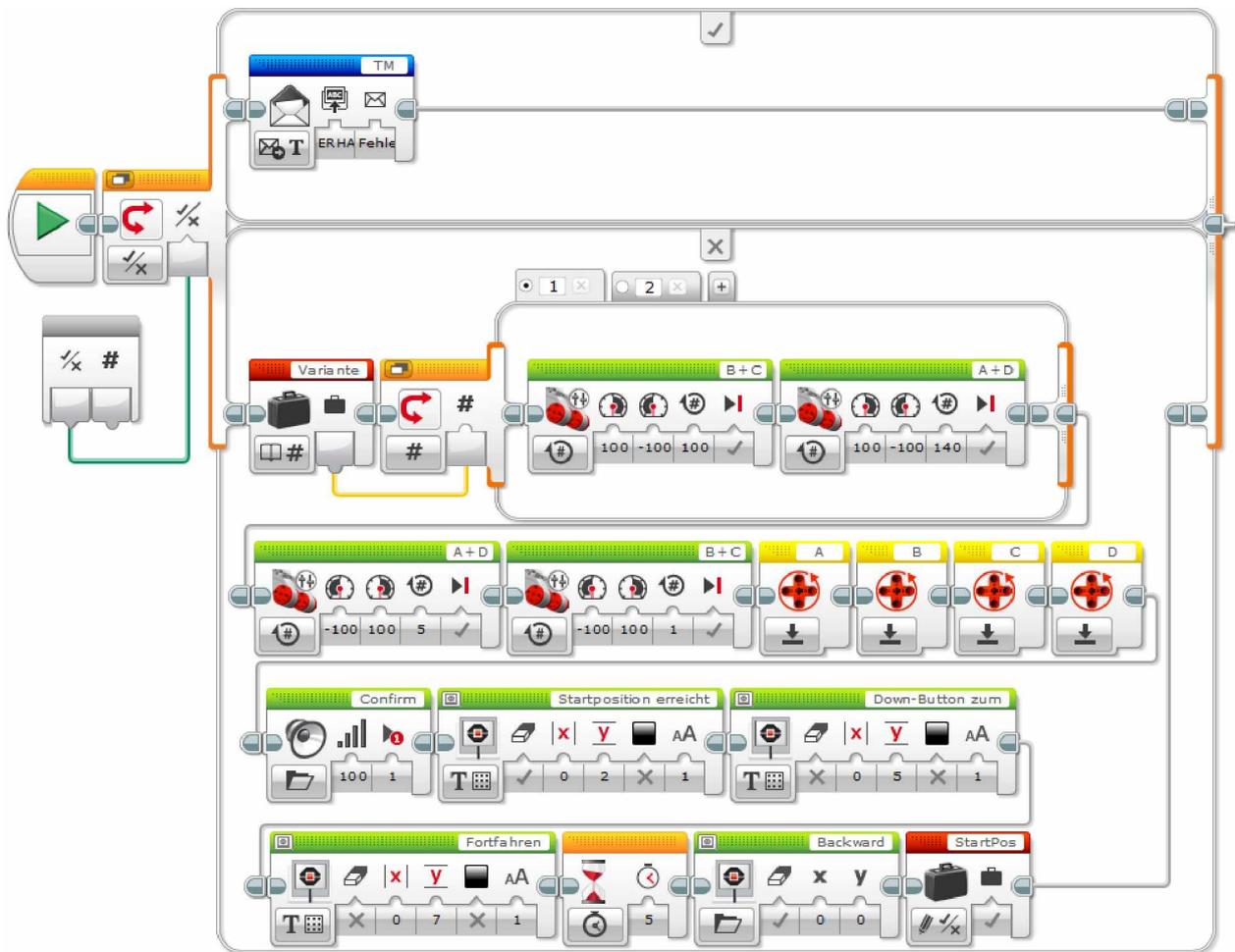


Abb. 4.28: Unterprogramm *StartPos.ev3p*

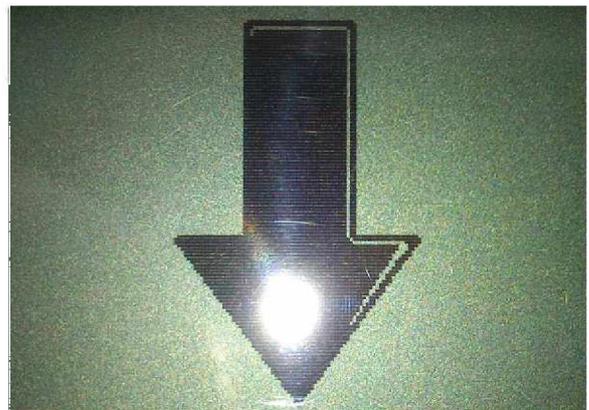
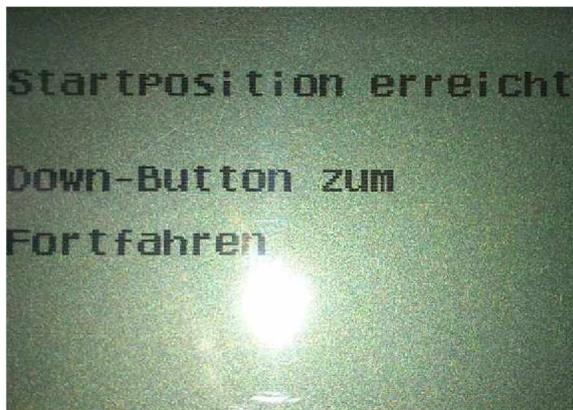


Abb. 4.29: Displaymeldungen bei der Startposition

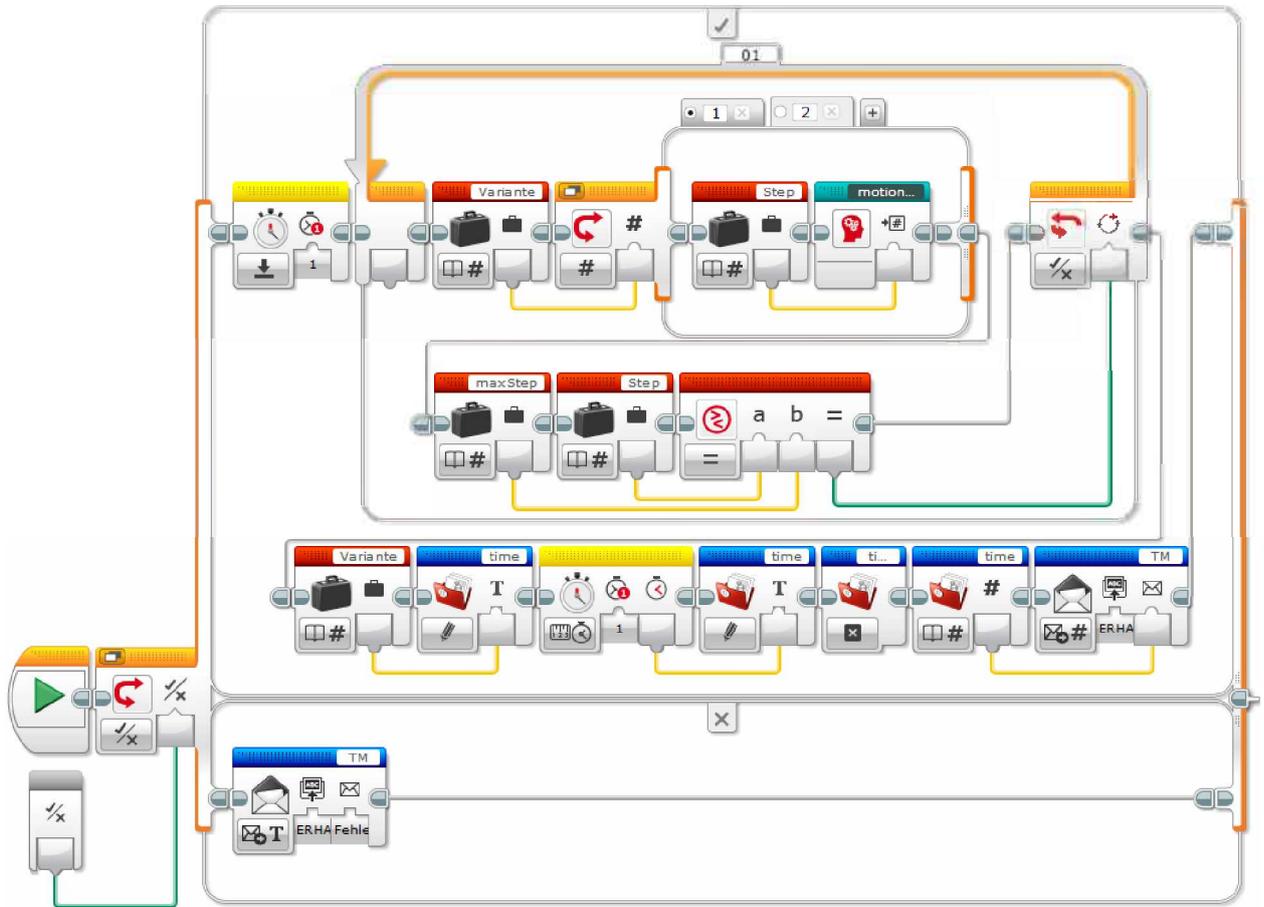


Abb. 4.30: Unterprogramm *Druecken.ev3p*

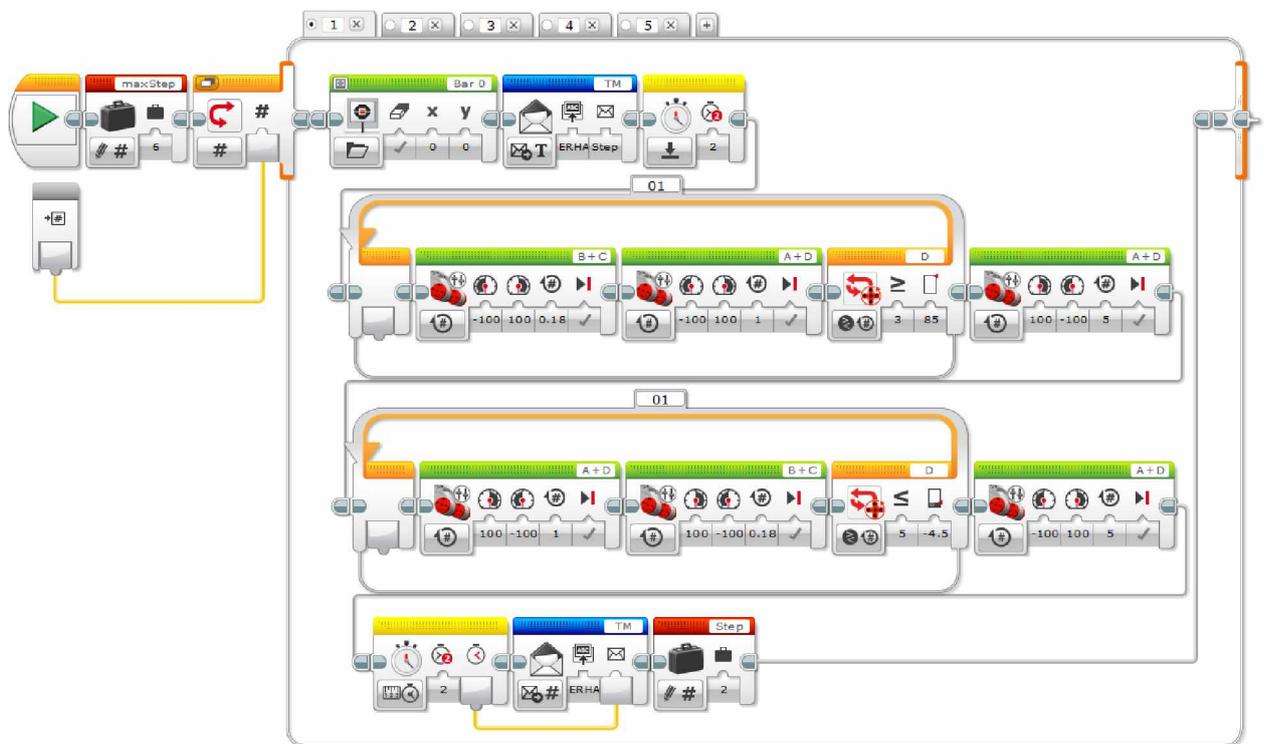


Abb. 4.31: Unterprogramm *motion_curve_V1.ev3p*

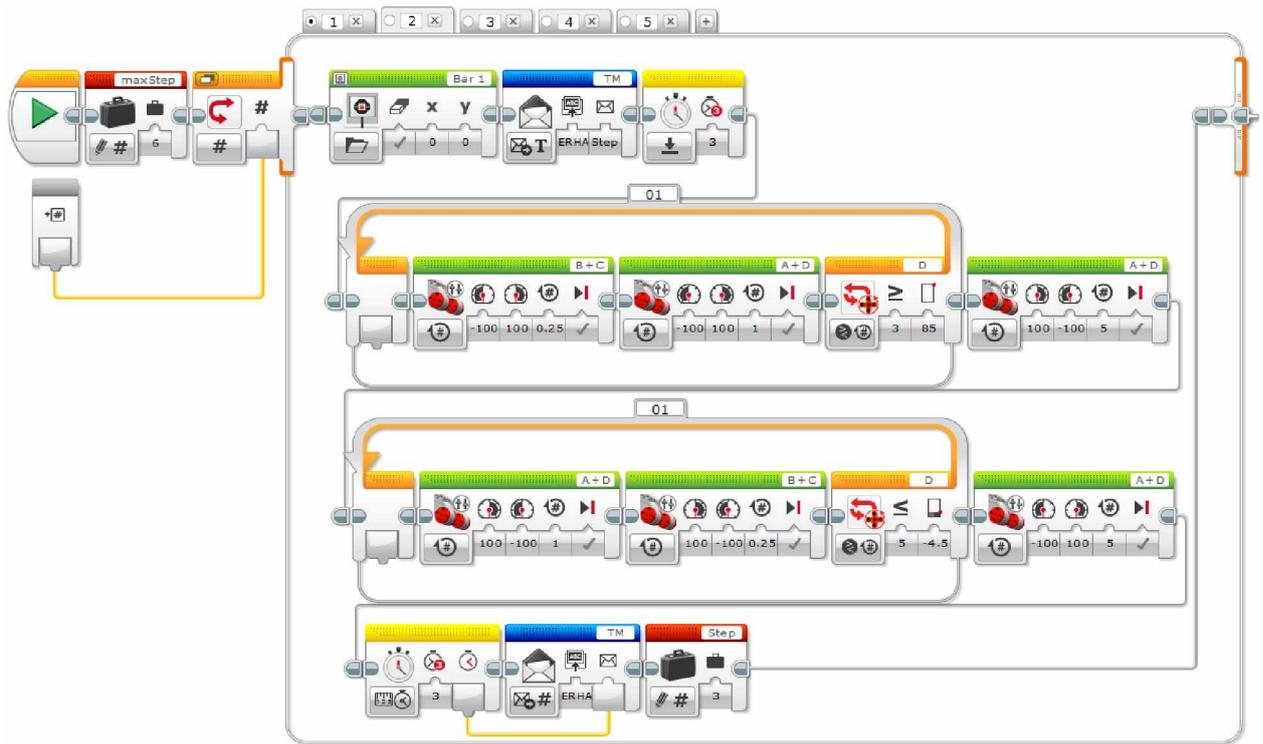


Abb. 4.32: Unterprogramm *motion_curve_V1.ev3p* (2)

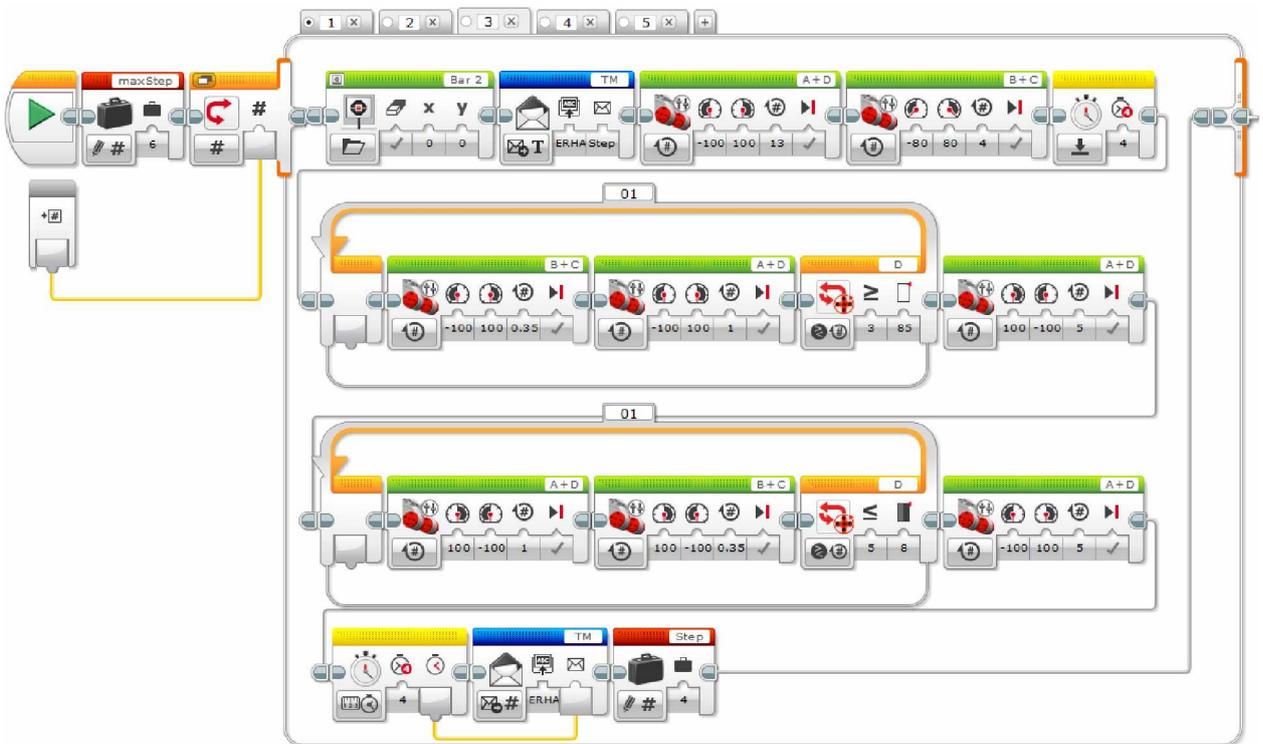


Abb. 4.33: Unterprogramm *motion_curve_V1.ev3p* (3)

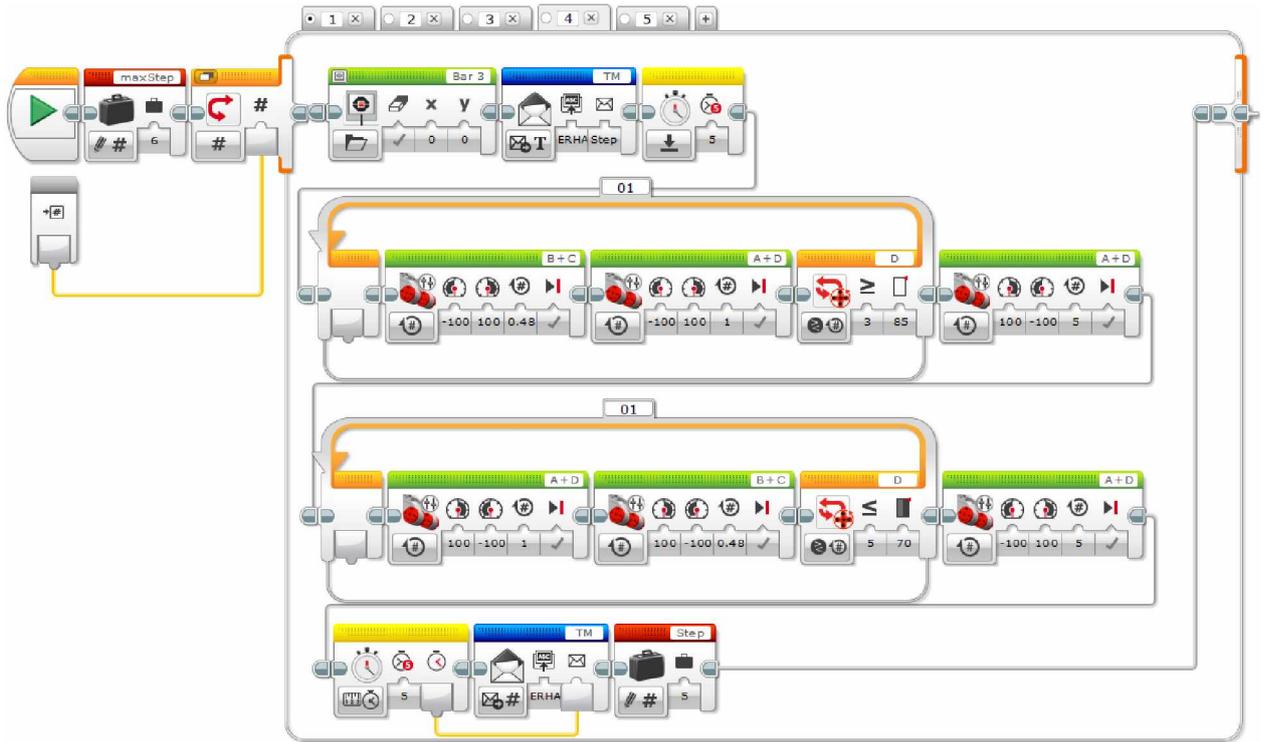


Abb. 4.34: Unterprogramm *motion_curve_V1.ev3p* (4)

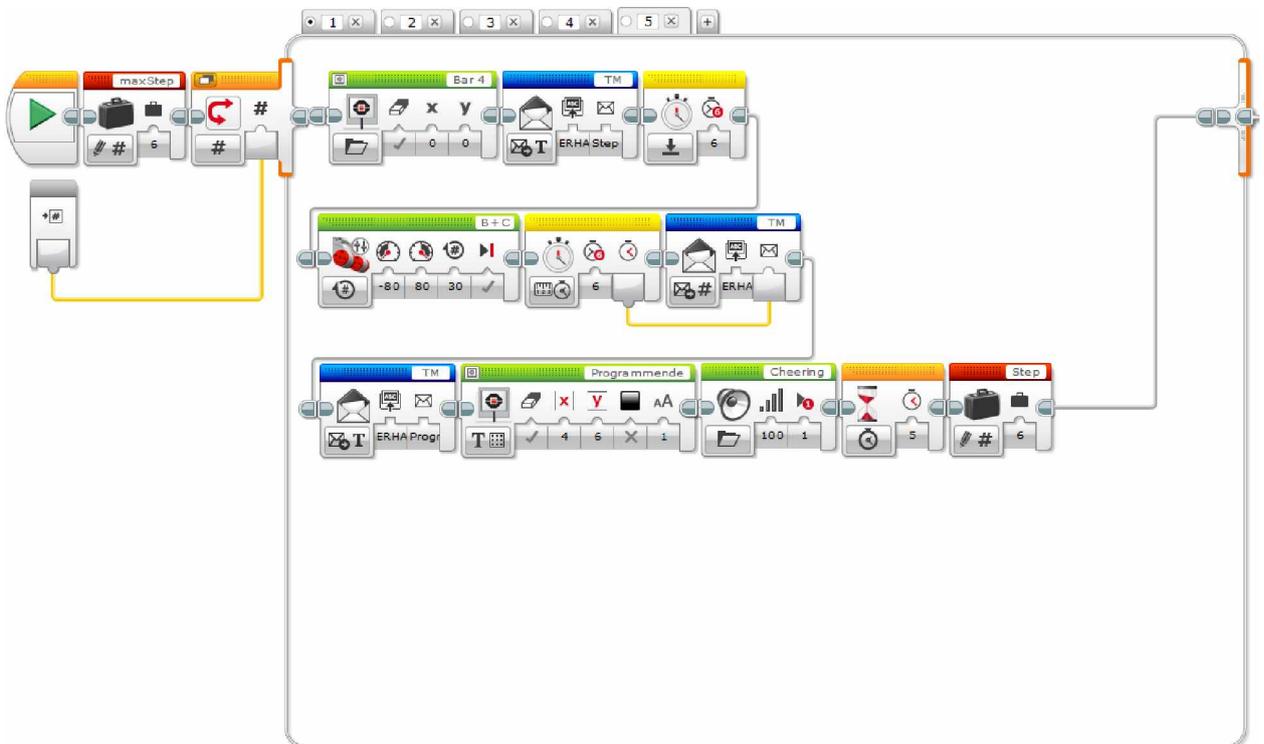


Abb. 4.35: Unterprogramm *motion_curve_V1.ev3p* (5)

den soll (Abbildung 4.36). Das Unterprogramm *BrickRep.ev3p* für diese Auswahl ist in Abbildung 4.37 zu sehen. Soll ein weiteres gleiches Werkstück produziert werden, fährt das Werkzeug zur Startposition zurück und wartet, bis die neue Runde eingespannt und das Unterprogramm *Druecken.ev3p* mit dem unteren Stein-Button erneut aufgerufen wird. Der Programmablauf kann auch jederzeit mit einem Druck auf die Zurück-Taste am Stein unterbrochen werden. In diesem Fall oder bei Unterbrechung der Stromversorgung beginnt das Programm wieder vom Beginn an, um einen definierten Zustand nach einer Unterbrechung zu gewährleisten.

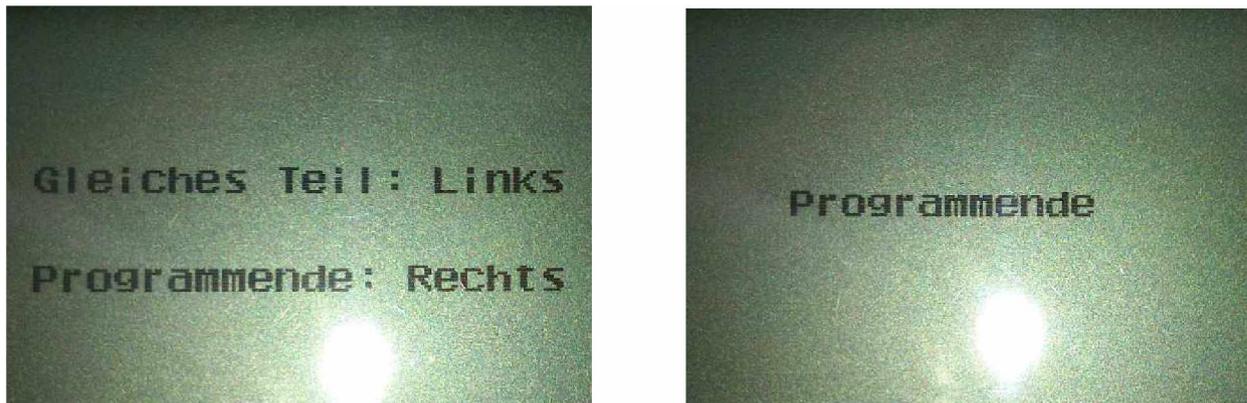


Abb. 4.36: Displaymeldungen nach Fertigstellung eines Teiles

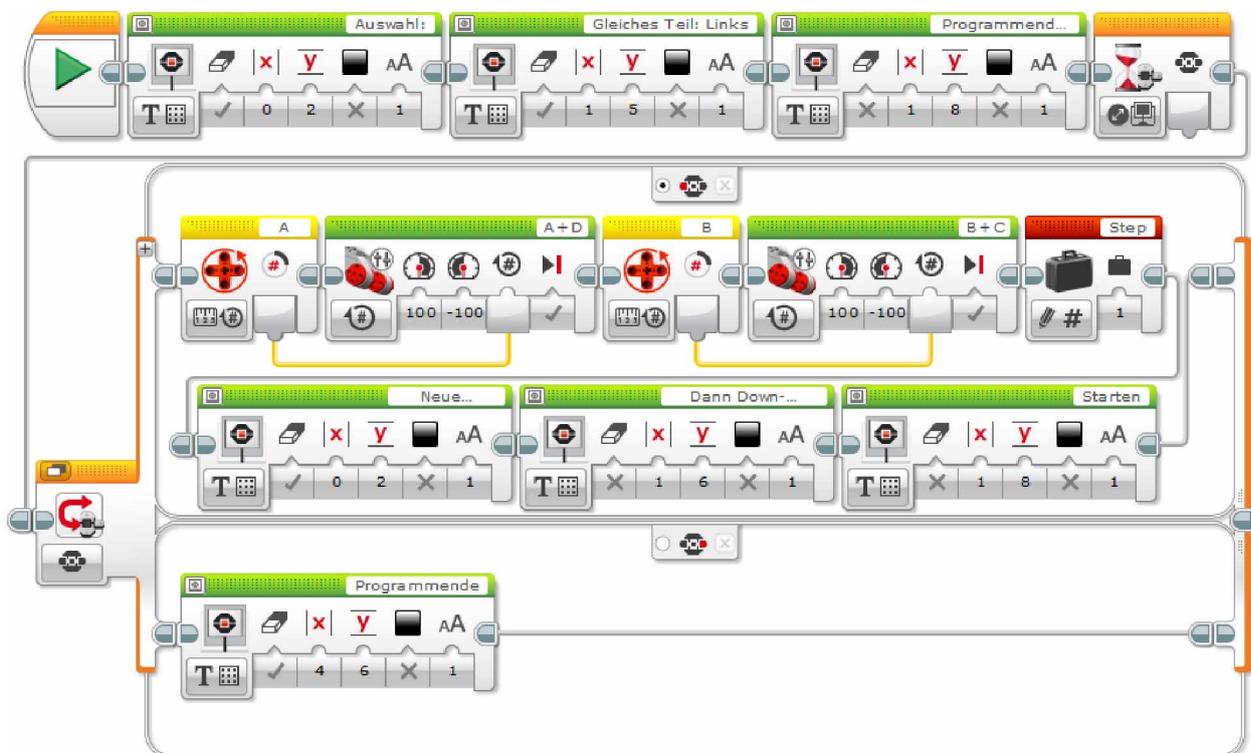


Abb. 4.37: Unterprogramm *BrickRep.ev3p*

Wurde die Option der PC-Steuerung gewählt, erhält der Benutzer die weiteren Informationen und Anweisungen über den EV3-Messenger. Die Einrichtung einer Bluetooth-Verbindung

zwischen EV3-Stein und PC und die nötigen Einstellungen im EV3-Messenger sind am Anfang dieses Kapitels beschrieben. Zum Starten der Referenzfahrt muss „1“ (Datentyp Nummer) an die Mailbox „EV3“ gesendet werden (Abbildung 4.38). Der erfolgreiche Abschluss der Referenzfahrt wird vom EV3-Stein gemeldet und auf den Befehl zum Anfahren der Startposition hingewiesen. Mit der Meldung „2“ an die Mailbox „EV3“ wird die Startposition angefahren. Auch das Erreichen der Startposition wird vom EV3-Stein rückgemeldet. Mit dem Befehl „3“ an die Mailbox „EV3“ wird letztendlich das eigentliche Bearbeitungsprogramm gestartet. Während der Bearbeitung wird der aktuelle Bearbeitungsschritt und nach dessen Abschluss die benötigte Zeit gemeldet.

Nach dem erfolgreichen Abschluss der Bearbeitung wird die Fertigstellung des Teiles bestätigt und die gesamte Bearbeitungszeit ausgegeben (Abbildung 4.38). Eine abschließende Meldung erfordert das Senden von „4“ für die Herstellung eines weiteren gleichen Teiles oder den Befehl „5“ an die Mailbox „EV3“, um das Programm zu beenden. Wird die Option für ein weiteres gleiches Teil gewählt, dann wird die aktuelle Position des Werkzeugs ermittelt und die Startposition erneut angefahren. Anschließend wird die Anweisung gegeben, eine neue Runde einzuspannen und danach „3“ an die Mailbox „EV3“ für den erneuten Start des Bearbeitungsprogramms zu senden.

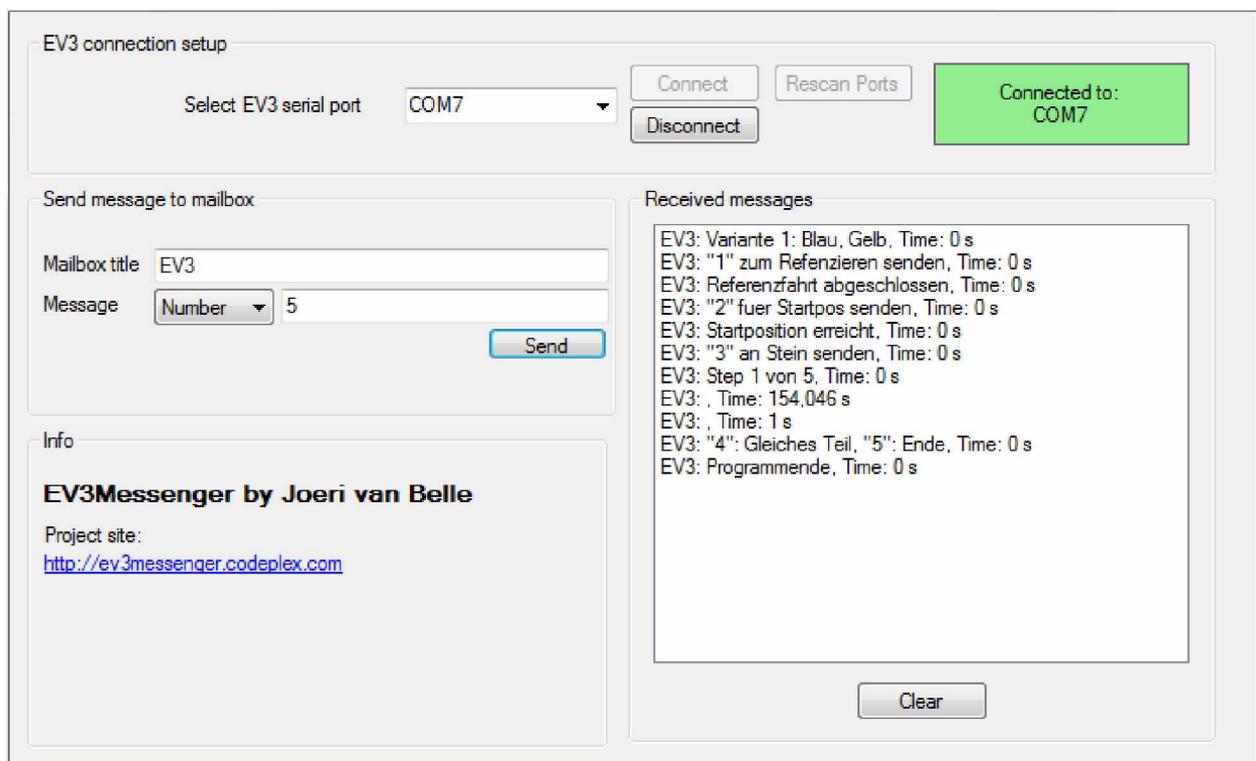


Abb. 4.38: PC-Steuerung über den EV3-Messenger

5 Schlussfolgerungen

Grundlegende Veränderungen in der Umformtechnik sind durch Industrie 4.0 in nächster Zeit nicht zu erwarten. Mit besseren und günstigeren IT-Lösungen für die Produktion wird der

Automatisierungsgrad und damit die Produktivität wahrscheinlich auch in kleineren Unternehmen weiter steigen. Eine Grundvoraussetzung für die Verbreitung von Industrie 4.0 ist eine flächendeckende Breitband-Internet-Infrastruktur. Ausgehend von den drei Paradigmen Smart Product, Smart Machine und Augmented Operator zeichnen sich in absehbarer Zukunft für umformtechnische Prozesse die Vernetzung der Produktionsanlagen, Maßnahmen für intelligentes Energiemanagement und die Unterstützung der Mitarbeiter bei der Fehlerbehebung, Instandhaltung und Materialhandling ab. Bei der Manipulation von Werkstücken werden Mitarbeiter in Zukunft von Leichtbaurobotern unterstützt. Das ermöglicht eine höhere Wiederholgenauigkeit und kürzere Taktzeiten. Mitarbeiter müssen nicht mehr der hohen Lärmbelastung im unmittelbaren Arbeitsbereich von Pressen und Hämmern ausgesetzt werden, was den Bestimmungen im Arbeitnehmerinnenschutzgesetz entgegenkommt.

Der Einsatz von IKT wird der Produktion zu größerer Flexibilität und Transparenz verhelfen. Intelligente Produkte werden mit allen relevanten Auftrags- und Produktionsdaten ausgestattet und von adaptiven, sich selbst konfigurierenden und teilweise selbstorganisierenden, flexiblen Produktionsanlagen hergestellt. Die klassische Automatisierungspyramide wird durch die Einführung von vernetzten, dezentralen Systemen schrittweise aufgelöst.

Die im Extremfall kundenindividuellen Einzelstücke können in Zukunft zwar günstiger produziert werden, liegen aber preislich durch die höheren Anlageninvestitionskosten dennoch über gewöhnlichen Massenartikeln. Diese Mehrkosten müssen also durch einen entsprechenden Mehrwert des smarten Produktes gegenüber den Kunden gerechtfertigt werden, damit diese Produkte auch am Markt absetzbar sind.

Bei der Konzipierung der Drückmaschine stand die Realisierung der Steuerung eines flexiblen Drückprozesses mit LEGO Mindstorms EV3 und die Mensch-Maschine-Kommunikation über verschiedene Kommunikationswege im Vordergrund. Für die Modelldrückmaschine wären einige zukünftige Ergänzungen denkbar. Mit einem weiteren EV3-Stein könnten beide Achsen simultan betrieben werden. Dadurch könnten Kurvenbahnen abgefahren werden und die beiden Achsen drahtlos miteinander kommunizieren. Wenn kompatible Sensoren zur Kraftmessung erscheinen, könnten auch die auftretenden Bearbeitungskräfte gemessen werden. Mit einem kompatiblen RFID-Sensor könnte die Werkstückerkennung wie bei realen industriellen Prozessen mit RFID-Tags erfolgen. Mit der Freigabe des Bluetooth-Protokolls durch LEGO kann die Bluetooth-Kommunikation verbessert werden und der Anschluss eines WiFi-Dongle an den EV3-Stein ermöglicht die Anbindung an IP-Dienste. Der EV3-Stein beherrscht außerdem die Kommunikation mit Android/iOS-Geräten. Apps zur Prozesssteuerung und -überwachung für Smartphones oder Tablets könnten daher programmiert werden. Der Aufbau anderer Modellprozesse wie z. B. Drahtbiegen mit den LEGO-Baukästen wäre natürlich auch denkbar.

6 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Masterarbeit war es, den aktuellen Stand des Zukunftsprojektes Industrie 4.0 abzubilden und anhand dieser Informationen potentielle Effekte auf die Umformtechnik in der Smart Factory darzustellen. Außerdem wurden derzeitige Automatisierungslösungen hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit in der Umformtechnik beurteilt. Der praktische Teil der Arbeit

umfasste die Konstruktion einer Modellmaschine für das Drücken von Aluminiumblechen mit LEGO Mindstorms EV3 als Steuerung.

Cyber-Physical Systems (CPS) werden zu einer Schlüsseltechnologie in der Fabrik der Zukunft und stellen die Grundlage für Industrie 4.0 dar. Das Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO definiert CPS als mit einer eigenen dezentralen Steuerung (engl. embedded systems) versehene intelligente Objekte, welche in einem Internet der Daten und Dienste miteinander vernetzt sind und sich selbstständig steuern. Für Maschinen- und Anlagenbauer rücken produktbegleitende Dienstleistungen rund um die eigentliche Maschine in den Fokus. Der Schlüssel zu solchen neuen produktbegleitenden Dienstleistungen sind CPS. Sie durchdringen den traditionellen Maschinen- und Anlagenbau immer stärker und schaffen Potentiale für innovative Dienstleistungen.

CPS erfordern erweiterte Kommunikationstechnologien. Für die Verbreitung von Industrie 4.0 ist jedenfalls ein Ausbau der Breitband-Internet-Infrastruktur notwendig. Das IOT (Internet of Things) stellt eine umfassende Erweiterung des klassischen Internets dar: Während das Internet auf den Austausch von Daten und Dokumenten verschiedener Medientypen beschränkt ist, adressiert das Internet der Dinge die Vernetzung von und mit Alltagsgegenständen. Damit hebt es die Trennung zwischen virtueller und realer Welt weitestgehend auf. Eindeutig identifizierbare physische Objekte (things) werden mit eingebetteten Systemen ausgestattet, erhalten eine virtuelle Repräsentation und kommunizieren über das Internet. Diese Verknüpfung von realen Objekten mit Internetdiensten wird ein breites Spektrum von neuen Anwendungen ermöglichen.

Die produzierende Industrie ist mit rasch veränderlichen globalen Märkten konfrontiert, die einen schnellen Wechsel von Produkten und Produktvarianten fordern. Diesem Umstand entsprechend sind nicht alle Automatisierungslösungen für jeden Anwendungsfall gleich gut geeignet bzw. sinnvoll anwendbar. Pneumatische Antriebssysteme sind einfach und kostengünstig aufgebaut und zeichnen sich vor allem durch eine hohe Bewegungsgeschwindigkeit aus. Anwendung finden sie beispielsweise bei der Werkstückhandhabung in Presswerken der Automobilindustrie. Ob elektrische, hydraulische oder hybride Antriebskonzepte an Maschinen zum Einsatz kommen, hängt vom konkreten Anwendungsfall ab. Hybride Automatisierungslösungen sollen die Vorteile der Hydraulik und Elektrik miteinander verbinden. Mechanische Steuerungselemente kommen beispielsweise noch bei Exzenterpressen zum Einsatz.

Die deutsche Bundesregierung führt in ihrer Hightech-Strategie unter dem Punkt „Industrie 4.0“ ein Zukunftsprojekt an, um seine Führungsposition in der Produktionstechnik zu halten und weiter auszubauen. Industrie 4.0 ertüchtigt Cyber-Physical Systems zur Anwendung in der produzierenden Industrie. Neben dem bundesdeutschen Projekt Industrie 4.0 wurden auch ähnliche Initiativen in den USA und China angestoßen. Zukünftig könnte sich ein durch den Kunden ausgelöster Produktionsauftrag selbstständig durch die Wertschöpfungskette steuern. Dabei reserviert er Bearbeitungsschritte, Anlagen und Materialien und kontrolliert die Ausführung automatisch. Er erkennt drohende Verzögerungen der Lieferung, organisiert soweit möglich zusätzlich benötigte Kapazitäten und meldet unvermeidbare Verzögerungen direkt dem entsprechenden Kunden. Die verwendeten Produktionsanlagen tauschen untereinander Zeichnungen aus und organisieren ihre Auftragsreihenfolge sowie Wartungs- und Instandhaltungsbedarfe untereinander. Die zentralen Aspekte von Industrie 4.0 können anhand von drei Paradigmen verdeutlicht werden: das intelligente Produkt („Smart Product“),

die kommunizierende Maschine („Smart Machine“) und der assistierte Bediener („Augmented Operator“). Bei der Idee des intelligenten Produkts wird das Produkt bzw. Werkstück selbst zum handelnden Akteur im Produktionsprozess und durch das Paradigma der kommunizierenden Maschine werden Anlagenkomponenten zu CPS und Produktionsanlagen zu Cyber-Physical Production Systems (CPPS). Der Kernaspekt des assistierten Bedieners zielt darauf ab, den Menschen im Zentrum der Fabrik durch kontextsensitive Informationsbereitstellung zu unterstützen.

Die Umsetzung von Industrie 4.0 wird weitgehend durch die Industrie selbst erfolgen. Grundlegender Forschungsbedarf ist dennoch gegeben. Zentrale Forschungsbereiche betreffen die horizontale Integration über Wertschöpfungsnetzwerke, die digitale Durchgängigkeit des Engineerings über die gesamte Wertschöpfungskette sowie die vertikale Integration und vernetzte Produktionssysteme.

Drückverfahren gehören zu einer Gruppe von Umformprozessen zur Herstellung hohler, axialsymmetrischer Blechbauteile. Besonderheiten gegenüber alternativen Fertigungsverfahren sind geringe Umformkräfte, einfache Werkzeuge und hohe erreichbare Oberflächenqualitäten. Bei der grundlegenden Technik des Drückens wird eine Blechrunde zentrisch gegen ein von einer Antriebsspindel aufgenommenes Drückfutter (engl. Mandrel) auf einer Drückmaschine gespannt und in Drehbewegung versetzt. Das vom Drückfutter über Reibschluss mitgenommene rotierende Blech wird mit einem Drückwerkzeug allmählich auf die Kontur des Drückfutters angeformt, entweder in nur einem Schritt oder mit mehreren Zwischenschritten.

Der Weg vom technischen Spielzeug zur Steuerung von Fertigungsprozessen ist nicht allzu weit und dieses Modell soll helfen, junge technische Nachwuchskräfte zu motivieren und zentrale Aspekte von Industrie 4.0 demonstrieren. Die Modelldrückmaschine soll Studenten und Interessierten auf einfache Art und Weise die Möglichkeit einer Automatisierungslösung in Kombination mit Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) demonstrieren und das Interesse an Technologien abseits der klassischen Ingenieurdisziplinen geweckt werden. LEGO Mindstorms EV3 wurde auf einer handelsüblichen Hobbydrehbank aufgebaut, um einen flexiblen Drückprozess zu steuern. Die Programmierung erfolgte mit der auf NI LabVIEW basierenden EV3-Software. Es können zwei verschiedene Werkstücke hergestellt werden. Die Steuerung erkennt anhand einer Farbcodierung auf der Ronde, welches Werkstück produziert werden soll und lädt das entsprechende Bearbeitungsprogramm (Intelligentes Werkstück). Anweisungen und Informationen für den Bediener werden am Display des EV3-Stein ausgegeben (Assistierter Bediener). Die Steuerung kann Wahlweise über den EV3-Stein oder ein PC-Interface erfolgen und Prozessinformationen werden an einen PC übermittelt.

Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) nehmen in der industriellen Produktion zu und deren Einsatz soll unter dem Projektnamen „Industrie 4.0“ systematisch vorangetrieben werden. Ob Industrie 4.0 die propagierte vierte industrielle Revolution in der vorgestellten Form bringt und welche konkreten Auswirkungen sich dadurch für die Produktion ergeben, wird die Zukunft zeigen.

Literatur

- [1] ASHTON, K.: *That 'Internet of Things' Thing*. <http://www.rfidjournal.com/articles/view?4986>. Version: 2009. – [Stand: 10.02.2014]
- [2] BEWELEY, B.P. ; FURRER, D.U.: Spinning. Version: 2006. <http://www.asminternational.org/content/ASM/StoreFiles/ACFAB91.pdf>. In: *Metalworking: Sheet Forming* Bd. 14B. Materials Park, Ohio, USA : ASM International, 2006, 367–374. – [Stand: 10.02.2014]
- [3] BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG (BMBF): *Bericht der Bundesregierung. Zukunftsprojekte der Hightech-Strategie (HTS-Aktionsplan)*. <http://www.bmbf.de/pub/HTS-Aktionsplan.pdf>. Version: 2012. – [Stand: 10.02.2014]
- [4] COOKE, P.: *Statement: Die Zukunft der Automation in der Umformtechnik ist hybrid*. http://www.boschrexroth.com/country_units/europe/germany/de/unternehmen/presse/presseinformationen/produktinformationen/dc_ia_de/archiv_2012/ST_004_12_de/index.jsp. – [Stand: 10.02.2014]
- [5] Norm DIN 8584-4 September 2003. *Fertigungsverfahren Zugdruckumformen. Teil 4: Drücken*
- [6] EINE SONDERVERÖFFENTLICHUNG DER INDUSTRIEVERBÄNDE BITKOM, VDMA UND ZVEI: *Zukunftsstrategie: Industrie 4.0*. April 2013
- [7] FAVRE-BULLE, B.: *Automatisierung komplexer Industrieprozesse: Systeme, Verfahren und Informationsmanagement*. Springer, 2004. – ISBN 978–3–211–21194–6
- [8] FLEISCH, E. ; THIESSE, F.: Internet der Dinge. Version: 2008. www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de. In: *Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik – Online-Lexikon*. Kurbel, K. and Becker, J. and Gronau, N. and Sinz, E. and Suhl, L., 2008. – [Stand: 10.02.2014]
- [9] GANSCHAR, G. ; GERLACH, S. ; HÄMMERLE, M. ; KRAUSE, T. ; SCHLUND, S. ; SPATH, D. (Hrsg.): *Produktionsarbeit der Zukunft-Industrie 4.0*. <http://www.iao.fraunhofer.de/images/iao-news/produktionsarbeit-der-zukunft.pdf>. Version: 2013. – [Stand: 10.02.2014]
- [10] GEISBERGER, E. ; BROY, M.: *agendaCPS – Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems (acatech STUDIE)*. Heidelberg u. a. : Springer Verlag, 2012
- [11] GEVATTER, H-J. ; GRÜNHAUPT, U. (Hrsg.): *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion*. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2006 (2., vollständig bearbeitete Auflage). – ISBN 3-540-21207-8
- [12] JASPERNEITE, J.: Industrie 4.0: Alter Wein in neuen Schläuchen? In: *Computer & Automation* 12 (2012), S. 24–28
- [13] LANGE, J. ; IWANITZ, F.: *OPC: Von Data Access bis Unified Architecture*. Vde-Verlag, 2010 (4. Auflage). – 494 S. – ISBN 3800732173
- [14] MATTERN, F. ; FLÖRKEMEIER, C.: Vom Internet der Computer zum Internet der Dinge. In: *Informatik Spektrum* 33 (2) (2010), S. 107–121

- [15] MUSIC, A. ; ALLWOOD, J.M. ; K., Kawai.: A review of the mechanics of metal spinning. In: *Journal of Materials Processing Technology* 210 (2010), S. 3–23
- [16] NIKOLAUS, K.: In der Fertigung wächst zusammen, was zusammen gehört. In: *Pictures of the Future. Die Zeitschrift für Forschung und Innovation*. Frühjahr (2013), 19-22. www.siemens.de/pof
- [17] PROMOTORENGRUPPE KOMMUNIKATION DER FORSCHUNGSUNION WIRTSCHAFT–WISSENSCHAFT: *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0*. http://www.forschungsunion.de/pdf/industrie_4_0_abschlussbericht.pdf. Version: April 2013. – [Stand: 10.02.2014]
- [18] RÜTH, C.: Da geht noch was. In: *Pictures of the Future. Die Zeitschrift für Forschung und Innovation*. Frühjahr (2013), 68-69. www.siemens.de/pof
- [19] RUNGE, M.: *Drücken und Drückwalzen: Umformtechnik, Werkstückgestaltung, Maschinen, Steuerungskonzepte*. Verlag Moderne Industrie, 1993 (Die Bibliothek der Technik). – ISBN 3–478–93086–3
- [20] RUSSWURM, S. ; HUBER, A.S. ; BAUM, G. ; BORCHERDING, H. ; BROY, M. ; EIGNER, M. ; SENDLER, U. (Hrsg.): *Industrie 4.0: Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. – ISBN 978–3–642–36916–2
- [21] SANTON, K. (Hrsg.) ; MCKAY, L. (Hrsg.): *Der große Atlas der Weltgeschichte. Von den Ursprüngen bis in das 21. Jahrhundert*. Köln : Parragon Books Ltd, 2005. – 320 S. – ISBN 1-40545-533-0
- [22] SAUER, O.: Maschinenbau der Zukunft. In: *visIT [Industrie 4.0]*. Fraunhofer ISOB, 2013 (14. Jahrgang), S. 6–7. – ISSN 1616-8240
- [23] SAUER, O. ; THIEL, Ch.: *Intelligente Vernetzung der Produktion*. <http://www.bicc-net.de/aktivitaeten/aktivitaet/cyber-physical-systems/>. – [Stand: 10.02.2014]
- [24] SCHLEIPEN, M.: Interoperabilität, MES als Datendrehscheibe der Zukunft. In: *visIT [Industrie 4.0]*. Fraunhofer ISOB, 2013 (14. Jahrgang), S. 10–11. – ISSN 1616-8240
- [25] SCHNIEDER, E.: *Methoden der Automatisierung: Beschreibungsmittel, Modellkonzepte und Werkzeuge für Automatisierungssysteme ; mit 56 Tabellen*. Braunschweig/Wiesbaden : Vieweg Friedr. & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1999 (Studium Technik). – ISBN 978–3–528–06566–9
- [26] SCHÜRSMANN, H.: *Industrie macht in der Produktion die Schotten dicht*. <http://www.klkblog.de/servlet/is/10283/>. Version: Juni 2013. – [Stand: 10.02.2014]
- [27] VDE VERBAND DER ELEKTROTECHNIK ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK E. V.: *Die Deutsche Normungs-Roadmap Industrie 4.0*. http://www.dke.de/de/std/informationssicherheit/documents/rz_roadmap%20industrie%204-0_web.pdf. Version: November 2013. – [Stand: 10.02.2014]
- [28] VERCLAS, S. ; LINNHOFF-POPIEN, C.: *Smart Mobile Apps. Mit Business-Apps ins Zeitalter mmobile Geschäftsprozesse*. Springer, 2011. – 575 S. – ISBN 978–3–642–22259–7

- [29] WANG, L. ; LONG, H.: A study of effects of roller path profiles on tool forces and part wall thickness variation in conventional metal spinning. In: *Journal of Materials Processing Technology* 211 (2011), S. 2140–2151
- [30] WONG, C.C. ; DEAN, T.A. ; LIN, J.: A review of spinning, shear forming and flow forming processes. In: *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43 (2003), S. 1419–1435
- [31] XIA, Q. ; SHIMA, S. ; KOTERA, H. ; YASUHUKU, D.: A study of the one-path deep drawing spinning of cups. In: *Journal of Materials Processing Technology* 159 (2005), S. 397–400

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Gliederung der Automatisierungseinrichtungen	11
Tab. 2:	Terminologie der Drückverfahren	22
Tab. 3:	Technische Daten Erba Compact C300	28
Tab. 4:	Verwendete LEGO Mindstorms Produkte	29
Tab. 5:	Technische Daten LEGO Mindstorms Intelligenter EV3-Stein	31
Tab. 6:	Technische Daten LEGO Mindstorms Großer EV3-Servomotor	31
Tab. 7:	Technische Daten LEGO Mindstorms Mittlerer EV3-Servomotor	31
Tab. 8:	Zähnezahlen der Untersetzungsgetriebe	41
Tab. 9:	Übersetzungen der Getriebestufen	41
Tab. 10:	Kennzeichnung der Werkstücke und Werkzeuge	62
Tab. 11:	Modellierungs- und Prozessdaten der FEM-Simulation	66
Tab. 12:	Maximalwerte der Umformkräfte an der Rolle	67
Tab. 13:	Anschlussbelegungen am EV3-Stein	72

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1:	Die vier Stufen der Industriellen Revolution	2
Abb. 1.2:	Umsatz im Maschinenbau in ausgewählten Ländern (2006–2011)	3
Abb. 2.1:	Beispiele für ausgetauschte Informationen der Beteiligten in der Produktion	5
Abb. 2.2:	Ineinandergreifende CPS-Anwendungsbereiche und übergreifende Nutzungsprozesse	6
Abb. 2.3:	Generischer hierarchischer Aufbau eines industriellen Automationssystems	11
Abb. 2.4:	Prinzipieller Aufbau einer SPS	13
Abb. 2.5:	Blockdiagramm von CNC und SPS	15
Abb. 2.6:	Schema des Drückens sowie an der Umformung beteiligte Komponenten .	16
Abb. 2.7:	Ausbildung der Umformzone und Werkstoffbeanspruchung in den Zwischenstadien des Drückens	17
Abb. 2.8:	Von Mises Spannungen in einer Blechrunde beim ersten Umformschritt mit einem Rollenwerkzeug	17
Abb. 2.9:	Übersicht der Umformverfahren	18
Abb. 2.10:	Unterscheidung der Drückprozesse nach Spannungsarten	19
Abb. 2.11:	Parameterübersicht für das Fertigungsverfahren Drücken	20
Abb. 2.12:	Typische Rollendesigns zum Drücken von Kegeln und Schalen	23
Abb. 2.13:	Drückmaschine aus Holz mit manuellem Schwungradantrieb	24
Abb. 2.14:	Typische Anordnungen für das manuelle Drücken mit einer Drehmaschine	24
Abb. 2.15:	Spinning Center Leifeld-SC-310 mit Playback-CNC-Steuerung	25
Abb. 2.16:	Leifeld-SC-235 in Modulbauweise bis 3,5 m Rondendurchmesser	26
Abb. 2.17:	Typische Fehlerarten beim konventionellen Drücken	27
Abb. 2.18:	Drückverhältnis vs. Vorschub/Drehzahl-Verhältnis für 2 mm dicken Baustahl	27
Abb. 3.1:	Erba Compact C300	28
Abb. 3.2:	LEGO Mindstorms Intelligenter EV3-Stein	30
Abb. 3.3:	LEGO Mindstorms Großer EV3-Servomotor	30
Abb. 3.4:	LEGO Mindstorms Mittlerer EV3-Servomotor	32
Abb. 3.5:	LEGO Mindstorms EV3-Farbsensor	32
Abb. 3.6:	LEGO Mindstorms EV3-Berührungssensor	33
Abb. 3.7:	Arbeitsoberfläche der LEGO Mindstorms Education EV3-Software	34
Abb. 3.8:	Wait Programmblock	34
Abb. 3.9:	Schreiben und Auslesen von Variablen	35
Abb. 3.10:	Move Tank Programmblock	35
Abb. 3.11:	Loop und Switch-Programmblock	36
Abb. 3.12:	Move Tank Programmblock	36
Abb. 3.13:	Messaging Programmblock	37
Abb. 3.14:	Display Programmblock	37
Abb. 3.15:	EV3-Messenger 1.1	38
Abb. 3.16:	LEGO Mini-Drehkranz	39
Abb. 3.17:	Links: Gewindestange mit Muttern für Querschlitzenantrieb, Rechts: Gewindestange mit Kleinteilen und LEGO-Elementen für Oberschlitzenantrieb	40
Abb. 3.18:	Erstes Antriebskonzept	40
Abb. 3.19:	Erba C300 mit LEGO Mindstorms EV3 und wälzgelagertem Rollenwerkzeug	42
Abb. 3.20:	Erba C300 mit LEGO Mindstorms EV3 und wälzgelagertem Rollenwerkzeug (2)	43

Abb. 3.21: Erba C300 mit LEGO Mindstorms EV3 und wälzgelagertem Rollenwerkzeug (3)	43
Abb. 3.22: Querschlittenantrieb mit LEGO Mindstorms EV3-Stein (Vorderansicht) .	44
Abb. 3.23: Querschlittenantrieb mit LEGO Mindstorms EV3-Stein (Rückansicht) . .	44
Abb. 3.24: Oberschlittenantrieb (Vorderansicht)	45
Abb. 3.25: Oberschlittenantrieb (Rückansicht)	45
Abb. 3.26: Verwendete Drückfutter	46
Abb. 3.27: Rollenwerkzeuge	47
Abb. 4.1: Horizontale Integration über Wertschöpfungsnetzwerke	50
Abb. 4.2: OPC UA-Architektur	52
Abb. 4.3: Durchgängigkeit des Engineering über die gesamte Wertschöpfungskette .	53
Abb. 4.4: Vertikale Integration und vernetzte Produktionssysteme	54
Abb. 4.5: Bihler GRM 80P Stanz-Biegeautomat	57
Abb. 4.6: ABB Augmented Reality	60
Abb. 4.7: Abmessungen der Ronden und Drückfutter	63
Abb. 4.8: Herstellbare Werkstückvarianten (Links: Kegel 50°, Rechts: Kegel 15°) . .	64
Abb. 4.9: Von der EV3-Software aufgezeichnete Werkzeugkinematik	64
Abb. 4.10: Werkzeugkinematik für die Drücksimulation	65
Abb. 4.11: Simufact Umgebung	65
Abb. 4.12: Verlauf der Blechdicke nach der vierten Umformstufe	67
Abb. 4.13: Umformgrad erste Stufe	68
Abb. 4.14: Vergleichsspannung erste Stufe	68
Abb. 4.15: Umformgrad zweite Stufe	69
Abb. 4.16: Vergleichsspannung zweite Stufe	69
Abb. 4.17: Umformgrad dritte Stufe	70
Abb. 4.18: Vergleichsspannung dritte Stufe	70
Abb. 4.19: Umformgrad vierte Stufe	71
Abb. 4.20: Vergleichsspannung vierte Stufe	71
Abb. 4.21: Vereinfachter Programmablaufplan	73
Abb. 4.22: Hauptprogramm <i>Al05_4M.ev3p</i>	75
Abb. 4.23: Hauptprogramm <i>Al05_4M.ev3p</i> (2)	76
Abb. 4.24: Hauptprogramm <i>Al05_4M.ev3p</i> (3)	77
Abb. 4.25: Displaymeldungen nach dem Programmaufruf	78
Abb. 4.26: Unterprogramm <i>Reference.ev3p</i>	78
Abb. 4.27: Displaymeldungen bei der Referenzfahrt	78
Abb. 4.28: Unterprogramm <i>StartPos.ev3p</i>	79
Abb. 4.29: Displaymeldungen bei der Startposition	79
Abb. 4.30: Unterprogramm <i>Druecken.ev3p</i>	80
Abb. 4.31: Unterprogramm <i>motion_curve_V1.ev3p</i>	80
Abb. 4.32: Unterprogramm <i>motion_curve_V1.ev3p</i> (2)	81
Abb. 4.33: Unterprogramm <i>motion_curve_V1.ev3p</i> (3)	81
Abb. 4.34: Unterprogramm <i>motion_curve_V1.ev3p</i> (4)	82
Abb. 4.35: Unterprogramm <i>motion_curve_V1.ev3p</i> (5)	82
Abb. 4.36: Displaymeldungen nach Fertigstellung eines Teiles	83
Abb. 4.37: Unterprogramm <i>BrickRep.ev3p</i>	83
Abb. 4.38: PC-Steuerung über den EV3-Messenger	84