

Schlussbericht vom 13.10.2023

zu IGF-Vorhaben Nr. 21590 N

Thema

Datenbasierte Prozessführung entlang überbetrieblicher Prozessketten

Berichtszeitraum

01.01.2021 bis 30.06.2023

Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V.
FOSTA
Sohnstraße 65
40237 Düsseldorf

Forschungseinrichtung(en)

Forschungseinrichtung 1:
Institut für Bildsame Formgebung (IBF) RWTH Aachen
Intzestraße 10
52072 Aachen

Forschungseinrichtung 2:
Forschungsinstitut für Rationalisierung (FIR) e. V. an der RWTH Aachen
Campus-Boulevard 55
52074 Aachen

Gefördert durch:

Institute für Bildsame Formgebung

Nilesh Thakare M.Sc.

Jannik Gerlach M.Sc.

Prof. Dr-Ing. Gerhard Hirt

FIR e. V. at RWTH Aachen University

Nikita Fjodorovs M.Sc.

Jokim Janßen M.Sc.

Tobias Schröer M. Sc.

Verantwortlich für die FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.
Dipl.-Ing. Franz-Josef Heise

Beteiligte am projektbegleitenden Ausschuss:

Firmenname/Institution	Ort
Achenbach Buschhütten GmbH & Co. KG	Kreuztal
Advaneo GmbH	Düsseldorf
AMEPA GmbH	Würselen-Aachen
AMSIT GmbH	Aachen
Bronk & Company GmbH	Aachen
C.D. Wälzholz GmbH & Co. KG	Hagen
Deutsche Edelstahlwerke GmbH	Witten
DFA Demonstrationsfabrik Aachen GmbH	Aachen
Fischer Fertigungstechnik GmbH & Co. KG	Gütersloh
Georgsmarienhütte Holding GmbH	Georgsmarienhütte
Graepel Seehausen GmbH & Co. KG	Seehausen (Altmark)
Industrieverband Blechumformung e.V.	Hagen
JET-Software GmbH	Babenhausen
Koda Stanz- u. Biegetechnik GmbH	Holzwickede
PRÄSCHU Umformtechnik, Präzisionsteile Franz Schulz GmbH	Bretzfeld
Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH	Salzgitter
Seeburger AG	Hamburg
Software AG	Saarbrücken
ZINQ Technologie GmbH	Gelsenkirchen

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben „Datenbasierte Prozessführung entlang überbetrieblicher Prozessketten“, IGF-Projekt Nr. 21590 N, der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA), Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Zur Bearbeitung des Projektes wurden für die Forschungseinrichtung 1 „Institut für Bildsame Formgebung“ insgesamt 30,0 Monate und für die Forschungseinrichtung 2 „FIR e.V. an der RWTH Aachen University“ 22,26 Monate wissenschaftlich-technisches Personal (A1) eingesetzt. Die Arbeiten wurden gemäß dem Forschungsantrag durchgeführt. Die für das Forschungsprojekt geleisteten Arbeiten waren angemessen und zur Erreichung des Forschungszieles notwendig.

Es wurden keine Geräte beschafft und keine Leistungen Dritter herangezogen.

Angaben über gewerbliche Schutzrechte

Es wurden im Rahmen des vorliegenden Projektes keine gewerblichen Schutzrechte erworben. Eine Anmeldung eines gewerblichen Schutzrechtes ist nicht beabsichtigt.

Kurzzusammenfassung

Eigenschaften von Stahlprodukten werden entlang industrieller Prozessketten lediglich stichprobenartig kontrolliert, sodass der genaue Zustand jedes einzelnen Stahlprodukts nicht bekannt ist. Dies bringt Einschränkungen, wie beispielsweise sehr eng gefasste Toleranzen seitens des Kunden mit sich, die bereits früh in der Prozesskette zu Ausschuss führen können. Außerdem können die Produkteigenschaften nicht in der Auslegung der Fertigungsprozesse verwendet werden, sodass eine Reaktion auf Abweichungen zur Prävention von Ausschuss nicht möglich ist. Das Ziel dieses Forschungsprojekts ist es daher, eine modellbasierte Vorhersage der Eigenschaften jedes einzelnen Stahlprodukts zu etablieren, um nachfolgende Prozesse basierend auf der Kenntnis des genauen Produktzustands auslegen zu können. Dadurch sollen Produktspezifikationen weniger restriktiv ausgelegt werden können und Ausschuss durch eine adaptive Prozessführung verringert werden. Ein weiteres Ziel ist es, die Übertragung der relevanten Daten zu untersuchen und eine Datenplattform zu konzipieren, die eine gesicherte und standardisierte Weitergabe der Produktinformationen vom Zulieferer zum Kunden ermöglicht.

Zur Umsetzung des Forschungsvorhabens wurde zunächst eine Testumgebung inklusive einer Modellprozesskette am IBF eingerichtet, die zwei virtuelle Unternehmen repräsentiert. Das erste Unternehmen befasst sich mit dem Kaltwalzen und fungiert als Zulieferer, während das zweite Unternehmen die vom ersten Unternehmen erhaltenen Bleche zu Kreuznäpfen umformt und als Kunde fungiert. Durch das Umformen von Stahlblechen mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften trotz gleicher Spezifikation unter Verwendung einer Standard-Tiefziehprozessführung wurde zunächst der Einfluss von Eigenschaftsschwankungen des Eingangsmaterials auf die resultierenden Kreuznapfeigenschaften untersucht. Im zweiten Schritt wurde eine simulationsbasierte Prozessauslegung genutzt, um auf diese Schwankungen adaptiv zu reagieren und die Schwankungen der resultierenden Kreuznapfeigenschaften möglichst gering zu halten. Zuletzt wurde vom ersten Unternehmen Kaltband produziert, welches bewusst außerhalb der Produktspezifikation lag. Auch hier konnte gezeigt werden, dass durch eine adaptive Prozessauslegung trotz unzulässigem Eingangsmaterial Gutteile erzeugt werden können und somit Ausschuss vermieden werden kann. Zur Konzeptionierung und Implementierung eines Datenplattformprototyps wurden persönliche Interviews und Umfragen mit Mitgliedern des PA sowie durch eine sorgfältige Literaturrecherche identifizierte Methodiken, die dem Stand der Technik entsprechen, genutzt. Um den unternehmensübergreifenden Datenaustausch für eine große Breite industrieller Unternehmen nutzbar zu machen, wurden darüber hinaus Standardisierungsempfehlungen für die Datenaufnahme, -speicherung und -übertragung erarbeitet.

Da im Projekt lediglich eine Modellprozesskette verwendet wurde, ist eine quantitative Beschreibung des Mehrwerts einer überbetrieblichen Datenweitergabe sowie einer modellbasierten, adaptiven Prozessführung schwer umsetzbar. Die entscheidenden Einflussfaktoren und Schlüsselaspekte wurden jedoch herausgearbeitet, sodass die

Erkenntnisse durch Unternehmen auf die eigene Prozesskette übertragen werden können und eine Abschätzung des Mehrwerts ermöglicht wird.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

Abstract

Properties of steel products are inspected only randomly along industrial process chains, so the exact condition of each individual product is not known. This brings limitations, such as very restrictive customer tolerances, which can lead to the generation of scrap in the early stages of the process chain. Additionally, product properties cannot be used in the design of manufacturing processes, making it impossible to react to deviations in order to prevent scrap. The goal of this research project is therefore to establish a model-based prediction of the properties of each individual product in order to be able to design subsequent processes based on knowledge of the exact product condition. This should allow product specifications to be designed with less restriction, and scrap to be reduced through adaptive process control. A further goal is to investigate the transmission of the relevant data and to design a data platform that enables the secure and standardized transfer of product information from the supplier to the customer.

To implement the research project, a test environment including a model process chain was initially set up at IBF, representing two virtual companies. The first company deals with cold rolling and acts as a supplier, while the second company forms the cold strip received from the first company into cross-die specimens and acts as a customer. By forming cold strips with different mechanical properties despite the same specification using a standard deep drawing process, the influence of variations in the cold strip properties on the properties of the resulting cross-die specimens was investigated. In the second step, a simulation-based process design was used to adaptively respond to these variations and minimize the fluctuations in the resulting cross-die specimen properties. Finally, the first company knowingly produced cold strip with its properties laying outside the product specification. Here too, it was shown that, through adaptive process design, even with unacceptable input material, good parts can be produced, thus avoiding scrap. Personal interviews and surveys with PA members, as well as state-of-the-art methodologies identified through a thorough literature review, were used to design and implement a data platform prototype. In order to make inter-company data exchange usable for a wide range of industrial companies, standardization recommendations for data acquisition, storage and transmission were also developed.

Since only a model process chain was used in the project, a quantitative description of the added value of cross-company data transfer and model-based adaptive process control is difficult to implement. However, the decisive influencing factors and key aspects have been worked out, so that these findings can be transferred by companies to their own process chain and an estimate of the added value is possible.

The objectives of this research project were accomplished.

Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Maßnahmen während der Projektlaufzeit

Maßnahme A: Projektbegleitender Ausschuss (PA)

Ziel	Rahmen	Zeitraum
Fortlaufende Diskussion der genauen Forschungsdetails sowie der aktuellen Forschungsergebnisse im PA	A1 1. PA-Sitzung (Online)	23.04.2021
	A2 2. PA-Sitzung (Online)	25.10.2021
	A3 3. PA-Sitzung (Online)	18.05.2022
	A4 4. PA-Sitzung (Online)	15.11.2022
	A5 5. PA-Sitzung (Abschlussveranstaltung in Aachen)	22.06.2023

Maßnahme B: Ansprache interessierter Unternehmen außerhalb des PA

Kontinuierlicher und zielgerichteter Transfer der Ergebnisse durch den engen Kontakt der Forschungsstellen zu einer Vielzahl von Unternehmen, Behörden und Planungsbüros	B1 Vorstellung des Projekts in bilateralen Gesprächen mit Industrievertretern beim CBA 2021 und 2022 (Aachen)	Juni 2021 Juni 2022
	B2 Vorstellung des Datenplattformkonzepts beim Abschlusstreffen des Forschungsprojekts Sichere Lebensmittel-Kette durch Anwendung der Blockchain-Technologie (SiLKe) am Cluster Smart Logistik (Aachen)	August 2022
	B3 Vorstellung des Projekts und der Potenziale des unternehmensübergreifenden Datenaustauschs beim Roundtable Supply-Chain-Management bei Bayer AG (Leverkusen)	August 2022
	B4 Vorstellung des Projekts in bilateralen Gesprächen mit Industrievertretern beim CDO 2022 (Aachen/Online)	November 2022
	B5 Vorstellen des Forschungsprojekts im Newsletter des Instituts für Bildsame Formgebung	November 2021 Juni 2023

Maßnahme C: Publikation der Ergebnisse durch Veröffentlichungen in Zeitschriften

Ergebnistransfer in Wirtschaft und Wissenschaft	C1 Fjodorovs & Marek (2021) Überbetrieblicher Datenaustausch schafft Flexibilität und Transparenz in der Stahlindustrie. In: <i>Unternehmen der Zukunft</i> Ausgabe 03	Dezember 2021
	C2 Fjodorovs et al. (2022) Überbetrieblicher Datenaustausch als Voraussetzung für adaptive Produktion. In: <i>Konferenzband Aachener Stahlkolloquium</i>	Oktober 2022

Maßnahme D: Publikation der Ergebnisse auf Tagungen und Kongressen

Ergebnistransfer in Wirtschaft und Wissenschaft	D1 Präsentation des Forschungsthemas auf den Postern im Rahmen des Aachener Stahlkolloquiums, Aachen	Oktober 2022
---	---	--------------

Maßnahme E: Publikation der Ergebnisse auf der Projekthomepage

Ergebnistransfer in Wirtschaft und Wissenschaft	E1 Präsentation des Forschungsthemas auf der Homepage des Instituts für Bildsame Formgebung und des FIR e.V. an der RWTH Aachen	seit September 2021
---	--	---------------------

Maßnahme F: Übernahme in Lehre und Ausbildung

Sensibilisierung von und Wissensvermittlung an Studierende im Rahmen von universitären Lehrveranstaltungen	F1 Übernahme in die akademische Lehre: Vorlesung Industrielle Logistik an der RWTH Aachen, Einheit Supply Chain Data Management	Seit WS 22/23
	F2 Mini Thesis: „Bestimmung des Geometriefaktors für die Walzkraftberechnung beim Kaltwalzen von Stahl mittels Finite-Elemente-Methoden“	Mai 2022 – August 2022
	F3 Masterarbeit: „Entwicklung von Empfehlungen zur Standardisierung der Datenerfassung, -speicherung und -übertragung in der Stahlindustrie im Rahmen der End-to-End-Digitalisierung der Lieferkette“	Mai 2022 – Dezember 2022
	F4 Masterarbeit: „Analyse der experimentellen und simulativen Ergebnisse zur Quantifizierung von Mehrwerten und Aufwänden des unternehmensübergreifenden Datenaustausches“	November 2022 – Mai 2023
	F5 Bachelorarbeit: „Identifikation und Bewertung der kritischen Kosten- und Nutzenaspekte des unternehmensübergreifenden Datenaustausches“	April 2023 – Juni 2023

Maßnahmen G: Nutzung und Übertragung der Projektergebnisse in die Industrie

Bereitstellung der Ergebnisse an die Industriepartner, die die Ergebnisse zur Verbesserung Ihrer Produkte nutzen können	G1 Weitergabe der Ergebnisse im Rahmen von PA-Treffen	seit April 2021
---	--	-----------------

Maßnahmen nach der Projektlaufzeit

Maßnahme A: Abschlussbericht

Ziel	Rahmen	Zeitraum
Darstellung und Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse	A1 Abschlussbericht	Dezember 2023

Maßnahme B: Veröffentlichung von Handlungsleitfaden

Veröffentlichung von Kernergebnissen zur weiteren Verwendung durch Unternehmen	B1 Veröffentlichungen von drei Standardisierungsberichten	Ab Dezember 2023
--	--	------------------

Maßnahme C: Publikation der Ergebnisse durch Veröffentlichungen in Zeitschriften

Ergebnistransfer in Wirtschaft und Wissenschaft	C1 Fjodorovs et al. (2023) Identification Of Factors Influencing Cost And Benefit Aspects Of Cross-Company Data Exchange Using The Example Of The Steel Industry. In: <i>Konferenzband International Conference on Transport and Logistics</i>	Oktober 2023
---	---	--------------

Maßnahme D: Publikation der Ergebnisse durch Beiträge bei Tagungen und Kongressen

Ergebnistransfer in Wirtschaft und Wissenschaft	D1 Präsentation der Forschungsergebnisse bei der Internationalen Konferenz für Transport und Logistik (ICLT), Helsinki	Oktober 2023
---	---	--------------

Maßnahme E: Übernahme in Lehre und Ausbildung

Sensibilisierung von und Wissensvermittlung an Studierende im Rahmen von universitären Lehrveranstaltungen	E1 Übernahme in die akademische Lehre: Weiterentwicklung der Vorlesung Industrielle Logistik an der RWTH Aachen, Einheit Supply Chain Data Management	Ab WS 23/24
--	--	-------------

Maßnahmen F: Nutzung und Übertragung der Projektergebnisse in die Industrie

Kontinuierlicher Austausch mit Industrieunternehmen und Anregung von Diskussionen und Erfahrungsaustauschen innerhalb der Stahlindustrie	F1 Etablierung eines Themenkreises <i>Leider hat der Themenkreis aufgrund des geringen Interesses seitens der Industrieunternehmen nicht stattgefunden. Keine weiteren Termine wurden geplant, da die Bereitschaft zur Teilnahme an weiteren Terminen ebenfalls sehr gering war, sodass kein sinnvoller Erfahrungsaustausch möglich wäre.</i>	September 2023
--	---	----------------

Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts

Aufgrund der oben genannten vielfältigen Transfermaßnahmen in die Wirtschaft werden die Anforderungen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft und insbesondere zu kleinen und mittleren Unternehmen erfüllt.

Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrages und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

In Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden die Möglichkeiten und Nutzen einer datenbasierten Prozessführung untersucht, bei der Simulationsmodelle verwendet wurden, um die Eigenschaften von kaltgewalzten und tiefgezogenen Produkten entlang einer Demonstratorprozesskette zu berechnen und über eine unternehmensübergreifende Datenplattform auszutauschen. Die experimentelle Bestimmung der Materialeigenschaften jedes einzelnen Produkts in einer Charge ist unwirtschaftlich, da die Durchführung von Materialcharakterisierungsversuchen zeit- und kostenaufwendig ist. Daher werden die Produkte in der Prozesskette nur stichprobenartig kontrolliert, sodass der genaue Zustand jedes einzelnen Produkts nicht bekannt ist. Daher ist der Ansatz der modellbasierten Berechnung der Materialeigenschaften vielversprechend. Die modellbasierte Berechnung der Produkteigenschaften liefert Kenntnisse über den genauen Zustand jedes Produkts und ermöglicht es, die Schwankungen in den Materialeigenschaften innerhalb der Produktspezifikation zu identifizieren. Durch eine adaptive Prozessauslegung als Reaktion auf diese Schwankungen oder gar Abweichungen der Eingangsmaterialeigenschaften kann Ausschuss reduziert werden und das Streuband der Eigenschaften des erzeugten Produkts verkleinert werden. Zusätzlich kann die eigene Restriktion an den Zulieferer breiter gefasst werden, da ein größeres Spektrum an Materialeigenschaften in ein Gutteil überführt werden kann. Die Wirtschaftlichkeit der gesamten Prozesskette wird somit deutlich gesteigert.

Durch die Verwendung analytischer und numerischer Prozessmodelle ist es möglich, die Eigenschaften der kaltgewalzten sowie tiefgezogenen Produkte mit guter Genauigkeit vorherzusagen. Die Entwicklung solcher Modelle ist aus wissenschaftlicher, technischer und wirtschaftlicher Sicht wichtig, da sie die Produkteigenschaften innerhalb kurzer Zeit vorhersagen können und somit zukünftig zusätzlich für Echtzeitadaptationen genutzt werden können. Damit bieten sie einen Mehrwert gegenüber experimentellen Methoden, die höhere Kosten verursachen und mehr Zeit in Anspruch nehmen.

Für die optimale Nutzung der Prozessmodelle sind auch Daten von Materiallieferanten, die als Eingangsgrößen für die Prozessmodelle genutzt werden, von hoher Bedeutung. Je detaillierter und präziser die Daten, desto höher ist die Qualität der Simulationsergebnisse. Um Daten innerhalb der Liefer- bzw. Prozesskette sicher auszutauschen, bedarf es einer passenden Technologie. Da es eine Vielzahl an Technologien und Ansätzen zum Datenaustausch gibt, kann dies dazu führen, dass Unternehmen mit geringer IT-Expertise und ohne geeignete Unterstützung (z.B. seitens Forschung oder IT-Dienstleister) eine Technologie auswählen, die den Anforderungen nicht gerecht ist. Die Folgen reichen vom erhöhtem Aufwand für die Anpassung und Konfiguration des Technologieeinsatzes bis hin zum Verlust von sensiblen Unternehmensdaten. Letzteres kann insbesondere bei KMU zum Verlust der

Wettbewerbsvorteile führen. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden die genauen Anforderungen von Unternehmen der Stahlindustrie an den Datenaustausch erhoben. Die aktuellen Technologien für den Datenaustausch wurden anhand dieser Anforderungen bewertet, damit eine Übersicht der Eignung der Technologien entsteht. Die gewonnenen Erkenntnisse können genutzt werden, um für Unternehmen eine Empfehlung auszusprechen, welche Technologie sich für den Datenaustausch innerhalb der Prozesskette am besten eignet, um die schwerwiegenden Folgen der falschen Technologieauswahl zu vermeiden.

Die Standardisierbarkeit von Schnittstellen und Datenformaten wurde ebenfalls untersucht, um insbesondere für KMU Maßnahmen zu entwickeln, nach denen diese den Datenaustausch umsetzen können. Hierdurch kann verhindert werden, dass aus großen Unternehmen, die an ähnlichen Datenplattformen arbeiten bzw. interessiert sind, Standards zum Nachteil der KMU vorgegeben werden. Diese Normungsabsichten erstrecken sich auch auf Prozesse und Verfahren zur Datenaufnahme, -speicherung und -übertragung.

Um die Vorteile der adaptiven Prozessführung und der standardisierten Weitergabe von Prozessdaten zu beschreiben, wurden strategische, technische und produktbezogene Einflussfaktoren und deren Einfluss auf mögliche Kosten- und Nutzenaspekte identifiziert. Diese Faktoren ermöglichen Unternehmen die Kosten des unternehmensübergreifenden Datenaustausches zu reduzieren und den Nutzen zu erhöhen, sowie eine bessere Qualität von Entscheidungen für IT-Projekte in Bezug auf Datenaustausch zu treffen.

Die in diesem Projekt generierten Ergebnisse zeigen ein hohes Potenzial zur weiteren Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Prozessketten der Stahlindustrie, indem sie dazu beitragen, dass sie robuster gegenüber Schwankungen und Abweichungen in den Materialeigenschaften werden. Die Bestandteile der im Projekt gewählten Demonstratorprozesskette, bestehend aus Kaltwalzen und Tiefziehen, finden sich heute in großen, mittleren sowie kleinen Unternehmen. Für kleine und mittelständische Unternehmen kann das genaue Wissen über jedes eingehende Produkt besonders wichtig sein, da sie typischerweise am Ende der Prozesskette stehen, wo fertige Produkte in großen Mengen hergestellt werden. Das Wissen über den Zustand des Ausgangsmaterials kann bei der robusten Gestaltung der Produktionsprozesse helfen. Da die Eigenschaften der Produkte für jeden Verarbeitungsschritt zwischengespeichert werden, kann dies in Fällen hilfreich sein, in denen die Entwicklung der Produkteigenschaften entlang der Prozesskette zurückverfolgt werden muss. Dies ermöglicht auch eine bessere Ursachenanalyse im Falle von Reklamation oder Qualitätsproblemen innerhalb der Prozesskette. Der resultierende technische Vorteil führt zu Wettbewerbsvorteilen.

Inhaltsverzeichnis/ Content

1	Einleitung / Introduction	1
1.1	Ausgangslage / Current situation	2
1.2	Problemstellung und Motivation / Problem statement and Motivation	2
1.3	Zielsetzung / Objective	3
2	Stand der Technik / State of the art.....	5
2.1	Grundlagen der Finite-Elemente-Methode (FEM) / Basics of finite element method (FEM).....	5
2.1.1	Verfahrensschritte der Finite-Elemente-Methode / Steps in finite element method.....	9
2.1.2	Anwendungen der Finite-Elemente-Methode in der Umformtechnik / Applications of FEM in metal forming	9
2.2	Grundlagen des Walzens / Basics of rolling	10
2.2.1	Flach-Längswalzen (Elementare Theorie des Walzens) / Flat longitudinal rolling (Elementary theory of rolling).....	13
2.2.2	Auslegungsgrößen beim Flach-Längswalzen / Parameters of flat longitudinal rolling.....	20
2.2.3	Bestimmung der Eigenschaften von gewalzten Blechen / Determination of the properties of rolled sheets	21
2.3	Grundlagen des Tiefziehens / Basics of deep drawing.....	25
2.3.1	Kreuznapf / Cross die specimen.....	30
2.4	Grundlagen des Design of Experiment (DoE) / Basics of Design of Experiment (DoE).....	32
2.4.1	Ansatz zur Implementierung des Design of Experiments / Approach of implementation of Design of Experiments.....	34
2.4.2	Experimentelle Designmethoden / Experimental design methodologies	34
2.5	Grundlagen der Datenerfassung, -übertragung und -speicherung / Basics of data acquisition, transmission and storage	39
2.5.1	Datenaufnahme / Data acquisition	39
2.5.2	Datenspeicherung / Data storage	42
2.5.3	Datenübertragung / Data transmission.....	48
2.6	Technologien für die Entwicklung der Datenplattform / Technologies for the development of Dataplatform	51
2.6.1	EDI-Konzepte / Concept of EDI.....	51
2.6.2	Cloud Computing Technologie / Cloud computing technology	54
2.6.3	Blockchain-Technologie / Blockchain technology.....	57

2.6.4	Industrieller Datenaustauschraum / Industrial Data Space (IDS)	59
2.7	Ansätze zur Bewertung des unternehmensübergreifenden Datenaustausches / Approaches for evaluating intercompany data exchange.....	61
2.7.1	Potenziale des Datenaustausches in der Fertigung / Potentials of data exchange in manufacturing	61
2.7.2	Motive und Anreize für den Datenaustausch in Ökosystemen / Motives and incentives for data exchange in ecosystems.....	63
2.7.3	Effekte der Digitalisierung in der Stahlindustrie / Effects of digitization in the steel industry	66
2.7.4	Kosten-Nutzen-Analyse von Informationssystemen / Cost-benefit analysis of information systems	68
2.7.5	Leistungsquantifizierung des Datenaustausches / Quantifying the performance of data exchange.....	69
3	Vorgehensweise und Implementierung / Approach and implementation.....	73
3.1	Arbeitspaket 1/ Work package 1.....	74
3.2	Arbeitspaket 2/ Work package 2.....	75
3.3	Arbeitspaket 3/ Work package 3.....	77
3.4	Arbeitspaket 4/ Work package 4.....	78
3.4.1	Beschaffung und Charakterisierung kommerzieller Kaltbänder / Procurement and characterization of commercial cold strips	78
3.4.2	Durchführung der Kreuznapfversuche / Implementation of cross die experiments.....	79
3.4.3	Analyse der experimentellen Ergebnisse der Tiefziehversuche / Analysis of the results of deep drawing experiments.....	80
3.5	Arbeitspaket 5/ Work package 5.....	81
3.5.1	Beschaffung und Charakterisierung von kommerziellem Warmband / Procurement and characterization of commercial hot strip	81
3.5.2	Simulative Nachbildung der Prozesskette / Simulative reconstruction of the process chain.....	81
3.5.3	Simulative Auslegung der Prozessparameter / Simulation based design of process parameter	93
3.5.4	Durchführung des Kaltwalzens / Execution of cold rolling experiment	94
3.5.5	Durchführung des Tiefziehens / Conducting the deep drawing	95
3.6	Arbeitspaket 6/ Work package 6.....	96
4	Ergebnisse und Diskussion/ Results and discussion	99
4.1	Arbeitspaket 1 / Work package 1.....	99

4.1.1	Einrichtung der Testumgebung / Setting up the test environment	99
4.1.2	Erzielte Ergebnisse / Achieved Results	102
4.2	Arbeitspaket 2 / Work package 2	102
4.2.1	Zielbild konkretisieren / Specification of the target concept	102
4.2.2	Anforderungserhebung/ Collection of requirements	104
4.2.3	Auswahl der Basistechnologie/ Selection of base technology	106
4.2.4	(Internes) Lastenheft und Plattformentwicklung/ (Internal) specification sheet and plattform development	107
4.2.5	Erzielte Ergebnisse / Achieved Results	110
4.3	Arbeitspaket 3 / Workpackage 3	110
4.3.1	Normungsbedarf identifizieren/ Identify need for standardisation	111
4.3.2	Erkenntnisse aus der Industrie/ Insights from the industry	113
4.3.3	Entwicklung eines Frameworks zur Strukturierung der Standardisierungsaktivitäten/ Development of a framework for structuring standardisation activities	116
4.3.4	Standardisierung und Handlungsempfehlungen/ Standardisation and recommendations for action	117
4.3.5	Erzielte Ergebnisse / Achieved Results	118
4.4	Arbeitspaket 4 / Workpackage 4	118
4.4.1	Beschaffung und Charakterisierung kommerzieller Kaltbandzustände/ Procurement and characterization of commerical cold strips	118
4.4.2	Durchführung der Kreuznapfversuche / Execution of cross die experiments	119
4.4.3	Analyse der experimentellen Ergebnisse der Tiefziehversuche / Analysis of the results of deep drawing experiments	120
4.4.4	Erzielte Ergebnisse / Achieved Results	122
4.5	Arbeitspaket 5 / Workpackage 5	123
4.5.1	Beschaffung und Charakterisierung von kommerziellem Warmband / Procurement and characterization of commercial hot strip	123
4.5.2	Simulative Nachbildung der Prozesskette / Simulative reconstruction of the process chain	123
4.5.3	Simulative Auslegung der Prozessparameter / Simulation based design of process parameter	131
4.5.4	Durchführung des Kaltwalzens / Execution of cold rolling experiment	132
4.5.5	Durchführung des Tiefziehens / Conducting the deep drawing	133
4.5.6	Erzielte Ergebnisse / Achieved Results	139

4.6	Arbeitspaket 6 / Work package 6.....	140
4.6.1	Analyse der experimentellen Ergebnisse / Analysis of experimental results	140
4.6.2	Analyse der simulativen Ergebnisse / Analysis of simulation results.....	141
4.6.3	Analyse des wirtschaftlichen Mehrwerts / Analysis of the economic added value	141
4.6.4	Erzielte Ergebnisse / Achieved Results.....	151
5	Empfehlungen des Projekts/ Project Recommendations.....	152
5.1.1	Technologie Auswahl (AP2) / Technology Selection	152
5.1.2	Standardisierungshandlungsempfehlungen (AP3) / Standardisation recommendations	153
5.1.3	Empfehlungen zur Prozessmodellierung und Verwendung von DoE zur Prozessoptimierung - (AP5) / Recommendations for process modelling and implementation of DoE for process optimization	156
5.1.4	Maximierung des Nutzens - (AP6) / Maximising the benefits	157
6	Zusammenfassung / Summary	159
7	Ausblick / Perspective	163
8	Zusammenstellung aller Veröffentlichungen / List of publications related to the project	165
9	Literaturverzeichnis / Bibliography	166

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Typische Elementtypen der Finite-Elemente-Methode [4]	8
Abbildung 2-2: Flach-Längswalzen des Walzguts mittels oberer und unterer Arbeitswalzen [4]	11
Abbildung 2-3: Flachfertigerzeugnisse für die Blechumformung [3]	11
Abbildung 2-4: Schematische Darstellung einer Kaltwalz-Tandemstraße [3]	12
Abbildung 2-5: Typen von Walzgerüsten, bestehend aus Arbeits- und Stützwalzen [3]	13
Abbildung 2-6: geometrische Verhältnisse beim Flach-Längswalzen [4]	14
Abbildung 2-7: Walzenabplattung aufgrund der elastischen Verformung der Arbeitswalzen [4]	16
Abbildung 2-8: Durchführung der Hitchcock Iteration zur Berechnung des neuen lokalen Krümmungsradius durch Walzenabplattung [3]	17
Abbildung 2-9: Spannungsverteilung im Walzspalt auf einem vertikalen Element [11]	18
Abbildung 2-10: Flachzugprobenabmessungen nach DIN EN ISO 6892 1 Norm [3]	22
Abbildung 2-11: Bestimmung der Spannung-Dehnung Kurve mittels des Falchzugversuchs [3]	23
Abbildung 2-12: Modellierung der Fließkurve nach dem Hollomon und Ludwik Ansatz [3]	24
Abbildung 2-13: Tiefziehen eines Napfes [3]	25
Abbildung 2-14: Das Tiefziehen unregelmäßiger Blechteile führt zu lokal unterschiedlichen Belastungsbedingungen, die unterschiedliche Reibungsbedingungen verursachen [3]	26
Abbildung 2-15: Verteilung des Umformgrads in einem Tiefziehnapf aus einer FE Simulation [3]	27
Abbildung 2-16: Im Tiefziehprozess wirkende Kräfte [4]	28
Abbildung 2-17: Verlauf der Tiefziehkraft während des Tiefziehprozesses [3]	29

Abbildung 2-18: Bodenreißer und Faltenbildung während des Tiefziehprozesses [3]	30
Abbildung 2-19: Bereich der Gutteilproduktion in Abhängigkeit von Niederhalterkraft und Ziehverhältnis [3].....	30
Abbildung 2-20: Die Matrize, der Stempel und das Tiefziehteil eines Kreuznapfversuchs [25].....	31
Abbildung 2-21: Charakterisierung der Kreuznapf entlang die drei Referenz Linien für Dickenverteilung	31
Abbildung 2-22: Prozentuale Ausdünnung (exp. und sim.) entlang der Referenz Linie 1 eines Kreuznapfs [25]	32
Abbildung 2-23: Anwendung des DoE in verschiedenen Fachgebieten [30]	33
Abbildung 2-24: Full Factorial Design mit 2 Einflussfaktoren (Faktor A und B), wobei jeder Faktor mit 2 Stufen (high und low) versehen ist [31]	35
Abbildung 2-25: Erstellung des Central Composite designs [33].....	36
Abbildung 2-26: Drei Arten des Central Composite Designs [33].....	37
Abbildung 2-27: Latin Hypercube Design für 10 Datenpunkten und 2 Faktoren (X1 und X2)	38
Abbildung 2-28: Latin Hypercube Design mit 15 Datenpunkten [34]	38
Abbildung 2-29: Central Composite Circumscribed (CCC) Design mit 15 Datenpunkten [34]	39
Abbildung 2-30: Klassifizierung von Methoden der Datenerfassung in Produktionssystemen [48]	42
Abbildung 2-31: Vier grundlegende IT-Architekturen auf dem Shopfloor (eigene Darstellung)	45
Abbildung 2-32: Architektur des iba-Systems als offenes Ökosystem [58]	48
Abbildung 2-33: Auflistung der identifizierten ökonomischen Potentiale [eigene Darstellung i. A. a. 75]	62
Abbildung 2-34: Aufbau des Motive-Incentive-Activation-Behaviour-Modell	64
Abbildung 2-35: Motive und Anreize des Datenteilens in Datenökosystemen [eigene Darstellung i. A. a. 76]	65

Abbildung 2-36: Kosten- und Nutzenaspekte von Digitalisierungsprojekten [eigene Darstellung i. A. a. 77]	67
Abbildung 2-37: Ausgewählte Kostenaspekte eines Informationssystems [eigene Darstellung i. A. a. 78]	69
Abbildung 2-38: Zusammensetzung der operativen Produktionsleistung [eigene Darstellung i. A. a. 79]	71
Abbildung 3-1: Konzept der Modellprozesskette zur Untersuchung der datenbasierten Prozessführung	74
Abbildung 3-2: Vorgehen bei der Anforderungserhebung	75
Abbildung 3-3: Ausschnitt aus der Bewertung und Priorisierung von Anforderungen	76
Abbildung 3-4: Ausschnitt aus der Bewertung von Basistechnologien	76
Abbildung 3-5: Ausschnitte aus dem interaktiven Workshop mit dem PA zur Identifikation von Standardisierungspotenzialen	77
Abbildung 3-6: Schematische Darstellung des Stempels für Kreuznapfversuche [80]	79
Abbildung 3-7: Durchführung der Kreuznapfversuch am IBF	80
Abbildung 3-8: Unterteilung des Walzspaltes in Streifenelemente j und Höhenschichten k gemäß der	83
Abbildung 3-9: Prinzipieller Modellaufbau der mit dem Walzautomat erzeugten Walzmodelle [81]	86
Abbildung 3-10: Von links nach rechts: Komplette starre Walze, starrer Walzenring mit „Rigid Constraint“ und eine verformbare Walze [81]	86
Abbildung 3-11: Workflow der Simulationsstudie zur Kalibrierung des Geometrie Faktors für das Kaltwalzen	88
Abbildung 3-12: FE Modellierung der Kreuznapfversuch in Abaqus 2019 [82]	90
Abbildung 3-13: Qualitative Darstellung der Skalierung der Referenzfließkurve für die Erstellung des FE-Tiefziehmodells mit modifizierten Kaltbandeigenschaften	92
Abbildung 3-14: Workflow der DoE basierten Auslegung des Tiefziehprozesses	93

Abbildung 3-15:Workflow der Auslegung der Tiefziehprozesse basierend auf der genauen Kenntnis des Kaltbandzustands zur Untersuchung der adaptiven Prozessführung	96
Abbildung 3-16:Ausschnitt aus dem Workshop zur Identifikation potenzieller Kosten- und Nutzenaspekte	97
Abbildung 3-17: Ausschnitt aus dem Workshop zur Konkretisierung der Aspekte und Identifikation des wirtschaftlichen Mehrwerts	98
Abbildung 4-1: Modellprozesskette mit zwei virtuellen Unternehmen für Untersuchung der datenbasierten Prozessführung	100
Abbildung 4-2: Infrastruktur für Datenerfassung und -speicherung in einer NoSQL-Datenbank in virtuellen Unternehmen A.....	101
Abbildung 4-3: Die Infrastruktur für Datenerfassung und -speicherung in einer NoSQL-Datenbank in virtuellen Unternehmen B.....	102
Abbildung 4-4: Erster Entwurf des Zielbilds.....	103
Abbildung 4-5: Relevante Daten für adaptive Produktion.....	103
Abbildung 4-6: Unterschiede bei den ursprünglich definierten und neuen relevanten Kategorien	104
Abbildung 4-7: Ergebnis der Bewertung der Basistechnologien.....	107
Abbildung 4-8: Das finale Konzept der Datenplattform zum überbetrieblichen Datenaustausch entlang einer Prozesskette	108
Abbildung 4-9: Beispielhafte Auszüge aus dem Lastenheft für die Entwicklung des Plattformprototyps	109
Abbildung 4-10: Erläuterung der Unterschiede zwischen der IDS-Technologie und der umgesetzten Datenplattform	109
Abbildung 4-11: Funktionskonzept der Datenplattform und die Interaktion mit der Plattform.....	110
Abbildung 4-12: Framework zur Einordnung von Standards in unterschiedlichen Unternehmensebenen.....	116
Abbildung 4-13: Analyse des Einflusses der Kaltbandeigenschaften auf die max. Tiefziehkraft.....	121

Abbildung 4-14: Analyse des Einflusses der Kaltbandeigenschaften auf die Kreuznapfeigenschaften.....	121
Abbildung 4-15: Streuung der Eigenschaften der kommerziellen Kaltbänder und des Demonstrator Bauteils	122
Abbildung 4-16: Experimentell gemessene und nach dem Ludwik Ansatz extrapolierte Warmbandfließkurve	124
Abbildung 4-17: Vergleich der Walzkraft zwischen Experiment, FE-Kaltwalzmodell und dem für das Kaltwalzen unkalibrierte, schnelle Walzmodell.	125
Abbildung 4-18: Modellierung des Geometrie Faktors als Funktion von Walzspaltverhältnis und Reibung	126
Abbildung 4-19: Validierung des schnellen Kaltwalzmodells sowie des integrierten Modells zur Vorhersage der resultierenden Kaltbandeigenschaften	128
Abbildung 4-20: Modellierung der Kaltband Fließkurve nach McConnell-Lenard Ansatz für die Implementierung in der FE-Tiefziehmodell	129
Abbildung 4-21: Konvergenzanalyse des FE-Tiefziehmodells für Elementgrößen von 1 mm, 2 mm und 3 mm.....	129
Abbildung 4-22: Vergleich zwischen experimentell und simulativ ermittelter, maximaler Tiefziehkraft und maximaler Ausdünnung zur Validierung des FE-Tiefziehmodells.	130
Abbildung 4-23: Gegenüberstellung des experimentell und simulativ ermittelten Streubands der maximalen Ausdünnung des Kreuznapfs unter Verwendung des Standard Tiefziehprozesses.....	131
Abbildung 4-24: Streckgrenze und Zugfestigkeit des am IBF kaltgewalzten und geglühten Materials	133
Abbildung 4-25: Eigenschaften des Kaltbands (grün), das für Validierungsversuch I verwendet wurde, zusammen mit der DC04-Spezifikation (schwarz) und dem experimentell ermittelten Kaltband-Streuband aus AP4 (rot)	134
Abbildung 4-26: Experimentelle Ergebnisse und Simulationsergebnisse der Tiefziehversuche unter Verwendung der Standard-Tiefziehparameter	135
Abbildung 4-27: DoE-basierte Auslegung des Tiefziehprozesses für Kaltband A, B und C	136

Abbildung 4-28: Reduziertes experimentelles und simulatives Streuband der Kreuznapfeigenschaften durch Verwendung der DoE-basierten Prozessauslegung.....	137
Abbildung 4-29: Für die Validierungsversuche III verwendetes Kaltband mit Eigenschaften außerhalb der Spezifikation	138
Abbildung 4-30: Validierung der adaptiven Prozessführung zur Erzeugung von Kreuznäpfen innerhalb der Spezifikation aus Kaltband außerhalb der Spezifikation.....	139
Abbildung 4-31: Überblick über relevante Kostenaspekte des unternehmensübergreifenden Datenaustauschs.....	142
Abbildung 4-32: Übersicht der Nutzenaspekte des unternehmensübergreifenden Datenaustauschs	143
Abbildung 5-1: Rollen und ihre Interaktionen im International Data Spaces.....	152
Abbildung 5-2: Beispiel der IT-Architektur und Systemgrenzen im Forschungsprojekt.....	155
Abbildung 6-1: Konsolidiertes Vorgehen des Forschungsprojekts	160

List of figures

Figure 2-1: Element types in finite element method [4]	8
Figure 2-2: Rolling of workpiece using upper and lower work rolls [4].....	11
Figure 2-3: Flat sheet products for sheet metal forming [3]	11
Figure 2-4: Depiction of a cold rolling mill [3].....	12
Figure 2-5: Types of rolling mill stands consisting of work and support rolls [3]	13
Figure 2-6: Geometrical relationships in flat longitudinal rolling [4]	14
Figure 2-7: Roll flattening due to elastic deformation of work rolls [4]	16
Figure 2-8: Hitchcock iterations for calculation of flattened work roll radius [3]	17
Figure 2-9: Stress distribution in the roll gap on a vertical element [11]	18
Figure 2-10: Tensile test specimen geometry according to DIN EN ISO 6892 1 Norm [3]	22
Figure 2-11: Determination of the stress strain curve using the tensile tests [3]	23
Figure 2-12: Modelling and extrapolation of flow curve using Hollomon and Ludwik [3]	24
Figure 2-13: Deep drawing of a cup [3]	25
Figure 2-14: Deep drawing of irregular sheet component leads to locally different loading conditions that result in different friction conditions [3].....	26
Figure 2-15: Distribution of equivalent plastic strain in an deep drawn cup using FE simulation [3]	27
Figure 2-16: Forces in a deep-drawing process [4]	28
Figure 2-17: Deep drawing force during the deep drawing process [3]	29
Figure 2-18: Development of bottom cracks and wrinkles during deep drawing process [3].....	30
Figure 2-19: Area of defect free production in dependence of blankholder force and drawing ratio [3].....	30
Figure 2-20: The die, punch and cross die specimen in cross die test [25]	31
Figure 2-21: Characterization of cross die specimen for its thickness distribution along three reference lines.....	31

Figure 2-22: Percentage thinning (exp. and sim.) along the reference line in a cross die specimen [25].....	32
Figure 2-23: Applications of Design of Experiments in different fields [30].....	33
Figure 2-24: Full Factorial Design with 2 factors (factor A and B) where each factor has 2 levels (high and low) [31].....	35
Figure 2-25: Creation of central composite design [33].....	36
Figure 2-26: Three types of central composite designs [33].....	37
Figure 2-27: Latin Hypercube Design for 10 samples and 2 factors (X1 and X2).....	38
Figure 2-28: Latin hypercube design with 15 samples [34]	38
Figure 2-29: Central composite circumscribed (CCC) design with 15 samples [34]	39
Figure 2-30: Classification of data acquisition methods in production systems [48]	42
Figure 2-31: Four basic IT architectures on the store floor (own illustration).....	45
Figure 2-32: Architecture of the iba system as an open ecosystem [58]	48
Figure 2-33: Listing of the identified economic potentials.....	62
Figure 2-34: Structure of the Motive-Incentive-Activation-Behaviour-Model [eigene Darstellung i. A. a. 76]	64
Figure 2-35: Motives and incentives of data sharing in data ecosystems.	65
Figure 2-36: Cost and benefit aspects of digitization projects	67
Figure 2-37: Selected cost aspects of an information system	69
Figure 2-38: Composition of operating production output	71
Figure 3-1: Concept of the demonstrator process chain for the investigation of data based process control	74
Figure 3-2: Procedure for requirements gathering	75
Figure 3-3: Excerpt from the evaluation and prioritization of requirements	76
Figure 3-4: Excerpt from the evaluation of basic technologies	76
Figure 3-5: Excerpts from the interactive workshop with the PA on the identification of standardization potentials.....	77
Figure 3-6: Schematics of the punch for cross die experiments [80].....	79

Figure 3-7: Execution of cross die experiment at IBF.....	80
Figure 3-8: Subdivision of roll gap in strip elements j and height levels k according to elementary theory	83
Figure 3-9: Fundamental model structure of the rolling models generated using Walzautomat [81]	86
Figure 3-10: From left to right: A rigid roll arc, a rigid roll ring (Rigid Constraint), and deformable roll [81].....	86
Figure 3-11: Workflow of simulation study for the calibration of the geometry factor for cold rolling	88
Figure 3-12: FE modelling of cross die test in Abaqus 2019 [82]	90
Figure 3-13: Qualitative representation of scaling of the reference flow curve for preparation of the FE deep drawing model using modified cold strip properties	92
Figure 3-14: Workflow for DoE based design of deep drawing process	93
Figure 3-15: Workflow - Design of deep drawing process using the information of about the exact cold strip properties for investigation of adaptive process control	96
Figure 3-16: Excerpt from the workshop on identifying potential cost and benefit aspects.....	97
Figure 3-17: Excerpt from the workshop for the concretization of the aspects and identification of the economic added value.....	98
Figure 4-1: Demonstrator process chain consisting of two virtual companies for the investigation of data based process control	100
Figure 4-2: Infrastructure for data acquisition and data storage in a NoSQL Databank in virtual company A.....	101
Figure 4-3: Infrastruktur für Datenerfassung und -speicherung in einer NoSQL- Datenbank in virtuellen Unternehmen B.....	102
Figure 4-4: First draft of the target.....	103
Figure 4-5: Data relevant for adaptive production	103
Figure 4-6: Differences in the originally defined and new relevant categories.....	104
Figure 4-7: Result of the evaluation of the foundation technologies	107
Figure 4-8: The final concept of the data platform for inter-company data exchange along a process chain.....	108

Figure 4-9: Sample excerpts from the specifications for the development of the platform prototype	109
Figure 4-10: Explanation of the differences between the IDS technology and the implemented data platform.....	109
Figure 4-11: Functional concept of the data platform and interaction with the platform	110
Figure 4-12: Framework for the classification of standards in different company levels.....	116
Figure 4-13: Analysis of the influence of the max. deep drawing force	121
Figure 4-14: Analysis of the influence of cold strip properties on cross die cup properties	121
Figure 4-15: Deviations in the properties of commercial cold strip and demonstrator component	122
Figure 4-16: Hot strip flow curve using the hot strip tensile test and extrapolated using Ludwik approach.....	124
Figure 4-17: Comparison of rolling force between experiment, FE cold rolling model and uncalibrated fast rolling model.	125
Figure 4-18: Modelling of geometry factor as a function of roll gap ratio and friction.....	126
Figure 4-19: Validation of fast cold rolling model as well as the integrated model for prediction of cold strip properties	128
Figure 4-20: Modelling of cold strip flow curve using McConnell-Lenard model for implementing in FE deep drawing model	129
Figure 4-21: Convergence analysis of FE deep drawing model for element size of 1 mm, 2 mm and 3 mm.	129
Figure 4-22: Comparison of experimental and simulative determined max. deep drawing force and max. thinning for validation of the FE deep drawing model.....	130
Figure 4-23: Comparison of the experimentally and simulatively determined deviations in the maximum thinning of cross die specimen using the standard deep drawing process.	131

Figure 4-24: Yield strength and tensile strength of at IBF cold rolled and subsequently heat treated sheets	133
Figure 4-25: Properties of cold strip used for validation test 1 (green) together with DC04-specification (black) and experimentally determined deviation in the in WP4 (red)	134
Figure 4-26: Experimental and simulation results for deep drawing tests using standard deep drawing process	135
Figure 4-27: DoE based design of deep drawing process for cold strip A, B and C	136
Figure 4-28: Reduction of experimental and simulative deviations in cross die properties using DoE based process design	137
Figure 4-29: At IBF processed cold strip with properties outside the cold strip tolerance from WP4 for validation test III.....	138
Figure 4-30: Adaptive deep drawing process control for processing cold strip outside the tolerance to produce deep drawn component with its properties within the specification	139
Figure 4-31: Overview of relevant cost aspects of cross-company data exchange ..	142
Figure 4-32: Overview of the benefits of cross-company data exchange	143
Figure 5-1: Rollen und ihre Interaktionen im International Data Spaces	152
Figure 5-2: Beispiel der IT-Architektur und Systemgrenzen im Forschungsprojekt ..	155
Figure 6-1: Consolidated Approach of the Research Project	160

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Hitchcock Konstante für unterschiedliche Walzenwerkstoffe [4].....	17
Tabelle 2-2: Signifikante Einflussgrößen auf die Walzkraft ohne Längszüge [3]	21
Tabelle 2-3: Prüfverfahren zur Bestimmung der Materialeigenschaften von Blechen [3]	21
Tabelle 2-4: Rollenkategorien des IDS.....	59
Tabelle 3-1: Versuchsmatrix für die Durchführung der Tiefziehversuche	80
Tabelle 3-2: Versuchsmatrix für die Simulationsstudie mittels des FE- Kaltwalzmodells	89
Tabelle 3-3: Zusammenfassung der Inputs und Outputs des FE Tiefziehmodells	91
Tabelle 3-4: Zusammenfassung der Inputs zur Durchführung des DoE.....	94
Tabelle 3-5: Durchgeführte Tiefziehversuche zur Validierung der datenbasierten Prozessführung	95
Tabelle 4-1: Vorstellung der gewichteten Anforderungen	105
Tabelle 4-2: Identifizierte IT-Systeme zur Speicherung verschiedener Datenkategorien.....	114
Tabelle 4-3: Mechanische Eigenschaften der beschafften kommerziellen Kaltbänder im geglühtem Zustand	119
Tabelle 4-4: Tiefziehversuchsmatrix zur Herstellung anforderungsgerechter Kreuznäpfe.....	120
Tabelle 4-5: Zusammenfassung der Ergebnisse der Charakterisierung der Kaltbänder im geglühten Zustand und der Tiefziehversuche unter Verwendung des Standard Tiefziehprozesses	120
Tabelle 4-6: Definierte Grundlagen zur Überprüfung der Arbeitshypothesen in AP5	122
Tabelle 4-7: Charakterisierung des Warmbands durch Zugversuche	123
Tabelle 4-8: Beispielhafte Ergebnisse der FE Simulationsstudie zur Kalibrierung des schnellen analytischen Kaltwalzmodells.....	125
Tabelle 4-9: Modelle zur Vorhersage des Geometrie Faktors in Abhängigkeit des Walzspaltverhältnisses und der Reibung	126

Tabelle 4-10: Kaltbandeigenschaften im walzharten Zustand	127
Tabelle 4-11: Vickershärte und Umformgrad basiertes Modell zur Vorhersage der Kaltbandeigenschaften.....	127
Tabelle 4-12: Experimentell und simulativ ermitteltes Streuband der resultierenden Kreuznapfeigenschaften	131
Tabelle 4-13: Stichplan zur Durchführung des Test-Kaltwalzversuchs	132
Tabelle 4-14: Zugfestigkeit und Streckgrenze des am IBF produzierten Kaltbands im walzharten Zustand, ermittelt mithilfe von Zugversuchen	132
Tabelle 4-15: Zusammenfassung der Tiefzieh Simulations- und Versuchsergebnisse unter Verwendung des Standard Tiefziehprozesses.....	134
Tabelle 4-16: Ergebnisse der über DoE ausgewählten Tiefziehsimulationen und der dazugehörigen experimentellen Versuche	136
Tabelle 4-17 : Zusammenfassung der Simulationsergebnisse und experimentellen Ergebnisse von Validierungsversuch III	139
Tabelle 4-18: Einfluss steigender Marktmacht auf Kosten und Nutzen eines unternehmensübergreifenden Datenaustauschs.....	144
Tabelle 4-19: Einfluss steigender Ressourcenverfügbarkeit auf Kosten und Nutzen des unternehmensübergreifenden Datenaustauschs.....	145
Tabelle 4-20: Einfluss steigender Transaktionsquantität auf Kosten und Nutzen des unternehmensübergreifenden Datenaustauschs	146
Tabelle 4-21: Einfluss eines steigenden Digitalisierungsreifegrades auf Kosten und Nutzen des unternehmensübergreifenden Datenaustauschs.....	147
Tabelle 4-22: Einfluss der Simulationsexpertise auf Kosten und Nutzen des unternehmensübergreifenden Datenaustausches.....	148
Tabelle 4-23: Einfluss steigender Produktkomplexität auf Kosten und Nutzen des unternehmensübergreifenden Datenaustauschs	149
Tabelle 4-24: Einfluss steigender Kritikalität auf Kosten und Nutzen des unternehmensübergreifenden Datenaustausches.....	150

List of tables

Table 2-1: Hitchcock constant for different work roll materials [4]	17
Table 2-2: Significant influence of rolling parameters on rolling force without strip tension [3].....	21
Table 2-3: Test procedures to determine properties of rolled sheets [3]	21
Table 2-4: Role categories of the IDS	59
Table 3-1: Test matrix for conducting the deep drawing experiments	80
Table 3-2: Test matrix for the simulation study using FE cold rolling model.....	89
Table 3-3: Summary of the inputs and outputs of the FE deep drawing model	91
Table 3-4: Summary of the inputs for DoE	94
Table 3-5: Planned deep drawing experiments for the validation of the data based process control	95
Table 4-1: Presentation of the weighted requirements	105
Table 4-2: Identified IT systems for storing different categories of data	114
Table 4-3: Mechanical properties of the procured commercial heat treated cold strips.....	119
Table 4-4: Deep drawing test matrix for producing cross cup dies fulfilling the requirements	120
Table 4-5: Summary of the results of characterization of heat treated cold strips and deep drawing experiments using standard deep drawing process	120
Table 4-6: Defined bases for testing the work-hypotheses in WP5	122
Table 4-7: Characterization of hot strip using tensile tests	123
Table 4-8: Results off FE simulation study for calibration of fast analytical rolling model	125
Table 4-9: Models for the prediction of the geometry factor as a function of the roll gap ratio and friction	126
Table 4-10: Cold strip properties in roll-hardened state	127
Table 4-11: Vickers hardness and equivalent plastic strain based model for prediction of cold strip properties	127

Table 4-12: Experimentally and simulatively determined deviation in the cross die properties	131
Table 4-13: Pass schedule for cold rolling experiment.....	132
Table 4-14: Yield strength and tensile strength of cold band after cold rolling determined using tensile tests.....	132
Table 4-15: Summary of the deep drawing simulation and experimental results using standard deep drawing process.....	134
Table 4-16: Results of deep drawing simulation and experiments using standard deep drawing process as well as DoE based selected new deep drawing process parameter	136
Table 4-17: Summary of simulation and experimental results for validation test III ..	139
Table 4-18: The influence of increasing market power on the costs and benefits of cross-company data exchange	144
Table 4-19: Einfluss steigender Ressourcenverfügbarkeit auf Kosten und Nutzen des unternehmensübergreifenden Datenaustauschs.....	145
Table 4-20: The influence of increasing transaction quantity on the costs and benefits of cross-company data exchange	146
Table 4-21: The influence of increasing digitalization maturity on the costs and benefits of cross-company data exchange	147
Table 4-22: The influence of simulation expertise on the costs and benefits of cross-company data exchange	148
Table 4-23: The influence of increasing product complexity on the costs and benefits of cross-company data exchange	149
Table 4-24: The influence of increasing criticality on the costs and benefits of cross-company data exchange	150

Abkürzungsverzeichnis und Symbole /

List of Abbreviations and symbols

ASC	Accredited Standards Committee
AMQP	Advanced Message Queuing Protocol
APS	Advanced Planning and Scheduling
ANSI	American National Standards Institute
AHP	Analytic Hierarchy Process
API	Application Programming Interface
R ²	Bestimmtheitsmaß
BDE	Betriebsdatenerfassung
ca.	circa
CAQ	Computer Aided Quality
CEFIC	Conseil Européen des Fédérations de l'Industrie Chimique (Verband der Europäischen chemischen Industrie)
DPÖ	Datengetriebene Plattform Ökosysteme
ε	Dehnung
DoE	Design of Experiment
DIN	Deutsches Institut für Normung
EDI	Electronic Data Interchange
EDIFACT	Electronic Data Interchange for Administration, Commerce and Transport
ERP	Enterprise Resource Planning
et al.	et alii / et aliae; und andere
etc.	et cetera
EDA	Event Driven Architecture
XML	Extensible markup Language
FTP	File transfer protocol
FTPS	File Transfer Protocol Secure
FE	Finite Elemente
FEM	Finite Elemente Methode
°	Grad

°C	Grad Celsius
GUI	Graphical User Interface
HV	Härte nach Vickers
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IIOT	Industrial Internet of Things
IT	Information Technology
IaaS	Infrastructure-as-a-Service
IBM	International Business Machines
IDS	International Data Spaces
IDSA	International Data Spaces Association
ISO	International Organization for Standardization
ITU	International Telecommunication Union
IOP	Internet of Production
JSON	JavaScript Object Notation
KMU	Kleine und Mittelständische Unternehmen
cos	Kosinusfunktion
ln	Logarithmusfunktion
MES	Manufacturing Execution System
MDE	Maschinendatenerfassung
MPa	Megapascal
MQTT	Message Queue Telemetry Transport
m	Meter
m/min	Meter pro Minute
µm	Mikrometer
mm	Millimeter
mm/s	Millimeter pro Sekunde
k _{fm}	Mittlere Fließspannung
N	Newton
N/mm	Newton pro Millimeter
NoSQL	Not only SQL
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture
PaaS	Platform-as-a-Service

PÖ	Plattformökosystem
PLM	Product Lifecycle Management
PA	Projektbegleitende Ausschuss
%	Prozent
A	Querschnitt
REST	Representational State Transfer
RoCaT	Rolling Calculation Tool
SSL	Secure Socket Layer
SMTP	Simple mail transfer protocol
sin	Sinusfunktion
SaaS	Software-as-a-Service
σ	Spannung
$R_{p0,2}$	Streckgrenze
SQL	Structured Query Language
tan	Tangensfunktion
3D	Three-Dimensional
2D	Two-Dimensional
u.a.	unter anderem
VAN	Value-Added Network
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
n	Verfestigungsexponent
r	Walzenradius
YAML	YAML Ain't Markup Language
β	Ziehverhältnis
R_m	Zugfestigkeit

1 Einleitung / Introduction

Kurzfassung

Eine typische Prozesskette umformtechnisch hergestellter Stahlprodukte umfasst mehrere Unternehmen. Dabei stellt jedes Unternehmen Anforderungen an seine Zulieferer bezüglich der Produkteigenschaften in Form von Produktspezifikationen. Die Kontrollen der Eingangs- und Ausgangsprodukte stellen sicher, dass diese Anforderungen eingehalten werden. Diese können jedoch nur stichprobenartig durchgeführt werden. Dadurch sind die genauen Eigenschaften der einzelnen Stahlprodukte einer Charge unbekannt, sodass material- oder prozessbedingte Abweichungen in den Produkteigenschaften nicht erkannt werden. Um trotzdem zuverlässig gute Produkte herstellen zu können, werden Produktspezifikationen und Prozesse restriktiver als notwendig definiert. Zudem kann auf unbekannte Abweichungen nicht reagiert werden, was zu erhöhtem Ausschuss führen kann und somit die Wirtschaftlichkeit der Prozesskette senkt. Ziel dieses Projektes ist, das Potenzial einer modellbasierten Vorhersage der Produkteigenschaften jedes einzelnen Stahlprodukts und einer unternehmensübergreifenden Weitergabe dieser entlang der Prozesskette aufzuzeigen. Die Kenntnis über den genauen Produktzustand soll für eine adaptive Prozessauslegung verwendet werden, welche wiederum zu weniger Ausschuss und damit einer Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Prozesskette führt.

Abstract

A typical process chain for steel products manufactured using forming technology involves multiple companies. Each company places requirements on its suppliers regarding product properties in the form of product specifications. Inspections of incoming and outgoing products ensure that these requirements are met. However, inspections can only be carried out on a random basis. As a result, the exact properties of individual steel products in a batch are unknown, making it difficult to detect material- or process-related deviations in product properties. In order to reliably produce good products despite this uncertainty, product specifications and processes are defined more restrictively than necessary. In addition, unknown deviations cannot be addressed, which can lead to increased scrap and, consequently, reduced cost-effectiveness of the process chain. The goal of this project is to implement a model-based prediction of the properties of each individual steel product and the cross-company transfer of these along the process chain. Knowledge about the exact product condition is intended to be used for adaptive process design, which in turn leads to reduced scrap and improved cost-effectiveness of the process chain.

1.1 Ausgangslage / Current situation

Stahlprodukte durchlaufen in der Regel aus mehreren Unternehmen bestehende Prozessketten vom Erz über Zwischenzustände (Halbzeuge) bis zum Endprodukt. Nach der Urformung und vor der finalen Bearbeitung erfolgt die umformtechnische Einstellung der Geometrie sowie der Produkteigenschaften. Während die Geometrie präzise erreicht werden muss, werden Produkteigenschaften lediglich mit Bereichen angegeben, innerhalb der sie liegen. Diese werden Spezifikationen genannt. Innerhalb einer Prozesskette definiert jedes Unternehmen seine eigenen Spezifikationen an seinen Zulieferer, um sicherzustellen, dass im eigenen Prozess stets Gutteile erzeugt werden können. Die Eigenschaften dieser werden wiederum ebenfalls durch eine Spezifikation angegeben und müssen innerhalb der geforderten Spezifikation des in der Prozesskette nachfolgenden Unternehmens liegen.

Die Produktspezifikationen ergeben sich daher indirekt aus denen des Folgeprozesses, sodass sie letztendlich vom Abnehmer des Endprodukts, in der Regel Großunternehmen wie Automobilhersteller, maßgeblich beeinflusst werden. Die Produktspezifikationen umfassen meistens ein Streuband oder minimale Anforderungen, sodass gewisse Toleranzen ermöglicht werden. Bei der Weitergabe des Stahlbauteils in der Prozesskette werden Materialdaten nur für eine Charge und nicht für jedes einzelne Produkt separat mitgeliefert. Durch Wareneingangs- bzw. Warenausgangskontrollen stellen sowohl die Zulieferer als auch Abnehmer sicher, dass das Stahlprodukt den Spezifikationen entspricht. Diese Kontrollen erfolgen jedoch meistens nur stichprobenartig an einzelnen Halbzeugen, weshalb der genaue Zustand jedes einzelnen Produkts unbekannt ist. [1,2].

1.2 Problemstellung und Motivation / Problem statement and Motivation

Die fehlende Kenntnis der genauen Produkteigenschaften führt zu folgenden Einschränkungen in der Produktion, die in einer geringeren Wirtschaftlichkeit resultieren.

- Es besteht lediglich die Zusicherung des Zulieferers, dass alle Stahlhalbzeuge innerhalb der Produktspezifikationen liegen. Falls die Produkteigenschaften doch nicht den Anforderungen entsprechen, können Probleme in der Stahlbearbeitung (z. B. verlangsamte Bearbeitung, erforderliche Nacharbeit, Materialversagen) zum erhöhten Arbeitsaufwand oder Produktionsstillständen führen.
- Der genaue Zustand jedes einzelnen Halbzeugs der Charge, abgesehen von den stichprobenartig kontrollierten Teilen, ist unbekannt. Daher ist keine gezielte Einstellung der finalen Produkteigenschaften basierend auf den Eingangeigenschaften möglich.

Insgesamt führt dies zu restriktiven Produktspezifikationen, zu breiten Streubändern der eigenen Erzeugnisse und zu einer Prozessauslegung mit wenig Freiheitsgraden. Aus wissenschaftlicher, technischer und wirtschaftlicher Sicht ist daher die

modellbasierte Vorhersage des Produktzustands jedes einzelnen Stahlprodukts von hoher Bedeutung. Sie ermöglicht es, adaptiv auf Schwankungen oder Abweichungen im Eingangsmaterial zu reagieren und das Streuband der Eigenschaften der eigenen Produkte zu verkleinern, sodass die eigene Produktqualität erhöht wird.

Um modellbasierte Vorhersagen zu treffen, benötigen Unternehmen eine umfangreiche und zuverlässige Datengrundlage. Daten können sowohl zum Verständnis von Produktionsprozessen beitragen (z. B. Prozesstransparenz durch Big Data oder Entwicklung intelligenter Entscheidungsmechanismen) als auch als Input für zukünftigen Handlungsbedarf und Vorhersagen dienen. Eine geeignete prozesskettenübergreifende Datengrundlage dafür existiert bereits, ist jedoch nicht für alle Beteiligten zugreifbar, denn die Daten befinden sich in separaten Datenbanken von verschiedenen Unternehmen der Prozesskette. Es bestehen aktuell Technologien und Ansätze, Daten zwischen Unternehmen auszutauschen. Diese werden jedoch nicht ausreichend genutzt. Der Datenaustausch erfolgt aktuell nur in seltenen Fällen. Der Datenaustausch ist dabei unstrukturiert und nicht standardisiert, erfolgt üblicherweise mittels E-Mail und Telefon und die Daten werden im proprietären Excel-Dateiformat übertragen. Neben hoher Fehleranfälligkeit und hohen Sicherheitsrisiken führt dieses Vorgehen zum erhöhten Aufwand für Kommunikation und Datenvorbereitung und -übertragung und ist daher nicht wirtschaftlich skalierbar.

1.3 Zielsetzung / Objective

Das übergeordnete Ziel des Forschungsprojekts ist die Demonstration der modell- und datenbasierten Prozessführung durch eine sichere Übertragung von Produktinformationen entlang der Prozesskette.

Das erste Teilziel besteht darin, eine **Testumgebung für die ausgewählte Modellprozesskette einzurichten**, die aus zwei virtuellen Unternehmen besteht. In der Testumgebung sollen Versuche durchgeführt sowie Daten erfasst und weitergeleitet werden, damit sie für die nachfolgende Prozessauslegung verwendet werden können.

Das zweite Teilziel ist die **Konzeptionierung der Datenplattform** für den Austausch der Produktinformationen sowie die Entwicklung eines Plattformprototyps. Die Grundlage für die Konzeptionierung und Entwicklung sollen konkrete Anforderungen der Unternehmen der Stahlindustrie bilden.

Um die Nutzbarkeit der erzielten Ergebnisse für eine große Breite industrieller Unternehmen sicherzustellen, umfasst das dritte Teilziel eine **Ausarbeitung von Standardisierungsempfehlungen** der Datenaufnahme, -speicherung und -übertragung.

Das vierte Teilziel besteht darin, eine **Datengrundlage zur Überprüfung der Arbeitshypothesen** in der eingerichteten Testumgebung zu schaffen. Dafür soll der Einfluss der Eigenschaftsschwankungen von kommerziellen Kaltbändern gleicher Spezifikationen auf die resultierenden Eigenschaften eines Tiefziehteils bestimmt werden.

Das fünfte Teilziel liegt in der Entwicklung einer simulativen **Abbildung der Modellprozesskette** und der anschließenden **Durchführung der Validierungsversuche der Arbeitshypothesen**. Dabei soll vor allem das Design of Experiments (DoE) genutzt werden, um Prozesse adaptiv als Reaktion auf die Eingangseigenschaften des Materials auszulegen. Um diese stets zu kennen, soll zunächst ein Ansatz zur modellbasierten Vorhersage der Eigenschaften in die Simulationsmodelle implementiert werden.

Das sechste und letzte Teilziel ist die Bewertung des **Mehrwerts der datenbasierten Prozessführung** durch die Analyse der experimentellen und simulativen Ergebnisse sowie der Betrachtung des wirtschaftlichen Mehrwerts des Datenaustausches.

2 Stand der Technik / State of the art

Kurzfassung

Im Stand der Technik sind zahlreiche Möglichkeiten zur Modellierung von Umformprozessen und zur Berechnung von Produkteigenschaften sowie Basistechnologien zur Entwicklung übergeordneter Datenplattformen etabliert. Grundsätzlich können zwei Hauptansätze für die Prozessmodellierung unterschieden werden: Es können analytische Modellierungsmethoden oder aber numerische Methoden wie Finite-Elemente-Methoden verwendet werden. Außerdem bietet der Stand der Technik mehrere Ansätze für das Design of Experiment (DoE) zur Realisierung einer adaptiven Prozessführung. Es werden diverse Technologien und Ansätze für die Datenübertragung detailliert vorgestellt, um die Vor- und Nachteile zu veranschaulichen. Die für das Forschungsvorhaben relevanten Grundlagen werden in diesem Kapitel zusammengefasst.

Abstract

The state of the art provides numerous possibilities for modeling forming processes and calculating product properties as well as the basic technologies for developing the data platform. Basically, two main approaches for process modeling can be distinguished: On the one hand, analytical modeling methods and, on the other hand, numerical methods such as finite element methods can be used. In addition, the state of the art offers several approaches for Design of Experiment (DoE) in order to allow for adaptive process design. Various technologies and approaches for data transfer are presented in detail to illustrate the advantages and disadvantages. The foundations are summarized in this chapter.

2.1 Grundlagen der Finite-Elemente-Methode (FEM) / Basics of finite element method (FEM)

Die Finite-Elemente-Methode (FEM) ist eine numerische Technik zur Lösung von Problemen, die durch partielle Differentialgleichungen beschrieben werden oder eine funktionale Minimierung beinhalten. Vor allem statische Problemstellungen können sehr genau mit partiellen Differentialgleichungen modelliert werden, jedoch nicht mit analytischen Ansätzen gelöst werden. Stattdessen können Näherungslösungen dieser Gleichungen mithilfe von Diskretisierungsmethoden erzielt werden, welche dann wiederum mit numerischen Methoden gelöst werden können. Die Technik wurde erstmals für die Analyse komplexer Modelle in den Bereichen Maschinenbau, Bauwesen und Luft- und Raumfahrttechnik entwickelt. Die FEM kann heute für die

Strukturmechanik verschiedener mechanischer Teile unter unterschiedlichen Belastungsbedingungen, für den Wärmetransport und in der Elektrotechnik zur Modellierung der Maxwell'schen Gleichungen verwendet werden. In der Umformtechnik ermöglicht die FEM die Berechnung von Stofffluss, Spannungsverteilungen, Formänderungsverteilungen, Temperaturverteilungen oder Gefügeeigenschaften [3–5].

Nachfolgend sind die wichtigsten Faktoren aufgeführt, die in der FEM benötigt werden:

Partielle Differentialgleichungen: Die Beschreibung der Natur und ihrer physikalischen Gesetze für raum- und zeitabhängige Probleme wird in der Regel mithilfe von partiellen Differentialgleichungen realisiert. Die partiellen Differentialgleichungen sind dabei Gleichungen zur Beschreibung ein oder mehrerer unbekannter, unabhängiger Variablen. Um die geeignetste Methode zur Lösung der partiellen Gleichungen zu bestimmen, muss der Typ der Gleichung bekannt sein. Darüber hinaus sind mit partiellen Differentialgleichungen verbundene Randbedingungen aus realen Problemstellungen zu berücksichtigen, um eine genaue Lösung zu gewährleisten. Typische Beispiele für solche partiellen Differentialgleichungen sind: Navier-Stokes-Gleichung, Schrödingers Gleichung, Wärmeleitungsgleichung, Maxwell'sche Gleichungen, Wellengleichung.

Anfangsbedingungen und Randbedingungen: Ein Randwertproblem ist eine Differentialgleichung, die in einem Bereich gelöst werden muss, auf den Randbedingungen angewendet werden sollen. Im Gegensatz zu Anfangswertproblemen, bei denen nur der Startpunkt angegeben ist, schränkt das Randwertproblem die Werte ein, die für die Knoten an den Grenzen erhalten werden können. Randwertprobleme bilden die Mehrheit der Modelle, die verwendet werden, um Probleme von der Festigkeitslehre bis zur Wärmeübertragung zu modellieren. Randbedingungen für kontinuierliche Systeme können wie folgt unterteilt werden:

- I. Dirichlet Randbedingung: Die Dirichlet-Randbedingung, auch als "Essential oder Fixed Randbedingung" bezeichnet, ist eine Art von Randbedingung, die nach Peter Gustav Lejeune Dirichlet benannt ist, wobei der Wert, den die unbekannte Variable entlang des Domänengrenze annehmen muss, direkt angegeben wird [6].
- II. Neumann Randbedingung: Die Neumann-Randbedingung ist eine Art von Randbedingung, die nach Carl Neumann benannt ist. Sie wird mittels einer Differentialgleichung (PDE/ODE) aufgestellt, bei der die Werte, welche die Ableitung einer Lösung an der Domänengrenze annehmen muss, festgelegt sind. Die Neumann-Randbedingung wird auch als "Natural Randbedingung" bezeichnet, weil sie bei der Entwicklung der schwachen Formulierung in jedem Finite-Elemente-Ansatz auftritt [6].
- III. Robin Randbedingung: Die Robin-Randbedingung ist eine Art von Randbedingung, die nach Victor Gustave Robin benannt ist. Sie besteht aus einer linearen Kombination der Werte des Felds und dessen Ableitungen an der Domänengrenze [7].
- IV. Gemischte Randbedingungen: Die gemischte Randbedingung besteht aus der Anwendung verschiedener Arten von Randbedingungen in verschiedenen Bereichen der Domain. Die gemischte Randbedingung unterscheidet sich von der Robin-Randbedingung, weil letztere aus verschiedenen Arten von

Randbedingungen besteht, die auf denselben Bereich der Domänengrenze angewendet werden, während die gemischte Bedingung verschiedene Arten von Randbedingungen enthält, die auf verschiedene Teile der Domänengrenze angewendet werden.

- V. Cauchy Randbedingung: Die Cauchy-Randbedingung ist eine Bedingung sowohl für das unbekannte Feld als auch für seine Ableitungen. Sie unterscheidet sich von der Robin-Randbedingung, da die Cauchy-Randbedingung die Anwendung von zwei Nebenbedingungen (1 Dirichlet-Randbedingung + 1 Neumann-Randbedingung) erfordert [8].

FEM Solver: FEM Solver können in zwei Typen unterteilt werden: Direkte und iterative Solver. Die Aufgabe der FEM ist die Matrixgleichungen der Form (Gleichung 2-1) zu lösen,

$$[K]\{u\} = \{f\} \quad (2-1)$$

wobei $[K]$ die Steifigkeitsmatrix, $\{f\}$ die Kraftmatrix und $\{u\}$ die unbekannte Variable Matrix wie z.B. Verschiebung, Temperatur, Geschwindigkeit, usw. ist. Direkte Solver verwenden die Inverse der Matrix $[K]$, um sie mit $\{f\}$ zu multiplizieren und die unbekannte Matrix $\{u\}$ zu lösen. Da diese Methode die Inversion der Matrix beinhaltet, wird sie für rechentechnisch weniger aufwändige Probleme bevorzugt. Wenn die $[K]$ -Matrix groß wird, wird die Berechnung der Inversen von $[K]$ rechentechnisch aufwändig. Aus der Literatur lässt sich ableiten, dass direkte Solver nicht mehr wettbewerbsfähig sind, wenn die unbekannte Matrix 100.000 Elemente überschreitet. Wenn das Finden der Inversen oder die Zerlegung der Matrix in Teil-Matrizen rechentechnisch zu aufwändig wird, werden iterative Methoden zur Lösung des Gleichungssystems bevorzugt. Der Algorithmus beginnt mit der anfänglichen Schätzung (einschließlich Anfangsbedingungen und Randbedingungen) und schreitet dann iterativ zur endgültigen Lösung voran. Der Solver iteriert, bis ein Toleranzwert (vom Benutzer festgelegt) erreicht ist. Die Suchrichtung, d.h. die Richtung, in die sich die Lösung bewegt, wird mithilfe eines konjugierten Gradientenansatzes überprüft. Daher werden für rechentechnisch aufwändige Probleme iterative Solver bevorzugt, da sie effizient parallelisiert werden können. Iterative Methoden erfordern jedoch eine sorgfältige Konditionierung der Matrix, da andernfalls oszillierendes Verhalten beobachtet werden oder die Lösung divergieren kann.

FE Netz: Ein Netz in der FEM besteht aus Elementen, die durch Knotenpunkte verbunden sind. Diese Elemente teilen die gesamte Geometrie in kleinere Bereiche auf, an den die Problemstellung durch den Solver partiell gelöst wird und anschließend zur Gesamtlösung zusammengeführt wird. Dieses Vorgehen wird als räumliche Diskretisierung bezeichnet. Dies erfordert eine genaue Darstellung der Geometrie und die Erzeugung eines numerischen Netzes, das die Struktur repräsentiert. Die Elemente können als 1D-, 2D- und 3D-Elemente klassifiziert werden. Die geometrische Form des Elements, die Form des Interpolationsansatzes und das die physikalischen Zusammenhänge beschreibende Funktional sind wesentliche Kennzeichen der verschiedenen Typen von finiten Elementen. Wie in Abbildung 2-1: Typische Elementtypen der Finite-Elemente-Methode [4] dargestellt kommen die geometrischen Formen kommen z. B. Stäbe, Schalen, Dreiecke, Vierecke, Tetraeder, Hexaeder usw. in Betracht. Die Elemente und Knoten können entweder an den Werkstoff gebunden

(Lagrange Formulierung) oder ortsfest (Euler-Formulierung) sein. Die Euler Formulierung ist für stationäre Prozesse gut geeignet, während die Lagrange Formulierung besonders für instationäre Prozesse geeignet ist [4].

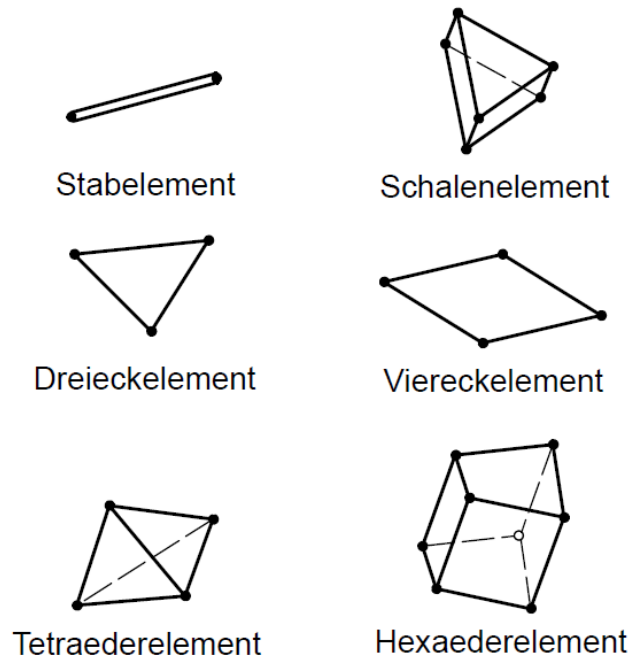


Abbildung 2-1: Typische Elementtypen der Finite-Elemente-Methode [4]

Figure 2-1: Element types in finite element method [4]

Simulationsansatz: Die FEM verwendet zwei Typen von Simulationsansätzen, den expliziten und den impliziten Ansatz. Die Auswahl des geeigneten Simulationsansatzes hängt maßgeblich von der spezifischen Problemdefinition ab [4].

Im impliziten Simulationsansatz wird der zu simulierende Prozess zunächst in einzelne Zeitschritte unterteilt und die zugrundeliegenden Materialgleichungen dann so gelöst, dass sich das Werkstück am Ende eines jeden Zeitschrittes im statischen Gleichgewichtszustand befindet. Dieses Gleichgewicht kann bei den in der Umformtechnik behandelten Problemen, bedingt durch die vielen auftretenden Nichtlinearitäten, nur auf iterativem Weg ermittelt werden. Jeder Iterationsschritt erfordert dabei den Aufbau und die Zerlegung einer sogenannten globalen Steifigkeitsmatrix, in der alle Materialeigenschaften und Prozessrandbedingungen zusammengefasst sind [4].

Explizite Simulationsansätze berechnen innerhalb eines Zeitschrittes keinen Gleichgewichtszustand, sondern betrachten den Umformvorgang als ein dynamisches Problem. Dabei wird die Zielgröße am Ende eines Zeitschrittes durch ein zentrales Differenzen-Schema gewonnen, welches die inkrementellen Verschiebungen, ausgehend von den vorangegangenen Werten, explizit ermittelt. Der enorme Vorteil des expliziten Verfahrens liegt in der wesentlich geringeren Rechenzeit für ein Prozesszeitinkrement und der damit möglichen feineren räumlichen Diskretisierung der Prozesse [4].

2.1.1 Verfahrensschritte der Finite-Elemente-Methode / Steps in finite element method

Die Schritte in der FEM können je nach Anwendung variieren, aber im Allgemeinen umfassen sie die folgenden Phasen [5]:

Geometriemodellierung und Vernetzung: Dieser Schritt beinhaltet die Erstellung eines präzisen geometrischen Modells des zu analysierenden Systems und die Unterteilung dieses Modells in endliche Elemente. Diese Elemente sind miteinander durch Knotenpunkte verbunden und bilden ein numerisches Gitter, das die Struktur repräsentiert.

Aufstellen der Differentialgleichungen: Die Differentialgleichungen, die das Verhalten des Systems beschreiben (z.B. die Navier-Stokes-Gleichungen für Strömungssimulationen oder die elastischen Gleichungen für Festigkeitsanalysen), werden formuliert. Diese Gleichungen basieren auf den physikalischen Gesetzen, die das System beschreiben.

Diskretisierung: Umwandlung der kontinuierlichen physikalischen Differentialgleichungen in diskrete Gleichungen durch die Aufteilung der Struktur in endliche Elemente und die Anwendung von Basisfunktionen zur Interpolation der Lösungen in den Knotenpunkten dieser Elemente. Dies führt zu einem System von algebraischen Gleichungen. Neben der räumlichen Diskretisierung findet zusätzlich eine zeitliche Diskretisierung statt, durch die das Problem in einzelne Zeitinkremente unterteilt wird, in denen jeweils ein aktueller Zustand als Lösung berechnet wird.

Aufstellen der Steifigkeitsmatrix und Lastvektoren: Für jedes endliche Element werden Steifigkeitsmatrizen erstellt, die das Verhalten des Elements beschreiben. Diese Matrizen werden dann kombiniert, um die Gesamtsteifigkeitsmatrix des Systems zu erstellen. Gleichzeitig werden Lastvektoren erstellt, welche die auf das System wirkenden Kräfte repräsentieren.

Anwenden von Randbedingungen: Randbedingungen werden definiert, um die Bewegungsfreiheit bestimmter Knoten einzuschränken oder Kräfte auf sie anzuwenden. Dies spiegelt die tatsächlichen physikalischen Bedingungen des Problems wider.

Lösen des Gleichungssystems: Das System von algebraischen Gleichungen wird gelöst, um die unbekannten Verschiebungen oder andere Ergebnisgrößen in den Knoten des Gitters zu berechnen. Hierbei kommen verschiedene numerische Lösungstechniken wie iterative oder direkte Solver zum Einsatz.

Post-Processing: Nachdem die Lösungen erhalten wurden, können verschiedene postprozessuale Schritte durchgeführt werden, um wichtige Größen wie Spannungen, Verformungen oder Temperaturverteilungen zu analysieren und zu visualisieren.

2.1.2 Anwendungen der Finite-Elemente-Methode in der Umformtechnik / Applications of FEM in metal forming

In den letzten Jahren wird die FEM in der Umformtechnik weit verbreitet verwendet, um die Umformprozesse zu modellieren und damit unterschiedliche Untersuchungen durchzuführen. In einer Studie von Padmanabhan et al. [9] wurde der Einfluss von

Prozessparametern auf das Tiefziehen von rostfreiem Stahl mithilfe von FEM-basierten Simulationen untersucht. In einer anderen Studie konzentrierten sich Takalkar et al. [10] auf den Einfluss von Ausdünnung, Faltenbildung und Rückfederung auf das Ziehteil. Nassir et al. [11] haben sowohl isothermische als auch gekoppelte thermomechanische 3D-Rigid-Plastic-Finite-Elemente-Modelle des Warmringwalzens entwickelt, um ihre Unterschiede bei der genauen und schnellen Vorhersage des Prozesses zu untersuchen. Behrens et al. [12] verwendete die FEM zur Untersuchung des Werkzeugverschleißes während des Schmiedens aufgrund thermomechanischer Materialermüdung. In einer Studie von Bambach et al. [13] wurde eine neue Methodik implementiert, um die Übereinstimmung von FE-Berechnungen mit Experimenten in der inkrementellen Blechumformung quantitativ zu bewerten. Dazu wurden präzise Messungen verwendet, die aus einem optischen Deformationsmesssystem gewonnen wurden. Seuren et al. [14] verwendete die FEM zur Kalibrierung eines schnellen analytischen Walzmodells durch eine inverse Berechnung des Geometrie-Faktors aus FE Walzsimulationen. In der Studie von Kopp et al. [15] wurde die FEM verwendet, um die Mikrostruktur des Walzguts während des Warmwalzprozesses mit verbesserter Genauigkeit vorherzusagen, indem eine lokale FE-Netzverfeinerung und ein Modell für mikrostrukturelle Vorhersagen implementiert wurden.

2.2 Grundlagen des Walzens / Basics of rolling

Die Dominanz von Metallkomponenten in den heutigen technologischen Anwendungen beruht nicht nur auf ihren hervorragenden mechanischen Eigenschaften, sondern auch auf ihrer Fähigkeit, sich in fast jede gewünschte Form leicht umformen zu lassen. Im Laufe der vielen Jahrhunderte des menschlichen Fortschritts wurden zahlreiche Umformverfahren wie Schmieden, Walzen, Tiefziehen usw. entwickelt, um Metalle in ihre gewünschten Formen zu bringen. Mit fortschreitender Zeit und steigender Nachfrage nach Präzisionskomponenten hat die Komplexität der Umformprozesse zugenommen. Im Jahr 2022 wurden laut dem Europäischen Stahlverband 55 % des in Europa produzierten Stahls in Flachprodukte umgewandelt. Über 90 % der Flachprodukte werden durch Walzen hergestellt [16].

Walzen oder Längswalzen ist ein Umformverfahren mit dem Ziel, die Querschnittsfläche eines Walzguts zu reduzieren, seine Länge zu vergrößern und die gewünschten Eigenschaften des Werkstoffs (Zähigkeit, Festigkeit, Oberflächenstruktur) einzustellen [4]. Die plastische Verformung des Werkstücks wird erreicht, indem es zwischen zwei gegenläufig rotierenden Walzen hindurchgeführt wird. Eine schematische Darstellung des Walzprozesses ist in Abbildung 2-2: Flach-Längswalzen des Walzguts mittels oberer und unterer Arbeitswalzen [4] zu sehen.

In der Industrie wird das Kaltwalzen größtenteils in sogenannten Kaltwalz-Tandemstraßen durchgeführt, in denen der Stahlwerkstoff nacheinander mehrere Walzstiche durchläuft, wobei jeder Stich eine geringfügige Reduktion der Dicke im Vergleich zum vorherigen Stich bewirkt. Mit abnehmender Dicke des Werkstücks steigt die Auslaufgeschwindigkeit. Das bedeutet, dass das Werkstück am Ende jedes Walzgerüsts höhere Geschwindigkeiten aufweist und die Walzengeschwindigkeiten entsprechend der Dickenreduktion des vorherigen Stiches geregelt werden müssen. Am Ende der Walzstraße wird das aus dem letzten Walzgerüst kommende Werkstück mithilfe eines Haspels aufgewickelt [3]. Eine schematische Darstellung eines Tandem-Walzwerks ist in Abbildung 2-4: Schematische Darstellung einer Kaltwalz-Tandemstraße [3] zu sehen.

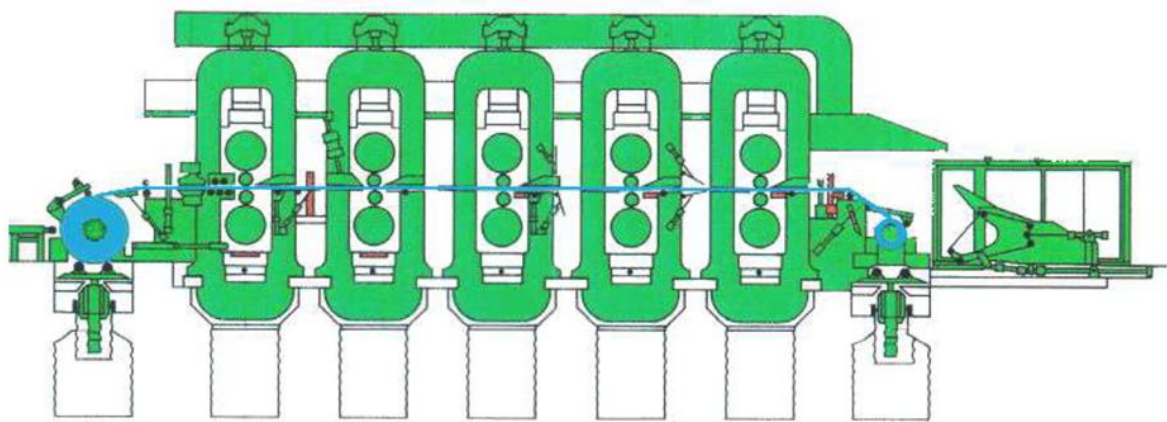


Abbildung 2-4: Schematische Darstellung einer Kaltwalz-Tandemstraße [3]

Figure 2-4: Depiction of a cold rolling mill [3]

Die Walzen, die direkt mit dem Werkstück in Kontakt stehen, werden als Arbeitswalzen bezeichnet. Obwohl diese aus speziell gehärtetem Stahl hergestellt sind, verformen sie sich im Laufe der Zeit aufgrund der hohen Walzkräfte oft elastisch und nutzen sich ab. Dies kann häufig zu Defekten im gewalzten Produkt oder Störungen im Walzprozess führen. Um dies zu vermeiden, wurden verschiedene Walzgerüstarten wie z.B. Duo, Quarto, Sexto, oder das 20-Rollen-Gerüst nach Sendzimir entwickelt. Beispielhafte Walzgerüste, bestehend aus Arbeits- und Stützwalzen, sind in Abbildung 2-5: Typen von Walzgerüsten, bestehend aus Arbeits- und Stützwalzen [3] gezeigt. Durch die Verwendung der unterschiedlichen Walzgerüste ist es möglich, eine größere Dickenreduktion in weniger Stichen zu erzielen und zusätzlich sehr dünne Bleche mit bis zu 0,1 mm Dicke mit geringerem Energieverbrauch herzustellen [3].

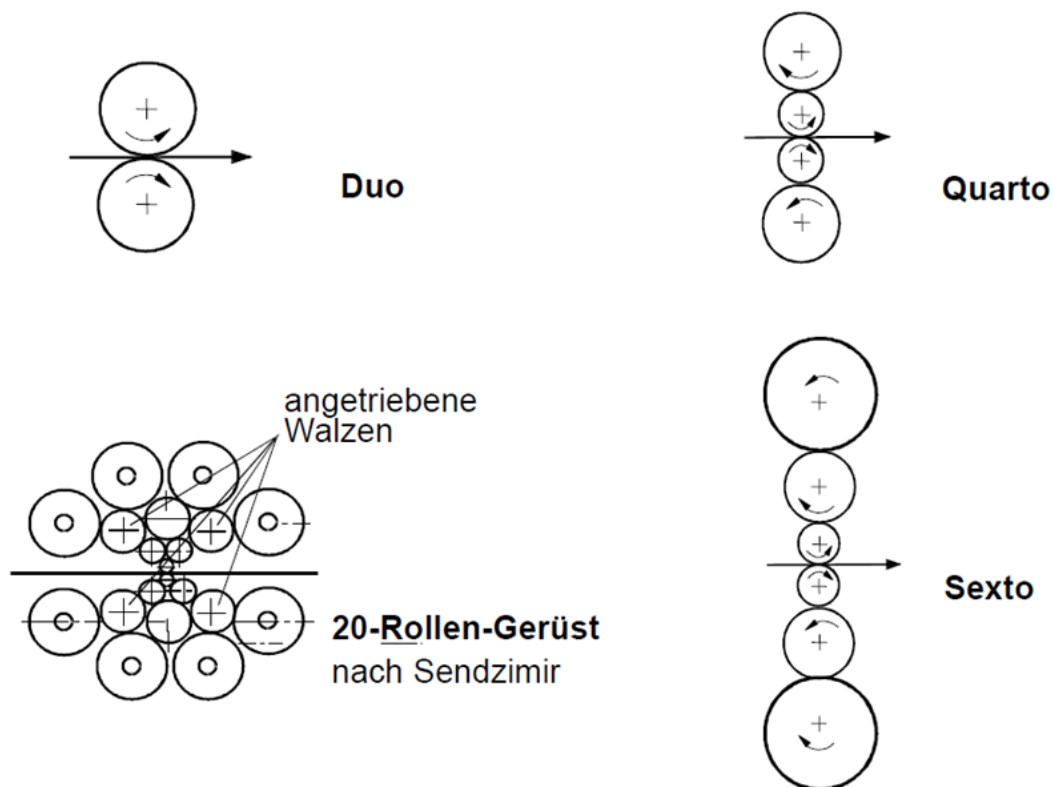


Abbildung 2-5: Typen von Walzgerüsten, bestehend aus Arbeits- und Stützwalzen [3]

Figure 2-5: Types of rolling mill stands consisting of work and support rolls [3]

2.2.1 Flach-Längswalzen (Elementare Theorie des Walzens) / Flat longitudinal rolling (Elementary theory of rolling)

Wie in Abbildung 2-2: Flach-Längswalzen des Walzguts mittels oberer und unterer Arbeitswalzen [4] dargestellt besteht ein Flach-Längswalzprozess aus einer oberen und einer unteren Arbeitswalze, die sich in entgegengesetzte Richtungen drehen. Der Bereich zwischen den beiden Arbeitswalzen wird als Walzspalt bezeichnet. Das Walzgut wird zwischen den Arbeitswalzen hindurchgeführt, um eine Dickenreduktion zu erzielen. Die Walzgeschwindigkeit, mit der das Walzgut in den Walzspalt eintritt, wird als Einlaufgeschwindigkeit (v_0) bezeichnet und ist langsamer als die Austrittsgeschwindigkeit (v_1), mit der das Walzgut den Walzspalt verlässt [4].

Die weiteren wichtigen Größen sind:

A_0 : Einlaufquerschnitt

A_1 : Auslaufquerschnitt

h_0 : Banddicke am Einlauf

h_1 : Banddicke am Auslauf

b_0 : Bandbreite am Einlauf

b_1 : Bandbreite am Auslauf

Z_0 : Längszug am Einlauf

Z_1 : Längszug am Auslauf

A_d : gedrückte Fläche = Projektion der Kontaktfläche zwischen Walze und Walzgut auf die horizontalen Ebene

Während des Walzprozesses fließt das Material hauptsächlich in Längsrichtung, aber auch in Querrichtung. Wenn die Breite des Walzguts größer ist als etwa das Zehnfache der Dicke ($b/h > 10$), kann der Walzprozess als breitungsfrei angenommen werden und somit von ebener Formänderung ausgegangen werden. Abbildung 2-6: geometrische

Verhältnisse beim Flach-Längswalzen [4] zeigt die geometrischen Verhältnisse beim Flach-Längswalzen und beschreibt die wichtigsten Einflussgrößen [4]:

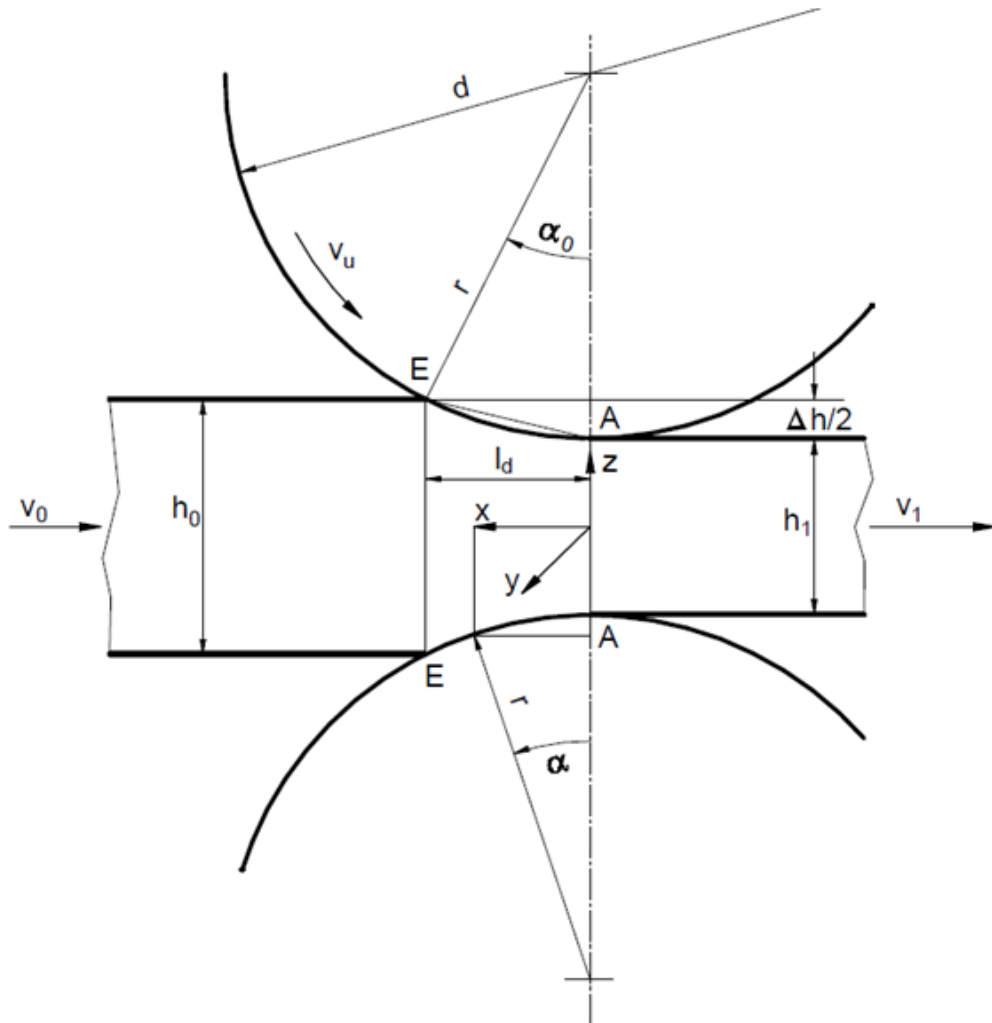


Abbildung 2-6: geometrische Verhältnisse beim Flach-Längswalzen [4]

Figure 2-6: Geometrical relationships in flat longitudinal rolling [4]

Walzspalteinlauf	EE
Walzspaltauslauf	AA
Dickenabnahme	$\Delta h = h_0 - h_1$
Mittlere Walzgutdicke	$h_m = 0,5 (h_0 - h_1)$
Gedrückte Länge	$l_d = \sqrt{r \cdot \Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}} \approx \sqrt{r \cdot \Delta h}$
Gedrückte Fläche	$A_d = b \cdot l_d \approx b \cdot \sqrt{r \cdot \Delta h}$
Walzspaltverhältnis	$\frac{l_d}{h_m}$
Walzwinkel	α_0
Reibungskoeffizient	μ

Halber Arbeitswalzendurchmesser	r
Mittlere Längszugspannung	σ_{la}
Mittlere Fließspannung	k_{fm}
Durchziehbedingung	$\mu \geq \sqrt{\frac{\Delta h}{r}}$
Greifbedingung	$\mu \geq \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{\Delta h}{r}}$
Umformwiderstand (Nach Siebel)	$k_w = (1.15) \cdot k_{fm} \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \mu \cdot \frac{l_d}{h_m}\right) - \sigma_{la}$ (Faktor 1,15 wird nur bei ebener Formänderung verwendet)
Walzkraft	$F = k_w \cdot b \cdot \sqrt{r \cdot \Delta h}$
Walzmoment	$M = F \cdot a + \frac{1}{2} \cdot (Z_0 - Z_1) \cdot r$
Hebelarmbeiwert	$m = \frac{a}{l_d}$

Das Walzspaltverhältnis ist eine wichtige Kennzahl zur Beschreibung der Walzspaltgeometrie. Viele technologische Zielgrößen sind abhängig vom Walzspaltverhältnis. Das Erfüllen der Greifbedingung sowie der Durchziehbedingung ist wichtig, damit das Material in den Walzspalt eingezogen wird und sich nicht vor diesem verkantet. Bei konstanten Reibbedingungen ist die Durchziehbedingung stets erfüllt, wenn die Greifbedingung erfüllt ist [4]. Für die zuverlässige Berechnung der Walzkraft und des Walzmoments ist es wichtig, die Walzenabplattung zu berücksichtigen. Aufgrund des vom Walzgut auf die Walzen ausgeübten Reaktionsdruckes deformieren sich die Walzen elastisch.

Wie in Abbildung 2-7: Walzenabplattung aufgrund der elastischen Verformung der Arbeitswalzen [4] dargestellt ändert sich die Kontur der Walzen im Kontaktbereich von der ursprünglichen, kreisförmigen Form zu einer Ellipse mit vergrößertem und nicht mehr konstantem Krümmungsradius. HITCHCOCK hat auf Grundlage der HERTZschen Gleichungen gezeigt, dass die sich im Kontaktbereich bildende Walzenkontur einen konstanten Krümmungsradius $r' > r$ aufweist, sofern man eine elliptische Druckspannungsverteilung im Walzspalt annimmt [4].

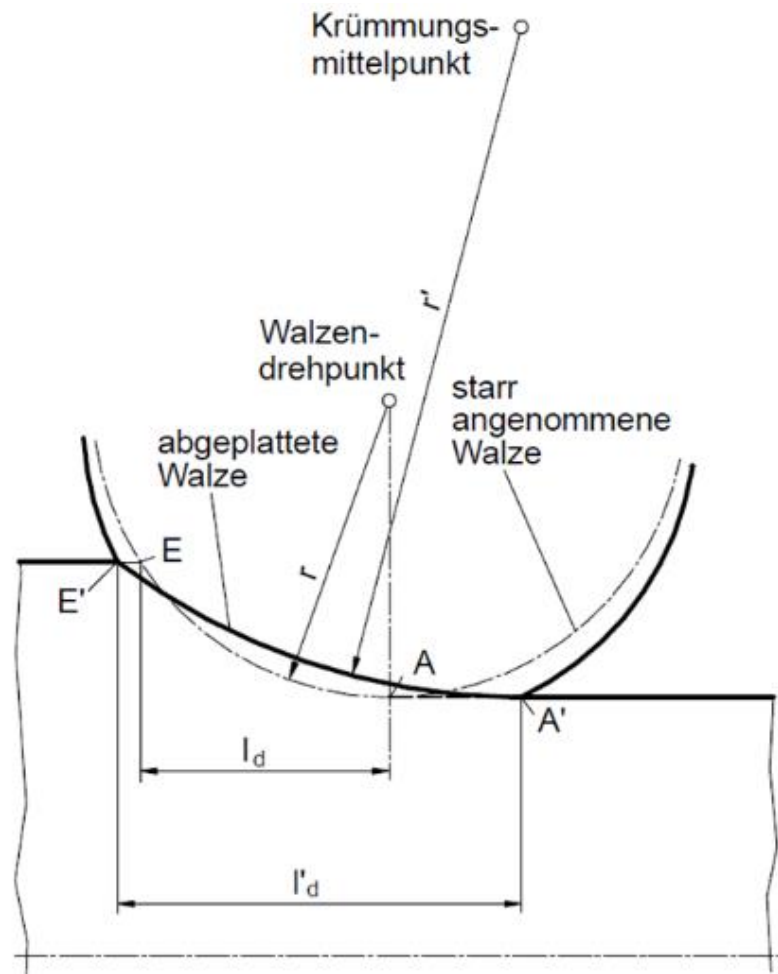


Abbildung 2-7: Walzenabplattung aufgrund der elastischen Verformung der Arbeitswalzen [4]

Figure 2-7: Roll flattening due to elastic deformation of work rolls [4]

Diese Annahme wurde durch den Vergleich mit gemessenen Druckverteilungen als bestätigt erwiesen. Der sich einstellende Krümmungsradius wird nach HITCHCOCK wie folgt berechnet [4]:

$$r' = r \cdot \left(1 + C_H \cdot \frac{F}{b \cdot \Delta h} \right) \quad (2-2)$$

$$l_d' = \sqrt{r' \cdot \Delta h} \quad (2-3)$$

Wobei C_H die Hitchcock Konstante darstellt, welche wiederum vom Walzenwerkstoff abhängig ist:

$$C_H = \frac{16}{\pi} \cdot \frac{1 - \nu^2}{E} \quad (2-4)$$

mit ν : Poisson Zahl
 E : E-Modul

Tabelle 2-1: Hitchcock Konstante für unterschiedliche Walzenwerkstoffe [4]

Table 2-1: Hitchcock constant for different work roll materials [4]

Walzenwerkstoff	$E [N/mm^2]$	ν	$C_H [mm^2/N]$
Stahl-Legierungen	$2,1 \cdot 10^5$	0,3	$22 \cdot 10^{-6}$
Hartguss	$1,6 \cdot 10^5$	0,27	$30 \cdot 10^{-6}$
Grauguss	$1,3 \cdot 10^5$	0,26	$36 \cdot 10^{-6}$

Die Berechnung der Walzenabplattung nach Hitchcock ist ein iteratives Verfahren, wie in Abbildung 2-8: Durchführung der Hitchcock Iteration zur Berechnung des neuen lokalen Krümmungsradius durch Walzenabplattung [3] dargestellt. Die Iteration beginnt mit der Berechnung der gedrückten Länge (l_d) und der Walzkraft (F) unter Verwendung des unverformten Walzenradius (r). Als nächstes wird der Krümmungsradius (r') unter Verwendung der zuvor berechneten Wirkkraft (F) mithilfe der von Hitchcock vorgestellten Gleichung berechnet. Falls die Differenz zwischen dem unverformten Walzenradius (r) und dem neu berechneten Krümmungsradius (r') kleiner als die festgelegte Toleranz ist, wird die Iterationsschleife gestoppt und der in der letzten Iteration berechnete Krümmungsradius zur Berechnung der Walzkraft verwendet. Wenn die Differenz zwischen dem unverformten Walzenradius (r) und dem neu berechneten Krümmungsradius (r') größer als die definierte Toleranz ist, werden weitere Iterationen durchgeführt, bis sich der Krümmungsradius nicht mehr ändert [3].

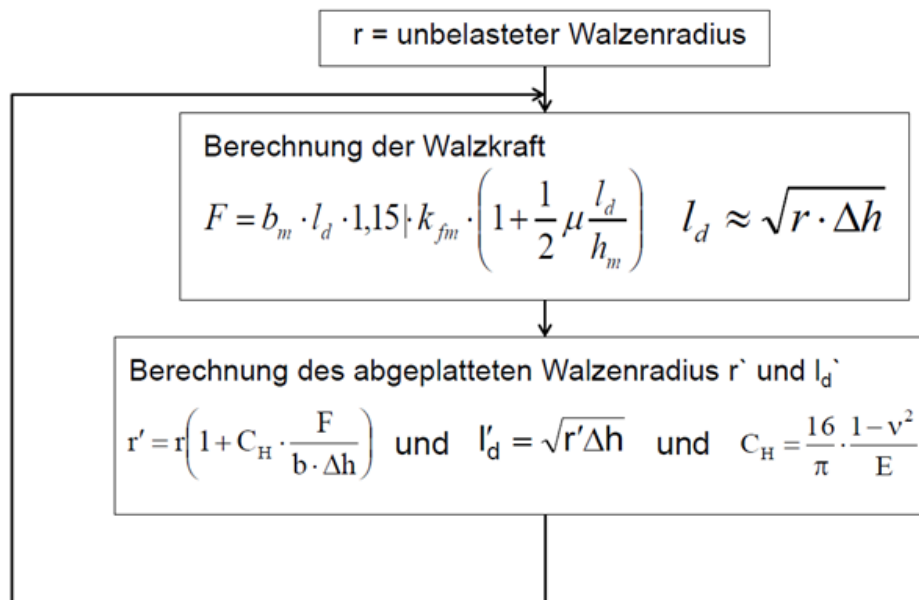


Abbildung 2-8: Durchführung der Hitchcock Iteration zur Berechnung des neuen lokalen Krümmungsradius durch Walzenabplattung [3]

Figure 2-8: Hitchcock iterations for calculation of flattened work roll radius [3]

Die Betrachtung des Kräftegleichgewichts des elementaren Slabs führt zur grundlegenden Differentialgleichung erster Ordnung (Gleichung 2-5), die eine der ersten physikalischen Modellierungsansätze des Walzprozesses darstellt [14].

$$\sigma_N \cdot (\tan \alpha \pm \mu) \cdot dx - \frac{1}{2} \cdot d(\sigma_h \cdot h) \quad (2-5)$$

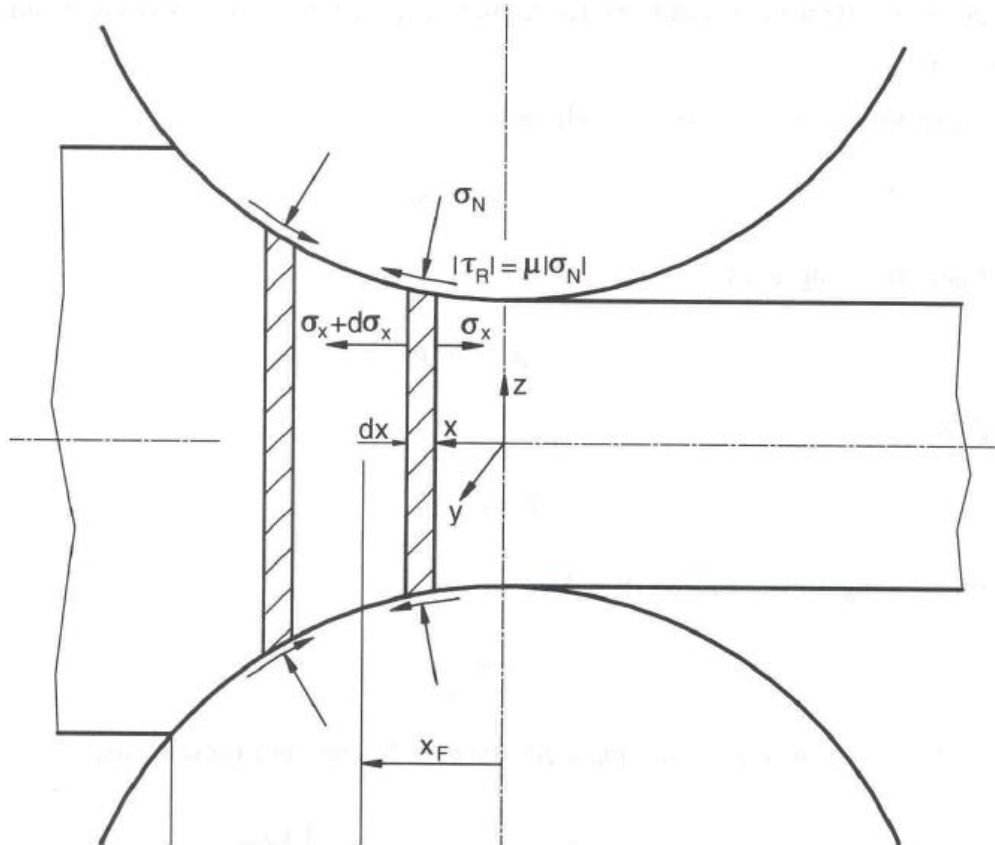


Abbildung 2-9: Spannungsverteilung im Walzspalt auf einem vertikalen Element [11]

Figure 2-9: Stress distribution in the roll gap on a vertical element [11]

In den 1920er Jahren führte SIEBEL mehrere Untersuchungen durch, bei denen er die Walzkraft F gemäß Gleichung 2-6 betrachtete. Diese Formel stammt aus einer speziellen Lösung von Gleichung 2-5 und zeichnet sich durch ihre Einfachheit aus, weshalb sie sich gut für die Berechnung von Stichplan eignet [18,14].

$$F = l_d \cdot b \cdot k_{fm} \cdot Q_p \quad (2-6)$$

Hierbei beschreiben l_d und b die Kontaktfläche zwischen Walzgut und Walze, k_{fm} quantifiziert die mittlere Fließspannung des Walzguts und der Geometriefaktor Q_p (Gleichung 2-7 [14]) berücksichtigt zusätzliche Kraftverluste durch Reibung und Scherung als Funktion des Walzspaltverhältnisses.

$$Q_p = 1 + \frac{1}{2} \cdot \mu \cdot \frac{l_d}{h_m} \quad (2-7)$$

Die Walzmomente werden mithilfe der Formel nach SIMS berechnet, die Kraft und Moment unter Verwendung eines virtuellen Hebelarms vom Zentrum der Arbeitswalze bis etwa zur Hälfte der Länge des Walzspalts verknüpft [19].

$$M = F \cdot l_d \cdot m \quad (2-8)$$

Ungenauigkeiten dieser Methode werden durch die Verwendung des Anpassungsfaktors m, auch Hebelarmbeiwert genannt, ausgeglichen [19].

Die Fließspannung im Walzspalt ergibt sich im vorliegenden Modell nachfolgendem Ansatz [18]:

$$k_f = A \cdot \dot{\varphi}^{A_1+A_2 \cdot \vartheta} \cdot e^{A_3 \cdot \vartheta} \cdot \varphi_{akk}^{A_4} \cdot e^{A_5 + \varphi_{akk}} \quad (2-9)$$

Die Parameter A₁-A₅ werden anhand von isothermen Stauchversuchen experimentell ermittelt. Der thermische Haushalt der Walzgut wird dabei durch den Fourier'sche Gesetz beschrieben [18]

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} \right) + \dot{Q} \quad (2-10)$$

Die Wärmeleitungsgleichung wird in Richtung der Walztafeldicke y aufgestellt und mittels finiten Differenzen Methoden nach dem impliziten Eulerverfahren gelöst. Die Dissipationswärme wird mittels eines Quellterms berücksichtigt. An den Oberflächen beschreiben die Randbedingungen den Wärmeübergang durch Strahlung und Konvektion. Weitere relevante Prozessgrößen sind der Umformgrad und die Umformgeschwindigkeit [18].

$$\varphi_v = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{h_0}{h_1} \quad (2-11)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{v_{roll}}{l_d} \cdot \varphi \quad (2-12)$$

Dabei sind h₀ und h₁ ein und auslaufdicke des Walzguts. v_{roll} ist die Umfangsgeschwindigkeit der Walze und l_d die Walzspaltlänge. Um die Verfestigung und Entfestigung im mehrstufigen Walzprozess abbilden zu können, wird akkumulierte Umformgrad verwendet [18].

$$\varphi_{akk,i} = \varphi_{v,i} + \varphi_{rest,i-1} \quad (2-13)$$

$$\varphi_{rest,i} = \varphi_{akk,i} \cdot (1 - X_i) \quad (2-14)$$

Die Kinetik der statischen Rekristallisation (SRX) wird für Stahlwerkstoffe in industriellen Prozessmodellen gemeinhin durch den empirisch phänomenologischen JMAK-Ansatz beschrieben [18].

$$X = 1 - \exp \left(\ln(0,5) \cdot \left(\frac{t}{t_{50}} \right)^k \right) \quad (2-15)$$

Hierbei ist X der rekristallisierte Anteil nach der Zeit t. Der sogenannte Avrami-Exponent k quantifiziert die Rate der Rekristallisation. t₅₀ ist der Halbwertszeit der Rekristallisation und nach Sellars berechnet [18].

$$t_{50} = B \cdot d_0^{B_1} \cdot \varphi_{akk}^{B_2} \cdot \exp\left(\frac{Q_{RX}}{R \cdot T}\right) \quad (2-16)$$

Dabei ist T die absolute Temperatur und d_0 die Austenitkorngröße in μm vor der Umformung. Die rekristallisierte Korngröße d_{RX} ergibt sich nach Sellars [18].

$$d_{RX} = C \cdot d_0^{C_1} \cdot \varphi_{akk}^{C_2} \quad (2-17)$$

Im Laufe der Rekristallisation bilden sich zunächst Keime an den Korngrenzen der verformten Körner. Diese folgen dann den Mechanismen des Kornwachstums und verzehren so das alte umgeformte Gefüge sowie Teile der neu gebildeten Körner. Die mittlere Korngröße während des Ablaufs dieser konkurrierenden Prozesse lässt sich nach Beynon und Sellars [18].

$$d = X^{4/3} \cdot d_{RX} + (1 - X)^2 \cdot d_0 \quad (2-18)$$

Nachdem die Rekristallisation vollständig abgelaufen ist, laufen weitere Kornwachstumsvorgänge ab, die durch folgenden Kinetik beschrieben [18].

$$d_{KW}^{D_1} = d_{RX}^{D_1} + D \cdot t \cdot \exp\left(-\frac{Q_{KW}}{R \cdot T}\right) \quad (2-19)$$

2.2.2 Auslegungsgrößen beim Flach-Längswalzen / Parameters of flat longitudinal rolling

Bei der Stichplanauslegung eines Walzprozesses müssen die folgenden Parameter für jedes Walzgerüst berücksichtigt bzw. vorgegeben werden [3]:

- Walzkraft (F)
- Walzmoment (M)
- Leistung ($P = M \cdot \omega$)
- Temperatur (T)
- Längszüge (Z_0, Z_1)
- Geschwindigkeit (v_0, v_1)
- Eingangs- und Ausgangsdicke (h_0, h_1)

Wichtig ist, dass bspw. die Walzkraft und das Walzmoment die Maschinengrenzen nicht überschreiten, jedoch nah genug an diesen liegen, um die vorhandene Anlagenleistung auszunutzen und wirtschaftlich zu produzieren.

Parameter, die einen signifikanten Einfluss auf die Walzkraft haben, sind in Tabelle 2-2: Signifikante Einflussgrößen auf die Walzkraft ohne Längszüge [3] zusammengefasst [3].

Tabelle 2-2: Signifikante Einflussgrößen auf die Walzkraft ohne Längszüge [3]

Table 2-2: Significant influence of rolling parameters on rolling force without strip tension [3]

Größe	Variation in der Parameter	Einfluss auf Walzkraft (F)
Walzendurchmesser (2r)	↑	↑
Dickenabnahme (Δh)	↑	↑
Bandbreite (b_0)	↑	↑
Fließspannung (k_f)	↑	↑
Reibung (μ)	↑	↑
Temperatur (ϑ)	↑	↓

Dünnere Arbeitswalzen bedeuten eine geringere Kontaktlänge (Kontaktfläche) und damit eine geringere Walzkraft. Nachteilig ist jedoch, dass dünnere Arbeitswalzen zu einer stärkeren Durchbiegung der Walzen führen, die dann durch den Einsatz von Stützwalzen ausgeglichen werden muss [3].

2.2.3 Bestimmung der Eigenschaften von gewalzten Blechen / Determination of the properties of rolled sheets

Walzprodukte (Bleche) machen einen Großteil der Endprodukte aus, die in der Stahlindustrie hergestellt werden. Bevor das Produkt jedoch zum Einsatz kommen kann, müssen die Materialeigenschaften bestimmt werden. Für gewalzte Blechprodukte gibt es eine Vielzahl von Prüfverfahren, mit denen verschiedene Eigenschaften bestimmt werden können. Die Prüfverfahren lassen sich in zwei Kategorien einteilen: qualitative und quantitative Verfahren.

Tabelle 2-3: Prüfverfahren zur Bestimmung der Materialeigenschaften von Blechen [3]

Table 2-3: Test procedures to determine properties of rolled sheets [3]

Quantitative Prüfverfahren	Qualitative Prüfverfahren
Flachzugversuch	Erichsen Tiefungsversuch
Flachstauchversuch	Näpfchen-Tiefziehprüfung nach Swift
Schichtstauchversuch	Keilzug Prüfverfahren nach Sachs
Hydraulischer Tiefungsversuch	Hydraulischer Tiefungsversuch
Ebener Torsionsversuch	Streckzieh Prüfverfahren nach Güth

Versuche zur quantitativen Bestimmung von Werkstoffkennwerten sind geeignet, um mechanische Eigenschaften zu bestimmen. Diese Versuche sind aber meistens auf einachsige Belastungszustände beschränkt. Versuche zur qualitativen Bestimmung

von Werkstoffkennwerten ermöglichen die Nachahmung einfacher Umformprozesse der Blechumformung mit fertigungsähnlichen Prozessbedingungen (z.B. Reibbedingungen). Eine Übertragung der Erkenntnisse auf verschiedene Umformverfahren bleibt trotzdem schwierig [3]. Deshalb existieren eine Vielzahl von qualitativen, technologischen Prüfverfahren. Im Rahmen dieses Projekts sind Zugversuche zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften von kaltgewalzten Blechen geplant. Daher wird an dieser Stelle lediglich der Zugversuch näher erläutert.

Der Flachzugversuch ist das am häufigsten verwendete Prüfverfahren für die Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften von Blechen. Beim Flachzugversuch wird der Kraft-Weg Verlauf gemessen, aus dem letztlich die Fließkurve ermittelt wird. Ein Beispiel für Zugprobenabmessungen nach DIN EN ISO 6892-1 ist in Abbildung 2-10: Flachzugprobenabmessungen nach DIN EN ISO 6892 1 Norm [3] dargestellt [3].

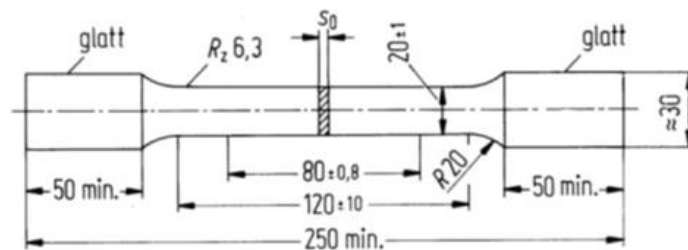


Abbildung 2-10: Flachzugprobenabmessungen nach DIN EN ISO 6892 1 Norm [3]

Figure 2-10: Tensile test specimen geometry according to DIN EN ISO 6892 1 Norm [3]

Wie in Abbildung 2-11: Bestimmung der Spannung-Dehnung Kurve mittels des Flachzugversuchs [3] dargestellt, wird die Zugprobe an beiden Enden eingespannt und die Kraft progressiv an einem Ende aufgebracht, bis die Probe versagt. Während des Tests werden die Kraft (F) und der Weg (l) aufgezeichnet und später zur Berechnung der technischen Spannungs-Dehnungs-Kurve mittels Gleichung 2-20 bis 2-23 verwendet [3].

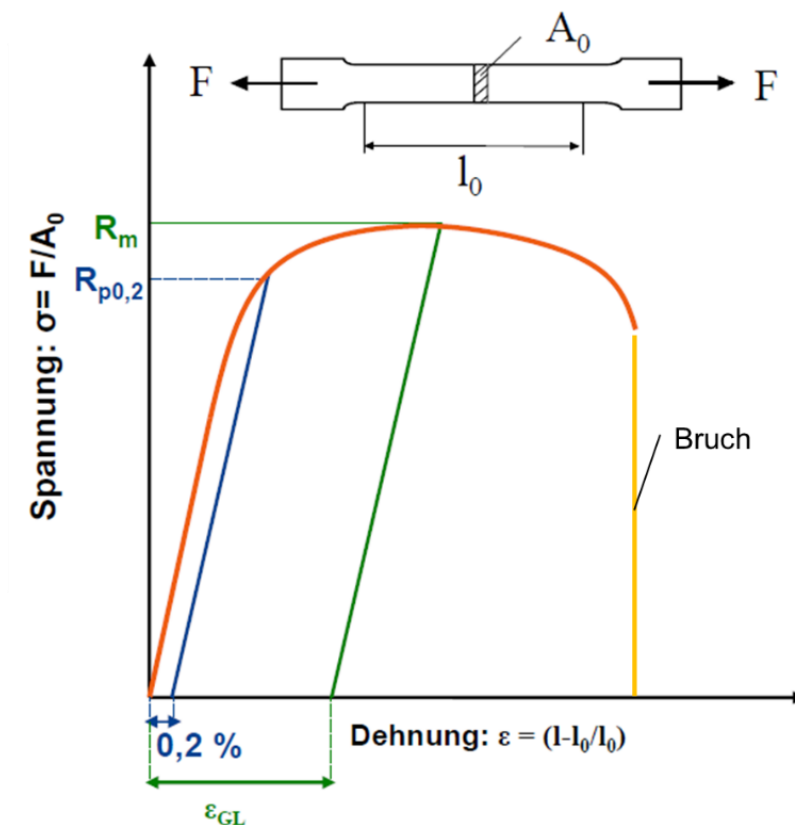


Abbildung 2-11: Bestimmung der Spannung-Dehnung Kurve mittels des Falchzugversuchs [3]

Figure 2-11: Determination of the stress strain curve using the tensile tests [3]

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2-20)$$

$$\epsilon_l = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2-21)$$

$$k_f = \frac{F}{A}, \text{ für } 0 < \varphi < \varphi_g \quad (2-22)$$

$$\varphi_l = \ln(1 + \epsilon_l) \quad (2-23)$$

mit	F	Kraft
	A_0	Ursprungsquerschnitt der Zugprobe
	A	Wahrer Querschnitt der Zugprobe
	σ	Ingenieursspannung / Konventioneller Spannung
	ϵ_l	Bezogene Abmessungsänderung (Dehnung)
	Δl	Probenverlängerung
	l_0	Ausgangslänge
	k_f	Fließspannung
	φ_l	Umformgrad in Längsrichtung
	φ_g	Gleichmaßdehnung

Die Fließspannung k_f (Gleichung 2-22) ist eine der wichtigsten Materialkenngrößen in der Umformtechnik. Die Fließspannung ist die Spannung, die im einachsigen, homogenen Spannungszustand zum plastischen Fließen eines metallischen Werkstoffs führt. Mehrachsige Spannungszustände werden mit Hilfe von Vergleichsspannungshypothesen (z.B. Gestaltänderungs-Energiehypothese nach von Mises oder Schubspannungshypothese nach Tresca) auf den einachsigen Spannungszustand zurückgeführt. Diese Kriterien geben an, unter welchen Bedingungen bei mehrachsigen Spannungszuständen plastisches Fließen beginnt [3]. Zur Ermittlung der Fließspannung muss der wahre Querschnitt der Zugprobe berücksichtigt werden.

Im Zugversuch experimentell ermittelte Fließkurven sind typischerweise nur bis zur Gleichmaßdehnung φ_g gültig, d. h. für niedrige Umformgrade (meist $\varphi < 0,2$). Grund dafür ist der Spannungszustand, der nur unterhalb der Gleichmaßdehnung einachsig ist [3]. In der Regel führt ein Umformprozess zu deutlich höheren Umformgraden. Aus diesem Grund werden verschiedene Methoden zur Modellierung und Extrapolation der Fließkurve verwendet. Abbildung 2-12: Modellierung der Fließkurve nach dem Hollomon und Ludwik Ansatz [3] zeigt die Modellierung und Extrapolation der Fließkurve nach dem Hollomon und Ludwik Ansatz [3].

- Hollomon Ansatz:

$$\sigma = K_H * \varphi^{n_H} \quad (2-24)$$

- Ludwik Ansatz:

$$\sigma = \sigma_0 + K_L * \varphi^{n_L} \quad (2-25)$$

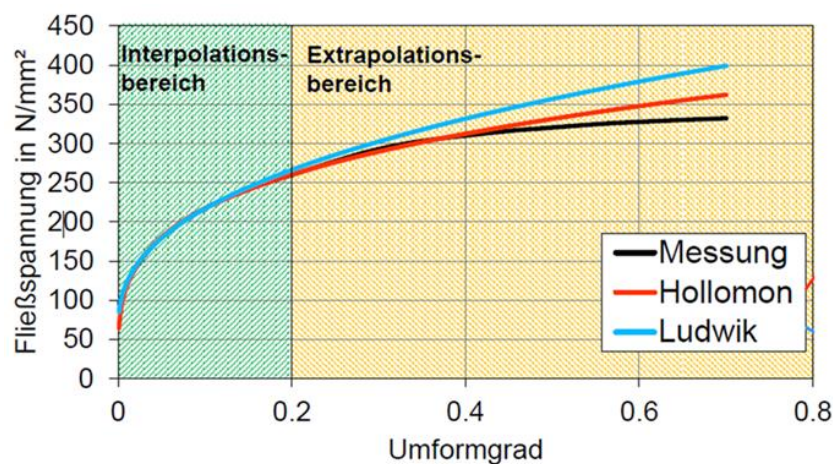


Abbildung 2-12: Modellierung der Fließkurve nach dem Hollomon und Ludwik Ansatz [3]

Figure 2-12: Modelling and extrapolation of flow curve using Hollomon and Ludwik [3]

Fließkurven stellen außerdem eine wichtige Eingangsgröße für die Finite-Elemente Simulation dar. Neben der Möglichkeit, die Fließspannung als Datensatz in Abhängigkeit ihrer Einflussgrößen in die FEM einzugeben, werden zunehmend sogenannte geschlossene Fließkurvenbeschreibungen in Form von mathematischen Zustandsgleichungen verwendet. Diese mathematischen Gleichungen liefern für jede Konfiguration an Parametern im Parameterfeld direkt einen Fließspannungswert [3].

2.3 Grundlagen des Tiefziehens / Basics of deep drawing

Die Automobilindustrie ist einer der wichtigsten wirtschaftlichen Antriebskräfte für jede moderne Wirtschaft. Sie ist einer der größten Abnehmer der Metallindustrie. Die meisten metallischen Produkte, die in der Automobilindustrie heute zum Einsatz kommen, sind Flachprodukte. Einen Großteil dieser machen wiederum Bleche aus, welche mittels Tiefziehverfahren in die gewünschten Komponenten umgeformt werden [20].

Tiefziehen ist ein Blechumformungsverfahren, bei dem ein Blech progressiv in eine 3D-Form umgeformt wird, indem eine Matrize das Metall um einen Stempel herum formt. Im Allgemeinen ist die Tiefe des durch Tiefziehen erstellten Halbzeug größer oder gleich dem Radius oder der Seitenlänge der Komponente [21,22].

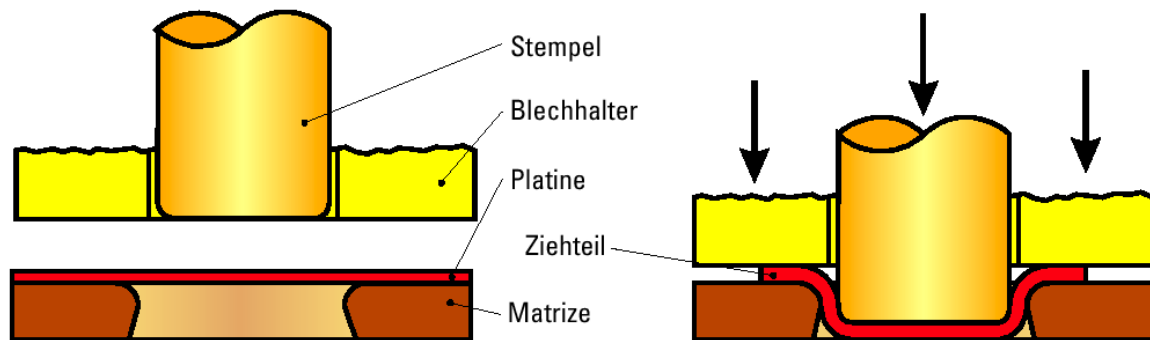


Abbildung 2-13: Tiefziehen eines Napfes [3]

Figure 2-13: Deep drawing of a cup [3]

Ein typischer Tiefziehprozess umfasst eine Platine, den Niederhalter/Blechhalter, eine Matrize und einen Stempel wie in Abbildung 2-13: Tiefziehen eines Napfes [3] gezeigt. Die Platine ist in der Regel ein kreisförmiger oder rechteckiger Blechausschnitt, der aus einem metallischen Band gefertigt wurde. Die Platine wird oben auf die Matrize gelegt und durch den Niederhalter festgehalten. Der Stempel bewegt sich von oben auf die Platine hinunter, um sie in die Matrizenhöhle zu ziehen. Die auf die Seitenwände wirkenden Zug- und Scherkräfte führen dazu, dass sie plastisch in die gewünschte Form gebracht werden. Nach Erreichen der gewünschten Ziehtiefe bewegen sich der Stempel und der Niederhalter nach oben, wodurch das tiefgezogene Teil entnommen werden kann. In einigen Prozessen kann ein Gegenstempel verwendet werden, um das geformte Produkt aus der Matrize auszustoßen. Der Teil der Platine, der direkt mit dem Niederhalter in Kontakt steht, wird als Flansch bezeichnet und kann nach Abschluss des Tiefziehprozesses abgeschnitten werden. Da die Verformungen im Tiefziehprozess sehr groß sind, ist die Duktilität der Platinen-Materialien von großer Bedeutung. In der Regel werden sehr duktile Materialien wie Aluminiumlegierungen und Tiefziehstähle tiefgezogen. Eine schematische Darstellung des Tiefziehprozesses ist in Abbildung 2-18 zu sehen [23].

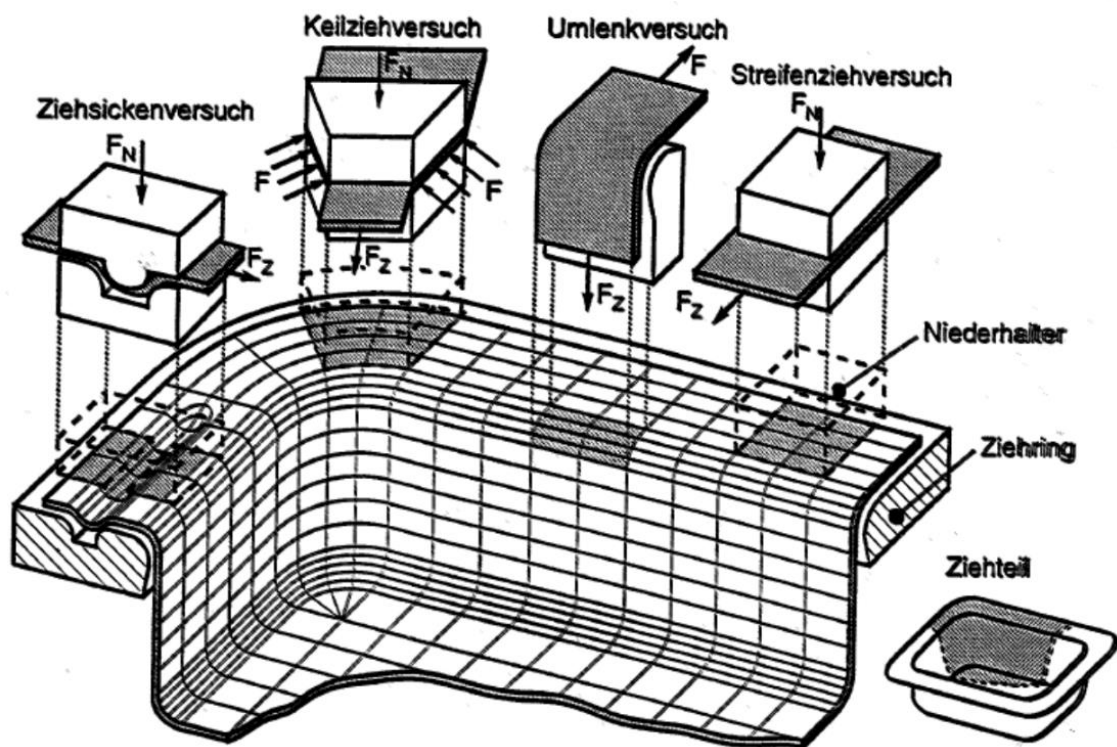


Abbildung 2-14: Das Tiefziehen unregelmäßiger Blechteile führt zu lokal unterschiedlichen Belastungsbedingungen, die unterschiedliche Reibungsbedingungen verursachen [3]

Figure 2-14: Deep drawing of irregular sheet component leads to locally different loading conditions that result in different friction conditions [3]

Da der Tiefziehprozess Scherkräfte an der Schnittstelle zwischen der Platine und dem Stempel mit sich bringt, müssen die Reibungsbedingungen an verschiedenen Stellen für komplexe Bauteile sorgfältig untersucht werden. Beim Ziehen unregelmäßiger Blechteile liegen örtlich unterschiedliche Belastungen und damit auch unterschiedliche Reibbedingungen vor wie in Abbildung 2-14: Das Tiefziehen unregelmäßiger Blechteile führt zu lokal unterschiedlichen Belastungsbedingungen, die unterschiedliche Reibungsbedingungen verursachen [3] gezeigt ist. Daher sollten die Reibungsbedingungen entsprechend angepasst werden. Die Reibungsbedingungen können in bestimmten Bereichen selektiv modifiziert werden, indem Rillen in die Oberfläche eingeführt werden, die Schmiermittel zurückhalten. Ähnlich variieren die Verformungen in einem tiefgezogenen Teil stark in den verschiedenen Bereichen des Produkts. Die Bodenplatte des Ziehstücks unterliegt nur geringer Verformung, während die Zarge- und Flanschbereiche des Produkts hohe Verformungen erfahren. Abbildung 2-15: Verteilung des Umformgrads in einem Tiefziehnapf aus einer FE Simulation [3] zeigt die Verteilung des Umformgrads in einem tiefgezogenen Napf aus einer FEM Simulation [3]. Es ist zu erkennen, dass die maximale Verformung in den Flansch- und Zarge Bereichen des Ziehstücks auftritt, während die geringste Verformung im Bereich des Bodens auftritt. Bedingt durch die große Umformung findet im Bereich der Zarge somit ebenfalls die größte Ausdünnung des Blechs statt, welche eine signifikante Größe zur Beurteilung des finalen Bauteils darstellt.

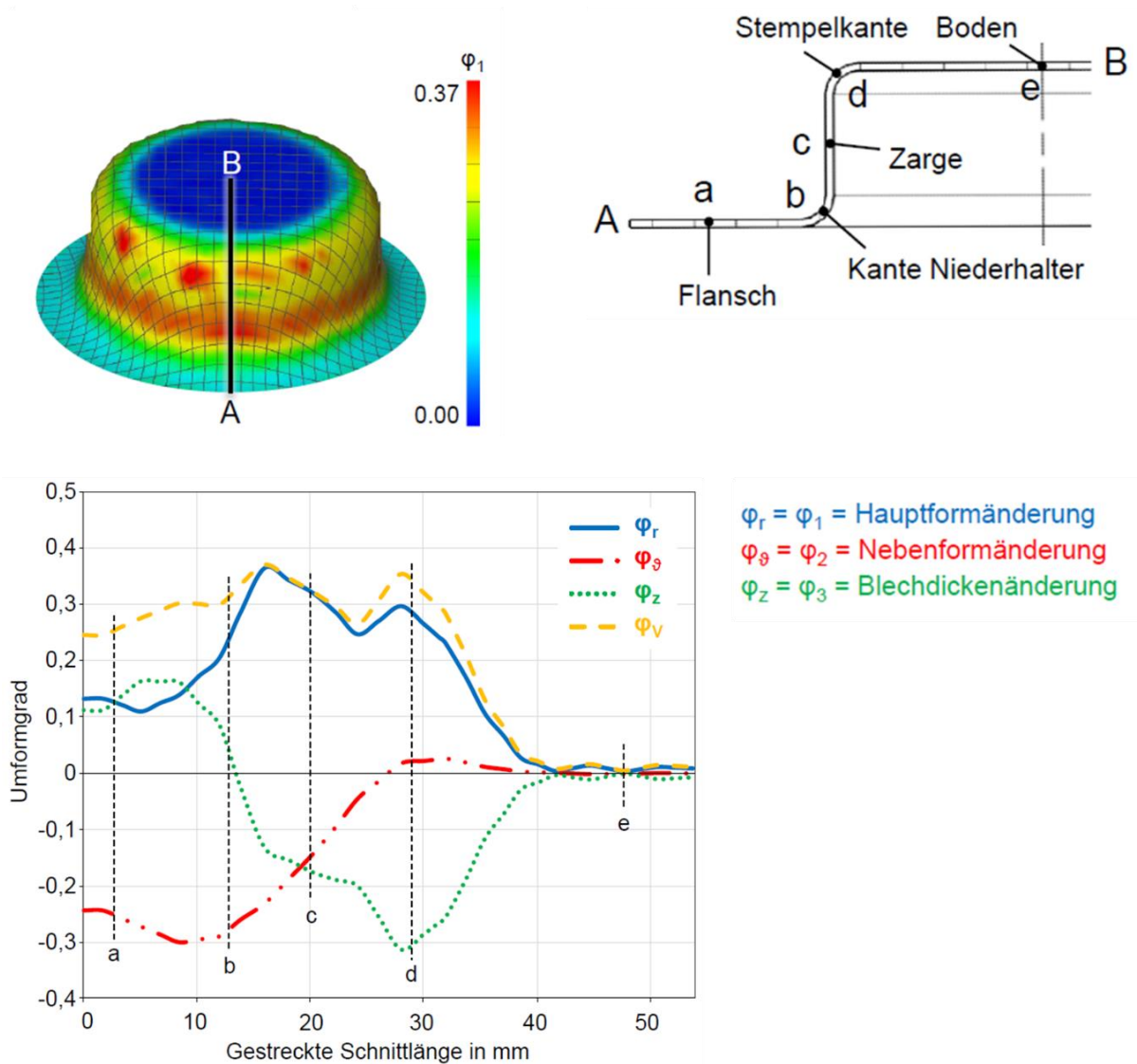
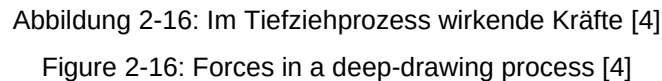


Abbildung 2-15: Verteilung des Umformgrads in einem Tiefziehnapf aus einer FE Simulation [3]

Figure 2-15: Distribution of equivalent plastic strain in an deep drawn cup using FE simulation [3]

Um den Tiefziehvorgang besser zu verstehen, ist es sehr wichtig, die wirkenden Kräfte und deren Wechselwirkung zu betrachten. Eine Übersicht der unterschiedlichen Kraftanteile ist in Abbildung 2-16: Im Tiefziehprozess wirkende Kräfte [4] gezeigt [4].

28

Reibwert:	μ
Stempeldurchmesser:	$2 \cdot r_1$
Platinendurchmesser:	$2 \cdot r_2$
Mittlerer Napfdurchmesser:	$d_m = 2 \cdot r_1 + t$

Wie in Abbildung 2-17: Verlauf der Tiefziehkraft während des Tiefziehprozesses [3] gezeigt, steigt die Umformkraft im Tiefziehprozess an, während der Stempel in das Blech eindrückt, bis sie ein Maximum erreicht. Danach fällt sie bis zum Ende des Prozesses wieder ab. Der Stempel und die Matrice sind entsprechend ausgelegt, um den hohen Umformkräften möglichst verschleißarm standzuhalten. Meist werden sie aus oberflächengehärteten Stählen hergestellt.

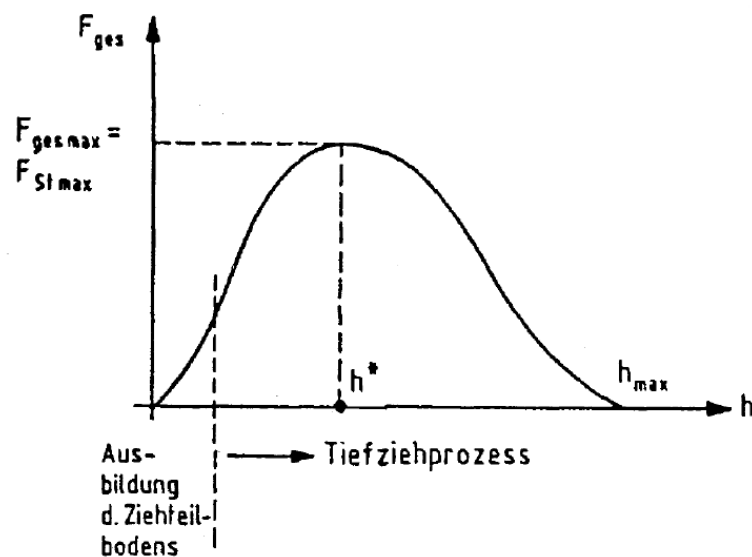


Abbildung 2-17: Verlauf der Tiefziehkraft während des Tiefziehprozesses [3]

Figure 2-17: Deep drawing force during the deep drawing process [3]

Einer der wichtigen Aspekte, die beim Tiefziehen berücksichtigt werden müssen, ist das Grenzziehverhältnis (Erstzug). Das maximale Ziehverhältnis β ist die Grenze, bis zu der ein Material erfolgreich tiefgezogen werden kann, ohne dass Risse im Material auftreten. Das Ziehverhältnis ist definiert als Verhältnis von Platine/Ronden- (d_0) zu Stempeldurchmesser (d_1) [3].

$$\beta = \frac{d_0}{d_1} \quad (2-28)$$

Sofern eine gewünschte Geometrie nicht in einem einzigen Zug erreicht werden kann, können mehrere aufeinanderfolgende Ziehstufen genutzt werden, die jeweils unterhalb des Grenzziehverhältnisses liegen. Dies ist vor allem für das Tiefziehen von Materialien mit vergleichsweise schlechter Duktilität relevant. Das Gesamtziehverhältnis ergibt sich dabei wie folgt [3]:

$$\beta_{tot} = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \dots \cdot \beta_n = \prod_{i=1}^n \beta_i = \frac{d_o}{d_n} \quad (2-29)$$

Das maximale Ziehverhältnis $\beta_{0,max}$ ist ein Maß für die Tiefziehbarkeit von Blechen. Gemeinsam mit der Niederhalterkraft bestimmt es den Bereich, in dem Gutteile erzeugt werden können. Außerhalb dieses Bereichs kann es zu zwei typischen Fehlerbildern kommen, die in Abbildung 2-18: Bodenreißer und Faltenbildung während des Tiefziehprozesses [3] gezeigt sind.

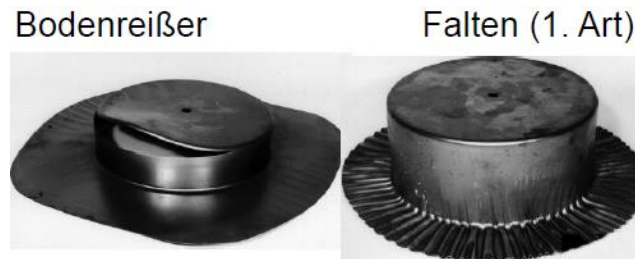


Abbildung 2-18: Bodenreißer und Faltenbildung während des Tiefziehprozesses [3]

Figure 2-18: Development of bottom cracks and wrinkles during deep drawing process [3]

Abbildung 2-19 zeigt das durch Niederhalterkraft und Ziehverhältnis festgelegte Prozessfenster für die Erzeugung von Gutteilen [3,24].

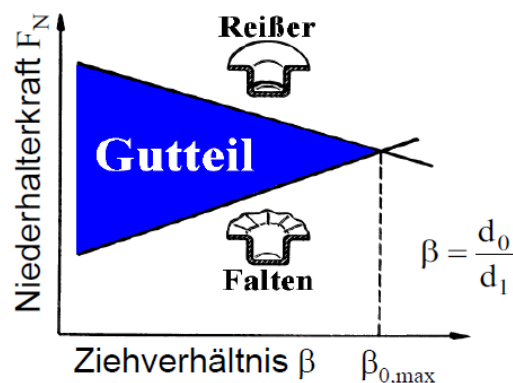


Abbildung 2-19: Bereich der Gutteilproduktion in Abhängigkeit von Niederhalterkraft und Ziehverhältnis [3].

Figure 2-19: Area of defect free production in dependence of blankholder force and drawing ratio [3]

2.3.1 Kreuznapf / Cross die specimen

Der Kreuznapf stellt eine etablierte Geometrie dar, die in der Blechumformung, insbesondere im Tiefziehprozess, zur Überprüfung der Tiefziehbarkeit verwendet wird. Dies ist darauf zurückzuführen, dass er eine breite Palette von Spannungszuständen abdeckt, die bei konventionellen Tiefziehprozessen der meisten industriellen Tiefziehkomponenten beobachtet werden [25]. Aufgrund der unterschiedlichen auftretenden Spannungszustände eignet sich der Kreuznapfversuch außerdem zur Ermittlung von Grenzformänderungskurven (FLD). Jansen et al. [26] untersuchten die FLD-Vorhersage sowie die auftretende Anisotropie eines Zinkblechs unter

Verwendung von Kreuznapfen. Ein typisches Werkzeug sowie die resultierende Blechgeometrie des Kreuznapfversuchs sind in Abbildung 2-20 dargestellt [27].

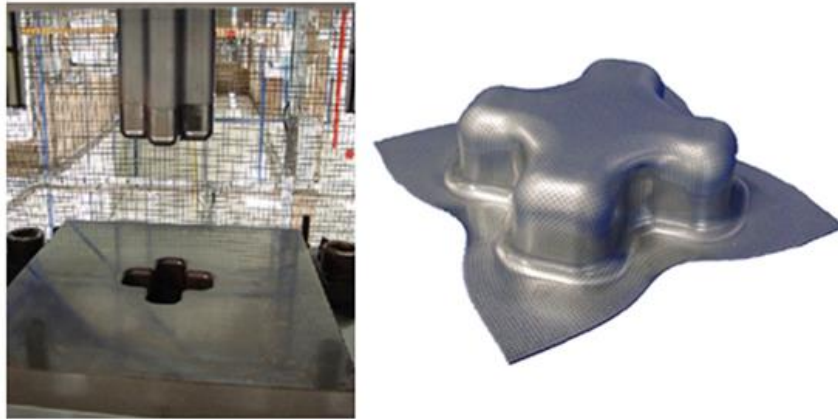


Abbildung 2-20: Die Matrize, der Stempel und das Tiefziehteil eines Kreuznapfversuchs [25]

Figure 2-20: The die, punch and cross die specimen in cross die test [25]

2.3.1.1 Charakterisierung eines Kreuznapfs / Characterization of cross die specimen

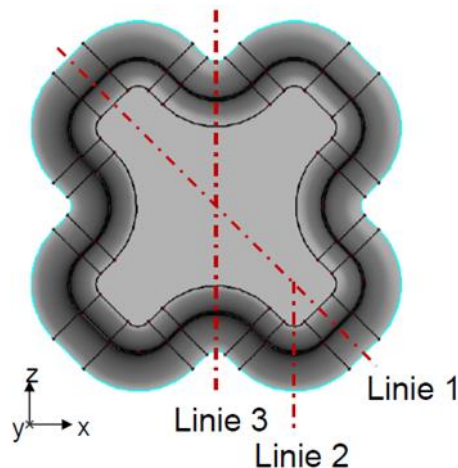


Abbildung 2-21: Charakterisierung der Kreuznapf entlang die drei Referenz Linien für Dickenverteilung

Figure 2-21: Characterization of cross die specimen for its thickness distribution along three reference lines

Eine Möglichkeit, die sich im Bauteil ergebende Blechdickenverteilung zu charakterisieren, ist die Messung entlang drei Symmetriereferenzlinien, wie in Abbildung 2-21 gezeigt ist. Die Dickenverteilungen entlang dieser Symmetriereferenzlinien repräsentieren die Dickenverteilung des gesamten Ziehteils und vereinfachen somit den Messaufwand [25]. Beispielhafte experimentell und simulativ ermittelte Dickenverteilungen entlang der Referenzlinie 1 sind in Abbildung 2-22: Prozentuale Ausdünnung (exp. und sim.) entlang der Referenz Linie 1 eines Kreuznapfs [25] dargestellt [25].

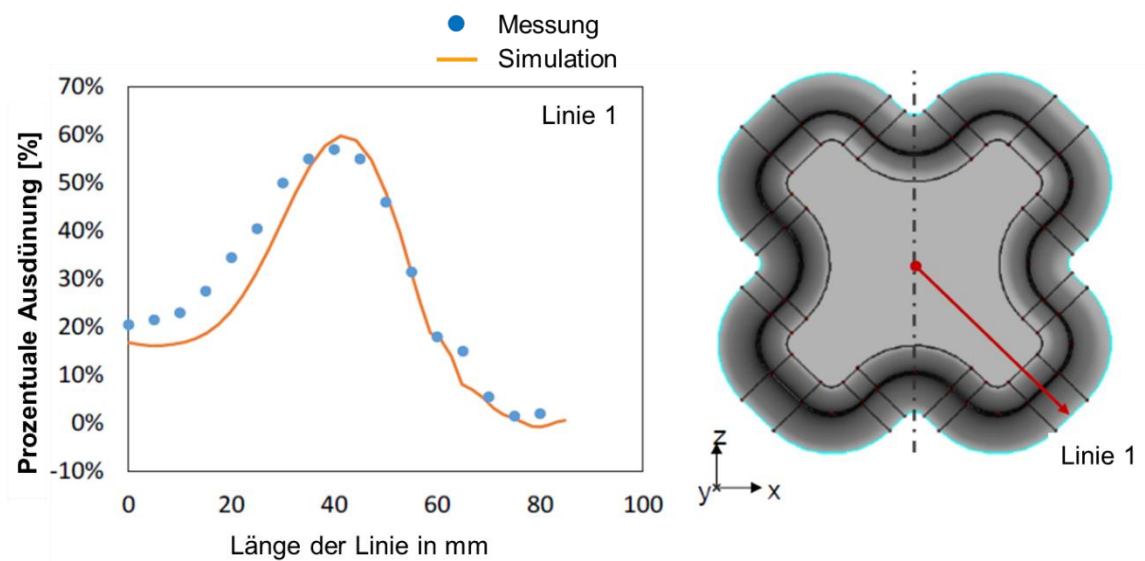


Abbildung 2-22: Prozentuale Ausdünnung (exp. und sim.) entlang der Referenz Linie 1 eines Kreuznapfs [25]

Figure 2-22: Percentage thinning (exp. and sim.) along the reference line in a cross die specimen [25]

2.4 Grundlagen des Design of Experiment (DoE) / Basics of Design of Experiment (DoE)

Der Ursprung des Design of Experiments (DoE) wird auf die Arbeit von Sir Ronald A. Fisher zurückgeführt, der in den 1920er Jahren wichtige Beiträge auf dem Gebiet des statistischen Versuchsdesigns geleistet hat, das in verschiedenen Branchen Anwendungen findet [28,29]. DoE ist ein sehr effizienter und weit verbreiteter statistischer Ansatz, um wissenschaftliche Forschung und industrielle Probleme mit mehreren Einflussparametern und komplexen Zusammenhängen zu analysieren. Das Hauptziel von DoE-Studien besteht darin, Daten effektiv zu sammeln, ihre Korrelation zu bestimmen und diese Daten effizient zu nutzen, um Entscheidungen bezüglich (Prozess-) Parametern zur Verbesserung der Produktqualität, Reduzierung der Prozesszeit und Ressourceneffizienz zu treffen. Heute findet das DoE Anwendung in einem breiten Spektrum von Branchen wie der Pharmazeutik, der Fertigung, der Logistik und der Landwirtschaft sowie weit verbreitet in der wissenschaftlichen Forschung [30]. Abbildung 2-23: Anwendung des DoE in verschiedenen Fachgebieten [30] zeigt die Bereiche mit der weitest verbreiteten Anwendung von DoE.

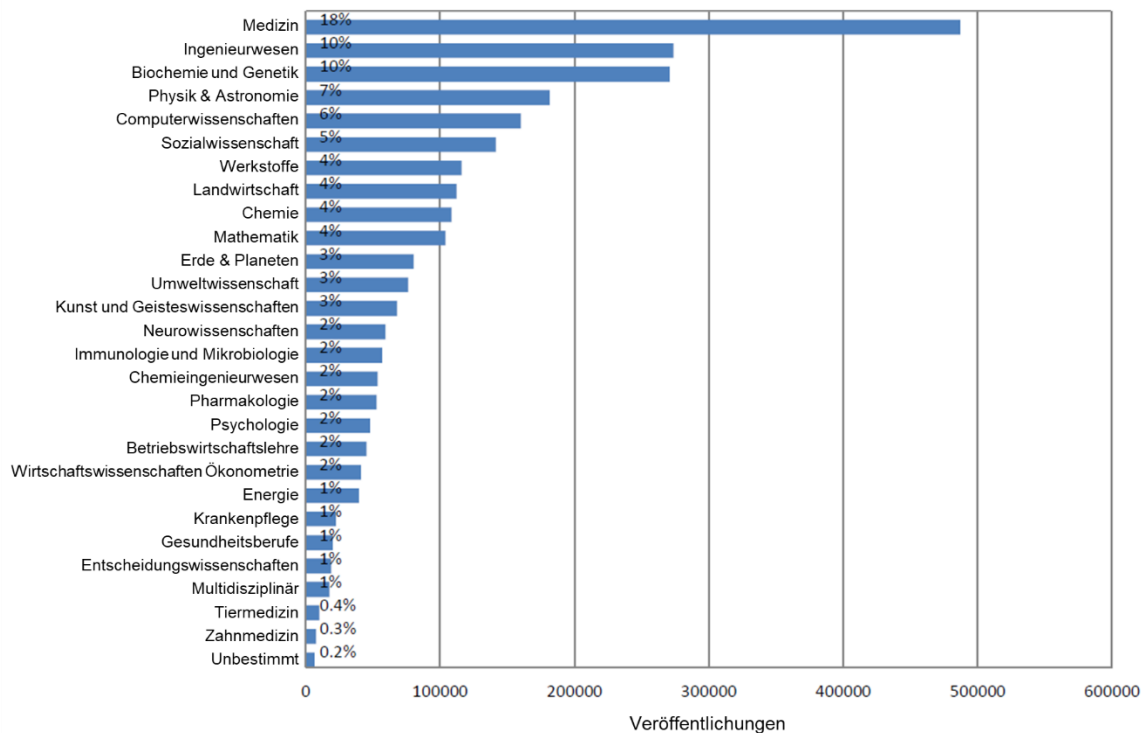


Abbildung 2-23: Anwendung des DoE in verschiedenen Fachgebieten [30]

Figure 2-23: Applications of Design of Experiments in different fields [30]

Die Signifikanz von DoE wird besonders deutlich, wenn es darum geht, komplexe Prozesse mit mehreren Variablen zu verstehen. Zum Beispiel ermöglicht es DoE Herstellern, in der Fertigung systematisch die einflussreichsten Prozessparameter zu identifizieren und sie so anzupassen, dass die gewünschten Ergebnisse erreicht werden [30]. Die wichtigsten Anwendungen von DoE in der Fertigungsindustrie sind die Prozessoptimierung, die Reduzierung von Ausschuss, die Materialauswahl, die Robustheitsprüfung, die Steigerung der Ressourceneffizienz, die Ursachenanalyse und der Vergleich verschiedener Fertigungsmethoden.

Einige der wichtigsten Aufgaben des Design of Experiments sind die folgenden [30]:

Variablenauswahl: Identifizierung wichtiger Einflussgrößen (Variablen) aus einer Vielzahl an auf ein System einwirkenden Parameter.

Identifizierung einer Übertragungsfunktion: Wenn wichtige Eingangsvariablen identifiziert sind, kann die Beziehung zwischen den Eingangsvariablen und den Zielgrößen zur weiteren Erforschung der Leistung des Systems, des Prozesses oder des Produkts über die Übertragungsfunktion ermittelt werden.

Systemoptimierung: Die Übertragungsfunktion kann zur Optimierung verwendet werden, indem das Experiment auf die optimalen Einstellungen der Variablen verschoben wird. Auf diese Weise können die Leistungen des Systems, des Prozesses oder des Produkts verbessert werden.

2.4.1 Ansatz zur Implementierung des Design of Experiments / Approach of implementation of Design of Experiments

Die Implementierung einer DoE-Studie erfolgt in der Regel in mehreren Schritten. Die wichtigsten Schritte sind nachfolgend zusammengefasst [30]:

Formulierung der Ziele: Zunächst wird das Problem inklusive der Ziele klar definiert. Dies kann die Verbesserung eines Produkts, die Reduzierung von Fehlern in einem Prozess oder die Optimierung von Ressourceneinsätzen umfassen.

Definition der Zielgröße: Definition des messbaren Ergebnisses des Experiments.

Bestimmung von Einflussfaktoren und Stufen (Level): Auswahl unabhängiger Variablen (Faktoren), die eine Variation der Zielgröße verursachen können.

Festlegung des experimentellen Designs: Basierend auf den ausgewählten Faktoren wird ein Versuchsplan erstellt. Dieser Plan umfasst die Anordnung der Versuchsdurchläufe und die Variation der Einflussfaktoren, um die benötigten Datensätze zu erhalten.

Durchführung des Design of Experiments: Unter der Verwendung des Versuchsplans werden die Experimente durchgeführt und die Versuchsdaten systematisch erfasst. Dies kann im Labor, in der Produktion oder in anderen relevanten Umgebungen wie einer Simulationsumgebung erfolgen.

Datenanalyse: Die gesammelten Daten werden statistisch analysiert, um Muster, Zusammenhänge und Einflüsse der Faktoren auf die Zielgröße zu identifizieren. Dies kann durch die Anwendung von Regression, ANOVA (Varianzanalyse) und anderen statistischen Methoden gemacht werden.

Schlussfolgerungen und Empfehlungen: Dies beinhaltet die grafische Darstellung und die Validierung der Ergebnisse. Die Ergebnisse der DoE-Studie werden dokumentiert und Empfehlungen zur Verbesserung des untersuchten Systems oder Produkts gemacht.

Auf Grundlage der Analyseergebnisse werden die Einflussfaktoren optimiert, um das gewünschte Ergebnis zu erreichen. Die optimierten Parameter und Ergebnisse werden validiert, um sicherzustellen, dass die gewünschten Verbesserungen tatsächlich erzielt wurden. Die optimierten Parameter und Erkenntnisse aus der DoE-Studie werden in die tatsächliche Produktion oder den Prozess implementiert, um die gewünschten Verbesserungen umzusetzen [30].

2.4.2 Experimentelle Designmethoden / Experimental design methodologies

Es gibt mehrere Designmethodiken zur Erstellung von Versuchsplänen, die jeweils für bestimmte Arten von Problemen und Anwendungen geeignet sind. Dieser Teil enthält einen Überblick über die DoE Methoden.

2.4.2.1 Full Factorial Design / Full Factorial Design

Das Full Factorial Design ist eine gute Methodik in der Statistik und der Forschung, welches verwendet wird, um den Einfluss mehrerer Faktoren auf ein System, einen

Prozess oder ein Produkt systematisch zu untersuchen. Diese Methode ermöglicht es, alle Interaktionen zwischen den Faktoren zu verstehen und die besten Einstellungen für diese Faktoren zu ermitteln, um ein gewünschtes Ergebnis zu erreichen. Dieser Ansatz ist besonders nützlich, wenn die Anzahl der zu untersuchenden Faktoren relativ niedrig ist [31].

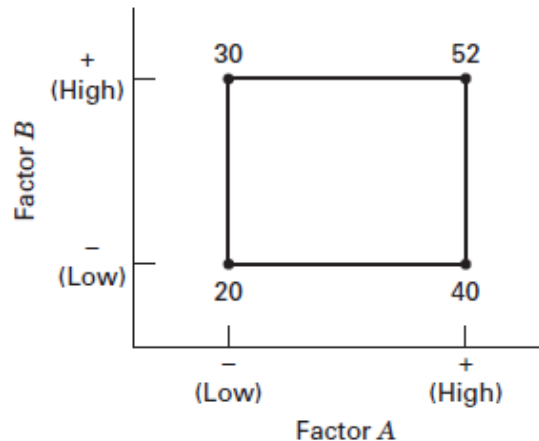


Abbildung 2-24: Full Factorial Design mit 2 Einflussfaktoren (Faktor A und B), wobei jeder Faktor mit 2 Stufen (high und low) versehen ist [31]

Figure 2-24: Full Factorial Design with 2 factors (factor A and B) where each factor has 2 levels (high and low) [31]

Im Full Factorial Design werden die zu untersuchenden Einflussfaktoren identifiziert und für jeden Faktor verschiedene Stufen (Level) definiert. Jeder Einflussfaktor kann mehrere Stufen haben, die seine Einstellungen repräsentieren. Wie in Abbildung 2-24: Full Factorial Design mit 2 Einflussfaktoren (Faktor A und B), wobei jeder Faktor mit 2 Stufen (high und low) versehen ist [31] dargestellt, können die Faktoren und Stufen in einem Produktionsprozess bspw. Temperatur (niedrig, hoch) und Druck (niedrig, hoch) sein. Das Full Factorial Design erstellt alle möglichen Kombinationen der Faktoren und ihrer Stufen. Wenn ein Faktor beispielsweise zwei Stufen hat und es zwei Einflussfaktoren (k) gibt, ergeben sich vier mögliche Kombinationen ($2^k = 2^2 = 4$). Für jede dieser Kombinationen werden Experimente oder Tests durchgeführt, um die Auswirkungen der Faktoren auf das untersuchte System zu verstehen [31].

Durch die Berücksichtigung aller möglichen Kombinationen der Faktoren werden keine Interaktionen oder Einflüsse übersehen. Dies führt zu umfassenden und zuverlässigen Ergebnissen. Jedoch steigt die Anzahl der Experimente exponentiell mit der Anzahl der Faktoren. Abhängig von der Komplexität des Problems oder den benötigten Rechenressourcen kann dies den benötigten Versuchs-/Rechenaufwand deutlich erhöhen. Um den entgegenzuwirken, ermöglichen moderne statistische Softwaretools eine effiziente Durchführung und Analyse der Experimente [32,31].

2.4.2.2 Fractional Factorial Design / Fractional Factorial Design

In der Mitte der 1930er Jahre führte die Arbeit von Fischer zur Entwicklung der Methode des Fractional Factorial Design. Fractional Factorial Designs sind eine der wichtigsten statistischen Methoden, um die Auswirkungen mehrerer steuerbarer Faktoren auf eine

Zielgröße effizient zu bestimmen. Im Gegensatz zum Full Factorial Design, bei dem alle Kombinationen von Einflussfaktoren getestet werden, werden im Fractional Factorial Design nur ausgewählte Kombinationen geprüft. Dies ermöglicht eine erhebliche Reduzierung der Versuchsdurchläufe. Dadurch werden Zeit und Ressourcen gespart, während immer noch wertvolle Informationen über die Auswirkungen der Faktoren auf das Experiment gewonnen werden [30].

2.4.2.3 Central Composite Design / Central Composite Design

Das Central Composite Design besteht aus einer Kombination des Full Factorial und des Fractional Factorial Design [33]. Es stellt eine der wichtigsten DoE-Methoden dar, die verwendet wird, um den Einfluss von Faktoren auf eine Zielgröße oder ein Ergebnis zu untersuchen, wobei die Krümmung der Response Surface berücksichtigt wird.

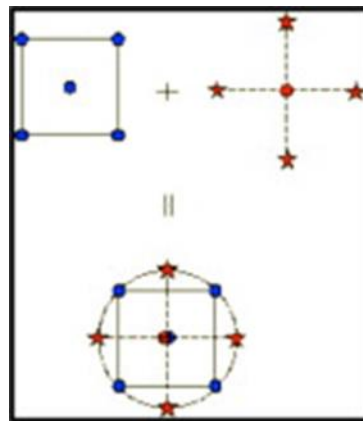


Abbildung 2-25: Erstellung des Central Composite designs [33]

Figure 2-25: Creation of central composite design [33]

Dieses Design beinhaltet die Variation der Stufen (Levels) der beiden Einflussfaktoren, inklusive Mittelpunkt, axialer Punkte und möglicherweise zusätzlicher Punkte. Die Designs enthalten zentrale Punkte innerhalb des Prozessfensters und "Stern"-Punkte außerhalb davon, um eine Abschätzung der Krümmung der Response Surface zu ermöglichen [33].

Es gibt 3 verschiedene Arten von Central Composite Design, wie in Abbildung 2-26: Drei Arten des Central Composite Designs [33] dargestellt ist: Central Composite Circumscribed Design (CCC), Central Composite Face-Centered Design (CCF) und Central Composite Inscribed Design (CCI).

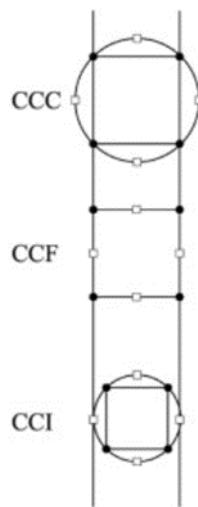


Abbildung 2-26: Drei Arten des Central Composite Designs [33]

Figure 2-26: Three types of central composite designs [33]

Im CCC Design liegen die Sternpunkte (weiße Kreise) außerhalb des Prozessfensters. Wie in Abbildung 2-26: Drei Arten des Central Composite Designs [33] zu sehen ist, erfordert dieses Design fünf Stufen pro Einflussfaktor. Jeder Einflussfaktor hat drei Stufen mit Sternpunkten und zwei Stufen mit schwarzen Punkten. Im CCF Design befinden sich die Sternpunkte auf den Außenflächen des Prozessfensters. Wie in Abbildung 2-26: Drei Arten des Central Composite Designs [33] zu sehen ist, erfordert dieses Design drei Stufen pro Einflussfaktor. Für jeden Einflussfaktor gibt es zwei Stufen mit schwarzen und Sternpunkten und eine Stufe mit nur Sternpunkten. Das CCI Design wird verwendet, wenn es nicht möglich ist, das Prozessfenster zu verlassen. Das CCC Design wird dann so verkleinert, dass es in diesen Bereich passt. Auch das CCI Design erfordert fünf Stufen pro Einflussfaktor. Jeder Einflussfaktor hat drei Stufen mit Sternpunkten und zwei Stufen mit schwarzen Punkten. [33].

2.4.2.4 Latin Hypercube Design / Latin Hypercube Design

Das Latin Hypercube Design (LHD) ist eine Stichprobenentnahmetechnik, welche zur Auswahl einer Gruppe von Experimenten aus einem mehrdimensionalen Raum in strukturierter Weise dient. Dieses Design ist praktisch, wenn die Anzahl der Faktoren hoch ist und viele mögliche Kombinationen von Einflussfaktorstufen existieren. Das LHD identifiziert effizient die wichtigsten Einflussfaktoren, welche die Zielgröße beeinflussen [34]. Das erste Space-Filling Design, das vorgeschlagen wurde, war das LHD von McKay, Conover und Beckman im Jahr 1979. Ein LHD für n Datenpunkte und k Faktoren resultiert in einer $n \times k$ Matrix, bei der jede Spalte eine zufällige Permutation der Stufen 1, 2, ..., n ist. Ein Beispiel für ein LHD mit 10 Datenpunkten und zwei Faktoren im Intervall von -1 bis 1 ist in Abbildung 2-27 dargestellt.

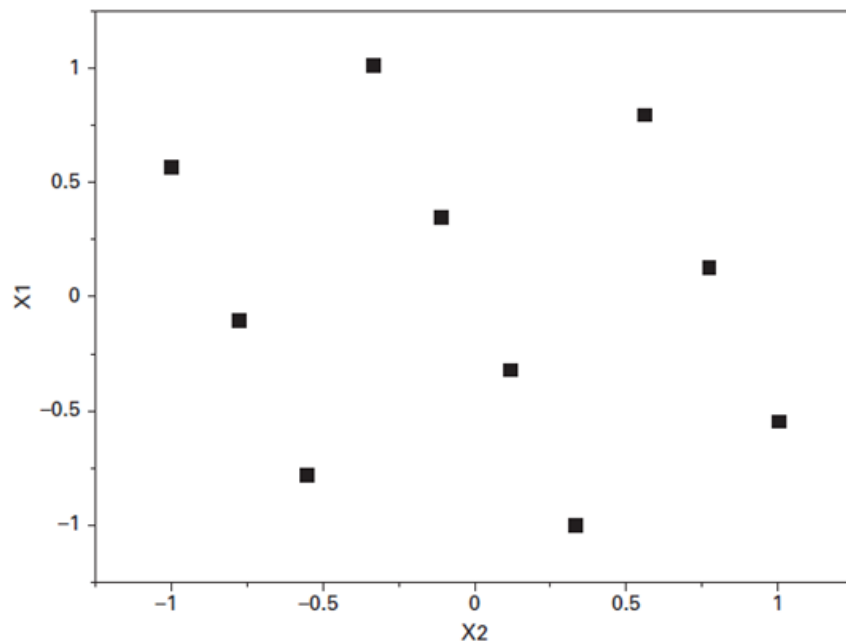


Abbildung 2-27: Latin Hypercube Design für 10 Datenpunkten und 2 Faktoren (X1 und X2)

Figure 2-27: Latin Hypercube Design for 10 samples and 2 factors (X1 and X2)

Der Vergleich des CCC Designs mit dem LHS Design zeigt deutliche Unterschiede, wenn man ihre jeweiligen Merkmale in einem multidimensionalen Designraum betrachtet.

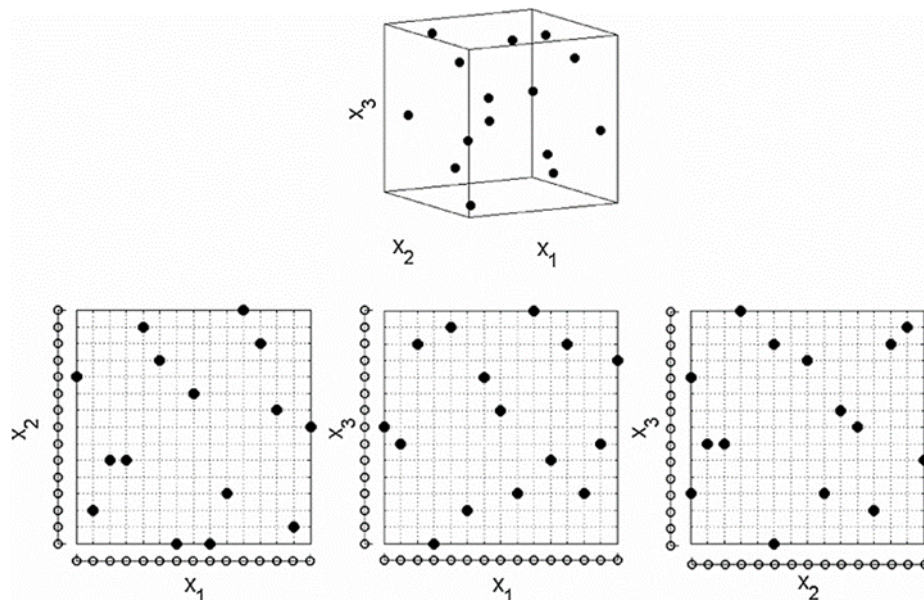


Abbildung 2-28: Latin Hypercube Design mit 15 Datenpunkten [34]

Figure 2-28: Latin hypercube design with 15 samples [34]

Abbildung 2-28: Latin Hypercube Design mit 15 Datenpunkten [34] zeigt ein LHS Design für 15 Datenpunkten und drei Faktoren. Jede zweidimensionale Projektion dieses Designs stellt dabei ebenfalls ein Latin Hypercube Design dar. Die Struktur des Latin Hypercube Designs bleibt demnach über verschiedene Dimensionen hinweg erhalten und konsistent.

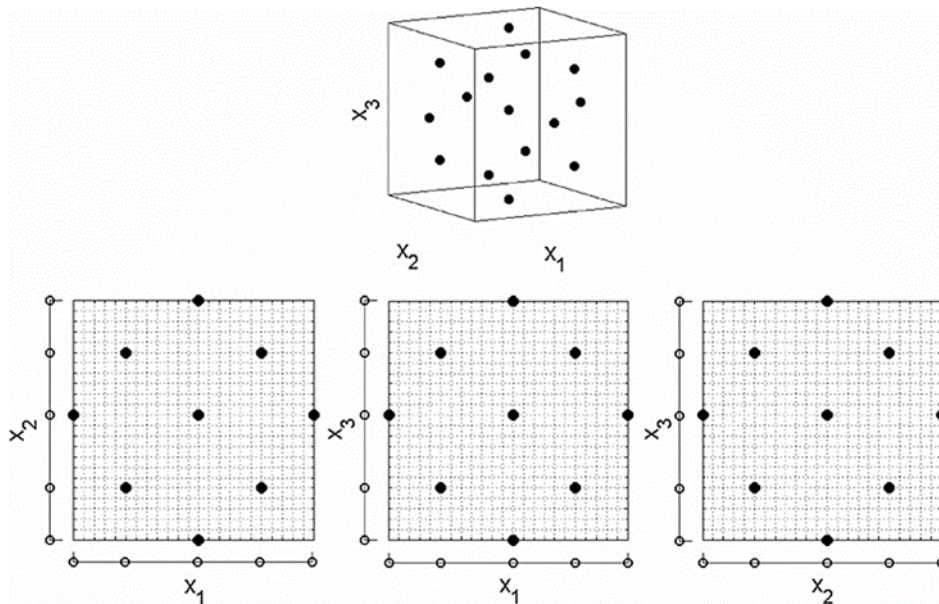


Abbildung 2-29: Central Composite Circumscribed (CCC) Design mit 15 Datenpunkten [34]

Figure 2-29: Central composite circumscribed (CCC) design with 15 samples [34]

Abbildung 2-29: Central Composite Circumscribed (CCC) Design mit 15 Datenpunkten [34] zeigt ein CCC Design für 15 Datenpunkte und 3 Faktoren. Im Gegensatz zum LHS-Design tritt hier eine Reduktion von Datenpunkten in der zweidimensionalen Projektion auf. So werden aus den ursprünglichen 15 Datenpunkten lediglich 9 Datenpunkte. Zusammengefasst zeigt sich die Flexibilität des LHS Designs in seiner Fähigkeit, die Eigenschaften der Latin Hypercube Struktur beizubehalten, auch wenn Dimensionen eliminiert werden. Diese Eigenschaft macht LHD zu einer praktischen Wahl für die Wiederverwendung vorhandener Datenpunkte, ohne die Anzahl der Datenpunkte zu beeinflussen. Im Gegensatz dazu zeigen CCC oder Factorial Designs, dass die Eliminierung von Dimensionen zu einer Reduktion der Datenpunkte und der damit verbundenen Information führt [34].

2.5 Grundlagen der Datenerfassung, -übertragung und -speicherung / Basics of data acquisition, transmission and storage

2.5.1 Datenaufnahme / Data acquisition

Datenaufnahme ist für produzierende Unternehmen von entscheidender Bedeutung, da sie ihnen ermöglicht, effizienter und effektiver zu arbeiten. Durch die Erfassung und Analyse von Daten können Unternehmen wertvolle Erkenntnisse gewinnen, um ihre betrieblichen Abläufe zu optimieren, Kosten zu senken und die Produktqualität zu verbessern. Im Folgenden werden die wichtigsten Standards und Technologien auf diesem Gebiet beleuchtet und ihre Bedeutung für die Branche hervorgehoben.

2.5.1.1 Maschinen- und Anlagenanbindung

Zur unternehmensübergreifenden Überwindung von heterogenen Kommunikationsschnittstellen, werden relevante Protokolle bzw. Standards wie **OPC UA**, **MTConnect**, **Industrial Ethernet**, **MQTT** und das **Konzept der Verwaltungsschale** verwendet. Die Standardisierung bei der Anbindung von Maschinen, Anlagen und Sensoren über solche Protokolle ist bereits weit fortgeschritten.

OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) ist ein offener, herstellerunabhängiger Kommunikationsstandard, der den hersteller- und plattform-unabhängigen Datenaustausch und die Interoperabilität zwischen IT-Systemen und Maschinen ermöglicht [35]. **MTConnect** bietet ein semantisches Vokabular für Fertigungsanlagen, um strukturierte, kontextbezogene Daten in einem nicht-proprietären Format zur Verfügung zu stellen. Die Notwendigkeit zur Übersetzung von herstellerspezifischen Datenformaten entfällt damit. Eine kombinierte Anwendung mit OPC UA ist möglich [36].

MQTT (Message Queue Telemetry Transport) ist ein von IBM entwickeltes Protokoll für die Kommunikation in IoT-Umgebungen (z. B. Maschine-zu-Maschine-Kommunikation oder Erfassung von Sensorendaten). Es verwendet das Publish-Subscribe-Modell, bei dem Clients über einen Broker Nachrichten austauschen. [37]. Der Austausch ist nach „Topics“ organisiert, einem UTF-8-String, der in allen Nachrichten enthalten ist und von jedem Client abonniert werden kann [38]. MQTT zeichnet sich im Vergleich zu anderen Protokollen wie HTTP durch einen geringen Ressourcenbedarf aus und eignet sich daher besonders gut für Umgebungen mit begrenzter Bandbreite. Es ermöglicht asynchrone Kommunikation und bietet verschiedene Mechanismen für eine zuverlässige Nachrichtenübertragung. MQTT enthält keine vorgeschriebenen Sicherheitsmechanismen. Diese werden stattdessen über die jeweiligen Broker wie Eclipse Mosquitto und HiveMQ bereitgestellt [37].

Industrial Ethernet bezieht sich auf den Einsatz von Ethernet-Netzwerken in industriellen Umgebungen. Ethernet ist ein weit verbreitetes Standardprotokoll für die Kommunikation in Computernetzwerken, das ursprünglich für Büro- und Unternehmensumgebungen entwickelt wurde. Industrial Ethernet erweitert dieses Konzept, um den spezifischen Herausforderungen in industriellen Anwendungen wie Vibrationen, hohen Temperaturen, Feuchtigkeit und elektromagnetischen Einflüssen gerecht zu werden [39]. Protokolle wie PROFINET oder Modbus-TCP basieren auf dem Industrial Ethernet und bieten zusätzliche Funktionen für den industriellen Einsatz wie Echtzeitfähigkeit durch niedrige Latenzzeiten und hohe Skalierbarkeit. Somit eignet sich Industrial Ethernet zur Anbindung der Assets in der Produktion [40].

Eine **Verwaltungsschale** ist die Umsetzung des digitalen Zwillings für Industrie 4.0 und ist in **IEC 63278** beschrieben. Sie existiert in Form einer Softwarekomponente, die ein Asset in der Produktion in Echtzeit über den gesamten Lebenszyklus passiv (Verwaltung von statischen Informationen), aktiv (Bereitstellung dynamischer Daten) oder proaktiv (Kommunikation mit anderen Assets) beschreiben und steuern kann. Durch APIs, die auf den in den letzten Paragraphen erwähnten Protokolle und Standards basieren, werden die gesammelten Daten zusammengeführt, aufbereitet und in einem

einheitlichen Format dargestellt [41]. Verwaltungsschalen schaffen folglich eine herstellerübergreifende Interoperabilität und ermöglichen durchgängige und datenbasierte Entscheidungsfindung durch höhere Transparenz und Einblicke in das Produktverhalten [42]. Sie besteht aus Teilmodellen zur Beschreibung des semantischen Vokabulars und speichert diese Informationen unter definierten Eigenschaften. Welche Teilmodelle zu verwenden sind, hängt jedoch weitgehend von der Art des Assets und der Anwendung ab. Die Standardisierung der Teilmodelle befindet sich in der Entwicklung. Einige wenige Standard-Implementierungsreferenzen für AAS wurden bereits entwickelt, z. B. OpenAAS von der RWTH Aachen, Eclipse BaSyx, das bei der Eclipse Foundation gehostet und hauptsächlich vom DFKI beigesteuert wird. Das Problem ist, dass diese Ansätze nur als Proof-of-Concept in einzelnen Werken umgesetzt wurden und es daher an einer breiten Akzeptanz fehlt. Eine Empfehlung ist hier die Durchführung von groß angelegten Pilotprojekten, die das Potenzial der semantischen Interoperabilität freisetzen, sowie von Richtlinien für die Implementierung und Durchführung von Experimenten [43].

2.5.1.2 IT-Systeme zur Datenerhebung

Ein **ERP-System** ist eine umfangreiche Software, die verschiedene geschäftliche Funktionen wie Finanzwesen, Materialwirtschaft, Produktion, Vertrieb, Personalwesen und mehr in einem einzigen integrierten System verwaltet. Es dient dazu, sämtliche Ressourcen und Prozesse eines Unternehmens zu planen, zu steuern und zu überwachen, um Effizienz und Transparenz zu verbessern [44].

MES (Manufacturing Execution System), **BDE** (Betriebsdatenerfassung) und **MDE** (Maschinendatenerfassung) sind eng miteinander verbundene Systeme, die die Produktionsebene in einem Unternehmen unterstützen. Ein ME-System überwacht und steuert die Produktion (auch in Echtzeit) sowie erfasst und verknüpft unter anderem Daten zu Aufträgen, Maschinenstatus und Arbeitszeiten. BDE-Systeme erfassen spezifische Betriebsdaten wie Arbeitszeiten und Auftragsdaten, während MDE-Systeme Daten von Maschinen und Anlagen aufnehmen, wie beispielsweise Produktionsparameter oder Maschinenstörungen [45].

In der Stahlindustrie sind auch besondere **IT-Systeme für Prozessdatenerhebung und -analyse** verbreitet. Im Vergleich zu MES bieten solche IT-Systeme ein tieferes Verständnis von Prozessen der Stahlindustrie und spezielle Analyse- oder Optimierungsalgorithmen. Der Fokus liegt dabei auf der Erfassung der Mess- und Prozessdaten. Ein häufig genanntes Beispiel ist das **IBA-System** der IBA AG [46].

CAQ-Systeme unterstützen die Qualitätssicherung, indem sie Maßnahmen wie Prüfplanung, Qualitätsprüfungen, Reklamationen und Audits elektronisch abbilden. Sie ermöglichen die Erfassung von Qualitätsdaten, ihre Verdichtung zu Informationen und Kennzahlen sowie ihre Visualisierung. Ein CAQ-System hilft dabei, Qualitätsstandards einzuhalten, Fehler zu reduzieren und die Kundenzufriedenheit zu verbessern [47].

Die Grundlage für die Entwicklung eines effektiven Datenerfassungssystems bildet eine gründliche Analyse der Unternehmensstruktur, der Prozesse, der verfügbaren Datenquellen und Lösungen. Mit dem Automatisierungsgrad als grundlegendes Kriterium können Produktionssysteme in die folgenden vier Kategorien aufgeteilt werden [48]:

1. Systeme, in denen die meisten Vorgänge manuell oder mit einfachen Geräten und Werkzeugen durchgeführt werden.
2. Mechanisierte Systeme, in denen keine Automatisierungsmittel eingesetzt werden.
3. Automatisierte Systeme mit älteren oder weniger anspruchsvollen Steuergeräten, die keine Kommunikationsschnittstellen aufweisen.
4. Automatisierte Systeme mit modernen Steuergeräten, die über Netzwerkschnittstellen verfügen.

In automatisierten Produktionssystemen liegt die Herausforderung nicht in der Datenerfassung, sondern darin, mit dem Problem fehlender Daten und fehlender Schnittstellen zwischen inkompatiblen Systemen umzugehen [48]. Zur Entwicklung eines an die Produktion angepassten Datenerfassungssystems können die verfügbaren Methoden und Instrumente wie in Abbildung 2-30: Klassifizierung von Methoden der Datenerfassung in Produktionssystemen [48] klassifiziert werden:

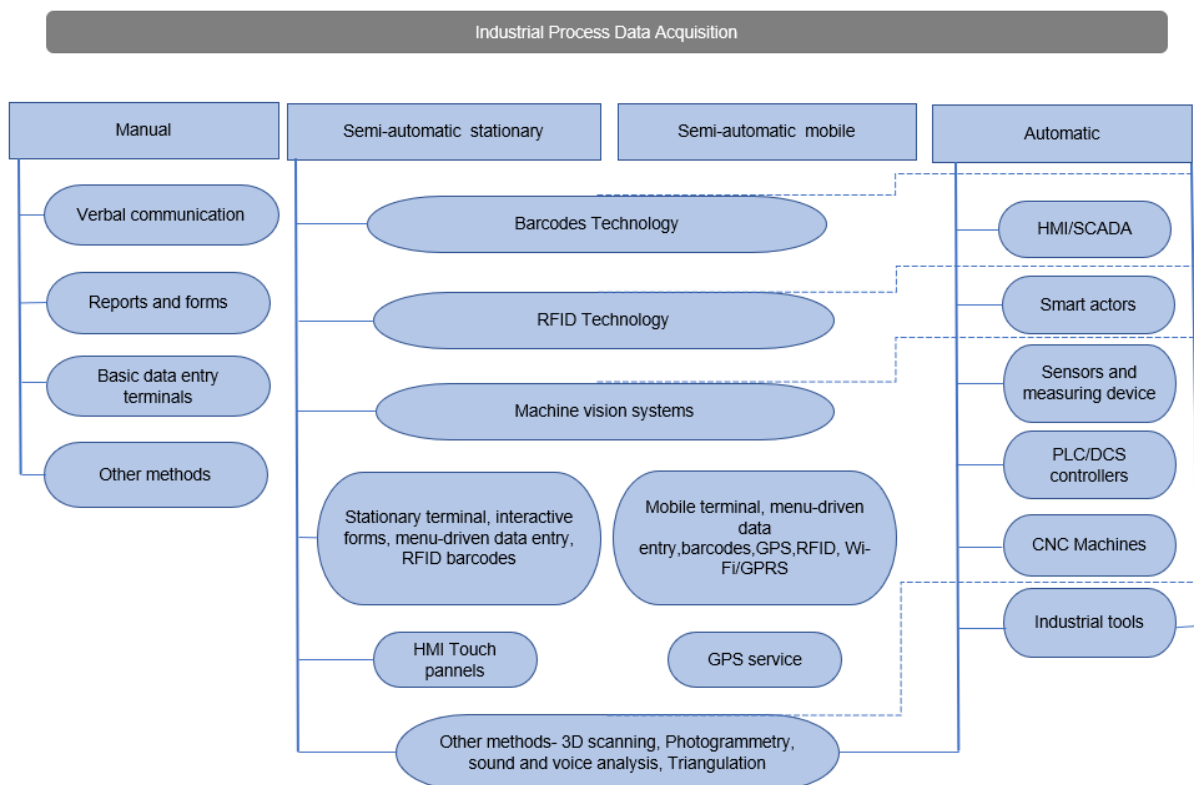


Abbildung 2-30: Klassifizierung von Methoden der Datenerfassung in Produktionssystemen [48]

Figure 2-30: Classification of data acquisition methods in production systems [48]

2.5.2 Datenspeicherung / Data storage

Sobald Daten in großen Mengen und mit hoher Geschwindigkeit erfasst werden, müssen diese Daten, die man auch als Big Data bezeichnen kann, zweckmäßig gespeichert werden, um sie zeitnah und zuverlässig abrufen zu können [49]. Die von verschiedenen Quellen erzeugten Daten haben in der Regel die Eigenschaft, sich im Unternehmen zu verteilen, da die Daten verschiedensten Datenkategorien und -typen zugehören und von unterschiedlichen Abteilungen und Personen für eine Vielzahl von

Anwendungen gebraucht werden. Im Folgenden werden die wichtigsten Standards und Technologien beleuchtet, die der höheren IT-System- und Datenintegration beitragen.

2.5.2.1 Gestaltung von IT-Architekturen und deren Elemente

Eine **Middleware** ist eine Software-Schicht, die als Verbindung zwischen Anwendungskomponenten, Datenquellen, Betriebssystemen und Netzwerken dient. Sie reduziert die Komplexität und Heterogenität von Netzwerken, Betriebssystemen und Protokollen, indem jeder Endpunkt nur eine einzige Schnittstelle zur Middleware hat [50]. Middlewares ermöglichen es Entwicklern, Anwendungen zu erstellen, ohne für jede Verbindung zwischen Endpunkten eine benutzerdefinierte Schnittstelle erstellen zu müssen. Dies geschieht durch die Bereitstellung von Diensten, die es ermöglichen, über gängige Messaging-Frameworks wie JSON (JavaScript Object Notation), REST (Representational State Transfer), XML (Extensible Markup Language), SOAP (Simple Object Access Protocol) oder Webservices zu kommunizieren. In der Regel wird es auch Komponenten, die in verschiedenen Sprachen geschrieben wurden, ermöglicht, miteinander zu kommunizieren [51]. Einige Beispiele für Middlewares, die in der Industrie eingesetzt werden können, sind der IBM WebSphere Application Server, die Oracle Fusion Middleware und Eclipse BaSys 4.

Eine Umsetzung einer Middleware sind **Eventbroker**. Diese ermöglichen die Kommunikation zwischen Systemkomponenten auf dem Prinzip der Ereignisgesteuerten Architektur (engl. event driven architecture – EDA). Ein Eventbroker empfängt Ereignisse (Events) von einer Quelle und leitet sie an die entsprechenden Zielkomponenten weiter. Dies geschieht in der Regel auf Basis von Publish/Subscribe-Mustern, bei denen die Komponenten als Publisher Ereignisse veröffentlichen und als Subscriber diejenigen Ereignisse empfangen, für die sie sich registriert haben [52]. Die Kommunikation erfolgt über definierte Protokolle, die auf offenen Standards wie HTTP, AMQP oder MQTT basieren kann. Eventbroker bieten verschiedene Vorteile, insbesondere in verteilten Systemen und Anwendungen. Sie ermöglichen eine lose Kopplung zwischen den Anwendungen und Systemen, indem sie die Ereignis-Abstraktion bereitstellen, die unabhängig von der zugrunde liegenden Implementierung ist. Außerdem können sie die Skalierbarkeit und Flexibilität verbessern, da neue Ereignis-Producer und -Consumer einfach hinzugefügt werden können, ohne dass Änderungen an den bestehenden Anwendungen erforderlich sind. Schließlich können Eventbroker auch die Wiederverwendbarkeit von Ereignissen verbessern, da sie als zentrale Sammlung von Ereignissen dienen können, die von verschiedenen Anwendungen und Systemen genutzt werden können. Durch den asynchronen Datenaustausch wird Überlastung eines Services vermieden und es entfallen blockierende und kaskadierende Aufrufe [53]. Gleichzeitig erhöht diese Asynchronität jedoch die Komplexität des gesamten Systems und die lose Kopplung der Services kann zu einer erhöhten Unübersichtlichkeit führen. Auf dem Markt gibt es eine Vielzahl von Produkten, die Event-Broker-Funktionalitäten bereitstellen. Dazu gehören bekannte Lösungen wie Kafka, RabbitMQ, IBM MQ, Google Pub/Sub und Microsoft Azure Event Grid.

Industrial Internet of Things (IIoT) umfasst vernetzte intelligente Objekte, cyber-physische Systeme sowie IT-Systeme im industriellen Kontext. Eine **IIoT-Plattform** ist

eine Middleware, die neben der Konnektivität und Integration von IT-Systemen und Assets auch als Datendrehscheibe dient und Tools zur Auswertung und Bearbeitung der erhobenen Daten dient. Sie ermöglicht den intelligenten und autonomen Echtzeit-Zugang, die Sammlung, Analyse, Kommunikation und den Austausch von Informationen über Prozesse, Produkte und/oder Services innerhalb einer industriellen Umgebung, mit dem Ziel, den gesamten Produktionswert zu optimieren. Dies geschieht durch die Bereitstellung von Applikationen und Werkzeugen, um die auf der Plattform oder extern gespeicherten Daten auszuwerten und für Entscheidungssysteme zu visualisieren [54]. Auf dem Markt sind viele solcher Plattformen erhältlich, unter anderem PTC ThingWorx, Siemens MindSphere, Bosch IoT Suite und Cisco Kinetic.

Das **Internet of Production (IoP)**, das an der RWTH Aachen entwickelt wurde, ist ein Framework, das die domainübergreifende Kollaboration durch hohe Datenverfügbarkeit definiert. Dies wird durch die kontinuierliche und hochiterative Bereitstellung von semantisch korrekten und kontextbewussten Daten ermöglicht. Das IoP adressiert die Tatsache, dass Daten in produzierenden Unternehmen oft in verschiedenen proprietären (Experten-)Systemen abgebildet werden. Diese Daten können jedoch häufig nur von Domänenexperten genutzt werden, die über das entsprechende Systemverständnis verfügen. Das IoP schafft eine Dateninfrastruktur entlang der Wertschöpfung im gesamten Unternehmen, um eine domainübergreifende Verknüpfung aller relevanten Systeme zu ermöglichen [55]. Die Daten werden nicht dupliziert, sondern als sogenannte Single Source of Truth behandelt und anderen Systemen für benötigte Operationen oder Auswertungen zur Verfügung gestellt [56]. Wenn wir den Blick über die Grenzen des Unternehmens hinaus erweitern und eine externe Perspektive einnehmen, werden auch Daten aus der Wertschöpfungskette sowie von Partnern im Ökosystem zunehmend relevant für die industrielle Datenbasis eines Unternehmens [57].

Wenn es mehrere Expertensysteme (z. B. Manufacturing Execution System (MES) oder Computer-Aided Quality Assurance System (CAQ-System)) in der Produktion eingesetzt werden, kann die Integration der IT-Systeme und Datenströme eine Herausforderung darstellen. In solchen Fällen lässt sich die Gestaltung der **IT-Architektur auf dem Shopfloor** grundlegend auf vier Architekturtypen zurückführen (s. Abbildung 2-31).

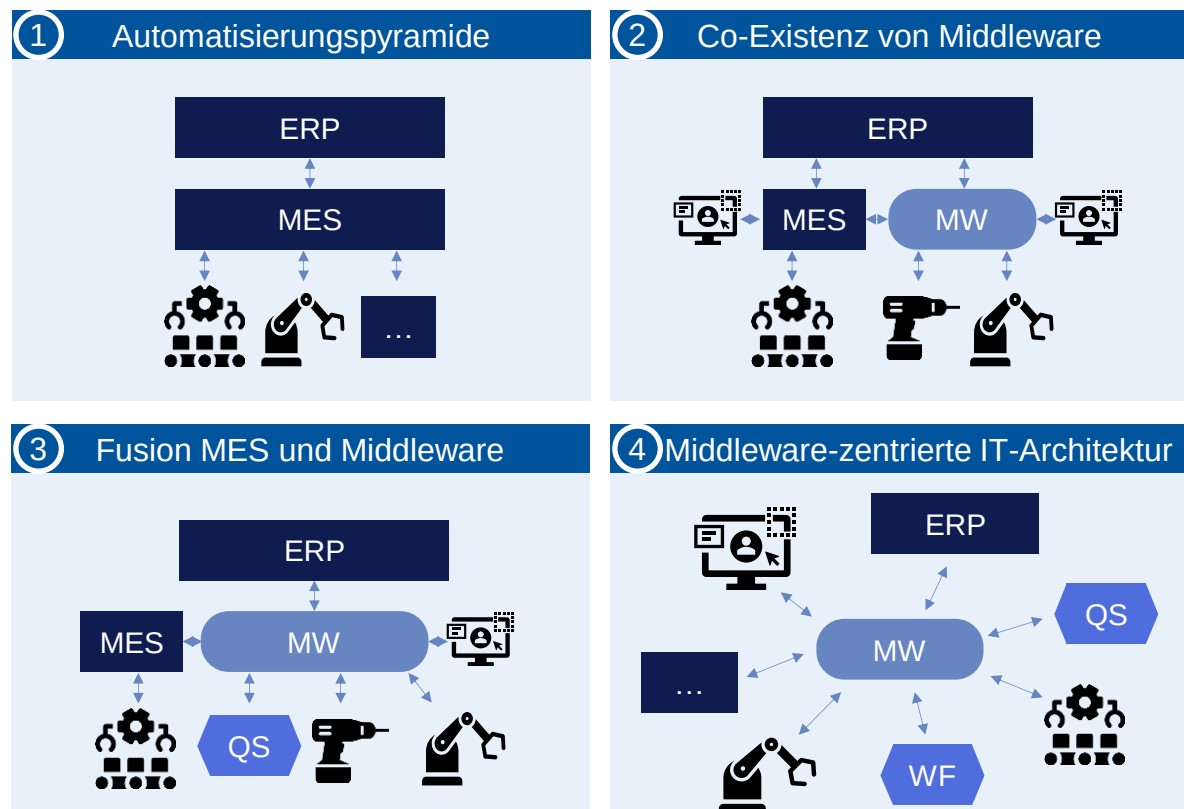


Abbildung 2-31: Vier grundlegende IT-Architekturen auf dem Shopfloor (eigene Darstellung)

Figure 2-31: Four basic IT architectures on the store floor (own illustration)

Die **Automatisierungspyramide** wird geprägt von einer stark hierarchischen Anordnung von IT-Systemen und einem 1-zu-1-Informationsfluss, bei dem beispielsweise das MES der Entscheidungsträger auf dem Shopfloor ist. Vorteilhaft sind bei diesem Architekturtypen die fortgeschrittenen Kompetenzen auf dem Markt. Allerdings resultiert dies in einer unklaren Einordnung einer großen Anzahl an IT-Systemen, z. B. Product Lifecycle Management (PLM) und Advanced Planning and Scheduling (APS) Systeme, und einer steigenden Anzahl an Schnittstellen mit jedem weiteren IT-System und Asset. Zudem kann die Duplizierung von Informationen auftreten. Insgesamt bietet dieser Architekturtyp wegen der Notwendigkeit zur tiefen Integration eine geringe operative und strategische Flexibilität und Unabhängigkeit. Daher wird es weder in der Forschung noch in der Industrie weiter untersucht oder empfohlen.

Beim zweiten Architekturtyp, der **Co-Existenz von Middleware**, wird eine Middleware zur Anbindung von vielen kleinen Assets oder nebensächlichen IT-Systemen. Zusätzlich ist der Einsatz von IIoT-Plattformen möglich, um diese IT-Systeme zu überwachen, verwalten und analysieren. Die Prozessverantwortung liegt und Anbindung von geschäftskritischen Maschinen erfolgt immer noch beim MES oder ähnlichem Expertensystem. Die hohe mögliche Anzahl an kleinen Assets und IT-Systemen bietet eine hohe Flexibilität, während das MES durch seine zentrale Rolle weiterhin als eindeutiger Ansprechpartner fungiert. Außerdem ist auf dem Markt eine hohe Anzahl an IIoT-Plattformen erhältlich. Jedoch ist auch bei diesem Architekturtypen die Einordnung von IT-Systemen wie PLM und APS nicht eindeutig und es gibt eine

geringe strategische Flexibilität wegen der weiterhin tiefen Integration. Die Anzahl der Schnittstellen steigt mit jedem weiteren großen IT-System und der Ausfall eines Systems beeinträchtigt gekoppelte Komponenten. Der Umgang mit einer Vielzahl an untergeordneten IIoT-Plattformen ist zum aktuellen Stand der Technik nicht eindeutig definiert.

Bei der **Fusion von MES** (oder einem ähnlichen IT-System) **und Middleware** wird die Middleware als zentrale Schnittstelle bzw. Kommunikationsinstanz verwendet. Es entstehen klar abgetrennte Microservices bzw. Funktionsmodule (z. B. für Qualitätssicherung oder Werkerführung). Der Einsatz eines MES erfolgt für mehrere unterschiedliche Funktionalitäten „aus einer Hand“ (z. B. Feinplanung, Energiemanagement), die noch nicht zu alleinstehenden Microservices überführt wurden. Dieser Architekturtyp bietet mehr Flexibilität bei der Anbindung diverser Assets und Systeme bei gleichzeitig erhöhter Unabhängigkeit von Systemanbietern. Dem Unternehmen wird ermöglicht die Übersicht und Kontrolle über die eigenen Daten zu behalten und bei dem Ausfall eines Systems die fortlaufende Funktionalität der anderen Systeme zu gewährleisten. Es wird jedoch ein hoher Aufwand benötigt, um geeignete Microservices zu entwickeln, betreiben und warten. Microservice-übergreifende Innovation muss vom Unternehmen selbst kommen. Wenn ein MES zudem zu viele Funktionsmodule bindet, besteht die Gefahr, dass die interne Datenübergabe oder Kommunikation nicht transparent dargestellt wird oder der Einsatz von Microservices zu Mehrkosten führen kann. Aktuell versuchen MES-Anbieter auch IIoT-Plattform-Funktionalitäten anzubieten und die zentrale Rolle auf dem Shopfloor zu behalten.

Bei der **Middleware-zentrierten IT-Architektur** wird die Middleware als zentrale Schnittstelle bzw. Kommunikationsinstanz für alle Systeme, Assets und Microservices eingesetzt. Diese Umsetzung bietet die höchste Flexibilität und Datenverfügbarkeit aller Architekturtypen. Die Middleware-zentrierte IT-Architektur stimmt mit dem IoP Framework überein. Es entsteht hierbei dennoch ein hoher konzeptioneller Aufwand der bei Definition der Microservices und Datenströme. Darüber hinaus setzt die Anwendung diesen IT-Architekturtyps hohe Kompetenzen in Weiterentwicklung, Betrieb und Wartung der gesamten IT-Architektur. Auch wie beim vorherigen IT-Architekturtyp liegen die Innovationsverantwortung am Anwenderunternehmen selbst.

2.5.2.2 Datenspeicherung und-nutzung in Cloud und Edge

Derzeit bleiben jedoch über zwei Drittel der verfügbaren Daten in Unternehmen ungenutzt. Eine Studie zeigt, dass Unternehmen im Durchschnitt etwa 36 % ihrer Daten regelmäßig von der Edge zur Cloud übertragen. Innerhalb der nächsten zwei Jahre wird dieser Anteil voraussichtlich auf 57 % steigen. Das von der Edge zur Cloud übertragene Datenvolumen wird sich in der Zeit von 8 auf 16 % verdoppeln. Diese steigende zu bewegendende Datenmenge erfordert eine effiziente Verwaltungsarchitektur dieser Daten. Die Datenverwaltung in einem Multi-Cloud-Ökosystem und in einer Hybrid-Cloud-Umgebung stellt eine der größten Herausforderungen dar, denen sich Unternehmen in den nächsten Jahren stellen müssen [56].

Beim Aufbau einer Datenbasis stehen Unternehmen vor dem Problem, dass sie nicht ausreichend Personal finden, um die fehlende Transparenz über existierende Datenquellen im eigenen Unternehmen bewältigen zu können. Zudem müssen

Prozesse der Datenspeicherung in nicht digitalisierten Umgebungen mit manueller Mehrarbeit durchgeführt werden, was sich negativ auf die Datenqualität auswirkt. Ein weiteres Hemmnis sind fehlende Standards, ausgelöst durch die rasche Entwicklung von IT-Lösungen zur Aufnahme, Speicherung und Übertragung von Daten [57].

1. Darauf aufbauend wird die Nutzung von Daten durch fünf Hauptfaktoren behindert: die effektive Nutzung der gesammelten Daten,
2. die effiziente Verwaltung der Datenspeicherung,
3. die Gewährleistung der Vollständigkeit der erforderlichen Daten,
4. die Sicherheit der gesammelten Daten und
5. die Integration verschiedener Datensilos [56].

Umfrageergebnisse zeigen, dass etwa 30 % der gespeicherten Daten in internen Rechenzentren, 20 % in Rechenzentren von Drittanbietern, 19 % in Edge-Rechenzentren oder an entfernten Standorten, 22 % in Cloud-Repositories und 9 % an anderen Orten gespeichert sind. Es wird erwartet, dass sich diese Verteilung in den nächsten zwei Jahren nicht wesentlich verändern wird, was darauf hinweist, dass die Speicherumgebungen von Unternehmen auch in absehbarer Zukunft weiterhin verteilt und komplex sein werden. Es ist daher entscheidend, dass Unternehmen in der Lage sind, diese verteilten Daten, unabhängig von ihrem Standort, effektiv zu verwalten [56].

Besonders die produzierende Industrie bevorzugt dabei die Speicherung von Daten in internen Rechenzentren. Obwohl diese Branche den größten Fußabdruck an lokalen Rechenzentren hat, verzeichnet sie eine der niedrigsten Datenwachstumsraten im Vergleich zu anderen Branchen (37 % im Vergleich zum Durchschnitt von 42,2 %). Die Erweiterung der vor Ort vorhandenen Infrastruktur gestaltet sich schwieriger in Bezug auf die Kapazität im Vergleich zu einer skalierbaren Cloud-Infrastruktur. Das produzierende Gewerbe wies zudem den geringsten Automatisierungsgrad bei den Datenverwaltungsfunktionen auf und verzeichnete die niedrigste Rate für eine vollständige Integration dieser Funktionen auf einer einzigen Plattform (nur 9 % im Vergleich zu über 19 % in allen anderen Branchen). Dies kann auf die hohe Anzahl vernetzter Geräte zurückgeführt werden [56].

Um in Echtzeit Erkenntnisse zu gewinnen und Ressourcen sowie Zeit zu sparen, kann die Analyse der gewonnenen Daten an die Edge gelegt werden, d.h. direkt an der Quelle zwischen dem Produktions-Netzwerk und dem IT-Netzwerk. Beispielhafte Anwendungen des Edge Analytics sind Machine Vision Applikationen zur Extraktion von Informationen aus Videos und Frequenzanalysen zur Schwingungsüberwachung. Die automatische Online-Auswertung ermöglicht es, einen Prozess in Echtzeit proaktiv zu überwachen, um den Prozess zu optimieren oder die Produktqualität zu erhöhen. Diese Art der Auswertung wird auch als Edge Analytics bezeichnet, da die Messdaten direkt an der Edge, d. h. zwischen dem Produktions-Netzwerk und dem IT-Netzwerk, verarbeitet werden, wo die Daten auch anfallen [58].

Es müssen jedoch ein umfassendes Abbild des Prozesses erzeugt und Korrelationen zwischen Produktion, Prozess und auftretenden Effekten wie Verschleißerscheinungen aufgezeigt werden. Dazu sollen Messdaten in einer für das ganze Unternehmen gemeinsam Datenbasis zur Verfügung stehen [58]. Eine gemeinsame Digitalisierungsstrategie, die von allen Abteilungen getragen wird, ermöglicht es, unternehmensübergreifende Synergien zu realisieren. Hierfür ist eine geeignete

Unterstützung seitens IT-Systemen erforderlich. Diese sollen einen einfachen Zugriff auf die Daten ermöglichen, sodass verschiedene Anwendergruppen Auswertungen selbstständig und an ihre spezifischen Anforderungen angepasst durchführen können. Beispielsweise stellt das iba-System (s. Abbildung 2-32: Architektur des iba-Systems als offenes Ökosystem [58]) als offenes Ökosystem eine Vielzahl von Methoden und Schnittstellen zur Verfügung, um die Daten über das Messsystem hinaus zu nutzen, insbesondere für Analysen [58].

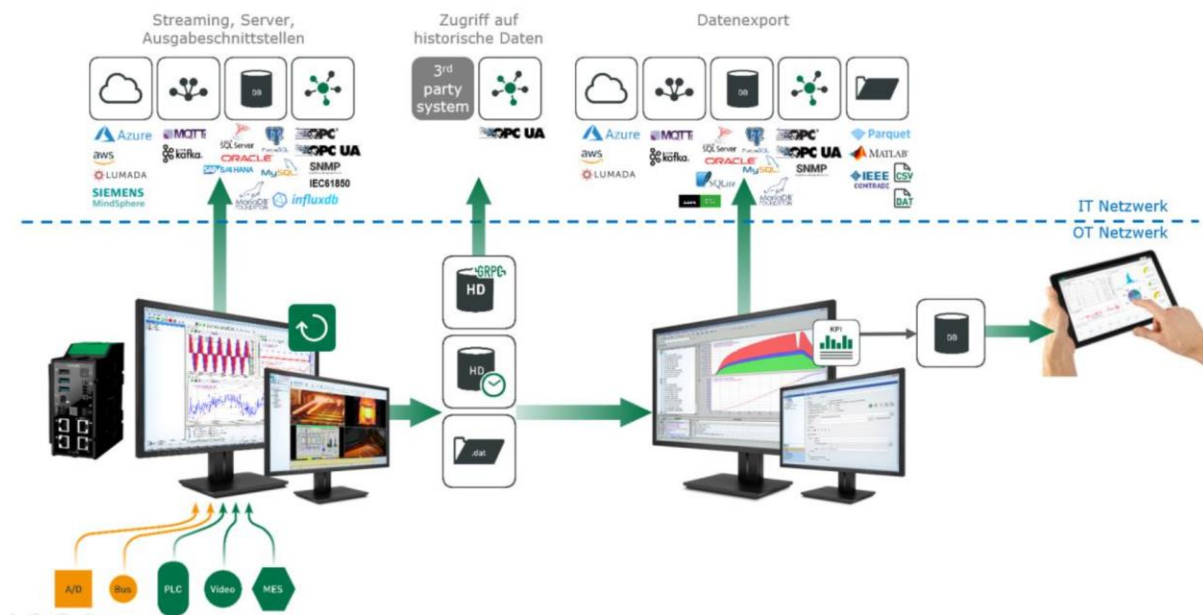


Abbildung 2-32: Architektur des iba-Systems als offenes Ökosystem [58]

Figure 2-32: Architecture of the iba system as an open ecosystem [58]

2.5.3 Datenübertragung / Data transmission

Die Datenaufnahme ist der Ausgangspunkt für die Entwicklung datengesteuerter Produktionssysteme. Die größte Herausforderung ist jedoch der Mangel an semantischer Datenbeschreibung und Infrastruktur für die Datenübertragung [59]. Die Standardisierung des Datenaustausches in der Stahlindustrie ist demnach ein wichtiger Schritt, um die Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Unternehmen zu verbessern. In diesem Kapitel werden die zentralen Aspekte für die Datenübertragung beschrieben.

2.5.3.1 Schnittstellen

Application Programming Interfaces (APIs) sind Schnittstellen, die es Anwendungen ermöglichen, miteinander zu kommunizieren und Daten auszutauschen. Im Allgemeinen gibt es zwei Arten von APIs: Web-APIs, die hauptsächlich für Integrationszwecke verwendet werden, nutzen internetbasierte Protokolle wie HTTP und ermöglichen den Zugriff auf festgelegte Informationen. Mit native APIs hingegen wird auf einem tieferen Level auf die Ressourcen eines Systems zugegriffen und sie sind für Integrationszwecke ungeeignet [60]. Durch APIs können somit Anwendungen entwickelt werden, die auf bereits vorhandene Dienste, Funktionen oder Daten von anderen Anwendungen zugreifen können. Wie andere Integrationstechnologien verwenden auch webbasierte APIs XML oder JSON als Kommunikationsstandard [61].

Representational State Transfer (REST) ist ein Architekturstil für die Kommunikation zwischen Client und Server und wird hauptsächlich für die Maschine-zu-Maschine-Kommunikation eingesetzt. Es wird in verteilten und lose gekoppelten Systemen verwendet und ist der De-facto-Architekturstil für webbasierte Systeme. Die Verwendung von REST kann sich positiv auf bestimmte Qualitätsmerkmale eines Systems wie die Interoperabilität und die Flexibilität auswirken. Allerdings können andere Aspekte wie die Leistung und Zuverlässigkeit auch negativ beeinflusst werden [62]. REST basiert auf dem Prinzip, dass Ressourcen über eindeutige URIs (Uniform Resource Identifiers) identifiziert werden und über standardisierte HTTP-Methoden abgerufen, erstellt, aktualisiert oder gelöscht werden können. RESTful APIs verwenden in der Regel JSON als Datenformat für den Austausch von Informationen. Ein wichtiger Aspekt in der REST-Architektur ist die Zustandslosigkeit der Server, durch die der Server keine Informationen über den Zustand des Clients oder vergangene Anfragen speichern muss. Durch die Zustandslosigkeit und die Verwendung von URL-basierten Anfragen ermöglicht REST neben der losen Kopplung zwischen Client und Server auch eine hohe Skalierbarkeit [63].

2.5.3.2 Sprachen

Im Folgenden sind die verschiedenen Sprachen aufgeführt, die für die Kommunikation verwendet werden.

Extensible Markup Language (XML) ist eine Auszeichnungssprache zur Darstellung strukturierter Daten in Form von Textdateien. Die Sprache ermöglicht die Definition eigener Tags und Strukturen, um Informationen hierarchisch und semantisch zu organisieren. Es wird häufig verwendet, um Daten zwischen verschiedenen Systemen auszutauschen, da XML plattformunabhängig und gut lesbar sowohl für Menschen als auch für Maschinen ist [64].

JavaScript Object Notation (JSON) ist ein leichtgewichtiges Datenformat zur strukturierten Darstellung von Daten und basiert auf einer einfachen Syntax, die aus Schlüssel-Wert-Paaren (z.b. „Alter“: 30) besteht. Es ist sowohl für Menschen als auch für Maschinen leicht lesbar und verständlich. Es ist das am weitesten verbreitete Datenformat für das Senden von API-Anfragen und -Antworten über das HTTP-Protokoll [65].

YAML ist eine rekursive Abkürzung für "YAML Ain't Markup Language" und legt den Fokus auf das Design als Datenspeicherformat. Es handelt sich um eine leichtgewichtige Serialisierungssprache, die in erster Linie darauf abzielt, einfach zu lesen und zu bearbeiten zu sein [66]. YAML wird häufig in Konfigurationsdateien, Skripten und Datenstrukturen und somit auch als Konfigurationssprache von Cloud-Plattformen und Infrastruktur-Automatisierungstools verwendet [67].

2.5.3.3 Datenplattformen

Datenplattformen spielen eine entscheidende Rolle bei der Förderung von Datensouveränität, Datenverfügbarkeit und damit verbundenen Innovationsmöglichkeiten im europäischen Raum [68]. Diese Einschätzung wird durch eine Studie der Beratungsgesellschaft McKinsey gestützt, die besagt, dass bis zum

Jahr 2025 mehr als 30 % des globalen Bruttoinlandsprodukts durch Plattformen generiert werden [69].

Datengetriebene Plattform Ökosysteme (DPÖ) sind eine formalisierte und automatisierte Art des Datenaustauschs zwischen Unternehmen. Sie bieten Vorteile im Vergleich zum herkömmlichen Datenaustausch über Excel-Sheets und E-Mails [70]. Das Ziel ist es, den unternehmerischen Wert von Daten zu maximieren, indem die richtigen Daten zur richtigen Zeit am richtigen Ort zur Verfügung gestellt werden. Daten, die innerhalb des Ökosystems aufgenommen, übertragen, konsolidiert und verwendet werden, sind dementsprechend die primäre Ressource [70].

Verglichen mit klassischen Plattformökosystemen (PÖ) grenzen sich DPÖs in erster Linie durch die Wertbildung ab. In einem PÖ stellt ein Platform Leader die Plattform bereit, verwaltet und reguliert, und ist für übergeordnete Themen wie Datenschutz, Standardisierung und Zuverlässigkeit verantwortlich. Drittunternehmen („Complementors“) können die Plattform durch ihre eigenen Angebote ergänzen. Durch die Verwendung der Plattform-Infrastruktur über ein User-Interface und die Kombination ihrer Angebote können Unternehmen einen höheren gekoppelten Wert erzielen als die Angebote einzeln darstellen. Da bei DPÖs der primäre Zweck der Austausch von Daten zwischen den Teilnehmern ist und die Wertschöpfung somit dezentral erfolgt, haben Endnutzer keinen Zugriff auf eine Plattform. Auf dem Markt gibt es jedoch keine eindeutige Unterscheidung von PÖ und DPÖ [70].

Die Literatur bietet bereits renommierte Artikel [71], die Prozesse zur Gestaltung und Implementierung von Plattformen entwickelt haben. Die Prinzipien von PÖs sind jedoch nicht direkt auf DPÖs übertragbar.

Unter anderem sind die Umsatzverteilung, da kein direkter Umsatz durch DPÖs generiert wird, und der Umgang mit Grenzressourcen, da Daten als Hauptressource multiplizierbar sind, eine Herausforderung. Es existiert somit eine Forschungslücke bezüglich der Gestaltung von DPÖs für die Maximierung des (inter-)nationalen Datenaustauschs.

Es entstehen hohe Anforderungen an das interne Datenmanagement, wovon Unternehmen allerdings selbst profitieren können. Daten werden qualitativ hochwertig verwaltet und gespeichert, was zu einer verbesserten Datenverfügbarkeit führt, die als Grundlage für innovative Projekte genutzt werden kann. DPÖs führen damit zur Verbesserung der Produktqualität, höherer Individualisierbarkeit von Produkten und wettbewerbsorientierten Preisgestaltung [70].

In Deutschland lassen sich digitale B2B-Plattformen in zwei Hauptkategorien unterteilen. Zum einen gibt es datenzentrierte Plattformen, die sich auf die Analyse und Verarbeitung von Daten konzentrieren und neue Erkenntnisse generieren. Zum anderen gibt es transaktionszentrierte Plattformen, die darauf abzielen, die Effizienz von Unternehmensprozessen zu steigern. Hierbei stehen Aspekte wie Einkauf, Verkauf, Logistik, Supply Chain und die Zusammenarbeit der Marktteilnehmer im Mittelpunkt [72]. Der Fokus des vorliegenden Berichts liegt auf Daten(transaktions-)plattformen, die diese beiden Kategorien vereinen.

Aktuell existieren keine solcher Ökosysteme, die sich auf den Datenaustausch in der Stahlindustrie fokussieren. Ein Beispiel einer branchenübergreifenden Lösung, die sich

auf die Referenzarchitektur der International Data Spaces Association (IDSA) und dem europäischen Gaia-X Projekt stützt, ist der Advaneo Digital Marketplace. Auch die Siemens MindSphere World Knowledge Exchange ist eine branchenübergreifende Plattform, auf der Mitglieder ihre Best Practices, Anwendungsfälle, technische Lösungen und branchenspezifische Erkenntnisse austauschen können [73]. Als Vorbild für die Umsetzung einer umfassenden Datenplattform können die Luftfahrtindustrie mit dem Aviation DataHub und die Chemieindustrie mit chembid dienen. Diese Branchen haben bereits Plattformen etabliert, die eine breite Palette an Daten-, Infrastruktur- und Plattformservices für verschiedene Anwendungsfälle bieten [72]. Mit Catena-X wird aktuell auch in der Automobilbranche ein offenes und sicheres Datenökosystem geschaffen. Das Projekt hat die Aufgabe, den digitalen Informationsfluss über die gesamte Lieferkette zu ermöglichen. Es geht darum, die Materialströme rückverfolgbar zu machen und den Forderungen nach Transparenz gerecht zu werden, die auch vom Gesetzgeber erwartet werden. Dabei sollen alle Akteure in durchgängigen Wertschöpfungsketten vernetzt sein, ihre Daten souverän kontrollieren können und keine Lock-in-Effekte auftreten. Dies soll besonders für KMU eine nachhaltige Lösung bieten und die Kooperation und Zusammenarbeit von Marktteilnehmern und Wettbewerbern unterstützen [74].

2.6 Technologien für die Entwicklung der Datenplattform / Technologies for the development of Dataplatform

Technologien bilden die Basis der Datenübertragung. Für die Datenübertragung werden die vier grundlegenden Technologien Electronic Data Interchange (EDI), Cloudbasierte Lösungen, Blockchain und Data Spaces (z.B. auf Basis von International Data Spaces (IDS)) eingesetzt.

2.6.1 EDI-Konzepte / Concept of EDI

2.6.1.1 Grundlagen

Ein EDI kann als der elektronischere Informationstransfer zwischen Unternehmen innerhalb einer Lieferkette bezeichnet werden. Durch die Verwendung von Dokumenten, welche spezifischen Protokollen, Kommunikationsstandards und Sprachen unterliegen, kann der Fluss von Gütern besser abgebildet und überwacht werden [75]. EDI bezeichnet die elektronische Datenübertragung zwischen Einkäufern und Herstellern, welche dazu dient, interorganisationelle Prozesse zu fördern und somit den Service und die Lieferleistung zu optimieren. Bereits in den 1960-er Jahren wurde EDI in den USA verwendet, um Daten strukturiert zwischen Partnern innerhalb einer Lieferkette auszutauschen. Die Verwendung von EDI kann dabei helfen, Verkäufe und den Profit zu steigern [76]. EDI ist ein elektronischer, papierloser Austausch von Geschäftsdaten zwischen den Anwendungssystemen verschiedener Unternehmen [77].

2.6.1.2 Standards und Protokolle in EDI

Die im EDI verwendeten Standards spiegeln die Datenstruktur wider und enthalten Informationen über den Datentyp, die Struktur, den Inhalt und die zeitliche Abfolge.

Protokolle charakterisieren die Regeln für den Datenaustausch und beinhalten Vereinbarungen in Bezug auf Datenformate, Zeitpunkt und Fehlerbehandlung während der Datenübertragung [77].

Anwendung verschiedener Standards in EDI

Im Folgenden werden einige der weltweit verwendeten Standards vorgestellt.

- American national standards institute accredited standards committee X12I (ANSI ASC X12I): ANSI ASC X12I ist ein Standard, der hauptsächlich in amerikanischen Märkten verwendet wird [75].
- Electronic data interchange for administration, commerce and transport (EDIFACT): EDIFACT ist ein in den USA entwickelter Standard, der die Beschränkungen nationaler oder regionaler Normen beseitigt, um allen Sektoren und der öffentlichen Verwaltung gerecht zu werden [78]. Der Standard European article number communication (EACOM) ist Teil des EDIFACT-Standards und findet hauptsächlich in der Konsumgüterindustrie Anwendung. Ähnlich dazu gibt es noch die Standards EDIFICE (für die Hightech-Industrie) und CEFIC (für die Chemieindustrie), die ebenfalls beide Teil des EDIFACT-Standards sind [79].
- Verband der deutschen Automobilindustrie (VDA): VDA ist ein Standard, der von der deutschen Automobilindustrie entwickelt wurde und dazu dient, den Datenaustausch zwischen Herstellern und Lieferanten zu regeln. Auch VDA ist Teil des EDIFACT-Standards [78].
- Organization for data exchange by teletransmission in europe (ODETTE): ODETTE ist ähnlich wie VDA ein Standard für die Automobilindustrie. Jedoch richtet sich dieser Standard an Hersteller und Lieferanten weltweit. ODETTE ist ebenso Teil des EDIFACT-Standards [78].

Anwendung verschiedener Protokolle in EDI

Protokolle kann man zunächst in klassische und internetbasierte Protokolle trennen. Das klassische X.400-Protokoll, entwickelt durch die International Telecommunication Union (ITU), ist unabhängig vom Hersteller und der Plattform. Die Struktur eines X.400-Protokolls ist standardisiert und gilt weltweit [77]. Im Folgenden werden einige auf dem Internet basierende Protokolle vorgestellt.

- File transfer protocol (FTP): FTP wird in erster Linie dazu verwendet, größere Datenmengen zu übertragen oder Website-Aktualisierungen vorzunehmen. Dazu müssen die Systeme mit dem Internet verbunden sein [80]. Bei diesem Protokoll werden die Daten in Textform gespeichert, wodurch das Daten nicht vollumfänglich sicher sind. Es besteht die Möglichkeit, ein FTPS-Protokoll (file transport protocol secure) zu verwenden, um diese Sicherheitslücke zu schließen [81].
- Simple mail transfer protocol (SMTP): Dieses Protokoll ist einfach anzuwenden, allgegenwärtig und die Kommunikationskosten sind gering. Um die Sicherheit zu gewährleisten, wird SSL-Tunneling (secure socket layer) verwendet [77].
- Hypertext transfer protocol (HTTP): HTTP ist ebenso wie SMTP ein Internetprotokoll, das auf dem World Wide Web basiert. Der Transfer erfolgt zwischen Client und Server [77]. Ähnlich wie beim FTPS-Protokoll, besteht die Möglichkeit eines umfassenderen Schutzes durch eine zusätzliche SSL-Verschlüsselung. Folglich ergibt sich ein HTTPS-Protokoll (hypertext transfer protocol secure) [81].

- Applicability Statement 1 (AS1): AS1 legt die Art und Weise fest, wie Daten über E-Mails übertragen werden [81]. AS 1 nutzt Verschlüsselungen für die Benachrichtigung über die Zustellung von Nachrichten [80].
- Applicability Statement 2 (AS2): Das AS2-Protokoll definiert den Schritt der Umwandlung eines HTTP-Protokolls in ein HTTPS-Protokoll über das Internet [80].
- Applicability Statement 3 (AS3): Dieses Protokoll beschreibt den Standard, FTS-Protokolle auf sichere Weise an Geschäftspartner zu übermitteln. AP1, AP2 und AP3 bieten, verglichen mit FTPS- und HTTPS-Protokollen, eine zusätzliche Sicherheitsschicht [81].

2.6.1.3 EDI-Typen

EDI kann in zwei Kommunikationstypen unterteilt werden. Eine Form der Kommunikation wird als "Speichern und Weiterleiten", die andere als "Punkt-zu-Punkt" bezeichnet. Im Folgenden werden diese beiden Formen der Kommunikation genauer beschrieben.

EDI basierend auf dem „Punkt-zu-Punkt“-Prinzip

In diesem EDI-System sind die ERP-Systeme der Geschäftspartner direkt miteinander verbunden. Dieser Kommunikationstyp passt zu Branchen, in denen zeitkritische Daten zur rechtzeitigen Produktion übermittelt werden [77]. Diese Kategorie wird ebenfalls als internes EDI oder direktes EDI bezeichnet, wobei die Software, Telekommunikation und die notwendigen Fähigkeiten zur Datenflussverwaltung vor Ort umgesetzt werden. Die Geschäftspartner definieren vorab den EDI-Standard und die Protokolle für den Datenaustausch [75].

EDI basierend auf dem „Speichern und Weiterleiten“-Prinzip

Bei dieser Form des EDI wird das Prinzip der Mailbox verwendet. Dies bedeutet, dass jeder Benutzer über eine Mailbox verfügt, die mit einem „Value-Added Network“ (VAN) oder einem Browser verbunden ist, der die Transaktion zwischen zwei Mailboxen durchführt. Der VAN-Betreiber oder der Browser-Anbieter gewährleistet, dass die Datenübertragung nach festgelegten Standards erfolgt [82]. Eine direkte Verbindung zwischen den Informationssystemen der Unternehmen ist nicht notwendig. Dieses Verfahren gewährleistet ein erhöhtes Maß an Datensicherheit [77]. Nach [75] kann dieser EDI-Typ in zwei weitere Kategorien unterteilt werden. Zum einen in einen externen EDI, wo die Informationssysteme beider Partner über einen VAN miteinander verknüpft sind [80]. In dieser Variante werden EDI-Dienste an einen externen Serviceanbieter ausgelagert, der dem Kundenunternehmen Anwendungen, Hardware, Telekommunikation und Plattform bereitstellt. Wenn der Anbieter Software zur Verfügung stellt, wird dies als „Software as a Service“ (SaaS) bezeichnet. Wenn er eine Plattform anbietet, handelt es sich um „Platform as a Service“ (PaaS). Im externen EDI erfolgt die Gebührenberechnung des Dienstleisters hauptsächlich auf Basis von Verbrauch und Nachfrage des Kunden. Ein wesentlicher Vorteil dieser EDI-Variante liegt darin, dass das Unternehmen sich nicht um Wartung, Betrieb und Hosting des EDI kümmern muss [75].

Die zweite Unterkategorie dieser EDI-Variante wird als Web-EDI bezeichnet. Web-EDI stellt eine internetbasierte Lösung dar, die speziell für kleine und mittelständische

Unternehmen (KMU) ohne ausreichende Ressourcen zur Datenübermittlung mit Partnern entwickelt wurde. Es erfordert lediglich eine minimale Investition [75]. Üblicherweise übernimmt der größere Partner die Implementierungskosten, während der kleinere Partner lediglich Zugriff auf die Daten erhält. Diese Methode erfordert keine spezielle Softwareinstallation seitens der Unternehmen. Die KMUs nutzen einen Browser, um elektronische Dokumente zu empfangen, zu erstellen und zu verwalten. Die einzige Voraussetzung für die Implementierung ist der Zugang zum Internet und zu einem Browser [79].

2.6.2 Cloud Computing Technologie / Cloud computing technology

In diesem Abschnitt wird die Technologie des Cloud Computing vorgestellt und die Anwendung dieser Technologie auf den Datenaustausch genauer betrachtet.

2.6.2.1 Grundlagen der Cloud Computing Technologie

Cloud-Computing-Technologie ist ein leistungsstarkes Werkzeug, das die Echtzeitfreigabe von Ressourcen ermöglicht und verschiedene Speicher- und Zugriffsanwendungen bietet, was dazu beiträgt, einen Wettbewerbsvorteil zu schaffen, indem Kosten reduziert werden [83]. Das National Institute of Standards and Technology definierte Cloud-Computing als "ein Modell zur Bereitstellung von bequemem, bedarfsgerechtem Netzwerkzugriff auf einen gemeinsamen Pool konfigurierbarer Rechenressourcen (z. B. Netzwerke, Server, Speicher, Anwendungen und Dienste), die schnell bereitgestellt und mit minimalem Verwaltungsaufwand oder Interaktion mit dem Diensteanbieter freigegeben werden können [84]." In der Cloud-Technologie sind Ressourcen nicht auf dem Unternehmensgelände vorhanden, sondern virtuell und können bei Bedarf mithilfe von Webtechnologien und dem Internet abgerufen werden [85].

Cloud-Computing weist mehrere Merkmale auf. Das Merkmal der bedarfsgesteuerten Selbstbedienung bezieht sich auf die Möglichkeit, Rechenkapazitäten ohne menschliche Interaktion immer dann anzufordern und zu nutzen, wenn sie benötigt werden [86]. Breiter Netzwerkzugriff bezieht sich auf die Möglichkeit, Ressourcen mit jedem Gerät, das mit der Cloud verbunden ist, wie einem Laptop oder einem Mobilgerät, abzurufen [87]. Die Merkmale der schnellen Elastizität und Skalierbarkeit drehen sich alle um die Fähigkeit, Ressourcen schnell hinzuzufügen und freizugeben, um die sich ändernde Nachfrage des Verbrauchers zu erfüllen. Während einer hohen Nachfrage ist es möglich, die Ressourcen zu skalieren, und bei geringerer Nachfrage zu reduzieren [88]. Das Merkmal des Ressourcen-Pooling ist die Fähigkeit des Diensteanbieters, Ressourcen zur Erfüllung der Verbrauchernachfrage aus verschiedenen Verbrauchern zu bündeln. Hierzu verwenden Diensteanbieter Mehrmandantenmode, bei denen virtuelle Ressourcen dynamisch den Verbrauchern zugewiesen werden [87].

2.6.2.2 Servicemodelle des Cloud Computing

Der Cloud-Dienstleister und der Verbraucher sind verschiedene Akteure in einem Cloud-Kontext. Der Cloud-Dienstleister bietet drei verschiedene Service-Modelle

basierend auf den Anforderungen des Verbrauchers an [84]. Diese werden im Folgenden beschrieben:

SaaS

Im SaaS-Service-Modell des Cloud Computing stellt der Cloud-Dienstleister die Software in der Cloud bereit. Der Verbraucher kann die bereitgestellte Software auf einer Cloud-Infrastruktur nutzen [89]. Der Endbenutzer muss die Software nicht auf seinen eigenen Geräten installieren, sondern kann sie direkt online verwenden [84]. Die SaaS-Anwendungen können in Echtzeit über eine Benutzeroberfläche wie einen Webbrowser aufgerufen werden. Der Dienstleister verwaltet die gesamte Cloud-Infrastruktur, einschließlich Netzwerken, Betriebssystemen, Speicher und Server. Der Hauptvorteil des SaaS-Modells besteht darin, dass es die Verantwortung für das Verwalten und Bereitstellen der Software vom Verbraucher auf den Anbieter verlagert. Dadurch entfallen die zusätzlichen Kosten und Komplexitäten für die Verwaltung und Bereitstellung der Software. Zusammen damit unterstützt das SaaS-Modell systematische Unterstützung, was die Notwendigkeit für jährliche Wartung beseitigt. Die Möglichkeit, die Software mit anderen Verbrauchern zu teilen, kann zu Kostenteilung und damit zu wirtschaftlichen Skaleneffekten führen [89].

PaaS

Im PaaS-Modell können Verbraucher ihre selbst erstellten oder erworbenen Anwendungen auf der von dem Dienstleister bereitgestellten Cloud-Infrastruktur bereitstellen. Der Verbraucher kann Programmiersprachen, Bibliotheken, Dienste und Tools nutzen, die vom Cloud-Anbieter bereitgestellt werden, um die Anwendung zu erstellen [84]. Der Cloud-Dienstleister stellt die Infrastruktur, die Betriebs- und Entwicklungsumgebung bereit, um die von den Verbrauchern erstellten Anwendungen bereitzustellen. Der Vorteil von PaaS im Vergleich zu SaaS besteht darin, dass der Benutzer Anwendungen erstellen und anpassen kann. Die Benutzer können die manipulationssicheren Einrichtungen nutzen, um vertrauliche Daten zu speichern und zu verarbeiten [89].

Infrastruktur als ein Service (IaaS)

Im IaaS-Service-Modell des Cloud-Computing erhalten Verbraucher die Möglichkeit, Rechenleistungen bereitzustellen, die Verarbeitung, Speicherung, Netzwerke und andere Computerressourcen umfassen können. Der Verbraucher kann die Software bereitstellen und ausführen, einschließlich Betriebssystemen und Anwendungen [84,89]. Der Cloud-Anbieter verwaltet die Hauptinfrastruktur der Cloud. Andererseits kontrolliert der Verbraucher Speicher, bereitgestellte Anwendungen und Betriebssysteme mit begrenzter Kontrolle über Netzwerkkomponenten. Im Gegensatz zu PaaS kontrolliert der Verbraucher die Hardware in IaaS [89].

2.6.2.3 Typen von Clouds

Basierend auf der Art des Zugangs kann Cloud Computing in fünf Bereitstellungsmodelle unterteilt werden [86]. Diese lauten wie folgt:

Public Cloud (Öffentliche Cloud)

In der öffentlichen Cloud gehört die Cloud einer Organisation, die die Dienste bereitstellt, und die Cloud-Infrastruktur steht der Öffentlichkeit oder einer großen

Gruppe von Branchen zur Verfügung. Diese Clouds sind über das Internet gehostet und können von jedem mit Internetzugang genutzt werden. Die Dienste werden auf Grundlage einer Pay-per-Usage-Gebühr abgerechnet [89]. Um die öffentliche Cloud zu nutzen, müssen sich Endbenutzer beim Cloud-Dienstleister registrieren [86]. Der Hauptnachteil der öffentlichen Cloud besteht in der Datensicherheit und -privatsphäre. Benutzer der öffentlichen Cloud wissen nicht, wo die Daten gespeichert sind und ob eine unbefugte Person darauf zugreifen kann [89].

Private Cloud

Bei dieser Art von Cloud-Infrastruktur handelt es sich um eine dedizierte Umgebung, die ausschließlich einer Organisation gehört. Diese Clouds können sich vor Ort (on-premises) oder außerhalb (off-premises) befinden und werden entweder von der Organisation selbst oder einem Drittanbieter verwaltet. Das Rechenzentrum des Unternehmens hostet die Cloud, und nur interne Mitglieder der Organisation haben Zugriff auf die Dienste [89]. Die private Cloud ist teurer als die öffentliche Cloud, bietet jedoch eine höhere Produktivität. Im Vergleich zur öffentlichen Cloud sind private Clouds sicherer und privater [86]. Die Organisation hat mehr Kontrolle über die Infrastruktur und Ressourcen und muss sich um die Kosten für den Kauf von Ausrüstung, Software und Personal kümmern [89].

Hybrid Cloud

Eine hybride Cloud ist eine komplexe Form, bei der zwei oder mehr verschiedene Arten von Clouds kombiniert werden. Die Mitglieder der hybriden Cloud behalten ihre individuelle Identität, sind jedoch über eine standardisierte Technologie miteinander verbunden, die Anwendungs- und Datenportabilität ermöglicht [85]. Es gibt zwei Möglichkeiten, eine hybride Cloud zu bilden. Eine Möglichkeit besteht darin, dass der Anbieter der privaten Cloud eine Partnerschaft mit dem Anbieter der öffentlichen Cloud eingeht, und die andere Möglichkeit ist umgekehrt [89]. Private Clouds eignen sich für kritische Aufgaben, während öffentliche Clouds für weniger kritische Aufgaben geeignet sind [86]. Unternehmen können von der Skalierbarkeit und den kostengünstigen Vorteilen der öffentlichen Cloud sowie den Vorteilen von Sicherheit und Datenschutz der privaten Cloud profitieren, indem sie eine hybride Cloud verwenden [89].

Community Cloud

Die Community Cloud liegt zwischen der öffentlichen und der privaten Cloud, wobei die Cloud-Infrastruktur und Ressourcen von zwei oder mehr Organisationen gemeinsam genutzt werden [89]. Diese Organisationen teilen gemeinsame Richtlinien sowie Sicherheits- und Datenschutzbedenken. Die Community Cloud kann von einem Drittanbieter oder einem der teilnehmenden Mitglieder gehostet werden [86]. Der Hauptvorteil der Community Cloud liegt in der Kostenverteilung unter den Teilnehmern. Darüber hinaus kann das Cloud-Management an einen neutralen und vertragsgebundenen Cloud-Anbieter ausgelagert werden. Die Community Cloud wird hauptsächlich in der Lieferkette eingesetzt, da die in der Cloud gespeicherten Informationen genutzt werden können, um die Kunden besser zu bedienen und die Sichtbarkeit und Nachverfolgung zu verbessern. Das Teilen der Speicherkapazität und

die höheren Kosten im Vergleich zur öffentlichen Cloud sind die Nachteile der Community Cloud [89].

Sealed Cloud

Die Sealed Cloud ist eine Technologie, die von der Uniscon GmbH in Partnerschaft mit dem Fraunhofer-Institut für Angewandte und Integrierte Sicherheit im Rahmen des Trusted Cloud-Programms des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie sowie des Unternehmens Securenet entwickelt wurde. Diese Technologie ermöglicht eine rechtlich konforme Nutzung von Cloud Computing. Sie kümmert sich um die technische Sicherung der Rechenzentren, sodass Cloud-Betreiber keinen Zugriff auf die Daten erhalten [90]. Während der Datenverarbeitung in der Cloud können Cloud-Anbieter auf die Daten zugreifen. Daher besteht immer ein Risiko erheblicher Schäden durch den Missbrauch von Daten. Die Sealed Cloud löst dieses Problem, indem sie das Rechenzentrum sichert und den Transport zu und von dem Rechenzentrum sowie das Speichersystem in der Datenbank schützt [90].

2.6.3 Blockchain-Technologie / Blockchain technology

In diesem Abschnitt wird die Blockchain-Technologie und deren Anwendung im Datenverkehr hervorgehoben.

2.6.3.1 Grundlagen der Blockchain-Technologie

Blockchain ist eine Distributed-Ledger-Technologie, die fälschungssicher ist und nicht verändert werden kann [91]. Im Gegensatz zu anderen Technologien wie EDI funktioniert die Blockchain-Technologie in dezentralen Umgebungen, in denen jede Transaktion durch Konsens validiert und in Blockformat gespeichert wird. Die Benutzer des Netzwerks validieren die Transaktionen und erstellen den Block. Diese Blöcke sind mit anderen Blöcken verbunden und bilden so eine nachverfolgbare und transparente Kette [92]. Der Hauptvorteil der dezentralen Umgebung besteht darin, dass keine zentrale Autorität benötigt wird, da die Benutzer die Transaktionen mithilfe eines verteilten Konsenses validieren und speichern [91]. Die wichtigsten Merkmale der Blockchain-Technologie, die sie für industrielle Anwendungen geeignet machen, sind nachstehend aufgeführt.

Dezentralisierung: Wie oben hervorgehoben wurde, benötigt die Blockchain-Technologie keine Vermittler, da sie auf einem Peer-to-Peer-Netzwerk arbeitet, in dem ein Konsensmechanismus verwendet wird, um alle Transaktionen zu validieren [93].

Unveränderlichkeit: Die Einträge in der Blockchain sind unantastbar und können nicht verändert werden [93].

Pseudonymität: Beim Durchführen von Transaktionen oder der Übertragung von Daten mithilfe der Blockchain-Technologie ist es möglich, anonym zu bleiben, was bedeutet, dass die Offenlegung der Identität nicht erforderlich ist [93].

Gleichheit und Verteilung von Rechten: Alle Benutzer des öffentlichen Blockchain-Netzwerks haben die gleichen und gleichen Rechte. In privaten Netzwerken besteht jedoch die Möglichkeit, privilegierte Parteien zu ernennen [93].

Vertrauen und Herkunft: In der Blockchain-Technologie kann jederzeit von jedem Ort auf alle Informationen zugegriffen werden, und sie bietet einen unbestreitbaren Nachweis der Datenherkunft. Die Aufzeichnung von Position, Geschichte und Eigentum jedes erstellten Blocks wird automatisch durch jedes Ereignisprotokoll erstellt [93].

Sicherheit: Jeder Teilnehmer im Blockchain-Netzwerk gewährleistet die Sicherheit und Integrität der Datenbank oder des Hauptbuchs. Einmal erfasste Daten können auch nicht verändert oder entfernt werden [93].

2.6.3.2 Typen von Blockchains

Public Blockchain

Eine öffentliche Blockchain, auch als Permissionless-Blockchain bekannt, kann von jedem genutzt werden. Die Netzwerkbenutzer können einen Knoten betreiben und Daten in der Transaktion schreiben, vorausgesetzt, sie halten sich an die Regeln der Blockchain [94]. Jeder kann mit anderen Transaktionsparteien im Netzwerk interagieren, ohne seine Identität preiszugeben, was bedeutet, dass die Identität anonym bleibt. In einer öffentlichen Blockchain gibt es keine Privatsphäre für die Transaktionen, da alle Benutzer Zugriff auf alle Transaktionen haben [95]. Die Aufrechterhaltung eines verteilten Hauptbuchs im großen Maßstab in einer öffentlichen Blockchain erfordert eine hohe Rechenleistung. Jeder Knoten im Netzwerk muss ein komplexes kryptografisches Problem namens „Proof-of-Work“ lösen, um sicherzustellen, dass die Knoten synchron bleiben [95]. Offene Plattformen wie Bitcoin und Ethereum sind Beispiele für öffentliche Blockchains. Das Bitcoin-Framework ermöglicht es Einzelpersonen oder Unternehmen, einen Knoten auszuführen und an der Genehmigung der Transaktion unter Verwendung eines Mining-Algorithmus teilzunehmen. Das Ethereum-Framework ermöglicht es den Teilnehmern, Programme in ihrem Netzwerk zu erstellen und bereitzustellen [96].

Private Blockchain

In einer privaten Blockchain, auch als Permissioned-Blockchain bekannt, benötigen Benutzer die Erlaubnis, dem Netzwerk beizutreten. Ohne diese Erlaubnis können sie die Historie nicht einsehen oder die Transaktionen nicht validieren. Die Entscheidung, Benutzern den Zugriff zu gewähren, obliegt einer privaten Person oder Organisation [94]. Im Gegensatz zur Permissionless-Blockchain bietet die Permissioned-Blockchain mehr Transaktionsprivatsphäre, was eine Voraussetzung für die Transaktion sensibler Daten ist. Eine Unterart der privaten Blockchain ist ein föderiertes oder Konsortiumsmodell. In dieser Art liegt die Macht, eine Blockchain zu betreiben, nicht bei einer einzelnen Entität [95]. Die Gruppe von Personen oder Einzelpersonen bildet die Gruppe, die als Konsortium oder Föderation bekannt ist und sich um das Netzwerk kümmert und die Berechtigungen vergibt [94]. Aufgrund der Beschränkungen und der Datenschutzvorteile eignen sich private Blockchains hauptsächlich für Anwendungen in der Lieferkette. Permissioned Blockchains bieten eine Infrastruktur, die kontrolliert und für die Zusammenarbeit geeignet ist [93]. Private Blockchains bieten zusätzliche Sicherheit, niedrigere Kosten, hohe Zuverlässigkeit und höheres Vertrauen. Hyperledger ist ein gutes Beispiel für das Konsortiumsmodell einer privaten Blockchain, das Anwendungen in der Lieferkette hat [95].

2.6.4 Industrieller Datenaustauschraum / Industrial Data Space (IDS)

2.6.4.1 IDS-Grundlagen

IDS ist eine Initiative der International Data Space Association (IDSA), die von der Politik, Unternehmen (mehr als 120 Unternehmen) und Forschungsinstituten wie der Fraunhofer-Gesellschaft finanziert wird. Die IDSA ist eine gemeinnützige und offene Vereinigung [97]. Datensouveränität ist das zentrale Thema von IDS und wird definiert als "die Fähigkeit einer natürlichen Person oder einer juristischen Person, mit ihren Daten völlig selbstbestimmt umzugehen [98]." Datenraum ermöglicht es den Benutzern, die Daten an ihrem Ursprungsort zu behalten und die Freigabe nur dann zuzulassen, wenn Daten benötigt werden, wodurch die Datensouveränität gewährleistet wird [98]. IDS ist ein Peer-to-Peer-Netzwerk, in dem Unternehmen sowohl Datenanbieter als auch Datennutzer werden können. In diesem Netzwerk verbinden sich Unternehmen mit anderen Teilnehmern mithilfe von Software, die als IDS Connector bekannt ist. Diese Verbindung ermöglicht die Suche nach anderen Teilnehmern, die Festlegung des gewünschten Sicherheitsniveaus und die Kontrolle der Datenverwendung [99]. Dieser Connector fungiert als Schnittstelle zwischen den Teilnehmern und stellt sicher, dass die Mitglieder die Datensouveränität wahren [98].

2.6.4.2 Referenzarchitektur des IDS

Die Teilnehmer des IDS können in vier verschiedene Rollen unterteilt werden. Diese sind in Tabelle 2-4 hervorgehoben.

Tabelle 2-4: Rollenkategorien des IDS

Table 2-4: Role categories of the IDS

	Rollenkategorie	Teilnehmer
Kategorie 1	Kernbeteiligte	Dateninhaber, Datenanbieter, Datennutzer, Datenverwender, App-Anbieter
Kategorie 2	Vermittelnde Teilnehmer	Metadaten-Broker-Dienstleister, Clearingstelle, Identitätsanbieter, App-Store, Vokabular-Anbieter
Kategorie 3	Software und Dienstleistungen	Softwareanbieter, Dienstleister
Kategorie 4	Verwaltungsstelle	IDSA, Zertifizierungsstelle, Evaluierungseinrichtung

Kernbeteiligte

Dateninhaber sind diejenigen, die die Kontrolle über die Daten haben und die Verantwortung für die Definition der Nutzungsverträge tragen. Die Datenanbieter sind die Mittel, um die Daten von den Datenbesitzern an die Verbraucher zu übertragen. Die

Datenverbraucher erhalten Daten von den Anbietern und können relevante Daten beim Broker-Dienstleister suchen. Ähnlich wie der Datenbesitzer haben Datenbenutzer rechtliche Ansprüche auf die Nutzung von Daten, die von Datenanbietern bereitgestellt werden, und müssen sich an die Nutzungsrichtlinien halten [98].

Vermittelnde Teilnehmer

Metadata-Broker-Dienstleister, Clearingstellen, App Stores, Vokabular-Anbieter und Identitätsanbieter gehören zu den vermittelnden Teilnehmern. Identitätsanbieter bieten die Wartung, Verwaltung, Überwachung und Validierung aller Teilnehmer an. Metadata-Broker-Dienstleister sind die Vermittler zwischen den Datenanbietern und -nutzern. Sie bieten Funktionen zum Veröffentlichen von Daten und zum Durchsuchen der Daten der Datenanbieter. Die Clearingstelle kümmert sich um finanzielle und datenbezogene Transaktionen. Sie enthält alle Informationen zu Suchanfragen und den tatsächlichen Datentransaktionen. Der App-Store hilft den Teilnehmern, entwickelte Software zur Erleichterung von Datendiensten zu starten. Die Vokabularanbieter bieten Vokabularen wie Referenzdatenmodelle und Ontologien an, die dazu beitragen, die Datensätze zu beschreiben [98].

Software und Dienstleistungen

Diese Schicht besteht aus Software- und Dienstleistungsanbietern, hauptsächlich IT-Unternehmen, die ihre Dienstleistungen den Teilnehmern des IDS zur Verfügung stellen. Das Hauptziel besteht darin, die für das IDS erforderliche Funktionalität umzusetzen [98].

Verwaltungsstelle

Das IDS wird von der IDSA verwaltet, die sich um die kontinuierliche Entwicklung der Datenräume kümmert. Es besteht auch aus der Zertifizierungsstelle, die für die Zertifizierungen und Evaluierungen der Teilnehmer verantwortlich ist [98].

2.6.4.3 Ziele des IDS

Das Konzept des IDS zielt darauf ab, die folgenden Ziele zu erreichen.

Vertrauen

Die Gewährleistung von Vertrauen ist eine der zentralen Prioritäten des IDS, da es eine Voraussetzung für die Ermöglichung des Datenaustauschs im Ökosystem darstellt. Es muss sicherstellen, dass die Mitglieder wertvolle Daten gemäß den vom Anbieter festgelegten Nutzungsrichtlinien verwenden. Um dies sicherzustellen, bietet die IDSA einen Zertifizierungsprozess an, der sicherstellt, dass jeder Teilnehmer und jede Software im IDS den festgelegten Anforderungen entspricht [98]. Dies dient dazu, sicherzustellen, dass jeder Teilnehmer und jede Software im IDS den festgelegten Anforderungen entspricht [97].

Sicherheit

Sicherheit ist neben Vertrauen ebenfalls ein wichtiger Aspekt. Der Zertifizierungsprozess der Mitglieder und Software überwacht die Sicherheitskriterien [98].

Datenhoheit

Datenhoheit ermöglicht es der Organisation, die Kontrolle über die Daten zu übernehmen und steht im Mittelpunkt des Konzepts der Datenräume. Datenhoheit erlaubt es Organisationen, Informationen anzusehen, zu verarbeiten, zu verwalten und abzusichern, und die Kontrolle darüber zu haben, wer auf diese Daten zugreifen kann [100]. Sie ermöglicht es dem Datenanbieter, Nutzungsbeschränkungen festzulegen, denen der Nutzer zustimmen muss, um die Daten zu verwenden [98].

Datenökosystem

Das Datenökosystem des IDS bietet den einzelnen Akteuren die Möglichkeit, neue Geschäftsmodelle zu ermöglichen, die sie aufgrund des Mangels an Datenintegrität nicht alleine umsetzen können. Kein einzelnes Mitglied verfügt über alle Daten, um innovative Dienstleistungen anzubieten. Hier ermöglicht der Datenraum die Möglichkeit neuer innovativer Dienste [98].

Dateninteroperabilität

Interoperabilität ist erforderlich, da die von verschiedenen Datenökosystemen verwendeten Protokolle und Datenformate voneinander abweichen. Um sicherzustellen, dass jedes System im IDS interoperabel ist, ist eine standardisierte Interoperabilität erforderlich. Die Daten und Endpunkte in der Architektur des IDS werden semantisch beschrieben, und die bereitgestellte Zertifizierung stellt sicher, dass das Informationsmodell gemäß vordefinierten Regeln verwendet wird und dass jedes System der Architektur folgt. Darüber hinaus können die IDS-Connector in den Ökosystemen miteinander kommunizieren [98].

2.7 Ansätze zur Bewertung des unternehmensübergreifenden Datenaustausches / Approaches for evaluating intercompany data exchange

In diesem Kapitel werden bestehende Ansätze zur Identifizierung der kritischen Kosten- und Nutzenaspekte des unternehmensübergreifenden Datenaustausches und Konzepte zu potenziellen Einflussfaktoren vorgestellt.

2.7.1 Potenziale des Datenaustausches in der Fertigung / Potentials of data exchange in manufacturing

In der Veröffentlichung „Ökonomische und Ökologische Potenziale des unternehmensübergreifenden Datenaustauschs“ [101] wird das Projekt „Inline Produktions- und Qualitätskontrolle bei der Fräsbearbeitung von metallischen und CFK-Produkten“, kurz MAI ILQ2020, vorgestellt und ausgewertet. Das **Ziel** des Projektes bestand darin, Potenziale durch den unternehmensübergreifenden Datenaustausch in Produktionsprozessen aufzuzeigen, speziell am Beispiel der Endbearbeitung durch Fräsen. Dabei wurden digitale Zwillinge von Fräswerkzeugen erstellt und mit Prozess-, Geometrie-, Typdaten usw. ihres gesamten Lebenszyklus angereichert. Durch den Austausch der Daten sowie deren Analyse mittels Data Analytics Methoden erhofften sich die beteiligten Unternehmen, ihre Produktqualität zu verbessern und Produktionskosten zu senken. Gleichzeitig soll Transparenz über die Auswirkungen des unternehmensübergreifenden Datenaustausches erhöht werden [101].

Das **Vorgehen** im Projekt umfasste im ersten Schritt den Aufbau einer Datenplattform zwischen dem Fräswerkzeughersteller und dem Nutzer, wobei ein besonderer Fokus auf die Souveränität des Datenerzeugers gelegt wurde. Daraufhin wurden die Auswirkungen der Maßnahmen im betrachteten Projekt beobachtet und analysiert. Im letzten Schritt wurden Wirkungsketten der wirtschaftlichen Potenziale der Maßnahmen hergeleitet. Dabei wurden alle Maßnahmen und resultierenden Potenziale miteinander verknüpft, um eine Gesamtübersicht zu schaffen [101].

Die **Ergebnisse** des Projektes zeigen die Identifikation von insgesamt 28 operativen Potenzialen aus verschiedenen Bereichen wie Werkstücke und Endprodukte, Werkzeuge, Offline-Prozessoptimierung und -programmierung, Inline-Prozessmonitoring und Maschinen. Konkrete Potenziale, die durch die Nutzung der Daten von beiden Parteien erzielt werden können, umfassen unter anderem eine deutlich effizientere Nutzung der Ressourcen (Fräswerkzeug), schnellere Reaktionsfähigkeit, vorausschauende Wartung, ein durchgängiges, lieferantenübergreifendes Prozessverständnis auch im Langzeitverhalten und effizientere und intensivere Kunden-Lieferantenbeziehungen [101].

Diese Potenziale wurden als **Wirkungsketten** in einem einzelnen Graphen visualisiert, wobei alle 28 identifizierten operativen Potenziale mittels Flüssen zu den daraus resultierenden ökonomischen Potenzialen führen. Beispielsweise können durch die Einführung einer Online-Prozessregelung die Energiespitzen geregelt (erstes operatives Potenzial), die Energiekosten (zweites operatives Potenzial) somit reduziert und schlussendlich der Maschinenstundensatz (ökonomisches Potenzial) verringert werden. Die operativen Potenziale können dabei auch zu mehreren ökonomischen Potenzialen beitragen: Durch das Reduzieren von Reklamationen kann einerseits die Personalkosten verringern und andererseits die Gewährleistungskosten reduzieren. In Abbildung 2-33 sind alle ökonomischen und einige operativen Potenziale aufgelistet. Dem Umfang geschuldet, sind hier nur die Relevantesten aufgeführt.

Kategorie	Ökonomisches Potenzial	Verursachendes operatives Potenzial
Qualitätskosten	Gewährleistungskosten reduzieren	Weniger Reklamationen
		Verbesserte Produktqualität
	Ausschusskosten reduzieren	Ausschuss reduzieren
Herstellungskosten	Personalkosten reduzieren	Weniger Kommunikation notwendig
		Weniger Arbeit
		Schnellere Bearbeitung
	Maschinenstundensatz reduzieren	Energiekosten reduzieren
Marktpotenzial	Preisreduktion verhindern	Akzeptanz der Kunden erhöhen
		Reputation erhöhen
	Steigerung des Absatzes	Flexibilität erhöhen
		Durchsatz erhöhen

Abbildung 2-33: Auflistung der identifizierten ökonomischen Potentiale [eigene Darstellung i. A. a. 101]

Figure 2-33: Listing of the identified economic potentials

Der **Beitrag** dieses Projektes sind die identifizierten Wirkungsketten in einer Gesamtübersicht. Damit werden möglichen Wirkungszusammenhänge und Auswirkungen, die sich aus dem unternehmensübergreifenden Datenaustausch ergeben können, identifiziert und miteinander verknüpft. Gleichzeitig wurde die Vorteilhaftigkeit des unternehmensübergreifenden Datenaustausches anhand der Fallstudie aufgezeigt.

Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass sich die Wirkungsketten auf den spezifischen Use-Case der Fräsfertigung beschränken und rein qualitativer Natur, ohne genaue Angaben von Korrelationen. Die Vollständigkeit und Transparenz der Aspekte ist auf der Nutzenseite gegeben, allerdings wird auf nur solche Kostenaspekte eingegangen, welche sich durch den Datenaustausch verringern, nicht aber auch solche, welche bei der Implementierung anfallen. Dadurch sind die Kostenaspekte nicht in Gänze abgedeckt und eine Gegenüberstellung zur Wirtschaftlichkeitsbewertung kann auf der Basis des Projektes nicht erfolgen. Somit beschränkt sich die **Eignung** der Quelle auf die Identifikation von Nutzenaspekten und sinkenden Kostenaspekten und zeigt mögliche Wirkungsüberschneidungen dieser auf.

2.7.2 Motive und Anreize für den Datenaustausch in Ökosystemen / Motives and incentives for data exchange in ecosystems

Die Veröffentlichung „Motives and Incentives for Data Sharing in Industrial Data Ecosystems“ [102] ist eine wissenschaftliche Arbeit im Tagungsband der 56. Internationalen Hawaii-Konferenz für Systemwissenschaften. Das **Forschungsziel** dieser Arbeit besteht darin, ein konzeptionelles Modell für die gemeinsame Nutzung von Daten im unternehmensübergreifenden Kontext zu entwickeln, welches die Motive und Anreize aufzeigt und auf die Fallstudie des industriellen Datenökosystems Catena-X anwendet. Dabei wird sich auf industrielle Daten und auf die Rolle der Datenanbieter, welche sich an Datenökosystemen beteiligen und anderen Akteuren Daten zur Verfügung stellen und ihre Motive und Anreize konzentriert [102].

Die **verwendete Methodik** dieser Studie besteht aus einer Einzelfallstudie, bei der qualitative Forschungsmethoden in Form von Interviews angewendet werden. Angesichts des begrenzten Vorwissens über Datenökosysteme im Allgemeinen und über Motive und Anreize für den Datenaustausch im Besonderen wurde diese Methode gewählt. Der Beschreibung des Untersuchungsobjekts folgt die Datenerhebung und abschließend die Datenanalyse [102].

Der Fall, der in dieser Studie untersucht wurde, ist das industrielle Datenökosystem **Catena-X** in der Automobilindustrie. Catena-X ist ein Zusammenschluss von Unternehmen, der das Ziel hat, einen konsistenten Datenaustausch in der gesamten automobilen Wertschöpfungskette zu etablieren. Die Studie beschreibt die Gründung, die Mitgliederstruktur und die Ziele von Catena-X. Zudem werden zehn Anwendungsfälle innerhalb von Catena-X definiert, die den Mehrwert des Datenaustauschs zwischen den Akteuren in der Automobilindustrie demonstrieren sollen [102].

Für die **Datensammlung** wurden sieben Interviews mit verschiedenen Experten durchgeführt, welche alle Teile des Catena-X-Konsortiums sind. Die Interviews wurden

per Video-Konferenz durchgeführt und auf der Grundlage der Forschungsfrage, des Forschungshintergrunds, des konzeptionellen Modells und relevanter Vorarbeiten erstellt. Dabei wurden die Experten nach den Beweggründen ihrer Organisation für die Teilnahme an Catena-X, den Motiven für den Datenaustausch und den Anreizen für den Datenaustausch befragt.

Die **Datenanalyse** erfolgte qualitativ mithilfe der Software MAXQDA. Es wurde eine qualitative Kontextanalyse durchgeführt, um die Ergebnisse der Interviewtranskripte zu analysieren. Zusätzlich zur primären Datenquelle der Interviews wurden insgesamt 25 Zeitungsartikel, 42 Pressemitteilungen, 4 Blog-Artikel und 5 Präsentationsvideos als sekundäre Daten analysiert, um die Plausibilität der Ergebnisse zu validieren und die Forschungsfrage durch Triangulation zu unterstützen. Zur Beschreibung und Einordnung der identifizierten Anreize wurde zuletzt auf das Motive-Incentive-Activation-Behaviour Modell (MIAB) zurückgegriffen. Im MIAB werden die Wirkbeziehungen zwischen Motiven, Anreizen, Aktivierung und Verhalten auf einfache Weise dargestellt: In einem bestimmten situativen Kontext (Anreiz) wird ein entsprechendes Motiv aktiviert und führt zu einem Verhalten (s. Abbildung 2-34).

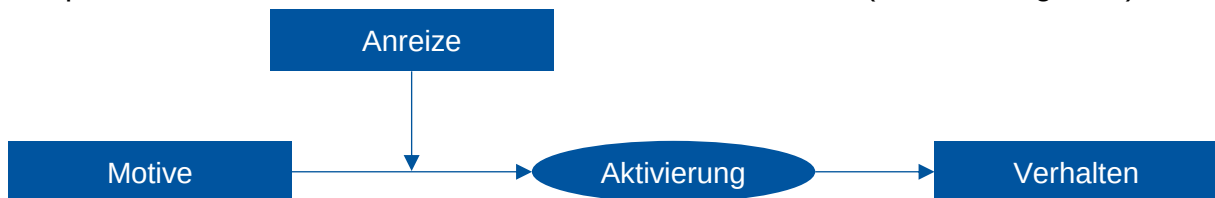


Abbildung 2-34: Aufbau des Motive-Incentive-Activation-Behaviour-Modell

Figure 2-34: Structure of the Motive-Incentive-Activation-Behaviour-Model [eigene Darstellung i. A. 102]

Grund für die Anwendung dieses Modells zur Verständnisk Gewinnung über die Motive und Anreize für die Beteiligung von Datenanbietern am Datenaustausch in industriellen Datenökosystemen ist, dass Organisationen von Menschen geführt werden und deren Verhalten wiederum vom MIAB erklärt werden kann. Motive sind in der Veröffentlichung als Gründe und Erwartungen definiert, warum ein Datenanbieter seine Daten teilt, und Anreize sind solche, die die Motive der Datenanbieter für die Weitergabe ihrer Daten ansprechen oder ihnen entsprechen [102].

Die **Forschungsergebnisse** bestehen aus insgesamt 7 Motiven und 8 Anreizen, welche für den Datenaustausch identifiziert wurden. Diese werden in drei Kategorien unterteilt: Wirtschaftliche, rechtliche und soziale Motive und Anreize. Zu den wirtschaftlichen Motiven zählen Kosteneinsparungen, erhöhte Transparenz, Differenzierung, strategische Partnerschaften und die direkte Entschädigung durch einen monetären Gegenwert für die Daten. Das rechtliche Motiv umfasst das Einhalten von Vorschriften und das soziale Motiv, die Erfüllung von Kundenanforderungen an die Nachhaltigkeit. Insbesondere wurde festgestellt, dass der größte Mehrwert durch den Verkauf der Daten selbst zustande kommt. Darüber hinaus wurde angemerkt, dass vor allem die nicht-quantifizierbaren Motive eine wesentliche Rolle für die Vorteilhaftigkeit des Datenaustausches spielen [102]. In Abbildung 2-35 sind die Ergebnisse in einer Übersicht dargestellt.

Kategorie	Motiv	Anreiz
Wirtschaftlich	Kosteneinsparung	Datenbasierte Dienste, die zur Verbesserung interner Prozesse führen
	Transparenz	Daten über die Herkunft und Authentizität von Komponenten und Materialien
	Differenzierung	Daten über die Herkunft und Authentizität von Komponenten und Materialien
		Wettbewerbsvorteil durch Informationsaustausch und Lerneffekte
	Strategische Partnerschaft	Maßnahmen zur Ermöglichung und Förderung des unternehmensübergreifenden Datenaustauschs
	Direkte Entschädigung	Geldzahlung für aufbereitete Daten
Rechtlich	Einhaltung der Vorschriften	Datenbasierte Dienste, die helfen, gesetzliche Anforderungen zu erfüllen
Sozial	Kundenanforderungen an die Nachhaltigkeit	Datenbasierter Dienst, der den Kohlendioxid-Fußabdruck berechnen kann

Abbildung 2-35: Motive und Anreize des Datenteilens in Datenökosystemen [eigene Darstellung i. A. a. 102]

Figure 2-35: Motives and incentives of data sharing in data ecosystems.

Die Veröffentlichung wurde durch die Forschungsfrage motiviert, welche Motive und Anreize Datenanbieter haben, ihre Daten in industriellen Datenökosystemen zu teilen. Aus den Ergebnissen ergeben sowohl theoretische als auch praktische Implikationen:

Die **wissenschaftlichen Beiträge** dieser Studie bestehen darin, das allgemeine Verständnis für das aufstrebende Forschungsfeld der industriellen Datenökosysteme zu erweitern. Insbesondere da es bisher nur begrenzte Einzelstudien zu industriellen Datenökosystemen in der Literatur gibt, tragen die Ergebnisse dieser Studie zur Erweiterung des Wissens über Motive und Anreize für den Datenaustausch bei.

Die **praktischen Beiträge** der Studie liegen darin, dass Unternehmen ein besseres Verständnis für die Datenökosysteme gewinnen können, in denen sie bereits aktiv sind, und für die Anreizmechanismen, die dort vorherrschen. Dies ermöglicht es Unternehmen, die Datenökosysteme und Anreizmechanismen aktiv zu gestalten und daraus einen größeren individuellen Nutzen aus dem Datenaustausch zu ziehen. Außerdem können Datenbenutzer die Motive potenzieller Datenanbieter besser verstehen und entsprechende Anreize für den Datenaustausch gestalten.

Es gibt jedoch einige **Einschränkungen** zu beachten: Erstens beschränken sich die Ergebnisse auf den spezifischen Fall von Catena-X, daher ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse begrenzt und nicht als quantifizierbare Auswertung von Unternehmen zu verstehen, sondern eher als eine Studie mit explorativem Charakter. Zweitens ermöglicht das angewandte Motive-Incentive-Activation-Behaviour-Modell zwar eine einfache Darstellung der Beziehungen zwischen Motiven und Anreizen, aber es hat seine Grenzen bei der Generierung komplexer oder messbarer Ergebnisse. Drittens befindet sich Catena-X noch in der Entwicklung und einige Aspekte rund um das Thema Anreize für den Datenaustausch sind noch nicht abschließend geklärt oder können sich im Laufe der Zeit ändern.

Die **Eignung** des Ansatzes für das Forschungsprojekt beschränkt sich auf die Identifikation von Nutzenaspekten. Die Motive und Anreize spiegeln einige der zu

erwartenden Nutzenaspekte wider und können übernommen werden. Da sich die Einzelfallstudie auf die Anreize des Datenaustausches in einem Ökosystem bezieht, sind die Ergebnisse auch auf andere Formen des unternehmensübergreifenden Datenaustausches übertragbar. Die Ergebnisse sind durch die umfassende Beschreibung transparent und nachvollziehbar gestaltet, allerdings zeichnen sich diese sowohl bei den Kosten-, als auch bei den Nutzenaspekten durch geringe Vollständigkeit aus.

2.7.3 Effekte der Digitalisierung in der Stahlindustrie / Effects of digitization in the steel industry

Die Mehrheit ist überzeugt, dass Digitalisierung insgesamt positive Auswirkungen auf eine Organisation hat. Es gibt zahlreiche Berichte, Fallstudien und Artikel, die positive Auswirkungen von Digitalisierung behandeln, was Unternehmen dazu ermutigt, dem Trend zu folgen. Dennoch sind Arbeiten, die die wirtschaftlichen Aspekte der Digitalisierung quantifizieren, selten. Zudem sind Studien zum aktuellen Stand der Digitalisierung in der Stahlindustrie ebenfalls begrenzt. Forscher und Stahlunternehmen haben Schwierigkeiten, die tatsächlichen Auswirkungen der Digitalisierung zu quantifizieren [103].

Der übergeordnete Zweck der Veröffentlichung „Effects of Digitalization in Steel Industry: Economic Impacts & Investment Model“ [103] besteht darin, potenzielle Auswirkungen der Digitalisierung in der Stahlindustrie zu identifizieren, um relevante Einsparungsmöglichkeiten zu ermitteln und schließlich strategische Schlussfolgerungen zu ziehen. Das **Ziel** ist es, ein Investitionsmodell zu entwickeln, in dem die Beziehung zwischen zukünftigen Digitalisierungsprojekten in einem begrenzten Stahlherstellungsprozess und verschiedenen Kosteneinsparfaktoren sorgfältig anhand von wirtschaftlichen Kennzahlen und anderen qualitativen Metriken untersucht wird. Damit sollen Stahlunternehmen fundierte Investitionsentscheidungen im Bereich der Digitalisierung ermöglicht werden [103].

Die **Forschungsmethodik** umfasst einen Mixed-Methods-Ansatz, der qualitative und quantitative Methoden kombiniert, um die Auswirkungen der Digitalisierungsprojekten zu untersuchen. Die Forschung ist in erster Linie deskriptiv und zielt darauf ab, die Auswirkungen zu bestimmen und zu beschreiben, anstatt zu erklären, warum oder wie sie auftreten. Es wird ein deduktiver Ansatz verwendet, der vom Allgemeinen zum Spezifischen fortschreitet und geeignet ist, kausale Zusammenhänge zu erklären und Konzepte quantitativ zu messen. Die Methodik besteht aus einer qualitativen Vorstudie, die eine Literaturrecherche umfasst, um Konzepte zu definieren, die Stahlindustrie zu erforschen und Rahmenbedingungen für die Projektevaluierung zu ermitteln. Im Anschluss wurde eine einzelne Fallstudie durchgeführt, um Primärdaten zu sammeln. Zuletzt wurden die Primärdaten mit den Ergebnissen der Literaturrecherche kombiniert, um ein quantitatives Investitionsmodell mit Excel zu erstellen, das durch eine Sensitivitätsanalyse zusätzlich überprüft werden kann [103].

Ergebnis der Veröffentlichung ist ein Investitionsmodell, welches auf der Grundlage einer Automatisierungslevel-Analyse, einer quantitativen und einer qualitativen Analyse entwickelt wurde. Diese werden im Rahmen der Arbeit vorgestellt und die Anwendung erläutert. Die identifizierten Aspekte wurden aus dem Bereichen

Instandhaltung, Produktivität, Personal, Qualität und Ausfallzeiten erhoben. Als letztes Kernergebnis, wurde das Investitionsmodell anhand einer Einzelfallstudie validiert. Dabei wurde der Weg bis zur Auswertung genau dokumentiert und die Ergebnisse inklusive der Sensitivitätsanalysen präsentiert.

Insgesamt werden dabei drei Kosteneffekte und 12 Nutzeneffekte (s. Abbildung 2-36) durch die Analysen identifiziert und im Investitionsmodell integriert. Diese Auswirkungen der Digitalisierung werden umfangreich auf Basis der beschriebenen Analysen hergeleitet und anschließend definiert [103].

Kategorie	Unterkategorie	Aspekt
Nutzen	Quantitative Aspekte	Gesteigerte Produktivität
		Weniger Produktionsverluste
		Kürzere Stillstandszeiten
		Weniger Fehlkonfigurationen von Maschinen
		Effizientere Wartungsarbeiten
		Höhere Qualität
		Geringerer Rohstoffverbrauch
		Effizientere Energienutzung
		Kürzere Markteinführungszeiten
	Qualitative Aspekte	Erhöhte Rückverfolgbarkeit
		Erhöhte Flexibilität
		Maßgeschneiderte Waren
		Gesteigerte Kundenzufriedenheit
		Verbesserte Gesundheit und Sicherheit der Belegschaft
Kosten	Quantitative Aspekte	Neue Arbeitsplätze
		Störung der Produktion
	Qualitative Aspekte	Umschulung der derzeitigen Mitarbeiter

Abbildung 2-36: Kosten- und Nutzenaspekte von Digitalisierungsprojekten [eigene Darstellung i. A. a. 103]

Figure 2-36: Cost and benefit aspects of digitization projects

Wesentlicher **Beitrag** der Veröffentlichung ist das Investitionsmodell, welches die quantitativen Analysen im Zusammenhang mit Digitalisierungsprojekten ermöglicht. Dieses Modell ist dabei so gestaltet, dass es nicht nur auf das Fallstudienunternehmen, sondern auch auf andere Branchen im produzierenden Gewerbe anwendbar ist. Außerdem verdeutlicht die Fallstudie, dass die Digitalisierung erhebliche Auswirkungen hat. Allerdings wird aufgezeigt, dass diese Auswirkungen oft schwer zu quantifizieren sind und unzureichende oder unstrukturierte Datenerfassung, sowie Schwierigkeiten bei der Abschätzung von Veränderungen erhebliche Abweichungen von den Prognosen nach sich ziehen können. Dies kann die Zuverlässigkeit der Ergebnisse maßgeblich beeinflussen.

Die Implementierung eines unternehmensübergreifenden Datenaustausches stellt ein Digitalisierungsprojekt dar und auch die Fokusbranche der Stahlindustrie sorgt für große thematische Überschneidungen mit dem Forschungsprojekt. Die identifizierten Aspekte werden nachvollziehbar hergeleitet, allerdings mit Fokus auf allgemeine Nutzeneffekte. Deswegen werden die Implementierungskosten eines Digitalisierungsprojektes nicht näher beleuchtet, da sie keinen unabsehbaren Effekt darstellen. Zusammenfassend ist eine Übertragung der Effekte nach Anpassung aber

zielführend, wenn diese speziell auf das Projekt des unternehmensübergreifenden Datenaustausches angepasst werden.

2.7.4 Kosten-Nutzen-Analyse von Informationssystemen / Cost-benefit analysis of information systems

Die Veröffentlichung „Cost-Benefit Analysis in Information Systems“ [104] verfolgt das **Ziel**, die grundlegenden Elemente der Kosten-Nutzen-Analyse bei Einführung computergestützten Informationssystemen zu beschreiben. Dabei wird eine Methodik geschaffen, in der sowohl das Vorgehen, mögliche Kosten- und Nutzenaspekte eines Informationssystems und potenzielle Probleme und Abweichungsfehler beschrieben werden [104].

Das vorgestellte **Vorgehen** ist in fünf Unterschritte gegliedert. Im ersten Schritt wird ein Analyst ausgewählt. Hierbei gilt es zu beachten, ob dieser ein Interner (Mitarbeitende), Externer (Berater) oder eine externe Partei (andere Organisationen) ist, da dies das Ergebnis der Analyse beeinflusst. Im zweiten Schritt werden die unterschiedlichen Investitionsalternativen identifiziert. Drittens werden die Kosten- und Nutzenaspekte der einzelnen Alternativen erhoben und gemessen. Danach werden im vierten Schritt die identifizierten Kosten- und Nutzenaspekte gewichtet und Diskontierungssätze festgelegt. Im fünften und letzten Schritt werden die Alternativen miteinander verglichen und die Beste ausgewählt. Dabei können Nutzenmaximierung, Kostenminimierung, höchster Nettonutzen, optimales Kosten-Nutzen-Verhältnis oder die Maximierung des internen Zinsfußes zum Ziel genommen werden [104].

Die identifizierten **Nutzenaspekte** sind im Rahmen dieser Arbeit von sekundärer Bedeutung, da sie die operativen Vorteile durch die Benutzung eines Informationssystems darstellen und so wenige Überschneidungen mit dem Untersuchungsgegenstand vorweisen. Allerdings lässt sich feststellen, dass die Nutzenaspekte den Kategorien Kostenreduzierung, Fehlerreduzierung, Flexibilitätserhöhung, Schnelligkeitsverbesserung und verbesserte Prozessführung zugeteilt werden.

Allerdings ist das relevante **Ergebnis** der Veröffentlichung die Methode zur Durchführung der Kosten-Nutzen-Analyse bei vollständiger Information über die Ausprägung der einzelnen Kosten- und Nutzenaspekte und Bewertungsgewichtung. Dabei wurden neben den Nutzenaspekten insgesamt 24 Kostenaspekte identifiziert. Diese werden in Abbildung 2-37 die aufgeführt. Die Kosten lassen sich jeweils den Unterkategorien Beschaffungskosten, Start-up Kosten, projektbezogene Kosten und den laufenden Kosten zuordnen.

Kategorie	Unterkategorie	Aspekt
Kosten	Beschaffungskosten	Kosten für die Installation der Ausrüstung
		Kauf oder Leasing der Ausrüstung
		Beratungskosten
		Modifizierungskosten
	Start-up Kosten	Erwerb der Software
	Projektbezogene Kosten	Schulung des Personals
		Kosten für die Dateneingabe und Datenausgabe
		Kosten für die Entwicklung eines Datenerfassungsverfahren
	Laufende Kosten	Kosten für die Systemwartung von Hardware, Software und Geräten
		Netzwerkkosten

Abbildung 2-37: Ausgewählte Kostenaspekte eines Informationssystems [eigene Darstellung i. A. a. 104]

Figure 2-37: Selected cost aspects of an information system

Der **Beitrag** der Veröffentlichung ist es aufzuzeigen, dass die Kosten-Nutzen-Analyse unter den richtigen Umständen ein genaues und nützliches Instrument sein kann, um Entscheidungen über Informationssysteme in Organisationen zu treffen. Allerdings werden auch Probleme deutlich aufgezeigt: Einerseits die Schwierigkeit der Quantifizierung der einzelnen Nutzenaspekte und der zu berücksichtigenden notwendigen Spezifikationen des Investitionsobjektes und andererseits der fehlende Fokus auf Investitionsalternativen.

Es gilt zu beachten, dass ein reiner Fokus auf die Wirtschaftlichkeit der Einführungen eines computergestützten Informationssystems gelegt wurde. Dieses Framework lässt sich also nicht direkt auf den Fall des unternehmensübergreifenden Datenaustausches anwenden. Diese Veröffentlichung leistet eine Vorarbeit in Bezug auf die Kosten- und Nutzenaspekte bei der Implementierung einer Informationstechnologie. Die Aspekte werden umfangreich und transparent hergeleitet, was eine Übertragbarkeit bei themenspezifischer Eignung für den unternehmensübergreifenden Datenaustausch ermöglicht.

2.7.5 Leistungsquantifizierung des Datenaustausches / Quantifying the performance of data exchange

Die Veröffentlichung „Method for quantifying the value of information for production control Method for quantifying the value of information for production control Method for quantifying the value of information for production control“ [105] ist ein wissenschaftlicher Artikel, der in der Zeitschrift "Procedia CIRP" erschienen ist. Procedia CIRP ist eine Open-Access-Zeitschrift, die Forschungsergebnisse im Bereich der Produktionstechnik und verwandter Disziplinen veröffentlicht. Der Artikel beschäftigt sich mit der Quantifizierung des wirtschaftlichen Werts von geteilten Informationen in wertschöpfenden Netzwerken (VANs) für die Produktionssteuerung. Das **Ziel der Forschung** besteht darin, eine Methode zu entwickeln, um den Wert der gemeinsam genutzten Informationen in VANs für die unternehmensspezifische Produktionssteuerung zu quantifizieren, wobei der Fokus auf Störungen wie Produktionsschwankungen liegt.

Die Autoren entwickeln eine **Methodik** zur Bewertung des Informationswerts basierend auf dem Analytic Hierarchy Process (AHP), einer Nutzwertanalyse, um komplexe Entscheidungen zu rationalisieren. Sie verwenden dafür einen Fallstudienansatz, um die Anwendbarkeit der entwickelten Methode zu demonstrieren. Die Fallstudie wird in einem netzwerkübergreifenden Produktionsumfeld durchgeführt [105]. Die Veröffentlichung beschreibt einen skalierbaren simulationsbasierten Ansatz, der in fünf Schritten strukturiert ist:

- (1) Definition des Beobachtungssystems: In diesem Schritt wird das Beobachtungssystem festgelegt, das die relevanten Prozesse in der Produktion, dem Transport und der Lagerung umfasst. Parallel wird das entsprechende Simulationsmodell aufgebaut.
- (2) Empfang und Verarbeitung von Informationen: Hier wird beschrieben, wie die empfangenen Informationen über Störungen kategorisiert und verarbeitet werden, um ihre Auswirkungen auf die Produktionssteuerung zu bewerten.
- (3) Definition des Beobachtungszeitraums: Der Zeitraum legt fest, in dem die Produktion mit und ohne verfügbare Informationen analysiert wird. Es werden verschiedene Zeitpunkte definiert, die den Informationsaustausch, den Beginn und das Ende der Störungsauswirkungen sowie die Rückkehr zum Produktionsplan markieren.
- (4) Bewertung der operativen Produktionsleistung (engl.: Operative Production Performance, OPP): In diesem Schritt werden die Prozesse im Beobachtungssystem mit und ohne verfügbare Informationen simuliert. Es werden verschiedene Leistungsindikatoren (s. Formel 2-29) verwendet, um die monetären Auswirkungen der Informationen auf die Produktionsleistung zu bewerten.

$$OPP = \text{Produktionsergebnis} + \text{Logistikleistung} - \text{Produktionskosten} - \text{Kapitalbildung} \quad (2-30)$$

- (5) Berechnung des quantitativen Werts der Information für die Produktionssteuerung: Auf Basis der Ergebnisse der operativen Produktionsleistung wird der quantitative Wert der Information für die Produktionssteuerung mit der Formel 2-30 berechnet.

$$\begin{aligned} \text{Wert der Information} &= OPP_{ml} - OPP_{ol} & (2-31) \\ \text{mit } OPP_{ml} &= OPP \text{ mit Informationsaustausch [€]} \\ OPP_{ol} &= OPP \text{ ohne Informationsaustausch [€]} \end{aligned}$$

Die **Ergebnisse** zeigen, dass die entwickelte Methode zur Quantifizierung des Informationswerts in netzwerkübergreifenden Wertschöpfungsnetzwerken geeignet ist. Sie identifizieren verschiedene Faktoren, die den Informationswert beeinflussen, und entwickeln eine Bewertungsmatrix, um den Nutzen der Informationsfreigabe zu quantifizieren. In dem beschriebenen Anwendungsbeispiel konnten durch den Informationsaustausch die Störungskosten um bis zu 6 % gesenkt werden, was die Potenziale der unternehmensübergreifenden Zusammenarbeit aufzeigt. Da der Fokus auf der Produktionssteuerung gelegt wurde, wird nur auf Aspekte eingegangen, welche die operative Produktionsleistung beeinflusst. Aspekte, wie die variablen Kosten

werden mittels graphischer Darstellung weiter in Material-, Maschinen-, Personal-, Qualitäts- und Instandhaltungskosten aufgeteilt [105].

Die Berechnung des Produktionsergebnisses, der Logistikleistung, der Produktionskosten und der Kapitalbindung erfolgte mit den in Abbildung 2-38: Zusammensetzung der operativen Produktionsleistung [eigene Darstellung i. A. a. 105] dargestellten Formeln.

Kategorie	Berechnungsformel
Produktionsergebnis	$Auftragsmenge \times \text{Durchschnittlicher Auftragswert}$
Produktionskosten	$Fixkosten + \text{Variable Kosten}$
Kapitalbindungskosten	$Anlagevermögen + \text{Umlaufvermögen}$
Logistikleistung	$Auftragsbezogene + \text{Systembezogene Leistung}$

Abbildung 2-38: Zusammensetzung der operativen Produktionsleistung [eigene Darstellung i. A. a. 105]

Figure 2-38: Composition of operating production output

Wesentlicher **Beitrag** der Fallstudie ist also, dass die Anwendbarkeit der Methode bestätigt und der positive Einfluss der Informationsfreigabe auf die Produktionsleistung des Wertschöpfungsnetzwerkes aufgezeigt wird. Allerdings ist dieser Ansatz speziell auf die kurzfristige Produktionssteuerung ausgerichtet und berücksichtigt nur die unternehmensspezifische Produktionskontrolle des simulierten Beobachtungssystems. Dadurch wird sich auf die Weitergabe von Informationen wie Lieferzeit, dynamische Bestandsdaten und Arbeitsstände fokussiert.

Durch diesen Betrachtungsfokus bleiben relevante Aspekte wie die Kosten für die Implementierung oder den Erhalt eines Informationsaustauschkonzeptes sowie jegliche qualitative Nutzenaspekte gänzlich unberücksichtigt, was die **Eignung** einschränkt. Allerdings sind diese für eine ganzheitliche Betrachtung für eine Berechnung des Mehrwertes notwendig. Dadurch sind die Überschneidungen des betrachteten Untersuchungsgegenstandes gering und die Übertragbarkeit beschränkt sich auf die Erkenntnis, dass man den Wert des unternehmensübergreifenden Datenaustausches mittels des operativen Produktionsergebnisses mit und ohne den Datenaustausch berechnen kann. Allerdings werden bei dieser Anwendung zwei Limitationen deutlich: Erstens beschränkt sich der durch die Differenz der beiden Produktionsergebnisse berechnete Wert der Informationen auf operative und quantifizierbare Faktoren. Dadurch wird zwar schnell ein Ergebnis geliefert, allerdings werden wesentliche Vorteile vernachlässigt. Zweitens muss dem Unternehmen die Ergebnisse aus beiden Zuständen vorliegen, was voraussetzt, dass der Datenaustausch bereits implementiert wurde. Als Investitionsentscheidung kann dieser Ansatz also nur dann gewählt werden, wenn darüber entschieden wird, ob man den unternehmensübergreifenden Datenaustausch auch an weiteren Standorten mit vergleichbaren Rahmenbedingungen etablieren möchte. Die Kriterien der Vollständigkeit und Transparenz der Kosten- und Nutzenaspekte ist durch den Fokus der Veröffentlichung nicht gegeben.

3 Vorgehensweise und Implementierung / Approach and implementation

Kurzfassung

Die Untersuchungen im Rahmen dieses Projekts wurden in sechs Arbeitspakete unterteilt. In AP1 wurde eine Testumgebung für die Durchführung von Experimenten eingerichtet. In AP 2 wurden die Anforderungen an die Datenplattform analysiert, verschiedene Technologien verglichen und bewertet, um eine geeignete Technologie auszuwählen und schließlich mit dem erstellten Lastenheft ein Datenplattformprototyp entwickelt. In AP 3 wurden die Möglichkeiten der Standardisierung der Datenerfassung, -übertragung und -speicherung im unternehmensübergreifenden Austausch untersucht. In AP 4 wurde die Schwankungen der Materialeigenschaften von Blechen gleicher Spezifikation und deren Einfluss auf die resultierenden Eigenschaften des Endproduktes analysiert, um eine Referenz für AP 5 zu schaffen. In AP 5 wurden zunächst die Simulationsmodelle der Prozesse entwickelt und eine DoE-basierte Auslegung des Tiefziehprozesses implementiert. Beides wurde genutzt, um modellbasiert Produkteigenschaften vorherzusagen und anschließend eine adaptive Prozessauslegung auf Basis dieser Informationen zu implementieren. In AP 6 wurden die experimentellen und Simulationsergebnisse aus AP 5 genutzt, um den Mehrwert des unternehmensübergreifenden Datenaustauschs zu ermitteln.

Abstract

The investigations within the scope of this project were divided into six work packages. In WP1, a test environment was set up for conducting experiments. In WP 2, the requirements for the data platform were analyzed, various technologies were compared and evaluated in order to select a suitable technology, and finally, a data platform prototype was developed using the specifications created. In WP 3, the possibilities of standardizing data acquisition, transmission and storage in cross-company exchange were investigated. In WP 4, the variations of material properties of sheets having same specification and their influence on the resulting properties of the final product were analyzed to provide a reference for WP 5. In WP 5, the simulation models of the processes are first developed and a DoE-based design of the deep drawing process was implemented. Both were used to predict product properties based on developed models and then used to implement an adaptive process design based using this information. In WP 6, the experimental and simulation results from WP 5 were used to determine the added value of cross-company data exchange.

3.1 Arbeitspaket 1/ Work package 1

In Arbeitspaket 1 wurde auf den Laboranlagen des IBF eine Testumgebung etabliert, in der die Experimente durchgeführt wurden und neue Methoden zur betriebsinternen und überbetrieblichen Datenaufnahme, -speicherung und -übergabe erprobt wurden. In dieser Testumgebung wurde eine Modellprozesskette zusammen mit der in AP2 entwickelten Datenplattform getestet.

Das Konzept der Modellprozesskette für die Untersuchung des überbetrieblichen Datenaustausches ist in Abbildung 3-1 dargestellt. Als Demonstrator wurde eine Modellprozesskette etabliert, welche aus zwei virtuellen Unternehmen besteht. Das erste Unternehmen stellt dabei ein Walzunternehmen dar, welches neben der Walzanlage über ein eigenständiges Simulationsmodell verfügt. Das zweite Unternehmen befasst sich mit dem Tiefziehen und verfügt über eine Tiefziehpresse sowie ebenfalls ein eigenständiges Simulationsmodell. Die beiden virtuellen Unternehmen legen ihre Mess-, Experiment- und Simulationsdaten in einer betriebsinternen NoSQL-Datenbank ab, wo alle relevanten Daten erfasst und automatisiert an die betriebsinternen Datenbanken weitergegeben werden. In der Modellprozesskette fließt das Material von links nach rechts, bis das Demonstratorbauteil (tiefgezogener Kreuznapf) erzeugt ist. Unternehmen A verarbeitet Warmband, um Kaltband zu erzeugen. Das von Unternehmen A produzierte Kaltband wird von Unternehmen B weiterverarbeitet, indem es tiefgezogen wird, um ein Tiefziehbauteil herzustellen. Die Datenplattform, die in Verbindung mit den NoSQL-Datenbanken der beiden virtuellen Unternehmen steht, ermöglicht den Austausch der Produkteigenschaften (Kaltbandeigenschaften).

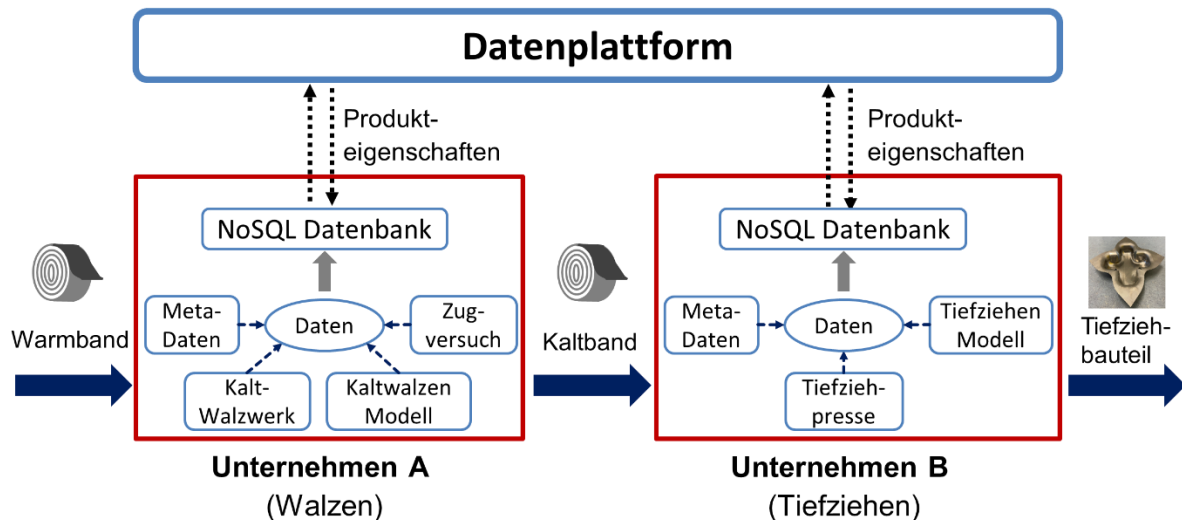


Abbildung 3-1: Konzept der Modellprozesskette zur Untersuchung der datenbasierten Prozessführung

Figure 3-1: Concept of the demonstrator process chain for the investigation of data based process control

3.2 Arbeitspaket 2/ Work package 2

Im zweiten Arbeitspaket soll eine Plattform für den überbetrieblichen Datenaustausch konzipiert werden. Im ersten Schritt wurde in Zusammenarbeit der beiden Forschungseinrichtungen auf Basis der relevanten Prozessschritten (Kaltwalzen und Blechumformung) und Ziele des Forschungsprojekts (überbetrieblicher Datenaustausch) nach dem Stand der Technik ein Zielbild erstellt, dass die Dateninfrastruktur und zu verwaltende Daten umfasst. Das Zielbild diente somit als die Grundlage zur Ableitung der konkreten Aufgaben und Funktionen der Datenplattform. Die übergeordnete Rolle und die spezifischen Aufgaben wurden in einer Beschreibung zusammengefasst, die als Leitfaden für Befragungen zur Anforderungsanalyse und die eigentliche Entwicklung diente.

Folgend wurden Anforderungen für die Datenplattform und eine entsprechende Dateninfrastruktur für prozessähnliche Vorgänge definiert. Dies erfolgte zunächst mittels einer Literaturrecherche. Die identifizierten potenziellen Anforderungen und das Zielbild wurden genutzt, um einen Interviewleitfaden für Industrieunternehmen vorzubereiten. Anschließend wurden Interviews mit Industrieunternehmen durchgeführt, um explizite (direkt genannt) und implizite (z. B. durch die Prozesse und Arbeitsweise) Anforderungen zu identifizieren. Im Zeitraum von fünf Monaten (Juni bis Oktober 2021) wurden insgesamt zehn Interviews mit relevanten Stakeholdern durchgeführt. Diese Interviews ermöglichten es, Einblicke in unterschiedliche Perspektiven und Anforderungen zu gewinnen. Während der Gespräche wurde eine umfassende Dokumentation der Ergebnisse vorgenommen. Insgesamt konnten 280 relevante Aspekte identifiziert und erfasst werden, welche die Vielschichtigkeit der Anforderungen verdeutlichten (s. Abbildung 3-2)

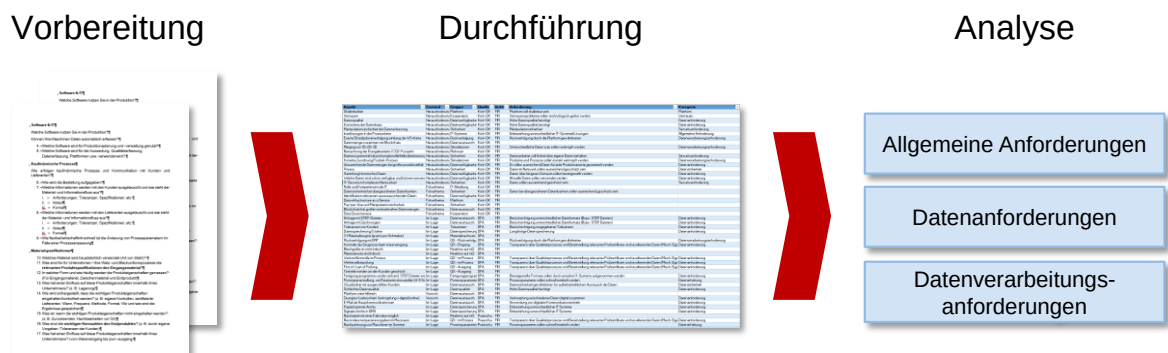


Abbildung 3-2: Vorgehen bei der Anforderungserhebung

Figure 3-2: Procedure for requirements gathering

Diese Anforderungen wurden anschließend in Kategorien zusammengefasst und mittels des paarweisen Vergleichs priorisiert, wie in Abbildung 3-3 dargestellt.

Figure 3-3: Excerpt from the evaluation and prioritization of requirements

2

Figure 3-4: Excerpt from the evaluation of basic technologies

Entertainment

3.3 Arbeitspaket 3/ Work package 3

Ziel dieses Arbeitspakets ist es, den unternehmensübergreifenden Datenaustausch für eine große Breite industrieller Unternehmen nutzbar zu machen. Durch die in Arbeitspaket 2 durchgeführten Interviews konnten der Standardisierungsbedarf sowie die ersten Ansatzpunkte für die Standardisierung identifiziert werden. Zur Untersuchung der Ansatzpunkte wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, um die verfügbaren Normen und Standards zu identifizieren und einen Abgleich zwischen dem Stand der Technik und der Arbeitsweise der Unternehmen durchzuführen. Daraus wurde der Standardisierungsbedarf in der Industrie abgeleitet.

Um den identifizierten Standardisierungsbedarf zu validieren und finalisieren, wurden im Rahmen einer PA-Sitzung die Herausforderungen bei der Datenaufnahme, -speicherung und -übertragung abgefragt sowie gemeinsam die manuellen und automatisierten Prozesse analysiert, um die erfolgreichen und optimierungsfähigen Ansätze zu identifizieren (s. Abbildung 3-5). Diese Ansätze wurden nachfolgend konsolidiert und als Erkenntnisse aus der Industrie zusammengefasst. Es wurden unter anderem aktuell eingesetzte IT-Systeme für Datenaufnahme und Speicherung sowie die ersten Ansätze des unternehmensübergreifenden Datenaustausches untersucht.

Datenaufnahme

Wie werden in Ihrer Produktion Daten erfasst?
Ordnen Sie bitte die Datenkategorien mit entsprechenden Quellen dem manuellen oder automatischen Prozess zu.

Manuelle Aufnahme
z. B. Abschreiben/Abtippen von einer Anzeige, Übertragung aus ausgedruckten Belegen/Reports

Datenkategorie: Produktionsleistung Quelle: Manuelle Dateneingabe (Arbeitsblätter, Messprotokolle)	Datenkategorie: Materialfluss Quelle: Manuelle Dateneingabe (Arbeitsblätter, Messprotokolle)	Datenkategorie: Produktionszeitpunkt Quelle: Manuelle Dateneingabe (Arbeitsblätter, Messprotokolle)	Datenkategorie: Produktionsort Quelle: Manuelle Dateneingabe (Arbeitsblätter, Messprotokolle)
Datenkategorie: Produktionsmenge Quelle: Manuelle Dateneingabe (Arbeitsblätter, Messprotokolle)	Datenkategorie: Produktionsdauer Quelle: Manuelle Dateneingabe (Arbeitsblätter, Messprotokolle)	Datenkategorie: Produktionskosten Quelle: Manuelle Dateneingabe (Arbeitsblätter, Messprotokolle)	Datenkategorie: Produktionsqualität Quelle: Manuelle Dateneingabe (Arbeitsblätter, Messprotokolle)
Datenkategorie: Produktionsfehler Quelle: Manuelle Dateneingabe (Arbeitsblätter, Messprotokolle)	Datenkategorie: Produktionsanomalien Quelle: Manuelle Dateneingabe (Arbeitsblätter, Messprotokolle)	Datenkategorie: Produktionsstörungen Quelle: Manuelle Dateneingabe (Arbeitsblätter, Messprotokolle)	Datenkategorie: Produktionsrückmeldung Quelle: Manuelle Dateneingabe (Arbeitsblätter, Messprotokolle)

Automatische Aufnahme
Daten liegen digital, aber lokal auf einer Anlage/Computer oder in einem besonderen IT-System vor

Datenkategorie: Produktionsleistung Quelle: LAMP-System, Maschine (DEW)	Datenkategorie: Materialfluss Quelle: LAMP-System, Maschine (DEW)	Datenkategorie: Produktionszeitpunkt Quelle: LAMP-System, Maschine (DEW)	Datenkategorie: Produktionsort Quelle: LAMP-System, Maschine (DEW)
Datenkategorie: Produktionsmenge Quelle: LAMP-System, Maschine (DEW)	Datenkategorie: Produktionsdauer Quelle: LAMP-System, Maschine (DEW)	Datenkategorie: Produktionskosten Quelle: LAMP-System, Maschine (DEW)	Datenkategorie: Produktionsqualität Quelle: LAMP-System, Maschine (DEW)
Datenkategorie: Produktionsfehler Quelle: LAMP-System, Maschine (DEW)	Datenkategorie: Produktionsanomalien Quelle: LAMP-System, Maschine (DEW)	Datenkategorie: Produktionsstörungen Quelle: LAMP-System, Maschine (DEW)	Datenkategorie: Produktionsrückmeldung Quelle: LAMP-System, Maschine (DEW)

Bitte bewerten Sie, wie wichtig für Sie / Ihr Unternehmen folgende Aspekte bei den gelisteten Datenkategorien sind?

Datenkategorien	Volumen/Umfang/ Häufigkeit	Datentyp	Grund der Erhebung	
			Relevanz für Ihr Unternehmen	Relevanz für Ihre Kunden
Produktionsleistung (z.B. ...)	1	1	1	3
Materialfluss	1	1	1	1
Produktionszeitpunkt	1	1	1	1
Produktionsort	1	1	1	1
Produktionsmenge	1	1	1	1
Produktionsdauer	1	1	1	1
Produktionskosten	1	1	1	1
Produktionsqualität	1	1	1	1
Produktionsfehler	1	1	1	1
Produktionsanomalien	1	1	1	1
Produktionsstörungen	1	1	1	1
Produktionsrückmeldung	1	1	1	1

Bitte bewerten Sie folgende Aspekte, die Ihre Datenlage beschreiben.

Ihre Zufriedenheit mit folgenden Aspekten

Gar nicht ← → Sehr

Aspekt	Gar nicht	Sehr
Datensicherheit	1	1
Datenqualität	1	1
Datenintegration	1	1
Datenverfügbarkeit/-zugänglichkeit	1	1

Abbildung 3-5: Ausschnitte aus dem interaktiven Workshop mit dem PA zur Identifikation von Standardisierungspotenzialen

Figure 3-5: Excerpts from the interactive workshop with the PA on the identification of standardization potentials

Weiterhin wurden Interviews mit IT-Unternehmen (Januar 2022) durchgeführt, um die Verbreitung und praktische Anwendung von Standards in der Entwicklung von IT-Produkten im Allgemeinen zu identifizieren. Anhand dieser Ergebnisse wurde ein Framework zur Strukturierung und Einordnung von Standards entwickelt.

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden anschließend zusammengefasst und mit dem Stand der Technik verglichen. Daraus wurden die Empfehlungen zur Standardisierung abgeleitet. Um die breite und schnelle Anwendung dieser Ergebnisse zu ermöglichen, wurde die Arbeit des Arbeitspakets in drei Standardisierungsberichten zusammengefasst.

3.4 Arbeitspaket 4/ Work package 4

Das Ziel dieses Arbeitspakets besteht darin, eine Referenz zu schaffen, die es im weiteren Projektverlauf erlaubt, den wirtschaftlichen Vorteil der Weitergabe des genauen Produktzustands aufzuzeigen. Anhand von Tiefziehversuchen wird der Einfluss unterschiedlicher, initialer Kaltbändeigenschaften auf die resultierenden Eigenschaften des Tiefziehbauteils untersucht und die Streuung in den Kaltband- und Kreuznapfeigenschaften ermittelt.

Zuerst wurde das Material in Abstimmung mit den PA-Mitgliedern ausgewählt. Die Kaltbänder mit dem ausgewählten Material (DC04 – Werkstoffnummer 1.0338) gleicher Spezifikation wurden von drei kommerziellen Stahlherstellern beschafft und anhand von Zugversuchen charakterisiert, um die Kaltbändeigenschaften Streckgrenze und Zugfestigkeit zu bestimmen. Anhand der definierten Anforderungen (Ziehtiefe und Rissfreiheit) wurden Tiefziehversuche durchgeführt, wobei für jedes der drei beschafften kommerziellen Kaltbänder die Platinenkantenlänge und Niederhalterkraft variiert wurden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden einerseits zur Ermittlung der Tiefziehparametergrenzen und andererseits zur Festlegung eines Standard-Tiefziehprozesses verwendet. Für den festgelegten Standard-Tiefziehprozess wurde der Einfluss der Variation der Kaltbändeigenschaften auf die resultierenden Kreuznapfeigenschaften analysiert und schließlich die Streuungen in den Kaltband- und Kreuznapfeigenschaften ermittelt. Damit wurde gezeigt, dass es trotz der Verwendung eines Standard-Tiefziehprozesses und Kaltband gleicher Spezifikationen Unterschiede in den finalen Kreuznapfeigenschaften (Max. Ausdünnung) gibt.

3.4.1 Beschaffung und Charakterisierung kommerzieller Kaltbänder / Procurement and characterization of commercial cold strips

Um die Unterschiede in den Kaltbändern gleicher Spezifikation experimentell zu charakterisieren, wurde Kaltband von drei verschiedenen Stahlherstellern beschafft. Anschließend wurden auf der Prüfmaschine Zwick Z100 Zugversuche durchgeführt, um die Streckgrenze und die Zugfestigkeit zu ermitteln und das plastische Materialverhalten der Kaltbänder zu charakterisieren. Dazu wurden unter Verwendung einer optischen Dehnungsmessung E Modul, Poisson-Wert sowie die Spannung-Dehnung-Kurve für alle Proben ermittelt.

3.4.2 Durchführung der Kreuznapfversuche / Implementation of cross die experiments

Um den Einfluss der unterschiedlichen Kaltbändeigenschaften auf den Endproduktzustand experimentell zu ermitteln, wurden die beschafften Kaltbänder zu Kreuznäpfen tiefgezogen und anschließend hinsichtlich ihrer Blechdickenverteilung (maximale Ausdünnung) charakterisiert.

Der Kreuznapfversuch wurde im Materialprüflabor am IBF an der Tiefziehpresse durchgeführt. Die Tiefziehpresse ist vom Modell Laufer RA-250 mit einer maximalen Pressenkraft von 2500 kN am Oberkolben und 1250 kN am Unterkolben. Das Kreuznapf-Tiefzieh-Werkzeug ist ausgerüstet mit einem Niederhalter, einem Stempel und einer Matrice. Der hier im Rahmen dieses Projekts benutzte Kreuzstempel besitzt die Form nach Banabic, wie in Abbildung 3-6 dargestellt [106].

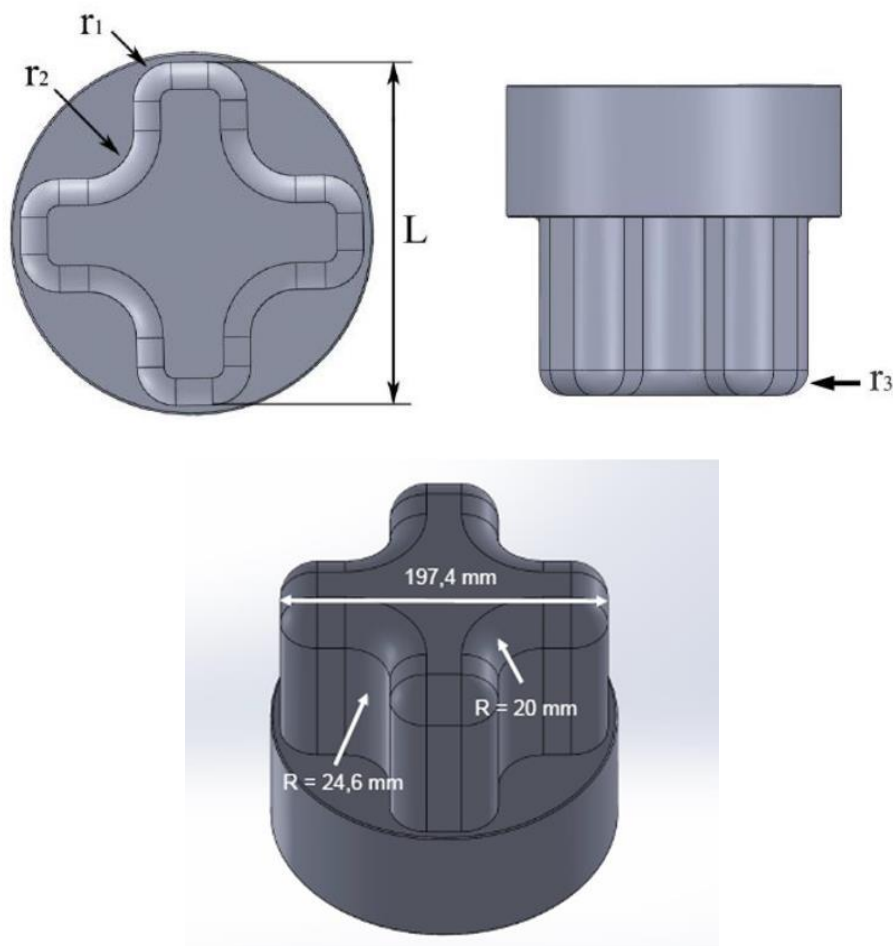


Abbildung 3-6: Schematische Darstellung des Stempels für Kreuznapfversuche [106]

Figure 3-6: Schematics of the punch for cross die experiments [106]

Vor der Versuchsdurchführung wurden die Blechproben auf beiden Seiten mit Tiefziehfolie (siehe Abbildung 3-7) beklebt und beidseitig mit Tiefzieh-Öl bestrichen, um die Reibung zu vermindern. Im Anschluss wurde die Probe mit einem Messschieber in der Tiefziehpresse zentriert positioniert. Nach Beendigung des Versuches wurde die Probe von der Folie befreit und mit Ethanol gereinigt [106].

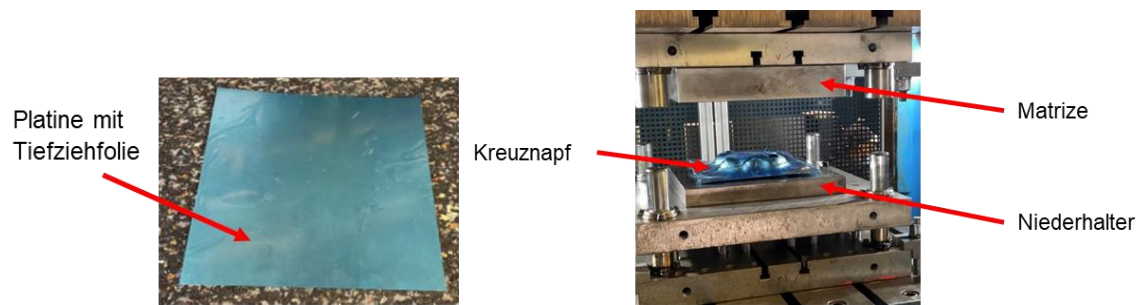


Abbildung 3-7: Durchführung der Kreuznapfversuch am IBF

Figure 3-7: Execution of cross die experiment at IBF

Zunächst wurde ein Versuchsplan für die Durchführung der Tiefziehprozesse vorbereitet, bei dem die Platinenkantenlänge und die Niederhalterkraft gezielt variiert wurden. Das Ziel war es, die oberen und unteren Grenzen der Tiefziehparameter zu bestimmen, die später in AP5 verwendet werden. Die Variation fiel dabei wie folgt aus:

Tabelle 3-1: Versuchsmatrix für die Durchführung der Tiefziehversuche

Table 3-1: Test matrix for conducting the deep drawing experiments

Tiefziehparameter	Parameterwerte
Platinenkantenlänge [mm]	240, 255, 270
Niederhalterkraft (Soll) [kN]	0, 200, 400, 600

Als nächstes wurden die Anforderungen an das Demonstratorbauteil (Kreuznapf) definiert, um zwischen guten und schlechten Bauteilen unterscheiden zu können. Ein Gutteil muss eine Ziehtiefe von 50 mm erreichen, ohne dass Risse auftreten. Anschließend wurden alle drei kommerziellen Kaltbänder verwendet, um die Tiefziehversuche unter Verwendung des in Tabelle 3-1 erstellten Versuchsplans durchzuführen. Der Versuchsplan wurde so erstellt, dass er alle möglichen Kombinationen der in Tabelle 3-1 definierten Platinenkantenlängen und Niederhalterkräfte berücksichtigt. Bei allen Versuchen wurde die Stempelgeschwindigkeit konstant bei 5 mm/s gehalten. Auf Basis aller durchgeführten Tiefziehversuche wurden ein Standard-Tiefziehprozess sowie Tiefziehparametergrenzen hinsichtlich Platinenkantenlänge und Niederhalterkraft festgelegt.

Am Ende aller Versuche werden die Kreuznapfe hinsichtlich ihrer Dickenverteilung charakterisiert, um die maximale Ausdünnung im Kreuznapf zu bestimmen. Als maximale Ausdünnung wird die absolute Dicke des Kreuznapfes in seinem dünnsten Bereich verstanden.

3.4.3 Analyse der experimentellen Ergebnisse der Tiefziehversuche / Analysis of the results of deep drawing experiments

Um den Einfluss der Kaltbändeigenschaften auf die Kreuznapfeigenschaften zu bestimmen, wurden die Zusammenhänge zwischen den initialen Kaltbändeigenschaften und den resultierenden Kreuznapfeigenschaften analysiert. Darauf basierend wurde anhand der Ergebnisse der in 3.4.2 durchgeführten Tiefziehversuche die Schwankungen in den Eigenschaften der Kreuznapfe für den

festgelegten Standard-Tiefziehprozess ermittelt und damit die Pseudo-Spezifikationen des Tiefziehbauteils festgelegt, welche fortan zur Klassifizierung von Gutteilen genutzt wurde.

3.5 Arbeitspaket 5/ Work package 5

In diesem Arbeitspaket bestand das Ziel darin, den Mehrwert der prozessübergreifenden experimentellen und simulativen Datenerfassung, -speicherung und -weitergabe anhand der etablierten Modellprozesskette aufzuzeigen. Zu diesem Zweck wurde zunächst kommerzielles Warmband beschafft und anhand von Zugversuchen charakterisiert. Zum anderen wurden Prozessmodelle zur simulativen Abbildung des Kaltwalzens und des Tiefziehens implementiert und anhand experimenteller Daten validiert. Die validierten Simulationsmodelle wurden unter anderem dafür genutzt, eine auf DoE basierende Auslegung des Tiefziehprozesses zu implementieren. Aus dem beschafften Warmband wurden durch eine angepasste Kaltwalzprozessführung gezielt Kaltbänder innerhalb und außerhalb der Spezifikation aus AP4 hergestellt. Diese wurden anschließend erneut zu Kreuznäpfen tiefgezogen. Das Ziel bestand dabei darin, durch eine datenbasierte, adaptierte Prozessführung auch für das Kaltband außerhalb der Spezifikation Kreuznäpfe zu erzeugen, die innerhalb der Pseudo-Spezifikation des Tiefziehbauteils aus AP4 liegen. Dadurch wurden die Möglichkeit und der wirtschaftliche Mehrwert einer datenbasierten, adaptiven Prozessführung demonstriert.

3.5.1 Beschaffung und Charakterisierung von kommerziellem Warmband / Procurement and characterization of commercial hot strip

Um die Arbeitshypothese zu validieren und den Mehrwert der modellbasierten Berechnung von Produkteigenschaften und deren Austausch über eine Datenplattform zu untersuchen, wurde ein kommerzielles Warmband beschafft, das zur gleichen Prozessroute gehörte, in der auch das in AP 4 beschaffte kommerzielle Kaltband hergestellt wurde. Das beschaffte Warmband wurde am bei IBF kaltgewalzt, um unterschiedliche Kaltbandzustände zur Überprüfung der einzelnen Arbeitshypothesen herzustellen. Zur Charakterisierung des plastischen Materialverhaltens des Warmbands wurden Fließkurven auf der Zwick Z100 durch Zugversuche ermittelt. Hierbei wurden mithilfe einer optischen Dehnungsmessung der E-Modul, der Poisson-Wert sowie die Spannungs-Dehnungs-Kurve für alle Proben bestimmt.

3.5.2 Simulative Nachbildung der Prozesskette / Simulative reconstruction of the process chain

Um bereits während der Prozessauslegung Abschätzungen über die auftretenden Walzkräfte und Walzmomente sowie die Temperaturentwicklung während des Walzens treffen zu können, kommen unterschiedliche Arten von Prozessmodellen zum Einsatz. Zur Modellierung des Tiefziehens wurde innerhalb dieses Projekts ein FE-Tiefziehmodell entwickelt.

3.5.2.1 Schnelles analytisches Walzmodell RoCaT / Fast analytical rolling model

RoCaT („Rolling Calculation Tool“) wurde bereits im Vorfeld dieses Projekts am Institut für Bildsamer Formgebung (IBF) entwickelt. RoCaT ist ein stichplanfähiges Walzmodell auf Basis der Elementaren Theorie, das diese gewünschten Ergebnisgrößen in Sekundenschnelle bereitstellt. Für eine möglichst zuverlässige Vorhersage von Walzkraft und Walzmoment ist die genaue Kenntnis der plastomechanischen Vorgänge im Walzspalt sowie der metallphysikalischen Mechanismen erforderlich. RoCaT ist mit einer Höhenauflösung versehen, welche die lokale Betrachtung der relevanten Zustandsgrößen im Walzgut ermöglicht. Eine globale Betrachtung der Mechanismen ist ebenfalls implementiert.

RoCaT berechnet folgende globale Zielgrößen:

Walzkraft	F
Walzmoment	M
Mittlere Temperatur	θ_m
Mittlere Fließspannung	k_{fm}
Umformgrad	φ
Rekristallisierter Anteil	X_{RX}
Mittlere Korngröße	d_m

Zusätzlich berechnet RoCaT folgende lokale Zielgrößen (Zustandsgrößen):

Lokale Formänderungen	ε
Lokale Formänderungsgeschwindigkeiten	$\dot{\varepsilon}$
Lokale Fließspannungen	$k_{f\varepsilon}$
Lokale Walzguttemperaturen	θ
Lokale Korngröße	d

Bei der Entwicklung von RoCaT wurden folgende Annahmen getroffen:

- Materialmodell und Randbedingungen kommen aus dem Walzen von Stahl Grobblech
- Walzspaltverhältnis $\frac{l_d}{h_m} = 0,2 - 5$
- Unterteilung des Walzspalts in Streifenelemente j auf Basis der Elementaren Theorie
- Höhenauflösung des Streifenelements zur lokalen Betrachtung der Zustandsgrößen über die Knoten k
- Berücksichtigung von inhomogener Formänderung über die Walzguthöhe auf Grund von Scherverformungen
- Ebene Formänderung (breitungsfrei)
- 1D Wärmeleitung in Höhenrichtung

- Durchgängige Ausnutzung der Symmetrieebene in der Mitte des Walzspalts
- Entfestigungsvorgänge werden in Form der statischen Rekristallisation zwischen den Stichen berücksichtigt.

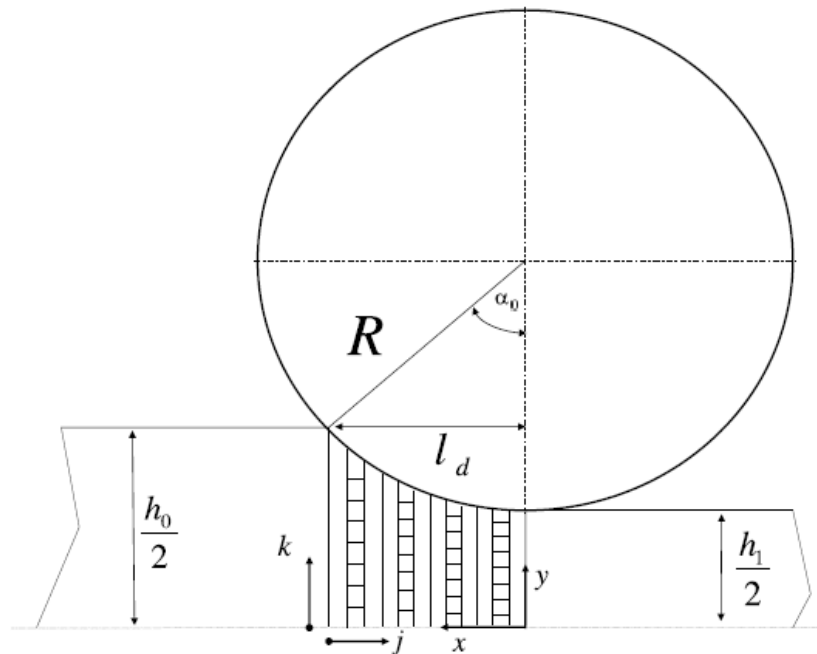


Abbildung 3-8: Unterteilung des Walzspaltes in Streifenelemente j und Höhengschichten k gemäß der Figure 3-8: Subdivision of roll gap in strip elements j and height levels k according to elementary theory Implementiert wurde RoCaT in MATLAB und ist dabei modular aufgebaut. Es besteht aus den folgenden Hauptkomponenten:

Input: Die Eingabedatei enthält alle relevanten Material- und Prozessparameter der Walzung. Diese sind bspw. der Stichplan, die thermischen Informationen, wie die Raumtemperatur, die Temperatur der Arbeitswalze und des Werkstücks sowie die Werkstoffdaten in Form von Dichte, E-Modul und Fließkurve des Walzguts. Darüber hinaus enthält die Eingabedatei Parameter für den Geometriefaktor für die Kraftberechnung, Hebelarmbeiwerte für die Momentberechnung sowie Rekristallisations- und Kornwachstumskinetiken.

Haupt-Module: Das Hauptmodul besteht aus mehreren Untermodulen, wobei jedes einzelne Untermodul verschiedene Aspekte des Walzprozesses berechnet. Das Hauptmodul hat die Aufgabe, den Programmablauf zu steuern, indem es die Daten für jedes einzelne Untermodul zur Verfügung stellt. Das Hauptmodul enthält die folgenden sechs Untermodule: Formänderungs-Modul, Temperatur-Modul, Werkstoff-Modul, Walzstich-Modul, Rekristallisations-Modul und Gefüge-Modul.

- Formänderungs-Modul:** Im Formänderungs-Modul werden der aktuelle Umformgrad φ und die Umformgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$ sowie die entsprechenden lokalen Größen Formänderung ε und Formänderungsgeschwindigkeit $\dot{\varepsilon}$ berechnet. Das Formänderungs-Modul enthält ein mittels einer umfangreichen FE-Studie kalibriertes Schermodell, welches sowohl die Richtungsumkehr der Scherung als auch die Rotation des Bezugsachsensystems berücksichtigt.

- ii. **Temperatur-Modul:** Das Temperatur-Modul dient der Berechnung der Temperaturverteilung im Walzgut über den gesamten Walzprozess. Die folgenden Phänomene können berücksichtigt werden:
- Wärmeleitung im Walzgut (Konduktion)
 - Wärmeübergang zur Walze (Konvektion)
 - Erzeugte Umformwärme während des Sticks (Dissipation)
 - Entzunderung mittels Spritzwasser vor und nach dem Stich (Konvektion)
 - Wärmeübergang und -strahlung zur Luft in den Pausenzeiten (Konvektion + Strahlung)

Die Wärmeleitung innerhalb des Walzgutes wird als instationär und 1-D in Richtung der Walzguthöhe angenommen. Die Temperaturentwicklung wird durch die Methode der finiten Differenzen ermittelt.

- iii. **Werkstoff-Modul:** Im Werkstoffmodul wird die mittlere Fließspannung k_{fm} des Walzguts in Abhängigkeit des Werkstoffs und der Kaltverfestigung, berechnet durch den akkumulierten Umformgrad φ_{acc} , die Vergleichsumformgeschwindigkeit $\dot{\varphi}_v$ und die Walzguttemperatur θ , ermittelt. Zur Modellierung der Fließkurve ist der Ansatz nach Hensel und Spittel (Gleichung 2-9) implementiert.
- iv. **Walzstich-Modul:** Im Walzstich-Modul wird die Walzkraft F und das Walzmoment M für die einzelnen Walzstiche ermittelt. Die Berechnung der Walzkraft erfolgt in Abhängigkeit der Kontaktfläche $\left(b \cdot \frac{l_d}{h_m}\right)$, der globalen mittleren Fließspannung k_{fm} und des Geometriefaktors Q_p nach Gleichung 2-6 und 2-7. Das Phänomen der Walzenabplattung ist durch den Ansatz nach Hitchcock (Abbildung 2-7: Walzenabplattung aufgrund der elastischen Verformung der Arbeitswalzen [4]) berücksichtigt. Die Berechnung des Walzmoments erfolgt abhängig von der Walzkraft, der gedrückten Länge l_d und des Hebelarmbeiwerts m nach Gleichung 2-8.
- v. **Rekristallisations-Modul:** Das Rekristallisations-Modul ermittelt die Entfestigung des Werkstoffs, die als Folge von statischen Rekristallisationsvorgängen zwischen den Walzstichen auftritt. Die Ermittlung des rekristallisierten Anteils X_{RX} erfolgt nach dem Arrhenius-Ansatz (Gleichung 2-13 bis 2-16).
- vi. **Gefüge-Modul:** Das Gefügemodul beschreibt die Korngrößenentwicklung innerhalb des Walzguts während des gesamten Walzprozesses. Einflussfaktoren sind die Gefügeneubildung durch statische Rekristallisation sowie das Kornwachstum (Gleichung 2-17 bis 2-19).

Output: RoCaT speichert während eines Durchlaufs alle relevanten End- und Zwischenergebnisse und liefert zusätzlich eine Visualisierung ausgewählter Prozessgrößen.

Durch die Implementierung der Höhenauflösung bringt RoCaT die folgenden Vorteile mit sich:

- Höhenaufgelöste Verteilung der umformtechnischen Zustandsgrößen im Walzspalt
- Berechnung der Gefügeentwicklung aufgelöst über die Walzguthöhe
- Berechnung der Zielgrößen ohne Lösen eines Kräftegleichgewichtes
- Deutlich kürzere Rechenzeiten (< 2s) im Vergleich zu FE-Modellen

3.5.2.2 *Finite Elemente Walzmodell / Finite element rolling modell*

Zur Abbildung der Walzprozesse in einem Finite Elemente Modell wurde ein am IBF entwickeltes Skript-Paket namens Walzautomat verwendet, welches in der Lage ist, nach wenigen Benutzereingaben automatisiert Walzmodelle in Abaqus Standard zu erzeugen. Es ist in der Lage, sowohl den Kaltwalzprozess als auch den Warmwalzprozess mit einem Walzstich sowie mehreren Walzstichen zu simulieren. Dies wird durch die automatische Übertragung der Ergebnisse des vorherigen Walzstichs auf den aktuellen Walzstich realisiert. Der Vorteil des Automatisierungstools Walzautomat besteht vor allem darin, die sich wiederholende Modellierungsarbeit und die fehleranfällige Umsetzung der einzelnen Modellierungsschritte und Datenextraktion zu minimieren [107].

Der Walzautomat kann grob in drei Hauptteile unterteilt werden [107]:

- Vorbereitung der erforderlichen Eingabedatei (.WIP Datei)
- Ausführung des Modellgenerierungsskripts
- Extraktion spezifischer Zielergebnisse im Post-Processing

In der .WIP-Datei werden alle Benutzereingaben hinterlegt, die für die eindeutige Beschreibung des Walzmodells benötigt werden. Diese sind beispielsweise die geometrischen Abmessungen der Walzen und des Werkstücks, aber auch sämtliche Materialparameter wie bspw. der E-Modul oder die Fließkurve. Schließlich wird ein Walzmodell in Bezug auf die Eingabewerte generiert. Sind alle Eingaben getätigt, werden die in Abaqus benötigten Simulationsdateien .inp- und .cae automatisiert erzeugt und können für die Simulation verwendet werden. Nach Abschluss der Simulation extrahiert das Post-Processing-Skript die relevanten Ergebnisgrößen wie bspw. die Formänderungsverteilung oder die resultierende Temperaturverteilung im Werkstück [107].

Durch die Ausnutzung von Symmetrieeffekten reicht es, lediglich das halbe Walzgut und die obere Arbeitswalze zu modellieren, was die Rechenzeit deutlich herabsenkt. Zusätzlich enthält jedes Modell noch einen sogenannten Schieber, der dafür sorgt, dass das Walzgut auch in den Walzspalt eingeführt wird, wenn die Greifbedingung nicht sofort erfüllt ist. Ein grundlegender Aufbau der verwendeten Simulationsmodelle ist in Abbildung 3-9 zu sehen.

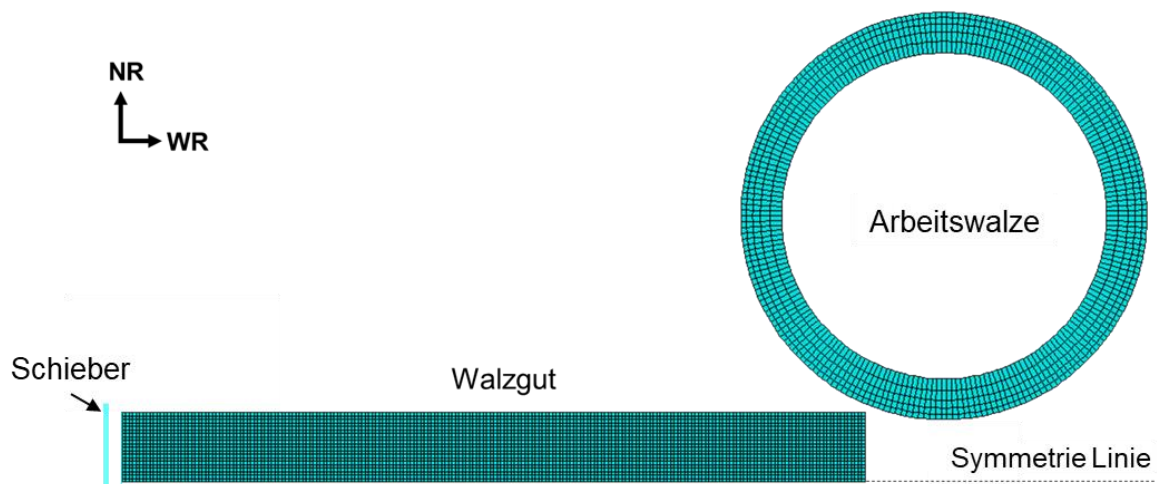


Abbildung 3-9: Prinzipieller Modellaufbau der mit dem Walzautomat erzeugten Walzmodelle [107]

Figure 3-9: Fundamental model structure of the rolling models generated using Walzautomat [107]

Das Walzgut ist ein quaderförmiges Bauteil, das mechanischer Verformung durch die Arbeitswalzen ausgesetzt wird. Es wird als verformbares Teil modelliert und mit quadratischen Elementen vernetzt. Die Vernetzung ist fein genug, um konvergierende Ergebnisse zu erzielen, aber so grob wie möglich gehalten, um die Simulationsdauer zu minimieren. Bei der Modellierung mehrstichiger Walzprozesse wird die Verteilung der plastischen Dehnung sowie die Knoten Temperaturen im Walzgut von einem Stich zum nächsten übertragen [107].

Im Walzprozess ist die Arbeitswalze das Hauptwerkzeug, das Kontakt mit dem Walzgut hat. Sie stellt sicher, dass das Walzgut durch den Walzenspalt gezogen wird und eine Änderung der Geometrie stattfindet. Es ist offensichtlich, dass die mechanischen Eigenschaften und die Einstellung der Walze besonders wichtig für die Wechselwirkung zwischen Werkstück und Walze und somit für die resultierende Geometrie und die Eigenschaften des Walzguts sind. Wie in Abbildung 3-10 dargestellt ermöglicht der Walzautomat die Verwendung dreier unterschiedlicher Walzenkonfigurationen [107].

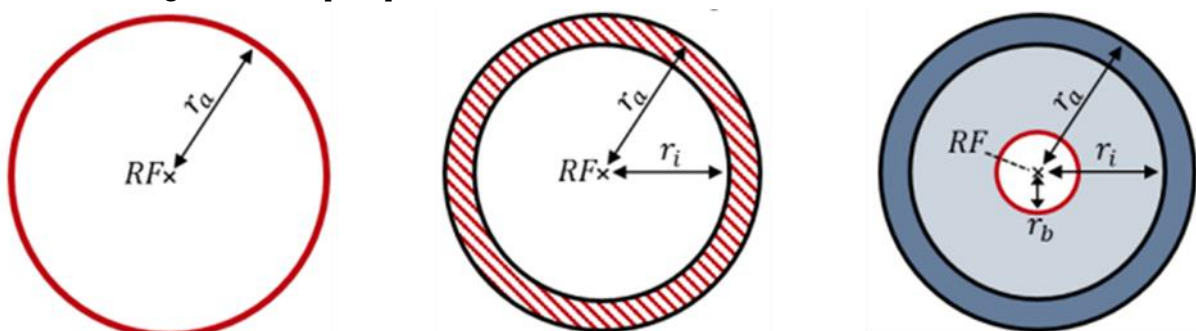


Abbildung 3-10: Von links nach rechts: Komplett starre Walze, starrer Walzenring mit „Rigid Constraint“ und eine verformbare Walze [107]

Figure 3-10: From left to right: A rigid roll arc, a rigid roll ring (Rigid Constraint), and deformable roll [107]

Der starre Walzenbogen stellt die einfachste Geometrie einer nicht verformbaren Arbeitswalze dar. Sie wird als "Discrete Rigid" Modelltyp modelliert, bei dem keine

Zuweisung von Walzenmaterialien erforderlich ist. Der starre Walzenring ist als verformbarer Ring (Schalenelement) mit einer "Rigid Constraint" modelliert. Diese Konfiguration wird jedoch sehr selten verwendet, da sie die Walzenverformung nicht genau abbildet. In der dritten Konfiguration kann die Walze als vollständig elastische verformbare Walze (Schalenelemente) modelliert werden. Diese Konfiguration wird häufig verwendet, um die Walzenverformung realitätsgetreu zu modellieren. Als Anfangsbedingungen für die Walzen wird nur die Temperaturverteilung angegeben [107].

Der Schieber ist ein wichtiger Bestandteil des Walzmodells. Aufgrund numerischer Ungenauigkeiten kann es vorkommen, dass der Greifbedingungen selbst bei einem ausreichend hohen Reibungswert nicht erfüllt wird. Um dies zu verhindern, wird ein Schieber erstellt, der das Werkstück langsam in den Walzspalt zwischen den Walzen schiebt, bis die Walze am Werkstück zieht. Der Schieber im generierten Modell bewegt sich zu jedem Zeitpunkt langsamer als die Umfangsgeschwindigkeit der Walze. Der Schieber wird als "Discrete Rigid Surface" modelliert. Sein einziger Zweck besteht darin, das Walzgut in den Walzspalt zwischen den Walzen zu bewegen, ohne das Spannungsfeld durch Kompression zu beeinflussen. Als Konsequenz werden thermische und mechanische Interaktionen (elastische/plastische Verformung) nicht berücksichtigt

In Walzautomat sind zwei Interaktionen definiert (Kontakt Definition): zwischen dem Walzgut und der Arbeitswalze sowie zwischen dem Walzgut und dem Schieber. Der Kontakt zwischen dem Walzgut und der Arbeitswalze ist ein "Surface-to-Surface" Kontakt mit definiertem tangentialen, normalem und thermischem Verhalten. Der Kontakt zwischen dem Scheiber und dem Walzgut ist ein reibungsfreier „Surface-to-Surface“ Kontakt [107].

3.5.2.3 Modellierung der Kaltwalzprozesse / Modelling of cold rolling processes

Für die Modellierung des Kaltwalzprozesses wurde das am IBF entwickelte, schnelle analytische Walzmodell RoCaT verwendet. Dieses basiert auf der Streifenmethode und beinhaltet semi-empirische Materialmodelle. Die in Abschnitt 3.5.1 ermittelte technische Spannungs-Dehnungs-Kurve aus den Zugversuchen für das beschaffte Warmband wurde zur Modellierung der Fließkurve des Warmbands verwendet. Hierfür wurde der Ludwiks-Ansatz (Gleichung 3-1) verwendet und mittels der Matlab Curve Fitting Toolbox die Fitting-Parameter ermittelt.

$$\sigma = \sigma_0 + K_L * \varphi^{n_L} \quad (3-1)$$

mit $\sigma_0, K_L, n_L = \text{Fitting Parameter}$

Das schnelle Walzmodell wurde ursprünglich für die Modellierung des Warmwalzprozesses entwickelt, um Walzkraft, Walzmoment, Temperatur- und Dehnungsverteilung sowie die Korngröße des Walzguts vorherzusagen. Um das schnelle Walzmodell in diesem Projekt für die Modellierung des Kaltwalzprozesses verwenden zu können, wurde es hinsichtlich des Geometriefaktors kalibriert. Zusätzlich wurde zur modellbasierten Vorhersage der Kaltbandeigenschaften ein analytisches

Modell basierend auf der Vickershärte und dem Umformgrad in das kalibrierte schnelle Walzmodell integriert und anhand experimenteller Ergebnisse validiert.

Zur Kalibrierung des schnellen Walzmodells wurde zunächst eine Simulationsstudie mit einem FE-Kaltwalzmodell durchgeführt. Abbildung 3-6 zeigt den gesamten Workflow der Simulationsstudie zur Kalibrierung des Geometriefaktors anhand der Studie von Seuren et al. [14].

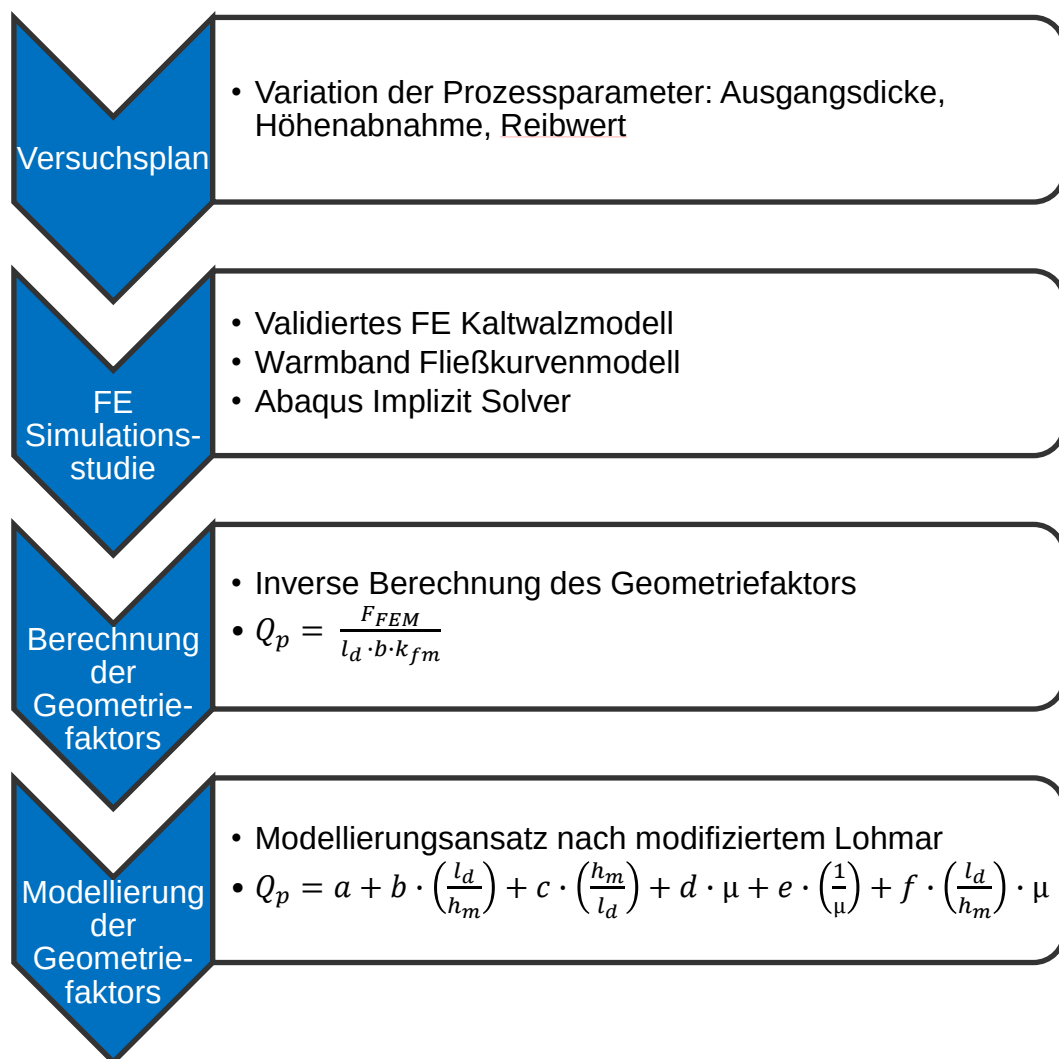


Abbildung 3-11: Workflow der Simulationsstudie zur Kalibrierung des Geometrie Faktors für das Kaltwalzen

Figure 3-11: Workflow of simulation study for the calibration of the geometry factor for cold rolling

Unter Verwendung der mit dem Ludwik Ansatz modellierten Warmband Fließkurve wurde ein FE-Kaltwalzmodell vorbereitet und anhand experimenteller Ergebnisse validiert. Anschließend wurden insgesamt 55 Simulationen unter Verwendung des in Tabelle 3-2 dargestellten Versuchsplans mittels Abaqus Standard durchgeführt, wobei die Ausgangsdicke, die relative Höhenabnahme und der Reibwert so variiert wurden, dass alle möglichen Kombinationen der Parameter betrachtet wurden.

Tabelle 3-2: Versuchsmatrix für die Simulationsstudie mittels des FE-Kaltwalzmodells

Table 3-2: Test matrix for the simulation study using FE cold rolling model

Variationsgrößen	Werte
Ausgangsdicke [mm]	1, 2, 3.8, 5, 10, 15
Höhenabnahme [%]	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40
Reibwert [-]	0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25

Als nächstes wurde für alle Simulationen im Post-Processing die simulativ berechnete Walzkraft ermittelt. Anhand der extrahierten Simulationsergebnisse wurde der Geometriefaktor unter Verwendung der unten dargestellten Formel nach Siebel berechnet [14]:

Geometrie Faktor (Gleichung 3-2)

$$Q_p = \frac{F_{FEM}}{l_d \cdot b \cdot k_{fm}} \quad (3-2)$$

mit F_{FEM} = Walzkraft aus FE Simulation [N]

$$l_d = \text{Gedrückte Länge [mm]} = \sqrt{r \cdot \Delta h - \left(\frac{\Delta h^2}{4}\right)}$$

r = Arbeitswalzenradius [mm]

h_0 = Ausgangsdicke [mm]

h_1 = Enddicke [mm]

Δh = Dickenabnahme [mm] = $h_0 - h_1$

h_m = Mittlere Walzgutdicke [mm] = $0,5 \cdot (h_0 + h_1)$

b = Bandbreite [mm]

k_{fm} = Mittlere Fließspannung [N/mm²]

$\frac{l_d}{h_m}$ = Walzspaltverhältnis [-]

μ = Reibwert [-]

Anschließend wurde das Modell für den Geometriefaktor nach einem modifizierten Lohmar Ansatz (Gleichung 3-3), welcher abhängig vom Walzspaltverhältnis und vom Reibwert ist, mithilfe der Matlab Curve Fitting Toolbox ermittelt.

$$Q_p = a + b \cdot \left(\frac{l_d}{h_m}\right) + c \cdot \left(\frac{h_m}{l_d}\right) + d \cdot \mu + e \cdot \left(\frac{1}{\mu}\right) + f \cdot \left(\frac{l_d}{h_m}\right) \cdot \mu \quad (3-3)$$

mit a, b, c, d, e, f = Fitting Parameter

Für die Vorhersage der mechanischen Eigenschaften des gewalzten Kaltbands wurde ein auf dem Umformgrad und der Vickers Härte basierender Modellierungsansatz verwendet. Zu diesem Zweck wurden zunächst alle in AP4 beschafften Kaltbänder im walzharten Zustand bezüglich ihrer Härte charakterisiert. Anhand der Ergebnisse wurde anschließend das Modell (Gleichung 3-4 bis 3-6) für die Vorhersage der Kaltbandeigenschaften mittels der Matlab Curve Fitting Toolbox kalibriert.

$$H_v = k \cdot c \cdot (\varphi_{eq})^n \quad (3-4)$$

$$YS = a_0 + a_1 \cdot H_v \quad (3-5)$$

$$UTS = b_0 + b_1 \cdot H_v \quad (3-6)$$

mit H_v = Vickershärte [HV]
 YS = Steckgrenze [MPa]
 UTS = Zugfestigkeit [MPa]
 φ_{eq} = Vergleichsumformgrad [–]
 a_0, a_1, b_0, b_1, c = Fitting Parameter

Zuletzt wurden sowohl das Modell des Geometrie Faktors als auch das Modell zur Vorhersage der Kaltbandeigenschaften in das kalibrierte schnelle Walzmodell integriert und anhand experimenteller Ergebnisse validiert. Damit wurden die Vorbereitungen zur Modellierung des Kaltwalzprozesses abgeschlossen.

3.5.2.4 Modellierung der Tiefziehprozesse / Modelling of deep drawing processes

Für die Modellierung des Tiefziehprozesses wurde ein am IBF bereits vorhandenes, implizites FE-Modell verwendet. Dieses Modell wurde für die Bestimmung des Grenzziehverhältnisses von hoch Mangan Stählen sowie die Vorhersage von Versagen eingesetzt [106]. Das FE-Kreuznapfmodell wird mit Abaqus 2019 nur als ein Viertel modelliert, um von der Symmetrie des tiefgezogenen Teils zu profitieren und den Verbrauch von Rechenressourcen zu reduzieren. Zu diesem Zweck werden Symmetriegrenzbedingungen entlang der Symmetrielinien definiert, um die realen Prozessbedingungen möglichst genau zu modellieren. Wie in Abbildung 23 dargestellt, besteht das FE-Kreuznapfmodell aus vier Teilen, nämlich dem Stempel, Matrize, Niederhalter und Platine.

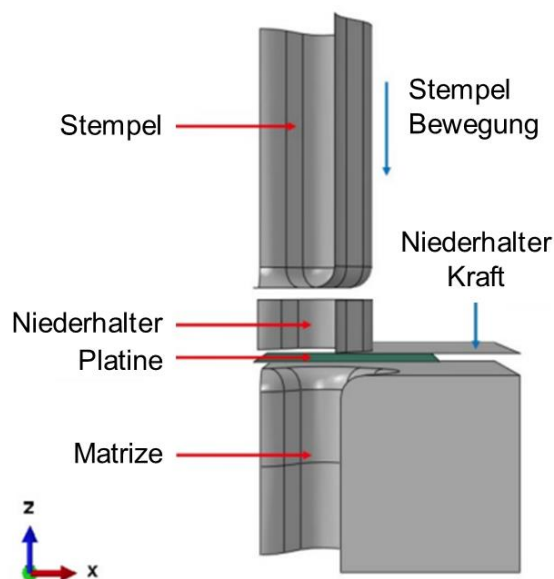


Abbildung 3-12: FE Modellierung der Kreuznapfversuch in Abaqus 2019 [108]

Figure 3-12: FE modelling of cross die test in Abaqus 2019 [108]

Die Platine wurde als verformbarer Teil mit S4R Quad Shell Elementen modelliert, während der Stempel, Niederhalter und der Stempel als diskrete starre Körper modelliert wurden. Daher wird ein Materialmodell benötigt, das das Verhalten des Materials unter der aufgebrachten Last beschreibt, jedoch nur für die Platine. Um die Wechselwirkung zwischen den Teilen zu modellieren, werden fünf Kontakt-Paare (Surface-to-Surface Kontakt) definiert, die die Wechselwirkungen der Oberflächenkontakte beschreiben.

- Kontakt zwischen Stempel und Niederhalter
- Kontakt zwischen Niederhalter und Matrize
- Kontakt zwischen Niederhalter und Platine
- Kontakt zwischen Stempel und Platine
- Kontakt zwischen Matrize und Platine

Alle Kontakte mit Platine sind mit Reibung von 0,05 [106] und Exponentiell soft normal Kontakt definiert. Die Matrize wird mit ENCASTRE-Randbedingungen auf eine Stelle fixiert. Symmetrie-Randbedingungen (X Symmetrie und Y Symmetrie) sind an den Kanten der Platine entlang der Symmetrielinien definiert. Der Blechhalter ist so fixiert, dass er sich in X- und Y-Richtungen nicht bewegen kann, jedoch entlang der Z-Richtung frei ist. Die Niederhalterkraft wird in Richtung -Z Richtung auf den Blechhalter angewendet. Die Bewegung des Stempels ist in den Richtungen X und Y blockiert, außer dass er entlang der Z-Richtung frei beweglich ist. Die Stempelgeschwindigkeit wird am Referenzpunkt des Stempels in -Z Richtung angewendet. Nach Abschluss der Simulation werden folgende Ergebnisse in der Ausgabedatenbankdatei (.odb-Datei) gespeichert:

- Plastische Dehnungsverteilung in Kreuznaht
- Dickenverteilung in Kreuznaht
- Stempelbewegung
- Stempelreaktionskraft

Alle Ergebnisse zusammen mit die Knotenkoordinaten werden dann aus der .odb-Datei extrahiert, was mithilfe des Makro-Manager-Toolbox in Abaqus CAE schnell automatisiert werden kann.

Die Inputs und Outputs des FE-Tiefziehmodells sind in Tabelle 3-3 zusammengefasst.

Tabelle 3-3: Zusammenfassung der Inputs und Outputs des FE Tiefziehmodells

Table 3-3: Summary of the inputs and outputs of the FE deep drawing model

Input	Output
Niederhalterkraft	Stempelkraft
Stempelgeschwindigkeit	Stempelweg
Platinengröße	Blechdickenverteilung
Kaltbandeigenschaften (z.B. Fließkurven, E-Modul, Fließkurve)	Dehnungsverteilung

Für die Modellierung des plastischen Materialverhaltens im FE-Tiefziehmodell wurden die im Zugversuch bestimmten Materialeigenschaften für das kommerzielle Kaltband von Stahlhersteller A aus AP4 als Referenzmaterialdaten (Referenzfließkurve) verwendet. Da in diesem Projekt das Warmband für Validierungsversuche von Stahlhersteller A beschafft wurde, wird die Fließkurve des kommerziellen Kaltbands von Stahlhersteller A als Referenzfließkurve verwendet. Für die Modellierung und Extrapolation der Referenzfließkurve wurde der Ansatz nach McConnell-Lenard (Gleichung 3-7) verwendet.

$$\sigma = A * (1 + B * \varphi)^C \quad (3-7)$$

mit $\varphi = \text{Umformgrad}$
 $A, B, C = \text{Fitting Parameter}$

Schwankungen der Kaltbändeigenschaften, d. h. der Streckgrenze und der Zugfestigkeit, führen zu einer Veränderung des plastischen Materialverhaltens und damit auch der Fließkurve. Um die Änderungen der Fließkurve aufgrund der Variation der Kaltbändeigenschaften bei der Erstellung des Tiefzieh-FE-Modells zu berücksichtigen, wird die Referenzfließkurve skaliert. Abbildung 3-13 zeigt qualitativ die Skalierung der Referenzfließkurve, um die neue skalierte Fließkurve aufgrund von Variationen der Kaltbändeigenschaften zu ermitteln.

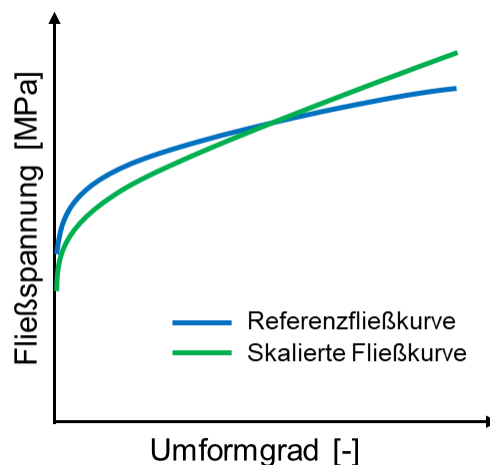


Abbildung 3-13: Qualitative Darstellung der Skalierung der Referenzfließkurve für die Erstellung des FE-Tiefziehmodells mit modifizierten Kaltbändeigenschaften

Figure 3-13: Qualitative representation of scaling of the reference flow curve for preparation of the FE deep drawing model using modified cold strip properties

Das vorbereitete FE-Tiefziehmodell wurde mit Hilfe einer Konvergenzanalyse hinsichtlich der verwendeten Netzgröße optimiert. Anschließend wurde das simulative Streuband der resultierenden Kreuznapfeigenschaften für alle drei kommerziellen Kaltbänder unter Verwendung des Standard-Tiefziehprozesses aus AP4 bestimmt.

3.5.3 Simulative Auslegung der Prozessparameter / Simulation based design of process parameter

Mit der Kenntnis über die genauen Kaltbandeigenschaften ist es möglich, den Tiefziehprozess als Reaktion auf Schwankungen oder Abweichungen in diesen Eigenschaften neu auszulegen. Die Auslegung der Prozessparameter wurde in diesem Projekt mithilfe des Design of Experiments (DoE) realisiert. Der Workflow der DoE-basierten Auslegung des Tiefziehprozesses ist in Abbildung 3-14 dargestellt. Dieser wurde unter Verwendung von Python 3.6 implementiert und automatisiert.

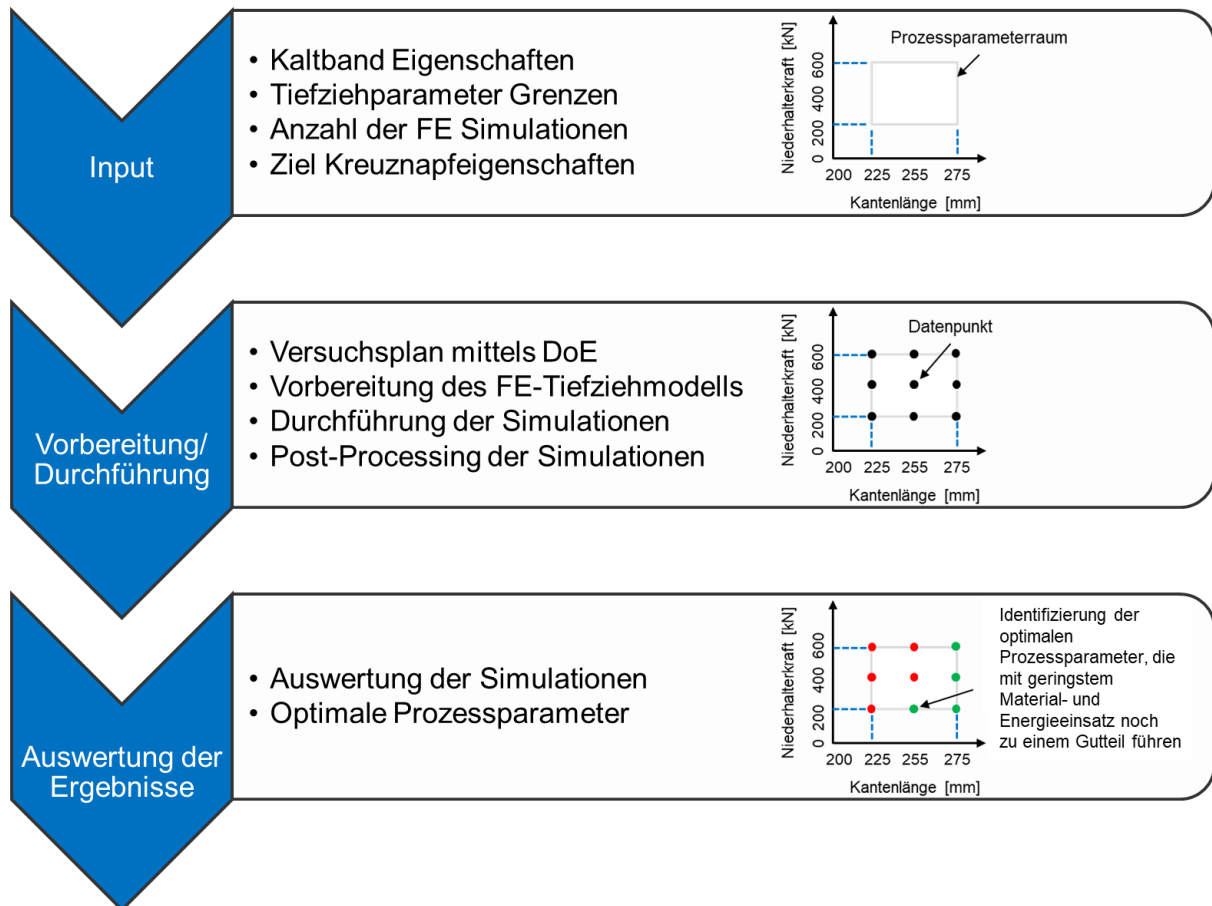


Abbildung 3-14: Workflow der DoE basierten Auslegung des Tiefziehprozesses

Figure 3-14: Workflow for DoE based design of deep drawing process

Der Workflow beginnt mit der Definition der erforderlichen Inputs für den DoE Algorithmus. Die Inputs zur Durchführung des DoE sind in Tabelle 3-4 zusammengefasst.

Tabelle 3-4: Zusammenfassung der Inputs zur Durchführung des DoE

Table 3-4: Summary of the inputs for DoE

Inputs	Parameter
Kaltbandeigenschaften	• Streckgrenze [MPa] • Zugfestigkeit [MPa]
Obere und untere Grenzen der Tiefziehparameter	• Platinenkantenlänge [mm] • Niederhalterkraft [kN]
Anzahl der Datenpunkt im Versuchsplan	• n
Ziel Kreuznapfeigenschaften	• Max. Ausdünnung [mm]

Unter Verwendung der in Tabelle 3-4 von User definierten Tiefziehparametergrenzen wird der Parameterraum vorbereitet, in dem alle Datenpunkte mithilfe der Full-Factorial DoE Methode erstellt werden. Diese werden dabei so erzeugt, dass sie gleichmäßig im Parameterbereich verteilt sind. Dies erlaubt eine Betrachtung des gesamten Parameterbereichs.

Für jeden Datenpunkt im Versuchsplan wird automatisiert ein FE-Tiefziehmodell vorbereitet und die Berechnung gestartet. Anschließend folgt ebenfalls automatisiert das Post-Processing der fertigen Simulationen, um die Simulationsergebnisse zu extrahieren. Die relevanten Ergebnisgrößen sind hier die maximale Tiefziehkraft sowie die maximale Ausdünnung.

Abschließend werden alle Simulationen analysiert, um die Datenpunkte zu ermitteln, welche die vom Benutzer definierten Ziele erfüllen. Dafür werden alle Simulationen identifiziert und farblich kodiert, die zu einem Demonstratorbauteil mit den definierten Zieleigenschaften führen. In diesem Fall handelt es sich um die Erreichung der gewünschten Kreuznapfeigenschaften (Max. Ausdünnung soll größer als die in Tabelle 3-4 von User definierten maximal zulässige Ausdünnung sein). Falls mehr als eine Simulation die Zielkreuznapfeigenschaften erfüllen, können weitere Kriterien wie bspw. ein minimaler Materialeinsatz oder ein minimaler Energieverbrauch herangezogen werden, um die optimalen Tiefziehparameter zu bestimmen.

3.5.4 Durchführung des Kaltwalzens / Execution of cold rolling experiment

Für die Validierung der datenbasierten adaptiven Prozessführung sowie des Kaltwalz-Simulationsmodells wurde das kommerziell beschaffte Warmband mit einer Dicke von 3,8 mm am IBF auf 1 mm Dicke kaltgewalzt. Das Ziel bestand darin, Kaltbänder sowohl innerhalb als auch außerhalb des Streubands der in AP4 bestimmten Kaltbandeigenschaften durch eine gezielte Anpassung der Prozessparameter zu erzeugen. Abschließend wurde das Kaltband mithilfe des Zugversuchs charakterisiert, um dessen Streckgrenze und Zugfestigkeit zu bestimmen. Das Ziel dieses Versuchs bestand darin, sicherzustellen, dass der ausgewählte Stahl erfolgreich am IBF verarbeitet werden kann und die Ergebnisse zur Validierung des Kaltwalzmodells verwendet werden können.

3.5.5 Durchführung des Tiefziehens / Conducting the deep drawing

Die Tiefziehversuche wurden durchgeführt, um die Arbeitshypothese der datenbasierten Prozessführung zu validieren und die Vorteile der adaptiven Prozessführung zu demonstrieren. Hierzu wurden die in 3.5.4 erzeugten Kaltbänder innerhalb und außerhalb des Streubands aus AP4 verwendet. Durch die modellbasierte Vorhersage der Eigenschaften von Kaltbändern und deren Übergabe vom virtuellen Unternehmen A zum virtuellen Unternehmen B ist der genaue Zustand jedes Kaltbands bekannt.

Insgesamt wurden drei Kategorien von Tiefziehversuchen mit spezifischen Zielen durchgeführt. Das Ziel, der Versuch und der Kaltbandzustand sind in Tabelle 3-5 zusammengefasst.

Tabelle 3-5: Durchgeführte Tiefziehversuche zur Validierung der datenbasierten Prozessführung
Table 3-5: Planned deep drawing experiments for the validation of the data based process control

Kategorie	Ziel	Kaltbandzustand
I	Validierung der prozessübergreifenden Datenerfassung, -speicherung und -übergabe	Innerhalb des Streubands
II	Minimierung des Kreuznapfstreubands	Innerhalb des Streubands
III	Untersuchung der Möglichkeiten zur adaptiven Prozessführung	Außerhalb des Streubands

Der **Tiefziehversuchstyp I** wurde mit Kaltband innerhalb des in AP4 ermittelten Streubandes durchgeführt. Für diese Versuche wurde der in AP4 festgelegte Standard-Tiefziehprozess verwendet. Das Ziel dieses Experiments lag in der Validierung der prozessübergreifenden Datenerfassung, -speicherung und -übergabe. Hier wurde die Funktionsweise der modellbasierten Berechnung von Kaltbandeigenschaften und deren Austausch mit dem virtuellen Unternehmen B über die Datenplattform geprüft.

Der **Tiefziehversuchstyp II** wurde mit Kaltband innerhalb des in AP4 ermittelten Streubandes durchgeführt. Für diesen Versuchstyp wird nicht mehr die Standardprozessführung aus AP4 verwendet, sondern mittels des DoE neue Prozessparameter als Reaktion auf die bekannten Eigenschaften des Eingangsmaterials ausgelegt. Das Ziel bestand dabei darin, dass Streuband der resultierenden Kreuznapfeigenschaften zu verkleinern und somit die Produktqualität zu erhöhen.

Der **Tiefziehversuchstyp III** wurde mit Kaltband außerhalb der Spezifikation durchgeführt. Der Workflow für die Durchführung Versuche in Abbildung 3-15 dargestellt. Dieser startet mit den Kaltbändern, die vom virtuellem Unternehmen A geliefert wurden und deren Eigenschaften (Zugfestigkeit und Streckgrenze) über die Datenplattform an das virtuelle Unternehmen B übermittelt wurden. Vor der Durchführung der Experimente wurde eine Tiefziehsimulation mit den in AP4

definierten Standard-Tiefziehprozessparametern durchgeführt. Zeigen die Simulationsergebnisse, dass das resultierende Tiefziehbauteil den definierten Spezifikationen entspricht, wird auch im Experiment die Standard-Prozessführung verwendet. Sagt die Simulation voraus, dass kein Gutteil erreicht wird, erfolgt eine Anpassung der Prozessparameter über DoE. Nachfolgend wird das Kaltband experimentell unter Verwendung der neu bestimmten Tiefziehparameter tiefgezogen. Das Ziel dieses Versuchs war es, die Möglichkeit der adaptiven Prozessführung zu demonstrieren, indem durch Anpassung der Tiefziehprozessparameter Kaltband außerhalb der Spezifikation zu einem Gutteil verarbeitet werden kann, welches bei Anwendung des Standard-Tiefziehprozesses zu einem Kreuznapf außerhalb der Spezifikation geführt hätte.

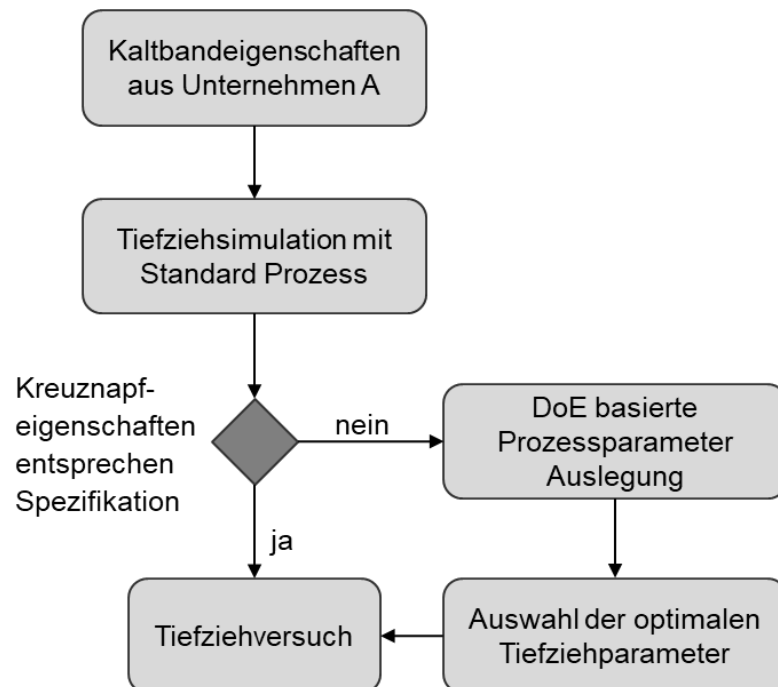


Abbildung 3-15: Workflow der Auslegung der Tiefziehprozesse basierend auf der genauen Kenntnis des Kaltbandzustands zur Untersuchung der adaptiven Prozessführung

Figure 3-15: Workflow - Design of deep drawing process using the information of about the exact cold strip properties for investigation of adaptive process control

3.6 Arbeitspaket 6/ Work package 6

In diesem Arbeitspaket wurde der Mehrwert einer unternehmens- und prozessübergreifenden Datenerfassung, -speicherung und -übergabe bewertet.

Nach der Durchführung aller Experimente und Simulationen sollten die Ergebnisse der Nutzung prozessübergreifender Datenerfassung, -speicherung und -übergabe am Beispiel des Kaltwalzens und der anschließenden Kreuznapfversuche untersucht werden. Dies diente zum einen der Überprüfung der Arbeitshypothese sowie der Analyse der Umsetzbarkeit der Vision. Zum anderen sollte die Übertragbarkeit auf die Industrie oder Anwendbarkeit in der Industrie geprüft werden. Ein Bewertungskriterium der experimentellen Ergebnisse hinsichtlich der Überprüfung der Arbeitshypothese war, ob eine Verbesserung der Prozessführung oder der Endigenschaften durch

Kenntnis des genauen Produktzustands erreicht wurde. Ein weiteres Kriterium bestand in der Reduktion der Streubreite der Endigenschaften.

Zusätzlich zur Betrachtung der experimentellen Ergebnisse sollte die Genauigkeit der Simulationen bewertet werden. Bewertungskriterium war hier vor allem die Abweichung zwischen simulierten und gemessenen Produkteigenschaften. Da die Vision beinhaltete, dass statische Produktspektren durch eine Kombination aus simulierten und gemessenen Eigenschaften ersetzt werden, musste die Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung ein schmaleres Fenster an Produkteigenschaften ergeben als die zuvor verwendeten.

Zunächst wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, um potenzielle Mehrwerte zu identifizieren und das Untersuchungsgebiet einzugrenzen. Auf Basis der Recherche wurde ein Workshopkonzept vorbereitet, das aus zwei Phasen besteht. In der ersten Phase wurden die Ideen des PAs in einer PA-Sitzung bezüglich möglichen Nutzens und Kosten gesammelt (s. Abbildung 3-16).

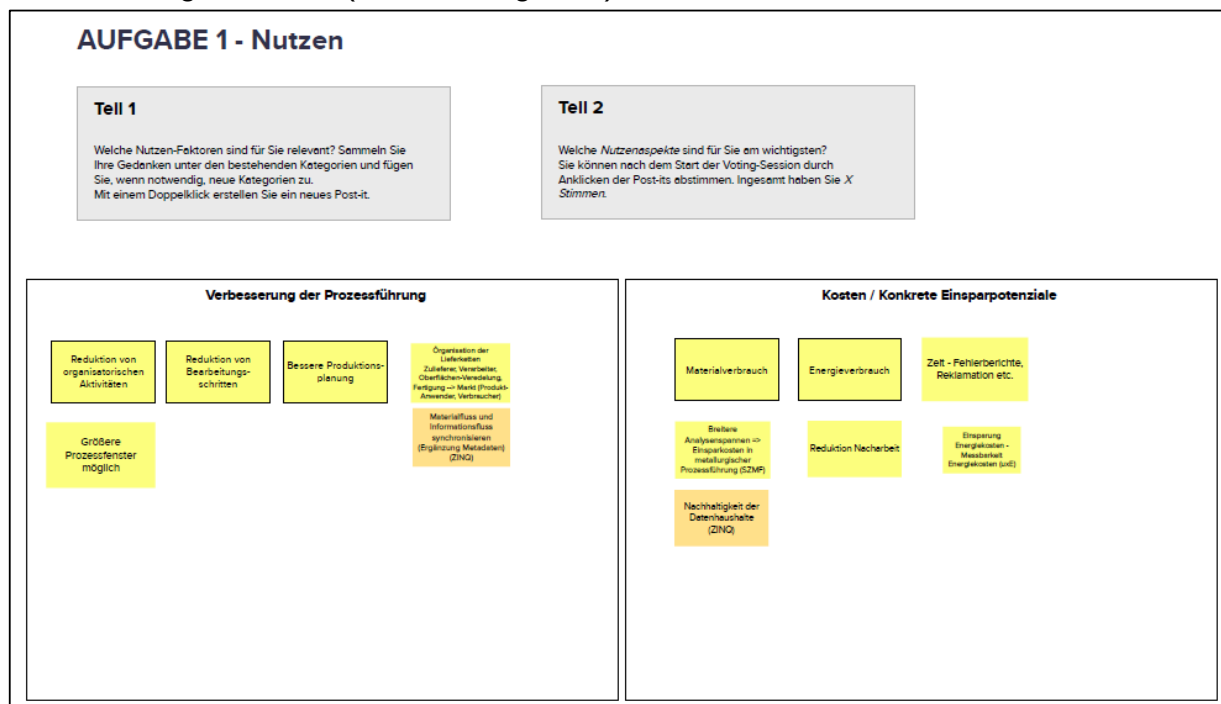


Abbildung 3-16: Ausschnitt aus dem Workshop zur Identifikation potenzieller Kosten- und Nutzenaspekte

Figure 3-16: Excerpt from the workshop on identifying potential cost and benefit aspects.

In der zweiten Phase wurden konkrete Einsparpotenziale, die sich durch die Nutzung der zusätzlichen Informationen über Materialeigenschaften für beteiligte Unternehmen ergaben, in der Zusammenarbeit mit dem PA unternehmensunabhängig untersucht. Dem gegenüber wurden die Kosten für die Implementierung, Unterhaltung und Wartung der Lösung (Projektmanagement, Retrofitting, Schnittstellen, Anpassung in betrieblichen Anwendungssystemen) gestellt (s. Abbildung 3-17).

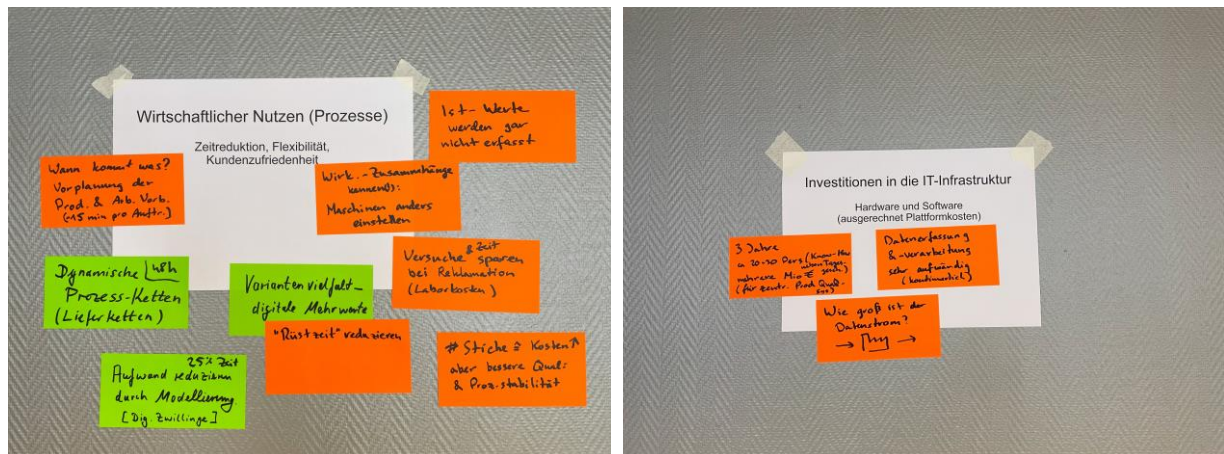


Abbildung 3-17: Ausschnitt aus dem Workshop zur Konkretisierung der Aspekte und Identifikation des wirtschaftlichen Mehrwerts

Figure 3-17: Excerpt from the workshop for the concretization of the aspects and identification of the economic added value

Zur Bestimmung des genauen wirtschaftlichen Mehrwerts wurden die identifizierten Kosten- und Nutzenaspekte anschließend mit dem PA monetär eingeschätzt. Da die monetäre Bewertung nur für einen konkreten Fall aussagekräftig ist und somit für die Industrie ohne weiteren Aufwand nicht übertragbar ist, wurde mit der Absprache mit dem PA eine allgemeingültige Lösung erarbeitet. Neben einer Übersicht von möglichen Kosten- und Nutzenaspekten wurden auch Faktoren identifiziert, die maßgeblich die Kosten- und Nutzenaspekte beeinflussen können, und deren Einfluss auf die Aspekte qualitativ bewertet. Diese Lösung ist allgemeingültig und kann von jedem Unternehmen der Stahlindustrie angewendet werden.

4 Ergebnisse und Diskussion/ Results and discussion

Kurzfassung

Verschiedene Ansätze für die Prozessmodellierung sowie zur modellbasierten Vorhersage von Produkteigenschaften wurden identifiziert. Unter Verwendung der Ergebnisse der Anforderungsanalyse und des Fragebogens mit den PA-Mitgliedern wurde das Konzept der übergeordneten Datenplattform festgelegt. Auf Basis der validierten Prozesssimulationen und der Datenplattform wurden die Kaltwalz- und Tiefziehversuche in der Testumgebung durchgeführt. Mit den Ergebnissen der datenbasierten Prozesssteuerung wurde die Möglichkeit der Implementierung einer adaptiven Prozesssteuerung demonstriert und ihr Mehrwert analysiert.

Abstract

Several approaches for process modelling and model based calculation of product properties were identified. Using the results of requirement analysis and questionnaire with PA members, the concept of data platform was determined. Together with the validated process simulation models and the data platform the cold rolling and deep drawing experiments were conducted in the test environment. With the results of the data based process control, the possibility of implementing adaptive process control was demonstrated and its added value analyzed.

4.1 Arbeitspaket 1 / Work package 1

4.1.1 Einrichtung der Testumgebung / Setting up the test environment

Die in Kapitel 3.1 beschriebene modellprozesskette bestehend aus zwei virtuellen Unternehmen wurde mit den am IBF vorhandenen Anlagen realisiert. Die realisierte Modellprozesskette ist in Abbildung 4-1 dargestellt.

Zur Abbildung der beiden virtuellen Unternehmen werden die am IBF verfügbaren Anlagen Bühler VRW-400 Universalwalzwerk für das Kaltwalzen, Lauffer RA-250 Tiefziehpresse für das Tiefziehen und Zwick Z100 für die Material Charakterisierung verwendet. Zur Prozessmodellierung kommen die Finite Elemente Software Abaqus und ein in Matlab entwickeltes, schnelles Walzmodell (RoCaT) zum Einsatz. Zur Datenerfassung kommt ein iba-System zum Einsatz, dessen Messdaten anhand einer am IBF entwickelten GUI mit Metadaten versehen und anschließend in NoSQL-Datenbanken gespeichert werden. Hier stehen Open-Source-Lösungen wie MongoDB und Arango DB zur Verfügung.

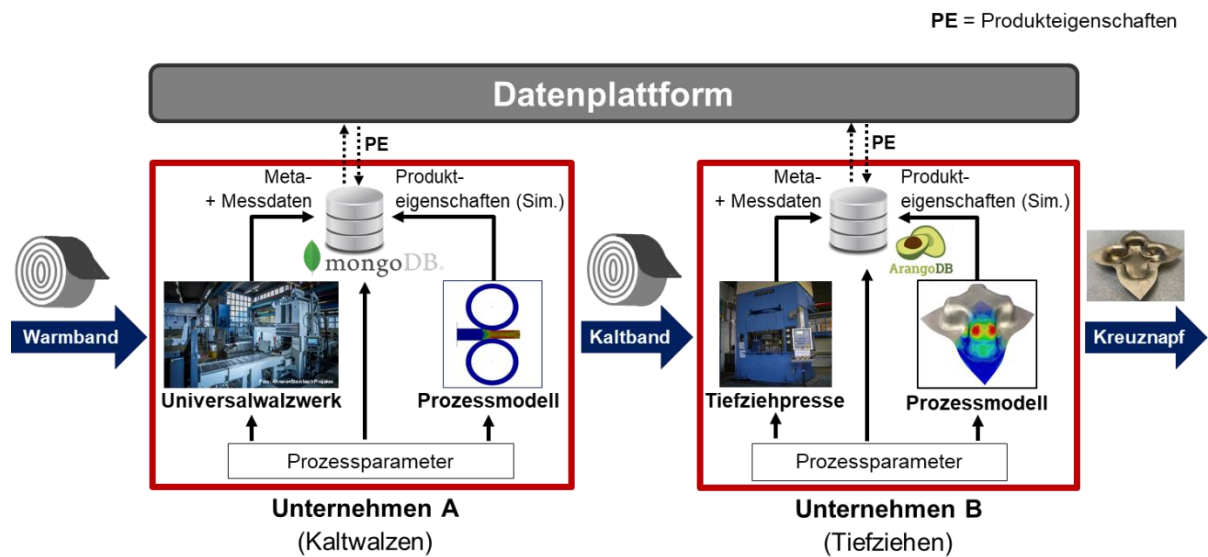


Abbildung 4-1: Modellprozesskette mit zwei virtuellen Unternehmen für Untersuchung der datenbasierten Prozessführung

Figure 4-1: Demonstrator process chain consisting of two virtual companies for the investigation of data based process control

Das virtuelle Unternehmen A repräsentiert ein Kaltwalzunternehmen. Die zum virtuellen Unternehmen A gehörende Infrastruktur ist in Abbildung 4-2 dargestellt. Virtuelles Unternehmen A nimmt Warmband und stellt Kaltband her, indem es das Warmband in mehreren Stichen am Bühler Walzwerk gewalzt, um die gewünschte Zielbanddicke zu erreichen. Zu diesem Zweck wird in Bühler Walzwerk ein Stichplan, bestehend ausfolgenden Prozessparametern, als Eingabe verwendet:

- Stichabnahme
- Walzengeschwindigkeit
- Pausenzeit zwischen Stiche
- Arbeitswalzendurchmesser

Während des Walzens werden alle messbaren Prozessdaten wie Walzkraft, Walzmoment, Walzspaltzustellung, Antriebsleistung, Walzgeschwindigkeit und Banddicke mit dem IBA-System im .DAT-Datenformat erfasst und dem Anwender am Messrechner zur Verfügung gestellt. Anschließend werden die erfassten Prozessdaten mit Hilfe der am IBF entwickelten GUI Walzup zusammen mit dem Stichplan und allen weiteren Metadaten wie Versuchsdatum, Bedienerangaben, Materialangaben, Walzgut Geometrie, Material Ofentemperatur, Versuchszweck, Soll Stichplan automatisiert gemergt und in eine .JSON Datei umgewandelt. Diese wird automatisiert in die MongoDB NOSQL-Datenbank hochgeladen.

Unter Verwendung der Prozessparameter der durchgeführten Kaltwalzversuche erfolgt die Erstellung der Inputdateien für die Kaltwalzsimulationen. Die relevanten Simulationsergebnisse, wie Walzkraft, Walzmoment, Spannungsverteilung, Formänderungsverteilung, Korngrößen- und Temperaturverteilung im Walzgut sowie die vorhergesagten Kaltbändeigenschaften, d.h. Zugfestigkeit und Steckgrenze, werden extrahiert und in eine .JSON-Datei umgewandelt. Diese wird ebenfalls in der MongoDB NOSQL-Datenbank unter der gleichen ID wie die experimentellen

Ergebnisse hochgeladen. Somit sind für jedes prozessierte Material alle experimentellen Daten und Simulationsdaten unter einer eindeutigen ID gespeichert.

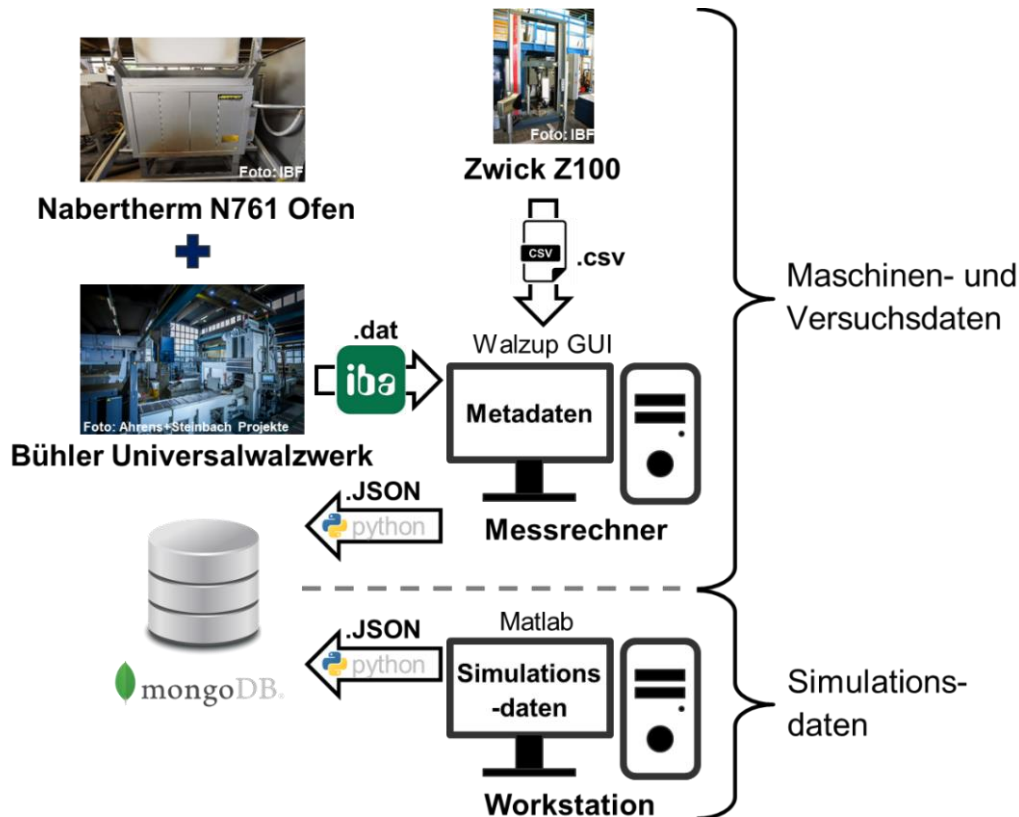


Abbildung 4-2: Infrastruktur für Datenerfassung und -speicherung in einer NoSQL-Datenbank in virtuellen Unternehmen A

Figure 4-2: Infrastructure for data acquisition and data storage in a NoSQL Databank in virtual company A

Das Unternehmen B repräsentiert ein Tiefziehunternehmen. Die Infrastruktur für die Datenerfassung und -speicherung in Unternehmen B ist in Abbildung 4-3 dargestellt. Das Unternehmen B erhält Kaltband von Unternehmen A und bearbeitet dieses, um das Tiefziehbauteil zu erzeugen. Zu diesem Zweck wird in Lauffer Tiefziehpresse folgenden Prozessparametern, als Eingabe verwendet:

- Niederhalterkraft
- Stempelgeschwindigkeit

Während des Tiefziehprozesses werden messbare Prozessgrößen wie Stempelweg und Stempelkraft erfasst und dem Anwender im .xlsx Datenformat am Messrechner zur Verfügung gestellt. Die erfassten Daten werden analog zu Unternehmen A in das JSON-Datenformat umgewandelt und automatisiert in die ArangoDB NoSQL Datenbank hochgeladen.

Unter Verwendung der Prozessparameter der durchgeführten Tiefziehversuche erfolgt die Erstellung der Tiefziehsimulationsmodelle. Die Simulationsergebnisse, bestehend aus Stempelkraft, Stempelweg und Blechdickenverteilung, werden ebenfalls in das JSON-Datenformat umgewandelt und in der ArangoDB NoSQL-Datenbank unter der gleichen ID wie die Versuchsdaten hochgeladen.

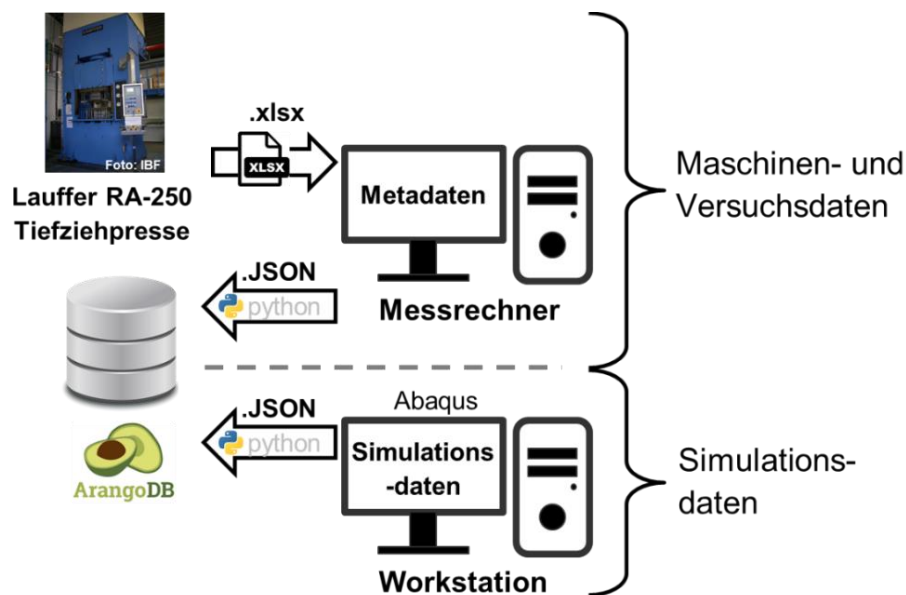


Abbildung 4-3: Die Infrastruktur für Datenerfassung und -speicherung in einer NoSQL-Datenbank in virtuellen Unternehmen B

Figure 4-3: Infrastruktur für Datenerfassung und -speicherung in einer NoSQL-Datenbank in virtuellen Unternehmen B

4.1.2 Erzielte Ergebnisse / Achieved Results

Das Ziel des Arbeitspakets 1 und somit das erste Teilziel des Forschungsprojekts, bestehend aus der **Einrichtung der Testumgebung für die ausgewählte Modellprozesskette**, wurde erfolgreich abgeschlossen. Das erste Unternehmen fungiert als Zulieferer und beschäftigt sich mit dem Kaltwalzen, während das zweite Unternehmen als Kunde agiert und sich mit dem Tiefziehen befasst. Zusätzlich wurden geeignete Methoden/Technologien zur Datenerfassung, -speicherung und -übertragung implementiert.

4.2 Arbeitspaket 2 / Work package 2

Im Zuge der digitalen Transformation der gesamten Lieferkette und Bestrebungen zur adaptiven Produktion spielen effiziente Datenaustausch- und Speicherlösungen eine zentrale Rolle für Unternehmen. Dieses Kapitel widmet sich der konzeptionellen Entwicklung einer Datenplattform, die den überbetrieblichen Austausch von Prozess- und Modelldaten ermöglicht.

4.2.1 Zielbild konkretisieren / Specification of the target concept

In der Zusammenarbeit der beiden Forschungseinrichtungen wurde auf Basis der relevanten Prozessschritte (Kaltwalzen und Blechumformung) und Ziele des Forschungsprojekts (überbetrieblicher Datenaustausch) nach dem Stand der Technik ein Zielbild erstellt, das in Abbildung 4-4 vorgestellt ist.

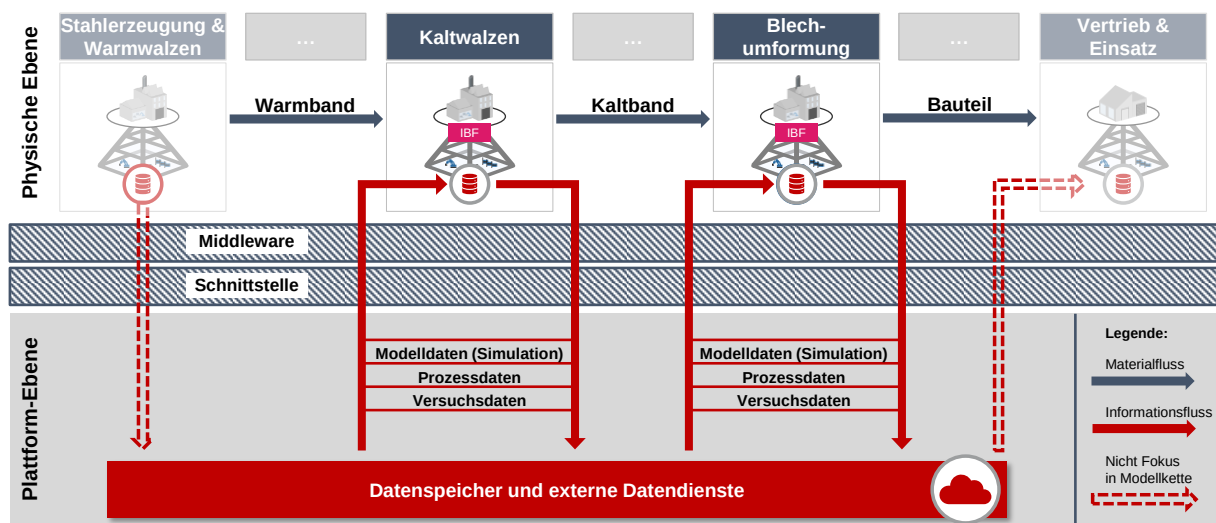


Abbildung 4-4: Erster Entwurf des Zielbilds

Figure 4-4: First draft of the target

Das Zielbild dient als der Wegweiser für alle Aktivitäten des Arbeitspakets und als Grundlage, anhand derer die Plattform entwickelt wird. Das Zielbild umfasst die wichtigsten Komponenten der gesamten Umgebung, die aus Unternehmen, Maschinen, Daten, Prozessen und Aufgaben besteht. Die physische Ebene umfasst alle Aktivitäten, Prozesse und Objekte in der realen Welt, z. B. Materialbewegungen zwischen Unternehmen und Server mit gespeicherten Daten. Zur Plattformebene gehören alle Aktivitäten, Prozesse und Objekte, die auf einer Datenplattform erfolgen, z. B. Datenbereitstellung und -übertragung sowie konkrete Daten. Die Kommunikation der physischen Ebene und der Plattformebene erfolgt durch die Middleware bzw. Schnittstellen. Diese Komponenten umfassen die in Arbeitspaket 3 zu untersuchende Standardisierung. Die Interaktion der Objekte auf den beiden Ebenen ist durch die Flusspfeile gekennzeichnet.

Neben dem Zielbild wurden auch die relevanten Datentypen definiert, die für die adaptive Prozessführung notwendig sind. Diese Daten wurden in Produkt- und Prozessdaten unterteilt und sind in Abbildung 4-5 vorgestellt.

Produktdaten	Prozessdaten
- Mechanische Eigenschaften (z.B. Streckgrenze, Zugfestigkeit) - Gefüge - Chemische Zusammensetzung - Geometrische Maße - Oberflächengüte - Beschichtung - Qualität des Materials (Unreinheiten, Fehler) - Daten zum Transport und Verpackung - Weitere Eigenschaften (Schweißbarkeit)	- Anlagen- / Werkzeuggeschwindigkeiten - Geometrieveränderung (z. B. Höhenabnahme) - Kraft - Umgebungsdaten (Temperatur, Feuchtigkeit)

■ Relevante Daten für das Forschungsprojekt

Abbildung 4-5: Relevante Daten für adaptive Produktion

Figure 4-5: Data relevant for adaptive production

4.2.2 Anforderungserhebung/ Collection of requirements

Vor Beginn der Anforderungserhebung wurden zwei Zielgruppen definiert: produzierende Unternehmen und IT-Unternehmen. Zusammen mit produzierenden Unternehmen sollten Anforderungen an die Datenplattform erarbeitet werden. Neben den explizit genannten Anforderungen konnten durch die Analyse der Prozesse und Arbeitsweise auch die impliziten Anforderungen abgeleitet werden. Die IT-Unternehmen sollten die technischen Möglichkeiten und Rahmenbedingungen des unternehmensübergreifenden Datenaustausches darstellen. Für jede Zielgruppe wurde jeweils ein Interviewleitfaden erstellt. Der Leitfaden wurde so konzipiert, dass er eine systematische Erfassung der Anforderungen entsprechend dem Zielbild ermöglichte.

Nach Abschluss der Interviews wurde eine Analyse der gesammelten Informationen durchgeführt. Dabei wurden die erfassten Aspekte bereinigt, um Redundanzen zu eliminieren und die Qualität der Anforderungen zu erhöhen. Anschließend erfolgte das Clustering der Anforderungen in Hauptkategorien, um eine übersichtliche Struktur zu schaffen. Das ursprüngliche Vorgehen sah vor, die Anforderungen in drei Kategorien zu betrachten: Datenanforderungen, Datenverarbeitungsanforderungen und allgemeine Anforderungen. Jedoch hat die genaue Untersuchung der Anforderungen gezeigt, dass die angedachte Verteilung nicht die tatsächlichen Schwerpunkte der erhobenen Anforderungen widerspiegelt. Aus diesem Grund wurden Kategorien definiert, die eine ausgeglichene Verteilung der Anforderungen darstellen. Die Anzahl der Anforderungen in den ursprünglich definierten und den neuen relevanten Kategorien ist in Abbildung 4-6 dargestellt.

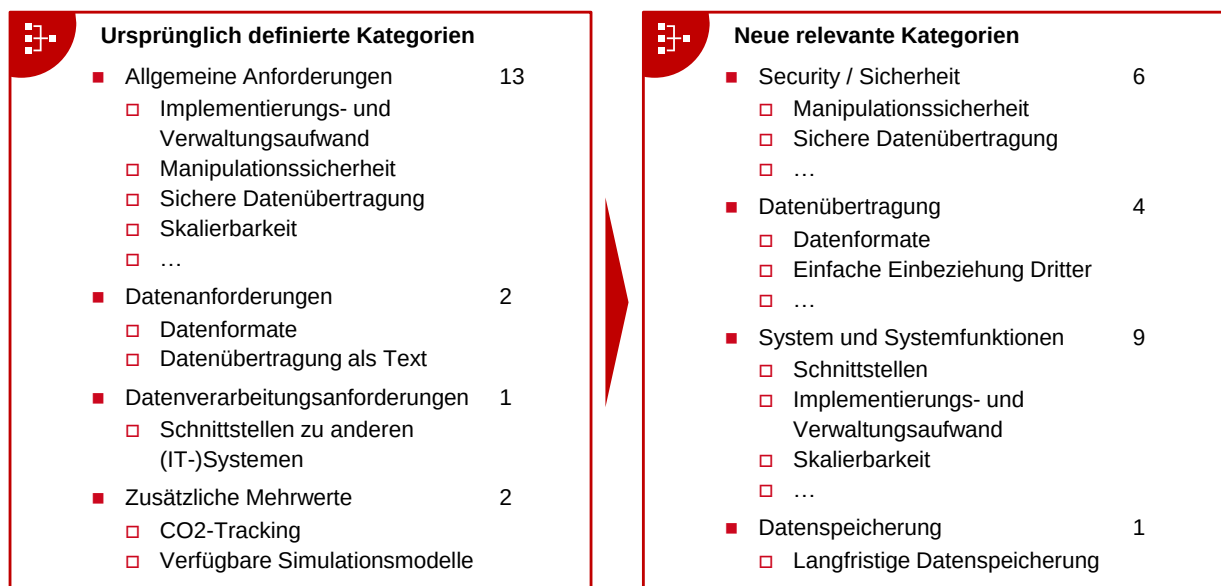


Abbildung 4-6: Unterschiede bei den ursprünglich definierten und neuen relevanten Kategorien

Figure 4-6: Differences in the originally defined and new relevant categories

Insgesamt wurden 20 konkrete Anforderungen an die Datenplattform in vier Kategorien definiert. Anschließend wurden die Anforderungen mithilfe des paarweisen Vergleiches gewichtet. Die Übersicht ist in Tabelle 4-1 dargestellt. Die Anforderungen und deren Gewichtungen wurden mit dem PA validiert und bestätigt.

Tabelle 4-1: Vorstellung der gewichteten Anforderungen

Table 4-1: Presentation of the weighted requirements

Kategorie	Aspekt	Gewichtung
Sicherheit	Geschützte Datenübertragung	10,11%
Sicherheit	Kontrolle über eigene Daten behalten	9,57%
Sicherheit	Sicherheit gegen Dritte	9,04%
Übertragung	Datenübertragung als Text	8,51%
Sicherheit	Daten im Netzwer eigenständig schützen	6,91%
Sicherheit	Manipulationssicherheit	6,38%
Übertragung	Einebeziehung Dritter soll möglich sein	6,38%
Speicherung	Langfristige Datenspeicherung	5,85%
Übertragung	Übertragung anderer Formate	5,85%
Sicherheit	Kein Datenzugriff durch Serviceanbieter	5,32%
System	Skalierbarkeit	4,79%
System	Verwaltungsaufwand	4,26%
System	Implementierungsaufwand	3,72%
System	Erfassung der Zugriffshistorie	3,72%
System	Adressierung von Vertrauensproblemen	3,19%
System	Berücksichtigung unterschiedlicher Schnittstellen	2,13%
Übertragung	Versenden von Lieferpapieren	2,13%
System	Verfügbarkeit von Simulationsmodellen	1,06%
System	CO2-Angaben sind erwünscht	1,06%
System	Produkt-/Chargenverfolgung ist erwünscht	0,00%

Wie aus der Analyse der Anforderungen hervorgeht, ist **IT-Sicherheit** großer Bedeutung. Unternehmen haben Bedenken hinsichtlich des Verlustes ihrer Daten und somit des Know-Hows. Die Prozesse und Materialverarbeitung sind die Alleinstellungsmerkmale spezialisierter Stahlbearbeitungsunternehmen. Falls diese Daten an andere Unternehmen geraten, kann dies zu erheblichen Wettbewerbsnachteilen bis zur Insolvenz führen. Aus diesem Grund wurde entschieden, im weiteren Projektverlauf nur die Materialdaten (s. Abbildung 4-5) für den unternehmensbergreifenden Datenaustausch zu berücksichtigen. Die Sicherheitsanforderungen betreffen nicht nur eine sichere Datenübertragung und den Schutz der Daten gegen Fremdzugriff: Unternehmen wollen die Kontrolle über eigene Daten stets behalten und diese idealerweise auf eigenen Servern speichern. Auch

Dienstleistungsanbieter sollen keinen Zugriff auf die Daten haben. Darüber hinaus ist für Unternehmen die Manipulationssicherheit sehr wichtig: Daten dürfen weder vor noch nach der Bereitstellung auf der Datenplattform verändert werden.

Hinsichtlich des tatsächlichen **Datenaustausches** stellt sich heraus, dass Unternehmen überwiegend Daten im maschinenlesbaren Format austauschen wollen. Aber auch die Möglichkeit, Daten in anderen Formaten, wie z. B. PDF, Konstruktions- oder Simulationsdateien, ist für Unternehmen großer Bedeutung. Diese Daten sollen mit Lieferanten und Kunden ausgetauscht werden, daher sollen diese auf einfache Weise in das Netzwerk integriert werden.

In Bezug auf die **Datenplattform** (Kategorie *System*) ist für Unternehmen die Skalierbarkeit wichtig, sodass die Datenplattform für große Datenmengen und eingebundene Partner geeignet ist. Die Datenplattform soll dabei möglichst wenige Aufwände verursachen – sowohl während der Implementierung als auch während des Betriebs.

4.2.3 Auswahl der Basistechnologie/ Selection of base technology

Die im Kapitel 2.6 beschriebenen Technologien wurden anhand der erhobenen Anforderungen bewertet. Die Bewertungsskala reichte von 0 (nicht erfüllt / nicht vorhanden) bis 3 (vollständig erfüllt). Jedes Kriterium wurde unabhängig voneinander bewertet. Da manche Anforderungen sich gegenseitig ausschließen bzw. gegenläufig sind, wurden zusätzlich Fallunterscheidungen in Best Case (theoretisch bestmögliche Erfüllung) und Worst Case (theoretisch schlechteste Erfüllung) vorgenommen. Beispielsweise behält das Unternehmen die volle Kontrolle über eigene Daten und alle Datentransaktionen, wenn das Unternehmen die Plattform selbst hostet (Bewertung für das Kriterium „Kontrolle über eigene Daten behalten“ ist 3). Dabei steigt der Aufwand zum Betreiben so einer Plattform deutlich (Bewertung für das Kriterium „Verwaltungsaufwand“ ist 1) im Vergleich zur Einbeziehung eines Dienstleisters. Somit sind die Werte des Best and Worst Cases theoretisch und können nicht erreicht werden. Dabei gilt: Je enger die Extremwerte sind, desto eindeutiger ist die Technologie umzusetzen.

Als Grundlage zur Bewertung der Technologien dienten Erkenntnisse aus den Interviews mit IT-Unternehmen, aus wissenschaftlicher Literatur, Technologiebeschreibungen und Berichten (sowohl seitens der IT-Dienstleister bzw. IT-Anbieter als auch seitens der Unternehmen, die die Technologien eingesetzt haben) sowie Erkenntnisse aus Rücksprachen mit Technologieexperten (z. B. myOpenFactory für EDI und Advaneo für IDS). Die unterschiedlichen Perspektiven aus der Recherche in der Kombination mit dem Expertenwissen haben eine möglichst genaue und objektive Bewertung der Technologien ermöglicht. Diese ist in Abbildung 4-7 dargestellt.

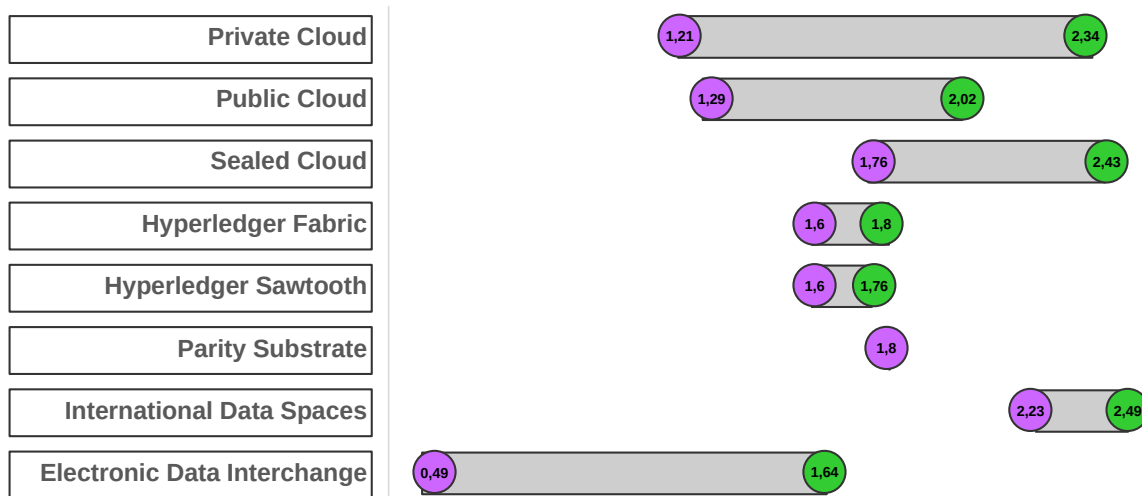


Abbildung 4-7: Ergebnis der Bewertung der Basistechnologien

Figure 4-7: Result of the evaluation of the foundation technologies

Nach der Gewichtung hat sich die **IDS-Technologie** als die passende Basistechnologie für die konzipierte Datenplattform rausgestellt. Diese Technologie gibt nicht nur technische Standards vor, sondern beschreibt das gesamte Konzept des überbetrieblichen Datenaustausches. Das zentrale technische Element ist der IDS-Connector – eine Software, die besonderen Zertifizierungskriterien entspricht und den technischen Zugang zum IDS-Ökosystem bereitstellt. Im IDS-Ökosystem gibt es unterschiedliche Rollen: Datenerzeuger, Datenbereitsteller, Datenkonsument, Datennutzer, Dienstleister, Broker, Clearingstelle (zur Protokollierung von Transaktionen), Daten-App-Anbieter und Daten-App-Store. Durch diese Rollenverteilung und Zertifizierung wird ein Ökosystem angestrebt, in dem Daten sicher behandelt werden. Das Konzept der IDS-Technologie stimmt auch mit dem Konzept der Datenplattform überein und eignet sich nicht nur seitens der Anforderungen, sondern auch der Vision des zukünftigen überbetrieblichen Datenaustausches.

4.2.4 (Internes) Lastenheft und Plattformentwicklung/ (Internal) specification sheet and platform development

Auf Basis der durchgeführten Interviews, daraus abgeleiteten Anforderungen sowie der Funktionsweise von IDS-Technologie wurde das Zielbild konkretisiert und das finale Konzept der Datenplattform erstellt.

Das finale **Konzept der Datenplattform** ist in Abbildung 4-8 zu sehen. Das Konzept wird anhand der beispielhaften Prozesskette am IBF, bestehend aus Kaltwalzen und Tiefziehen, erklärt. Die Datenplattform verbindet alle Unternehmen einer Prozesskette, dient jedoch nicht als ein Speicherort der Prozess- und Produktdaten. Auf der Plattform werden lediglich die Metadaten über Produkte (Kaltband) bereitgestellt. Interessierte Unternehmen (Umformunternehmen) können auf der Plattform Daten zum bereits erworbenen Produkt finden und diese beim Unternehmen (Kaltwalzunternehmen) anfragen. Das Unternehmen (Kaltwalzunternehmen) kann auf der Plattform die Zugriffsrechte verwalten und Zugänge erteilen. Wenn ein Zugang erteilt wird, werden Daten direkt zwischen den beiden Unternehmen ausgetauscht (Peer-to-Peer-Datenaustausch). Somit werden die Anforderungen hinsichtlich der sicheren

Datenhaltung und des sicheren Datenaustausches erfüllt. Der Plattformbetreiber hat somit keinen Zugang zu den sensiblen Produktdaten.

Die Plattform soll aber nicht nur als ein Datenkatalog oder Datenmarktplatz dienen, sondern auch perspektivisch zusätzliche Dienste bieten. Diese sind in Tabelle 4-1 unter der Kategorie Mehrwert zusammenfasst. So sollte die Plattform auch das Versenden und die Verwaltung von Lieferpapieren und Materialzeugnissen, Simulationsdienste (z. B. ein Unternehmen könnte eigene Simulationsmodelle und -dienstleistungen auf der Plattform anbieten, damit Unternehmen ohne des Simulations-Know-hows profitieren können) und Tracking von CO2 oder anderen nachhaltigkeitsbezogenen KPIs (z. B. Wasser und Energie) ermöglichen.

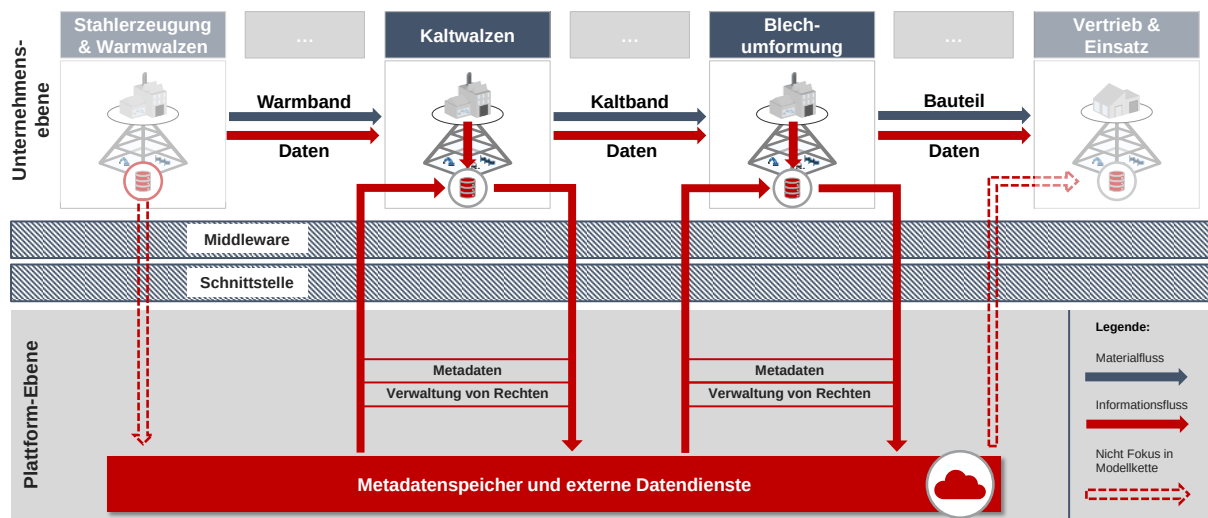


Abbildung 4-8: Das finale Konzept der Datenplattform zum überbetrieblichen Datenaustausch entlang einer Prozesskette

Figure 4-8: The final concept of the data platform for inter-company data exchange along a process chain

Zur Konkretisierung der Plattform wurde ein Lastenheft entwickelt, das die wichtigsten Anforderungen umfasst. Durch die Rücksprache mit IT-Experten aus dem PA wurde entschieden, das Lastenheft technologieneutral zu gestalten, um den Einsatz anderer Technologien zu ermöglichen, die sich dem Konzept von IDS nähern. Somit werden andere ähnliche, sowohl aktuelle als auch zukünftige Technologien nicht ausgeschlossen und Wettbewerb und Innovation nicht eingeschränkt.

Aus dem generischen Anforderungskatalog, der alle erhobenen Anforderungen enthält, wurden auch die fallspezifischen Anforderungen an die Dateninfrastruktur der Prozesse sowie an die am IBF zu verarbeitenden Daten, Schnittstellen sowie Datenintegration und -eingabe abgeleitet bzw. definiert. Auszüge des Lastenhefts sind in Abbildung 4-9 zu sehen.

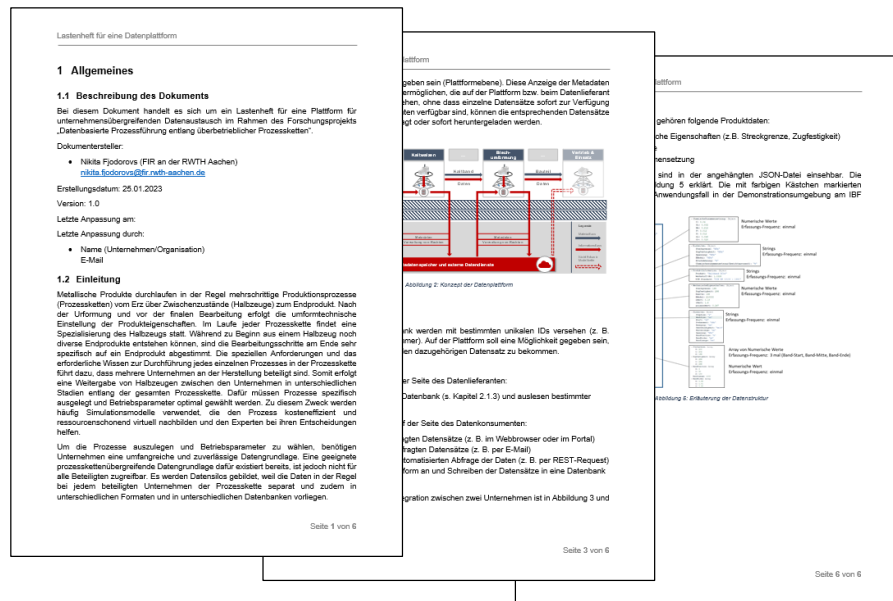


Abbildung 4-9: Beispielhafte Auszüge aus dem Lastenheft für die Entwicklung des Plattformprototyps

Figure 4-9: Sample excerpts from the specifications for the development of the platform prototype

Im Anschluss wurde anhand des erstellten Lastenhefts gemeinsam mit einem Partner aus dem PA, Seeburger AG, die Datenplattform entwickelt. Zur Entwicklung der Plattform wurde nicht die IDS-Technologie ausgewählt, sondern eine Seeburger-interne Technologie, die jedoch das grundlegende Konzept der IDS-Technologie widerspiegelt. Die Unterschiede der Technologien sind in Abbildung 4-10 dargestellt.

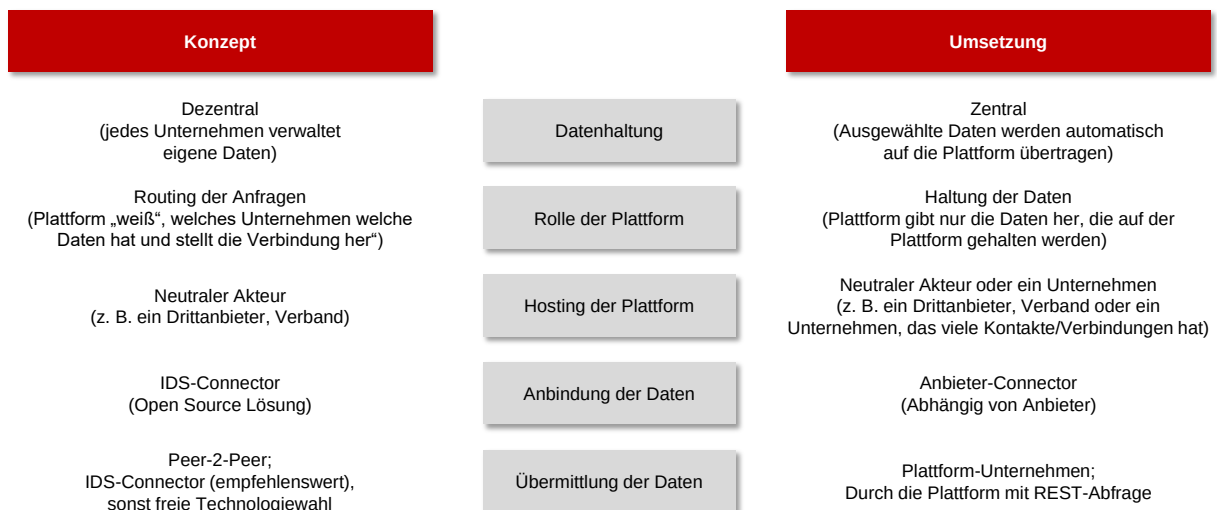


Abbildung 4-10: Erläuterung der Unterschiede zwischen der IDS-Technologie und der umgesetzten Datenplattform

Figure 4-10: Explanation of the differences between the IDS technology and the implemented data platform.

Mithilfe der Datenplattform wurden Materialdaten aus dem Kaltwalzprozess (Datenbank des Unternehmens 1) per REST-API durch die entwickelte Plattform (wo die Verwaltungsaktivitäten stattfinden) an das nachgelagerte Unternehmen (Blechumformung) weitergegeben. Das Funktionskonzept und die Interaktion sind in Abbildung 4-11 vorgestellt.

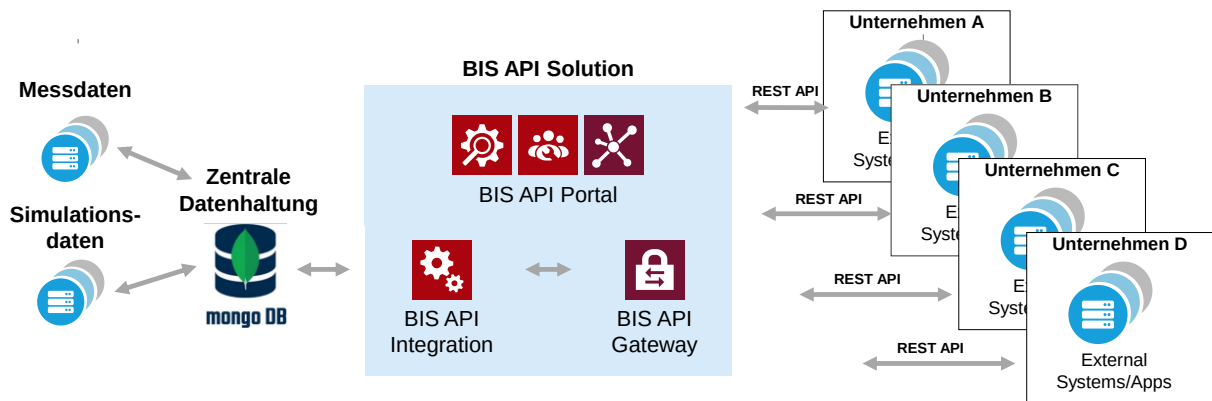


Abbildung 4-11: Funktionskonzept der Datenplattform und die Interaktion mit der Plattform

Figure 4-11: Functional concept of the data platform and interaction with the platform

4.2.5 Erzielte Ergebnisse / Achieved Results

Das Ziel des Arbeitspakets und somit das zweite Teilziel des Forschungsprojekts, die **Konzeption einer Datenplattform** und Entwicklung eines Plattformprototyps, wurde erfolgreich erreicht. Durch die Aufnahme und Analyse von Industrieanforderungen und Bewertung der Basistechnologien wurde das geeignete Konzept der Datenplattform erstellt. Anschließend wurde mit der Unterstützung des PA ein Plattformprototyp entwickelt, um Materialdaten in der Testumgebung zu übertragen und somit die Umsetzbarkeit des Konzepts darzustellen.

4.3 Arbeitspaket 3 / Workpackage 3

Um die Nutzbarkeit der erzielten Ergebnisse für eine große Breite industrieller Unternehmen sicherzustellen, erfolgen eine Ausarbeitung standardisierungswürdiger Inhalte und die Vorarbeiten für die Normung bzw. die Einleitung von Standardisierungsprozessen. Standards sind festgelegte Regeln und Vorschriften, die bestimmte Verfahren, Technologien oder Produkte beschreiben und definieren. Sie dienen dazu, eine einheitliche Herangehensweise an bestimmte Prozesse und Technologien sicherzustellen und so eine konsistente und zuverlässige Leistung zu gewährleisten [109]. Standards sind wichtig, weil sie:

- Interoperabilität und Kompatibilität fördern: Standards ermöglichen es, dass verschiedene Systeme, Geräte und Produkte miteinander kommunizieren und zusammenarbeiten können [110,111]
- Konformität: Durch die Verwendung von Standards kann sichergestellt werden, dass Produkte und Prozesse bestimmten Anforderungen entsprechen, was die Konformität erhöht und so die Kosten für Überprüfungen und Zertifizierungen reduzieren kann [112].
- Qualität und Sicherheit verbessern: Standards stellen sicher, dass Produkte und Technologien bestimmte Qualitäts- und Sicherheitsanforderungen erfüllen und helfen so, Fehler und Unfälle zu vermeiden [113,114].

- Effizienz und Produktivität erhöhen: Standards ermöglichen es, Prozesse und Technologien auf einheitliche und effiziente Weise zu nutzen, was zu einer höheren Produktivität und Effizienz führen kann [115].
- Innovation fördern: Durch die Verwendung von Standards kann sichergestellt werden, dass neue Technologien und Ideen auf eine Weise entwickelt werden, die mit bestehenden Systemen und Prozessen kompatibel ist [110].
- Entwicklungskosten: Durch die Verwendung von Standards kann sichergestellt werden, dass neue Technologien und Ideen auf eine Weise entwickelt werden, die mit bestehenden Systemen und Prozessen kompatibel sind, was die Entwicklungskosten reduzieren kann [115].
- Handelsbarrieren: Durch die Verwendung international anerkannter Standards können Handelsbarrieren reduziert werden, was zu einer Erhöhung des Handelsvolumens und einer Reduzierung der Handelskosten beitragen kann [114].

Die Notwendigkeit der Standardisierung der Datenübertragung innerhalb von Lieferketten ist aktuell sehr hoch, weil die Komplexität der Lieferketten aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Akteuren und Logistikobjekten kontinuierlich steigt. Dazu werden immer mehr Daten entlang der Lieferkette generiert. Der Austausch dieser Daten kann die Transparenz erhöhen sowie Prozesse und Entscheidungen verbessern [116].

4.3.1 Normungsbedarf identifizieren/ Identify need for standardisation

Zunächst wurde eine Literaturrecherche in wissenschaftlichen Datenbanken, Normungsdatenbanken und Fachzeitschriften zum aktuellen Stand der Standardisierung durchgeführt. Es gibt zahlreiche Normen, bewährte Verfahren, Protokolle und Plattformen, die die Verfahren zur Datenerfassung, -speicherung und -übermittlung in der Branche beschreiben, regeln und Verbesserungen vorschlagen. Diese Standards, Best Practices, Protokolle und Plattformen werden der Übersichtlichkeit halber unter dem Begriff *Verfahren* zusammengefasst. Zur Ermittlung der existierenden Verfahren wurden die Scopus-Datenbank, ScienceDirect-Datenbank, IEEE-Datenbank, Google Scholar, Beuth-Verlag, VDE-Verlag und DIN-Datenbank verwendet. Die für die Recherche verwendeten Begriffe sind spezifisch für die Stahlindustrie und allgemein für die verarbeitende Industrie. Es wurde nach den folgenden Begriffen einzeln und in Kombinationen miteinander gesucht:

"Datenerfassung", "Datenspeicherung", "Datenaustausch", „Datenübertragung“, "Datentransfer“, „unternehmensübergreifend“, „in Lieferketten“, "Datenstandards".

Vorrangig wurden Verfahren, Online-Artikel, Publikationen berücksichtigt, die sich auf die Stahl- und Fertigungsindustrie beziehen. Normen, die die IT-Sicherheit erläutern, sind nicht Gegenstand der Untersuchung, da davon ausgegangen wird, dass die Organisation und Drittanbieter von Software die Normen und das EU-Datenschutzgesetz zur Sicherung ihrer IT-Systeme befolgen. Standards für den elektronischen Datenaustausch sind nicht Gegenstand dieser Arbeit, da verschiedene Organisationen wie VDI, ODETTE, EDIFACT, ASC X12 bereits die EDI-Nachrichtenstandards definiert haben. Der aktuelle Stand der Erkenntnisse zu EDI ist

in Kapitel 2.7.1 detailliert vorgestellt. Normen, die in Bezug auf die Definition von Maschinenparametern für die Datenerfassung zu technisch sind, werden ausgeschlossen. Normen wie ISO 20000 (ITSM) fallen nicht in den Anwendungsbereich, da sie den Endzustand definieren und keine Schritte oder Vorschläge zur Erreichung des Endzustands enthalten. Plattformen, die den Austausch von Beschaffungsinformationen anbieten, sind ausgeschlossen, da die Beschaffung nicht als Anwendungsfall für diese Arbeit betrachtet wird.

Es wurde identifiziert, dass der systematisierte Datenaustausch zwischen Unternehmen einer Lieferkette noch nicht stattfindet. Eine der Ursachen ist eine fehlende oder unstrukturierte Zusammenarbeit [117]. Der Stand der Standardisierung variiert je nach Branche. Beispielsweise gibt es in der Luftfahrtbranche oder Pharmaindustrie bereits hohe regulatorische Anforderungen, die den Bedarf und die Bereitschaft zur Standardisierung fördern. Hier wurden bereits umfassende Standards für die Datenerhebung, die -archivierung und den -austausch etabliert und entsprechende Plattformen und IT-Systeme entwickelt. In der Stahlindustrie hingegen gibt es diesbezüglich weniger regulatorische Vorgaben, und Unternehmen nutzen produktbezogene Daten oft nur intern.

Unternehmen haben jedoch erkannt, dass der unternehmensübergreifende Datenaustausch Mehrwerte der gesamten Lieferkette erhöhen kann [116]. Daher steigt auch die Bereitschaft, Daten zu teilen und an entsprechenden Forschungsinitiativen teilzunehmen (z. B. Catena-X oder Uranos-X). Auch im Forschungsprojekt beteiligte Unternehmen berichten über engere Zusammenarbeit mit manchen Kunden berichteten, in der der Austausch von Produktions- und Produktdaten unstrukturiert erfolgte.

Moderne Informations- und Kommunikationstechnologien ermöglichen eine effiziente Abstimmung von Aufgaben und Produktionsschritten. Eine unternehmensübergreifende Standardisierung von Datenübertragung und Schnittstellen ist unerlässlich, um das Potenzial dieser Vorteile auszuschöpfen [118].

Durch die Standardisierung der Datenübertragung ist es möglich, die Komplexität der Datenvorbereitung oder Schnittstellendefinition zu reduzieren, die Effizienz der Datenübertragung zu steigern und die Zusammenarbeit zwischen den Akteuren in der Lieferkette durch klare Regeln und Vorgaben zu erleichtern. Die Bereitschaft zur Datenfreigabe und Zusammenarbeit wächst, und mit fortschreitenden Technologien und Reifegraden der Konzepte werden sich auch die Standardisierungsbemühungen weiter verstärken.

Bereits in den Interviews im Arbeitspaket 2 wurde der Normungsbedarf identifiziert. Die identifizierten Ansatzpunkte wurden im weiteren Verlauf des Forschungsprojekts in tiefergehenden Interviews mit konkreten Fragestellungen zur Standardisierung sowie Workshops mit Experten durchgeführt. Die konkreten Ergebnisse je nach Detailebene werden in folgenden Unterkapiteln vorgestellt.

4.3.2 Erkenntnisse aus der Industrie/ Insights from the industry

Gemeinsam mit dem PA wurde in Interviews und Workshops der aktuelle Stand der Arbeit und Standardisierung in der Industrie identifiziert. Die Ergebnisse werden in drei Handlungsfeldern Datenaufnahme, -speicherung und -übertragung vorgestellt.

4.3.2.1 Datenaufnahme

Je nach Größe des Unternehmens sowie der Komplexität und Kosten der Produkte variiert die Menge der gesammelten Daten. Einige Unternehmen sammeln umfangreiche Daten, um primär interne Optimierungen der Produkte und Prozesse vorzunehmen. Unternehmen, die hingegen einfache Produkte herstellen, erheben nur diejenigen Daten, die von Kunden angefragt werden. Die Entscheidung, welche Daten gesammelt werden, hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie den Investitionen, verfügbaren Ressourcen und möglichen Vorteilen.

Es handelt sich bei den Daten sowohl um Dokumente (z. B. Lieferschein oder Materialzeugnis) als auch **einzelne Werte (Datenpunkte)** aus den Dokumenten, die Aussagen über das Material treffen, z. B. **mechanisch-technische Eigenschaften, chemische Zusammensetzung, geometrische Maße** und **Oberflächengüte**. In einzelnen Fällen und nur bei engen Kooperationen werden Informationen zum Bearbeitungsprozess übermittelt, wie z. B. **Bearbeitungsparameter**.

Die gesammelten Daten stammen aus einer Vielzahl von internen und externen Quellen. Darunter fallen Dokumente wie Materialzeugnisse, Lieferpapiere und z. B. Prozessdaten, CAQ-Systeme und Plattformen wie SupplyOn. Zusätzlich dienen sowohl manuelle als auch automatische Geräte und Sensoren mit zugehörigen IT-Systemen (z. B. IBA-Analyzer und Wenzel Messgeräte) als Datenquelle. Der Umgang mit ineffizienten Prozessen bei der Datenaufnahme ist dementsprechend sehr unterschiedlich.

Grundlegend wird zwischen zwei Arten von Datenherkunft differenziert: **Unternehmensintern** generierte Daten und Daten, die von **externen Partnern** oder **Kunden** bereitgestellt werden.

Die **interne** Datenerhebung erfolgt überwiegend **automatisiert**, wobei die Informationen über lokale IT-Systeme wie BDE, gerätebezogene Software oder Kundenportale zur Speicherung und Analyse übertragen werden. Aufgrund des Alters vieler Maschinen, beruht die interne Datenerhebung in vielen Unternehmen auf einer **manuellen** Aufnahme und Eintragung der Daten in die oben genannten IT-Systeme. **Externe** Daten werden meist **im Textformat** und ohne **standardisierte Struktur** über das Unternehmensnetzwerk hinweg empfangen. Häufig geschieht dies über **E-Mails**, da die meisten Daten, mit Ausnahme von digitalen 2D-/3D-Zeichnungen, in digitaler Textform vorliegen und somit in erster Linie für eine manuelle Verarbeitung durch Menschen geeignet sind.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde festgestellt, dass der hohe manuelle Aufwand bei der Datenaufnahme mehrere Ursachen hat. Zum einen ist die **Anzahl** der zu **erfassenden Datentypen** (z. B. mechanisch-technische Eigenschaften, chemische Zusammensetzung, Oberflächengüte, Qualität und Reklamationen) **und**

Datenpunkten (z. B. Streckgrenze, Zugfestigkeit, Veränderung der Materialdicke, Härte und 8D Reporte) sehr hoch und äußerst heterogen. Zum anderen sind die vorhandenen IT-Systeme nicht für die Verarbeitung dieser großen und heterogenen Datenmengen ausgelegt oder ihre Möglichkeiten werden nicht vollständig genutzt. Stattdessen erfolgt die traditionell übliche Verarbeitung von Information im ausgedruckten oder digitalen Textformat. Die Vereinheitlichung der Informationsstrukturen gestaltet sich aufgrund der vielen unterschiedlichen Datentypen schwierig. Dadurch ist die Übertragbarkeit auf andere IT-Systeme überwiegend manuell möglich, was die Skalierbarkeit der Unternehmensprozesse und die Nutzung der Daten unternehmensintern und -extern stark einschränkt.

4.3.2.2 Datenspeicherung

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden für eine Reihe von Datenkategorien und -typen die für ihre Speicherung verwendeten IT-Systeme identifiziert. Diese werden in Tabelle 4-2 aufgeführt.

Tabelle 4-2: Identifizierte IT-Systeme zur Speicherung verschiedener Datenkategorien

Table 4-2: Identified IT systems for storing different categories of data

Datenkategorie	Datentyp	Anzahl identifizierter unterschiedlicher IT-Systeme	Beispielhafte identifizierte IT-Systeme
Mech-techn. Eigenschaften	Streckgrenze, Zugfestigkeit	2	ERP, CAQ
Oberflächengüte	Ebenheit, Rauheit	3	CAQ, Messsoftware, Lokales IT-System
Chemische Zusammensetzung	Chemische Zusammensetzung	2	QS-Modul ERP, lokale Datenbank
Daten zu Transport und Verpackung	Lieferscheine, Lieferabrufe, Artikelnummer	1	ERP
Geometrieveränderung	Veränderung der Materialdicke	1	QS-Model ERP
Geometrische Maße	Materialstärke/-breite, 3D-Modelldaten, weitere Messdaten	4	QS-Modul ERP, ERP, Messsoftware, Cloud
Kraft	Kraft	1	Prozessanalyse- und Messsysteme
Lieferdaten	Alle Daten des Dokuments	1	ERP
Prozessdaten der Anlage	Maschinen-einstellungen	2	Lokal (Rohdaten), BDE (verarbeitete Daten)
Reklamation	8D-Reporte, Reklamation, Reklamationsnummer	3	ERP, Lieferantenplattformen, CAQ

Es wird deutlich, dass für die Speicherung der gleichen Datenkategorien in der Stahlindustrie oft mehrere IT-Systeme verwendet werden, die sich grundsätzlich in ihren Funktionalitäten unterscheiden. Beispielsweise finden ERP-Systeme, worin die Informationen direkt mit den zugehörigen Auftragsdaten verbunden werden können, flächendeckend Verwendung. Sie dienen jedoch selten als einziges System für die Datenspeicherung.

Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die Systeme zum einen einander überschneidende Funktionen aufweisen und ihnen zum anderen von Unternehmen keine eindeutigen Aufgabenbereiche zugeordnet werden. Durch die Speicherung derselben Daten in verschiedenen IT-Systemen existiert keine sogenannte „Single Source of Truth“, also keine einheitliche Datenquelle. Es kann zu ineffizienten und fehlerhaften Entscheidungen kommen, da die Mitarbeitenden auf möglicherweise nicht mehr aktuelle Informationen zugreifen oder diese aus verschiedenen IT-Systemen zusammensuchen müssen.

Aus den durchgeführten Interviews kann gefolgert werden, dass IT-Architekturen historisch gewachsen sind und Systeme nur anhand ihrer jeweiligen Funktionalitäten eingeführt werden. Eine durchgängige Datenintegration fehlt allerdings, da die Prozesse der Datenerhebung und -integration nicht ausreichend beachtet werden. Mit der Größe eines Unternehmens steigt auch die Komplexität der Systemlandschaft, da alle Abteilungen ihre eigenen Anforderungen haben. Dadurch werden Insellösungen aufgebaut und es entsteht eine sogenannte Schatten-IT, bestehend aus inkonsistenten, nicht kompatiblen und vom Unternehmen nicht-geprüften Systemen besteht.

4.3.2.3 Datenübertragung

Im Rahmen des Projekts wurde identifiziert, dass der Datenaustausch in Bezug auf Materialdaten eher unregelmäßig und unstrukturiert erfolgt. Sehr gut standardisiert und automatisiert ist sind Erstellung und Übermittlung von Materialzeugnissen, Produktdatenblättern und Laborprüfberichten. Der Austausch von darüber hinausgehenden Daten, z. B. Materialdaten, findet aktuell überwiegend klassisch in Papierform, telefonisch oder per E-Mail im bilateral vereinbarten Format statt. Manche Unternehmen setzen auf Online-Plattformen, um die Datenaufnahme oder -übergabe zu standardisieren. Die vielfältigen digitalen Möglichkeiten der Datenübertragung führen in der Industrie zu einer heterogenen Landschaft der Übertragungstechnologien und -sprachen. Zudem ist es wichtig, zu betonen, dass dieser Austausch nur selten vorkommt, weil beide Parteien in der Lage sein sollen, die Daten zu erzeugen, sinnvoll zu verwenden (z. B. müssen entsprechende Simulationsmodelle vorhanden sein) und sich auf die Nutzung der Daten und daraus resultierenden Mehrwerten einigen (vertragliche Regelungen oder Vertrauen zwischen den Parteien ist dabei eine wichtige Voraussetzung).

4.3.3 Entwicklung eines Frameworks zur Strukturierung der Standardisierungsaktivitäten/ Development of a framework for structuring standardisation activities

Anhand der identifizierten Potenziale wurde ein Framework entwickelt, das eine Datenarchitektur und den Datenfluss im Unternehmen grob darstellt, um die Standardisierungsaktivitäten zu strukturieren. Das Framework ist in Abbildung 4-12 dargestellt.

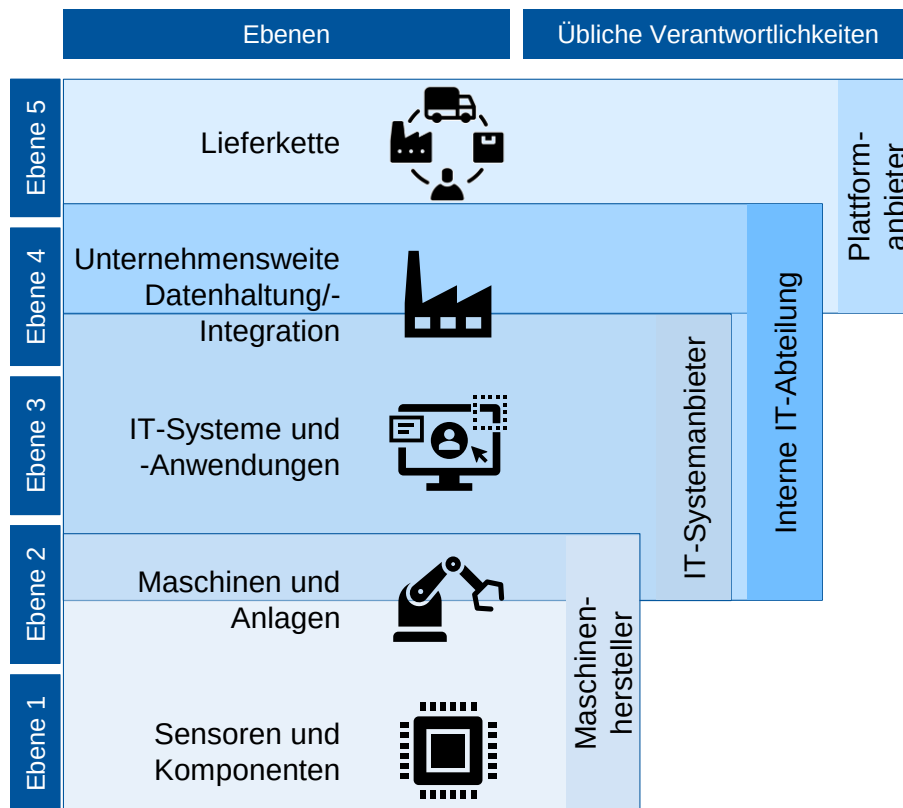


Abbildung 4-12: Framework zur Einordnung von Standards in unterschiedlichen Unternehmensebenen

Figure 4-12: Framework for the classification of standards in different company levels

Die **technische Ebene der Sensoren und Komponenten** (Ebene 1) ist bereits weitgehend standardisiert. Es existieren zahlreiche Standards, um die einzelnen Komponenten, Baugruppen und Sensoren untereinander zu vernetzen und den Datenaustausch zu ermöglichen (z. B. IEC 61131 Teil 5 oder ISO 23570-1:2005-11). Dies ermöglicht eine hohe Interoperabilität und höhere Flexibilität bei der Auswahl von Lieferanten von Baugruppen und Komponenten aus der Sicht der Maschinenhersteller. Diese Ebene ist jedoch für ein produzierendes Unternehmen der Stahlindustrie zu detailliert und wird in den Berichten nicht berücksichtigt.

Auf der **Maschinenebene** (Ebene 2) existieren ebenfalls mehrere technische Ansätze, um die Maschinen anzubinden und in die IT-Systemlandschaft zu integrieren (z. B. OPC-UA oder PROFINET). Auch das Konzept der Verwaltungsschale für die Bereitstellung von Informationen und für die Kommunikation in einheitlicher Sprache wurde bereits standardisiert (IEC 63278). Die Maschinenhersteller bieten heutzutage umfangreiche Möglichkeiten, Daten von ihren Maschinen zu sammeln. Betriebsstandards für die Anlagenverwaltung und Kommunikationsschnittstellen sind

für den Datenaustausch zwischen einzelnen Maschinen und IT-Systemen geeignet. Diese Daten können von Unternehmen für verschiedene Zwecke wie Produktionsüberwachung, Qualitätskontrolle und Prozessoptimierung genutzt werden.

Moderne IT-Systeme und -Anwendungen (Ebene 3) verfügen über eine Vielzahl von standardisierten Schnittstellen zur Erhebung von Daten aus verschiedenen Assets (z. B. Maschinen oder Sensoren), Prozessen (z. B. als Eventlogs) oder als Eingabemasken (z. B. Betriebsterminals). Die erhobenen Daten können auch zwischen IT-Systemen und -Anwendungen ausgetauscht werden (z. B. IDoc oder REST). Oft dienen IT-Systeme als eine Senke für die Daten und tragen somit der Speicherung, Verwaltung und Verbindung dieser Daten bei. Es kann jedoch sein, dass es in Unternehmen dedizierte übergeordnete Datenbanksysteme oder Dokumentmanagementsysteme für aggregierte Daten und daraus abgeleiteten Informationen gibt.

Für die **unternehmensinterne Datennutzung** (Ebene 4) ist es jedoch wichtig, dass Daten den richtigen Personen oder Abteilungen verfügbar sind. In vielen Fällen sind nicht die Rohdaten selbst, sondern Erkenntnisse aus den Daten, also Informationen von hoher Bedeutung (vor allem für das Entscheidungstreffen auf unterschiedlichen Unternehmensebenen). D.h., Daten müssen aus verschiedenen Quellen (z. B. Maschinen oder IT-Systemen) aggregiert, verknüpft und ggf. visualisiert werden. Darüber hinaus sollte Redundanz der Daten vermieden und eine Single-Source-of-Truth etabliert werden, damit alternative Datensätze nicht verwirren. Auf dieser Ebene gibt es mehrere Ansätze, die unternehmensinterne Datenintegration zu erreichen, es gibt jedoch keine offiziellen Standards.

Für den **unternehmensübergreifende Datenaustausch** (Ebene 5) ist es wichtig, dass Daten bereits in der richtigen Form vorliegen (z. B. Format, Menge, Daten sind geprüft und freigegeben). Diese Daten können dann auf unterschiedliche Art und Weise mit Partnerunternehmen geteilt werden (z. B. Plattformen, Cloud oder EDI). Dazu gibt es mehrere Standards und funktionierende, marktreife technologische Ansätze, sodass keiner davon eine überwiegende Marktanwendung erreicht.

Die Ebenen 1, 2 und 3 sind bereits sehr gut standardisiert und für die Ebene 5 gibt es mehrere technologische Möglichkeiten, sodass interne Datenerhebung und unternehmensübergreifender Datenaustausch keine technologische Schwierigkeit mehr darstellen. Es handelt sich vielmehr um eine organisatorische Aufgabe, Daten so zu aggregieren und zu speichern, dass diese aufwandsarm an Partner übermittelt werden können.

4.3.4 Standardisierung und Handlungsempfehlungen/ Standardisation and recommendations for action

Alle während des Forschungsprojekts erarbeiteten Ergebnisse in Bezug auf Standardisierung wurden in drei Standardisierungsberichten veröffentlicht, damit zukünftige (Forschungs- oder Industrie-) Projekte diese Vorarbeit verwerten können. Diese Standardisierungsberichte enthalten alle gesammelten (Stand der Technik (s. Kapitel 2.5 und 2.6), Recherchen zu Standards (s. Kapitel 4.3.1)) und erarbeiteten Informationen (Erkenntnisse aus der Industrie (s. Kapitel 4.3.2) und das Framework (s. Kapitel 4.3.3). Darüber hinaus beinhalten die Standardisierungsberichten

entsprechende Handlungsempfehlungen zur Verbesserung der Standardisierung in der Industrie und konkrete Implementierungsleitfäden, die eine schnelle Adaption durch KMU ermöglichen. Die Empfehlungen aus den Standardisierungsberichten werden in Kapitel 5.1.2 vorgestellt.

4.3.5 Erzielte Ergebnisse / Achieved Results

Das Ziel des Arbeitspakets 3 und somit das dritte Teilziel des Forschungsprojekts, **Ausarbeitung von Standardisierungsempfehlungen** für die Datenaufnahme, -speicherung und -übertragung, wurde erfolgreich erreicht. Durch die Recherche der aktuellen Standards und Ansätzen konnte der Standardisierungsbedarf identifiziert und präzisiert werden. Anschließend wurde mit dem PA die tatsächliche Arbeitsweise und das Vorgehen für die Datenaufnahme, -speicherung und -übertragung in der Industrie erfasst. Anhand des identifizierten literaturbasierten und praxisnahen Standardisierungsbedarfs wurde ein Framework erstellt, um die Standards einzuordnen. Anschließend wurden Empfehlungen zur Standardisierung ausgearbeitet.

4.4 Arbeitspaket 4 / Workpackage 4

Die in Kapitel 3.4 beschriebene Referenzstreuung der Produkteigenschaften trotz gleicher Spezifikation für AP5 wurde erfolgreich geschaffen. Hierzu wurden zunächst drei kommerzielle Kaltbänder gleicher Spezifikation (DC04) beschafft und hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften charakterisiert. Anschließend wurden diese tiefgezogen und schließlich das sich ergebende Eigenschaftsspektrum sowohl des Kaltbands als auch der Kreuznäpfe ermittelt.

4.4.1 Beschaffung und Charakterisierung kommerzieller Kaltbandzustände/ Procurement and characterization of commercial cold strips

Zusammen mit dem PA wurde der Tiefziehstahl DC04 ausgewählt. Um später in Kapitel 4.5 das Modell zur Vorhersage der Kaltbandeigenschaften zu entwickeln und die optimalen Wärmebehandlungsparameter zu bestimmen, wurden Kaltbänder im walzharten und geprühten Zustand mit der gleichen Spezifikation und einer Dicke von 1,0 mm von drei verschiedenen Stahlherstellern beschafft und durch Zugversuche in Walzrichtung zur Bestimmung der Streckgrenze ($R_{p0,2}$) und Zugfestigkeit (R_m) charakterisiert. Die Ergebnisse der Charakterisierung aller drei beschafften kommerziellen Kältebänder im geprühten Zustand sind in Tabelle 4-3 zusammengefasst.

Tabelle 4-3: Mechanische Eigenschaften der beschafften kommerziellen Kaltbänder im geglühtem Zustand

Table 4-3: Mechanical properties of the procured commercial heat treated cold strips

Kaltband	Stahlhersteller	Steckgrenze, $R_{p0,2}$	Zugfestigkeit, R_m
		(MPa)	(MPa)
DC04	Spezifikation	140	250
		210	370
DC04 (Geliefert)	A	178	294
	B	193	286
	C	169	284

Es wurde wie erwartet ermittelt, dass trotz der Beschaffung von Kaltbändern mit gleicher Spezifikation Schwankungen in den Eigenschaften bestehen. Dies bestätigt die Arbeitshypothese und liefert den Grundstein für die Forschungsfragen in diesem Projekt.

4.4.2 Durchführung der Kreuznapfversuche / Execution of cross die experiments

Um den Einfluss der Schwankungen der Kaltbändeigenschaften auf die resultierenden Eigenschaften des Tiefziehbauteils zu ermitteln, wurden als nächstes alle drei kommerziellen Kaltbänder tiefgezogen mit folgenden Anforderungen an das Demonstratorbauteil (Kreuznapf):

- Ziehtiefe - 50 mm
- Keine Rissbildung

Um die obere und untere Grenze der ausgewählten Tiefziehparameter Niederhalterkraft und Plattenkantenlänge sowie den für dieses Projekt ausgewählten Standard-Tiefziehprozess zu bestimmen, wurden insgesamt 36 Tiefziehversuche für alle drei kommerziellen Kaltbänder durchgeführt. Die Versuchsmatrix, die für diese Versuche verwendet wurde, ist in Tabelle 4-4 dargestellt. Alle Versuche, die erfolgreich waren und die zuvor definierten Anforderungen an das Tiefziehbauteil erfüllen, sind mit einem Häkchen markiert.

Es wurde festgestellt, dass alle drei kommerziellen Kaltbänder die festgelegten Anforderungen erfüllen und die gewünschte Tiefziehbarkeit erreichbar ist. Mithilfe der Versuchsmatrix wurden die oberen und unteren Grenzen für die Niederhalterkraft und die Plattengröße ermittelt. Der Standardprozess wurde so gewählt, dass genügend Spielraum für die Variation der Tiefziehparameter zur Untersuchung der adaptiven Prozessführung vorhanden war.

Standard Tiefziehprozess:

- Kantenlänge Platine = 270 mm
- Niederhalterkraft (Soll) = 200 kN

Tabelle 4-4: Tiefziehversuchsmatrix zur Herstellung anforderungsgerechter Kreuznöpfe
Table 4-4: Deep drawing test matrix for producing cross cup dies fulfilling the requirements

Kantenlänge Platine Niederhalterkraft (Soll)	240 mm	255 mm	270 mm
0 kN	✓	✓	✓
200 kN	✓	✓	✓
400 kN	✓	✓	✓
600 kN	✓	✓	✓

Standard Tiefziehprozess

4.4.3 Analyse der experimentellen Ergebnisse der Tiefziehversuche / Analysis of the results of deep drawing experiments

Für den ausgewählten Standard-Tiefziehprozess wurden für alle drei kommerziellen Kaltbänder die Zusammenhänge zwischen Kaltbandeigenschaften und Tiefziehbauteileigenschaften analysiert. Die Ergebnisse der Kaltbandcharakterisierung und der Tiefziehversuche sind in Tabelle 4-5 zusammengefasst.

Tabelle 4-5: Zusammenfassung der Ergebnisse der Charakterisierung der Kaltbänder im geglühten Zustand und der Tiefziehversuche unter Verwendung des Standard Tiefziehprozesses

Table 4-5: Summary of the results of characterization of heat treated cold strips and deep drawing experiments using standard deep drawing process

Kaltband	Stahlhersteller	Kaltbandeigenschaften		Kreuznapfeigenschaften	
		Steckgrenze, $R_{p0,2}$ [MPa]	Zugfestigkeit, R_m [MPa]	Max. Tiefziehkraft [kN]	Max. Ausdünnung [mm]
DC04	Spezifikationen	140	250	-	-
		210	370	-	-
DC04 (Geliefert)	A	178	294	142	0,74
	B	193	286	138	0,70
	C	169	284	129	0,72

Abbildung 4-13 zeigt den Zusammenhang zwischen Kaltbandeigenschaften und maximaler Tiefziehkraft. Zugfestigkeit zeigt erwartungsgemäß Korrelation mit max. Tiefziehkraft. Für Kaltband mit höherer Zugfestigkeit ist die erforderliche Tiefziehkraft höher.

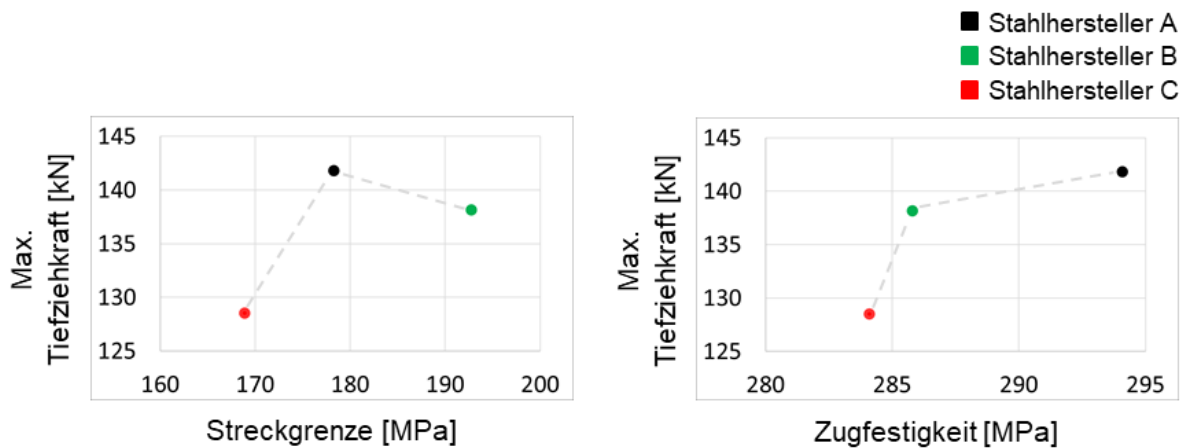


Abbildung 4-13: Analyse des Einflusses der Kaltbandeigenschaften auf die max. Tiefziehkraft

Figure 4-13: Analysis of the influence of the max. deep drawing force

Aus Abbildung 4-14 geht hervor, dass Kaltband B eine vergleichsweise hohe Streckgrenze bei vergleichsweise geringerer Zugfestigkeit aufweist, was auf einen geringeren Exponenten der Kaltverfestigung schließen lässt. In diesem Fall wurde eine maximale Ausdünnung von 0,7 mm festgestellt. Kaltband A hingegen besitzt eine vergleichsweise niedrigere Streckgrenze und eine höhere Zugfestigkeit, was zu einem höheren Exponenten der Kaltverfestigung führt. Daraus resultiert eine niedrigere maximale Ausdünnung von lediglich 0,74 mm. Die maximale Ausdünnung im Blech ist demnach direkt vom Verfestigungsverhalten des Materials abhängig.

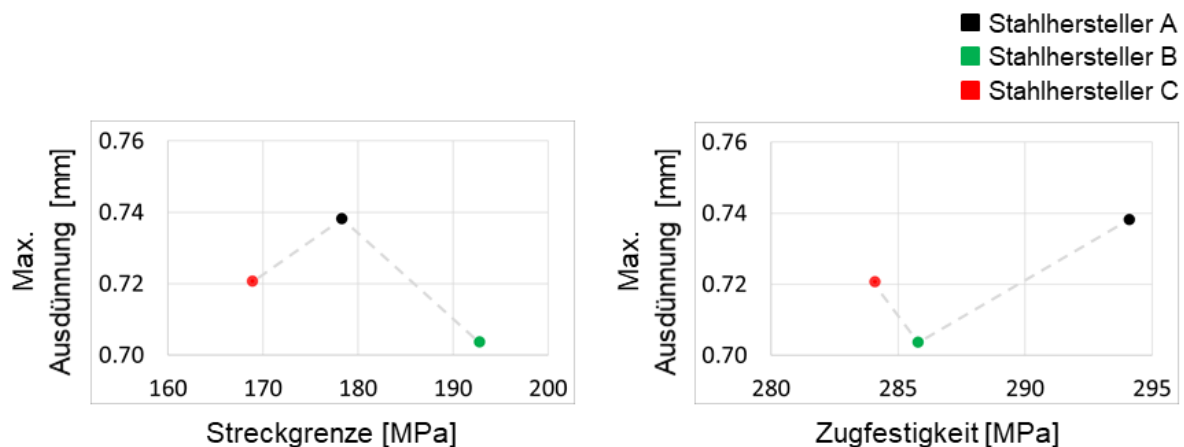


Abbildung 4-14: Analyse des Einflusses der Kaltbandeigenschaften auf die Kreuznapfeigenschaften

Figure 4-14: Analysis of the influence of cold strip properties on cross die cup properties

Bei dem im Rahmen dieses Projekts verwendeten Endprodukt handelt es sich um ein Demonstratorbauteil (Kreuznapf), für das keine kommerziellen Spezifikationen vorhanden sind. Daher müssen für den Kreuznapf Pseudospezifikationen festgelegt werden. Zu diesem Zweck werden die Ergebnisse der durchgeführten Kreuznapfversuche verwendet. Für den ausgewählten Standard-Tiefziehprozess wurde festgestellt, dass das Tiefziehen aller drei kommerziellen Kaltbänder zu einer

maximalen Ausdünnung von 0,7 mm führt (siehe Tabelle 4-5). Dementsprechend wurde die Spezifikation für das Demonstratorbauteil (Kreuznapf) festgelegt: Max. Ausdünnung (erlaubt) = 0,7 bis 1,0 mm

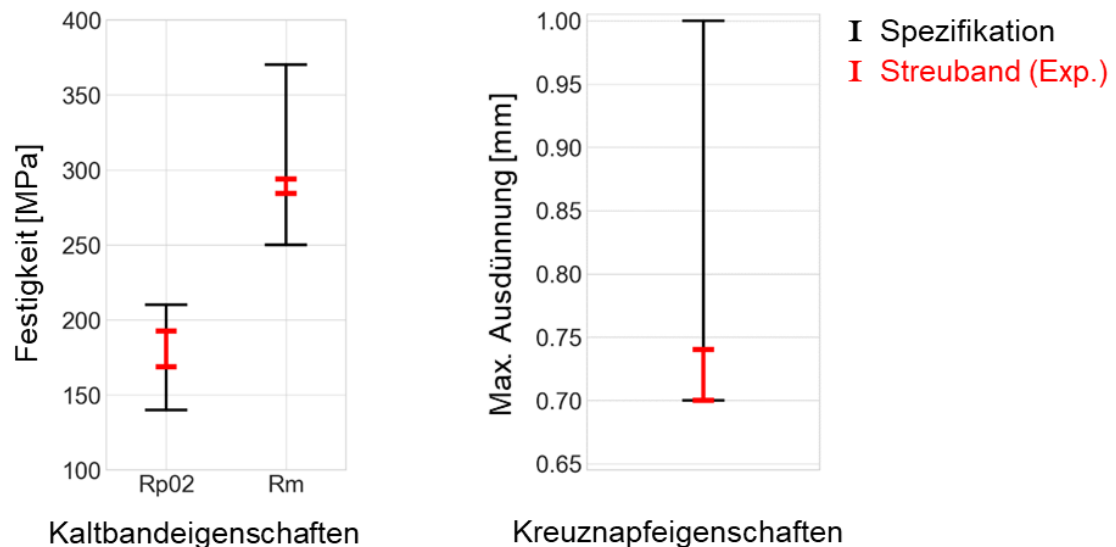


Abbildung 4-15: Streuung der Eigenschaften der kommerziellen Kaltbänder und des Demonstrator Bauteils

Figure 4-15: Deviations in the properties of commercial cold strip and demonstrator component

Mit der Ermittlung des Streubands für die kommerzielle Kaltbänder- und Kreuznapfeigenschaften, der Festlegung des Standard-Tiefziehprozesses und der Kreuznapfspezifikation wurde somit eine Grundlage zur Überprüfung der Arbeitshypothesen in AP5 geschaffen, welche in Tabelle 4-6 zusammengefasst ist.

Tabelle 4-6: Definierte Grundlagen zur Überprüfung der Arbeitshypothesen in AP5

Table 4-6: Defined bases for testing the work-hypotheses in WP5

	Kaltband Streuband		Tiefziehbauteil Streuband	Standard Tiefzieh Prozess	
	Steckgrenze, Rp _{0,2} [MPa]	Zugfestigkeit, R _m [MPa]	Max. Ausdünnung [mm]	Platine Kantenlänge [mm]	Niederhalterkraft Soll [kN]
Untere- grenze	169	284	0,70	270	200
Obere- grenze	193	294	0,74		

4.4.4 Erzielte Ergebnisse / Achieved Results

Das Ziel von Arbeitspaket 4 und somit das vierte Teilziel des Forschungsprojekts, bestehend aus der Schaffung eine Datengrundlage für die Durchführung der Validierungsversuche in der eingerichteten Testumgebung, wurde erfolgreich erreicht. Durch die Ergebnisse der durchgeführten Tiefziehversuche wurden eine Standard

Tiefziehprozessführung und Pseudo-Kreuznapf-Spezifikationen festgelegt sowie die Streubänder der Kaltband- und Kreuznapf-Eigenschaften ermittelt.

4.5 Arbeitspaket 5 / Workpackage 5

4.5.1 Beschaffung und Charakterisierung von kommerziellem Warmband / Procurement and characterization of commercial hot strip

Das Warmband mit 3,8 mm Dicke wurde vom Stahlhersteller A beschaffen. Es wurde sichergestellt, dass das Warmband zur gleichen Prozessroute gehört, mit der auch die DC04-Kaltbänder hergestellt werden. Die Ergebnisse der Charakterisierung des Warmbands durch Zugversuche in Walzrichtung sind in Tabelle 4-7 zusammengefasst.

Tabelle 4-7: Charakterisierung des Warmbands durch Zugversuche

Table 4-7: Characterization of hot strip using tensile tests

Eigenschaft	Wert
E Modul [GPa]	212
Poisson Zahl [-]	0,27
R _{p0,2} [MPa]	289
R _m [MPa]	366

Die Zugversuche wurden zweimal durchgeführt, um Messgenauigkeit sicherzustellen. Die im Zugversuch ermittelte technische Spannungs-Dehnungs-Kurve wurde verwendet, um die wahre Spannungs-Dehnungs-Kurve zu bestimmen, die dann zur Modellierung der Warmbandfließkurve zur Modellierung des Kaltwalzprozesses erforderlich ist.

4.5.2 Simulative Nachbildung der Prozesskette / Simulative reconstruction of the process chain

4.5.2.1 Modellierung der Kaltwalzprozess / Modelling of cold rolling process

Anhand der wahre Spannungs-Dehnungs-Kurve, die im Zugversuch zur Charakterisierung des Warmbands in 4.5.1 ermittelt wurde, wird der Ludwiks-Ansatz gefittet um damit das Warmbandfließkurve zu modellieren.

$$\sigma = \sigma_0 + K_L * \varphi^{n_L} \quad (4-1)$$

mit $\sigma_0 = 254,4 \text{ [MPa]}$
 $K_L = 426,5 \text{ [-]}$
 $n_L = 0,4696 \text{ [-]}$

Abbildung 4-16 zeigt die experimentell ermittelte sowie gefittet Warmbandfließkurve. Die gefittete Warmbandfließkurve wurde dann verwendet, um das Warmbandverhalten im FE-Kaltwalzmodell sowie im schnelle analytische Kaltwalzmodell zu beschreiben.

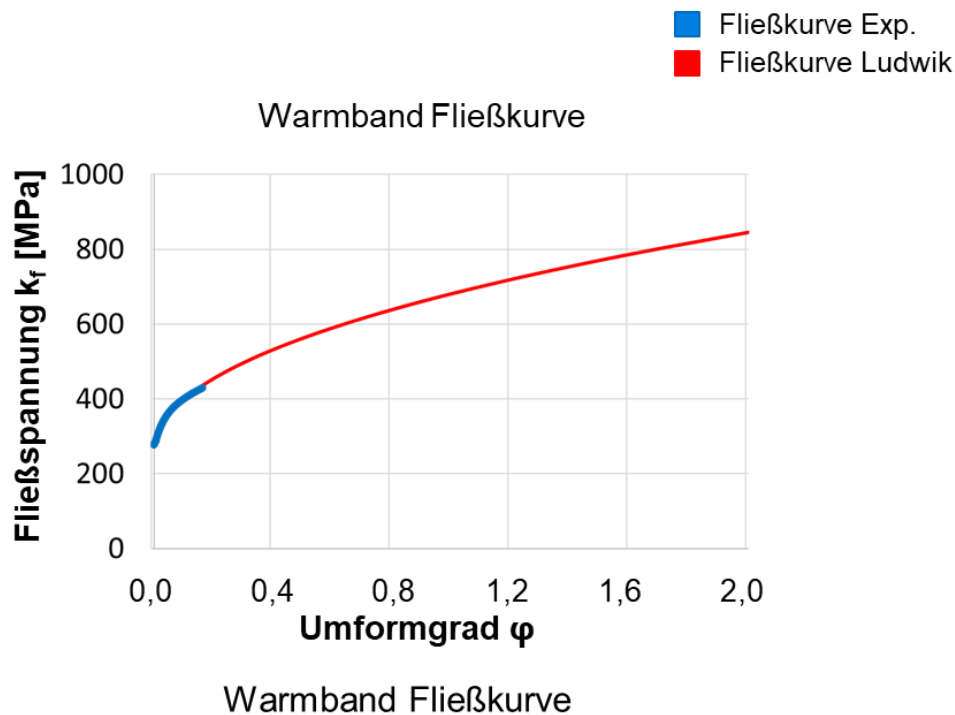


Abbildung 4-16: Experimentell gemessene und nach dem Ludwik Ansatz extrapolierte Warmbandfließkurve

Figure 4-16: Hot strip flow curve using the hot strip tensile test and extrapolated using Ludwik approach

Die Abbildung 4-17 zeigt den Vergleich der experimentell gemessenen Walzkraft mit der von zwei Modellen vorhergesagten Walzkraft: dem unkalibrierten schnellen Kaltwalzmodell und dem FE-Kaltwalzmodell. Im Vergleich zur experimentell gemessenen Walzkraft betrug die maximale Abweichung des FE-Kaltwalzmodells weniger als 10%. Im Gegensatz dazu war die Abweichung des unkalibrierten schnellen Walzmodells erwartungsgemäß deutlich größer. Aus diesem Grund wurde das schnelle Walzmodell für Geometriefaktors kalibriert.

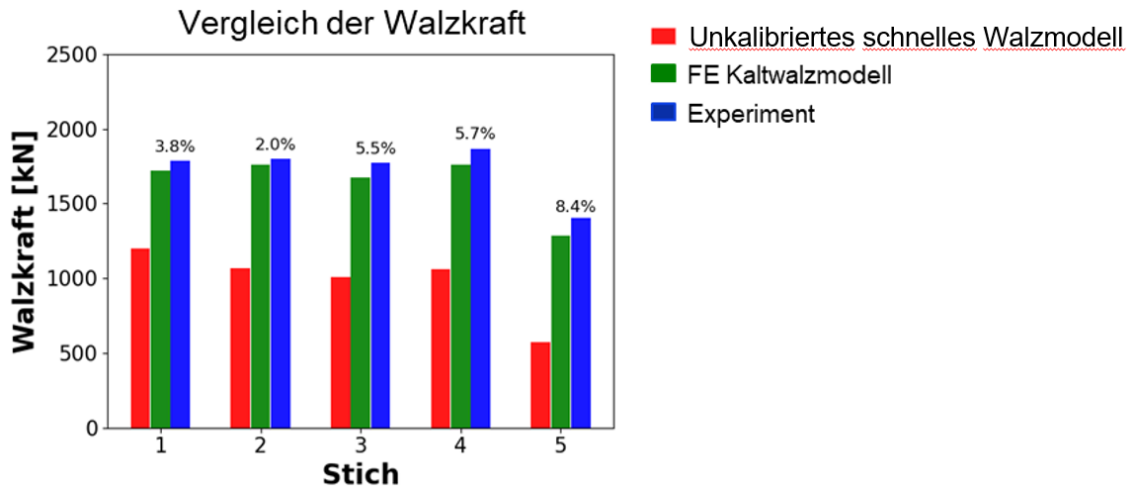


Abbildung 4-17: Vergleich der Walzkraft zwischen Experiment, FE-Kaltwalzmodell und dem für das Kaltwalzen unkalibrierte, schnelle Walzmodell.

Figure 4-17: Comparison of rolling force between experiment, FE cold rolling model and uncalibrated fast rolling model.

Wie in 3.5.1 beschrieben, wurde die Simulationsstudie zur Modellierung des Geometriefaktors durchgeführt. Die beispielhaften Ergebnisse der Simulationsstudie für die ersten fünf Simulationen sind zusammen mit den verwendeten Prozessparametern, dem invers berechneten Geometriefaktor und dem Walzverhältnis in Tabelle 4-8 zusammengefasst.

Tabelle 4-8: Beispielhafte Ergebnisse der FE Simulationsstudie zur Kalibrierung des schnellen analytischen Kaltwalzmodells

Table 4-8: Results off FE simulation study for calibration of fast analytical rolling model

Sim Nr.	h_0 [mm]	Stich- abnahme [%]	h_1 [mm]	h_m [mm]	μ [-]	Δh [mm]	Arbeits- walzen- radius [mm]	Walzkraft/ Breite [N/mm]	l_d [mm]	Breite [mm]	Vergleichs- umformgrad	k_{fm} [N/mm ²]	l_d/h_m [-]	Q_f
1	1.0	5	0.95	0.975	0.05	0.05	80.0	937.84	2.00	300.0	0.0590	331.22	2.05	1.42
2	1.0	10	0.90	0.95	0.05	0.10	80.0	1440.00	2.83	300.0	0.1212	362.11	2.98	1.41
3	1.0	15	0.85	0.925	0.05	0.15	80.0	1880.00	3.46	300.0	0.1869	386.43	3.74	1.40
4	1.0	20	0.80	0.9	0.05	0.20	80.0	2287.87	4.00	300.0	0.2566	407.62	4.44	1.40
5	1.0	25	0.75	0.875	0.05	0.25	80.0	2650.00	4.47	300.0	0.3308	427.04	5.11	1.39

In Abbildung 4-18 ist der Geometriefaktor in Abhängigkeit vom Walzspaltverhältnis und des Reibfaktors dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Reibung bei einem Walzspaltverhältnis von über 1 einen deutlichen Einfluss auf den Geometriefaktor hat. Eine erhöhter Reibwert führt dabei zu einem höheren Geometriefaktor. Der Einfluss der Reibung bei einem Walzverhältnis kleiner als 1 ist hingegen gering.

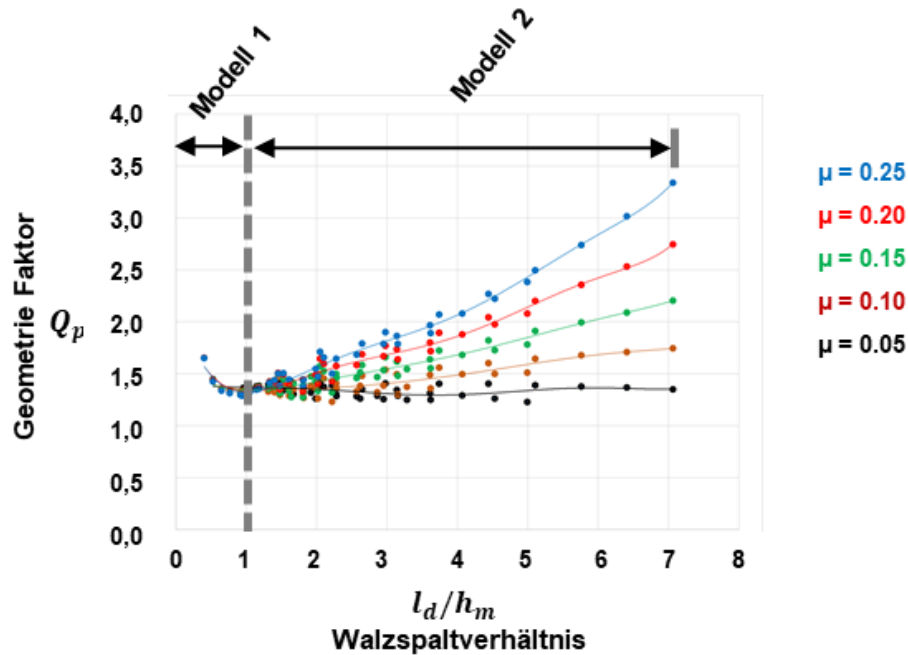


Abbildung 4-18: Modellierung des Geometrie Faktors als Funktion von Walzspaltverhältnis und Reibung

Figure 4-18: Modelling of geometry factor as a function of roll gap ratio and friction

Aus diesem Grund wurde der Geometriefaktor für zwei Bereiche ($\frac{l_d}{h_m} < 1$) und ($\frac{l_d}{h_m} \geq 1$) getrennt mittels des modifiziertem Lohmar Ansatz aus Kapitel 3.5.2 modelliert. Die gefitteten Modelle sind in Tabelle 4-9 zusammengefasst.

Tabelle 4-9: Modelle zur Vorhersage des Geometrie Faktors in Abhängigkeit des Walzspaltverhältnisses und der Reibung

Table 4-9: Models for the prediction of the geometry factor as a function of the roll gap ratio and friction

Modell	Gültigkeit	Modell für Geometrie Faktor	R ²	RMSE
1	$\left(\frac{l_d}{h_m}\right) < 1$	$Q_p = 0,0901 + 0,7664 \cdot \left(\frac{l_d}{h_m}\right) + 0,5029 \cdot \left(\frac{h_m}{l_d}\right) + 0,1482 \cdot \mu + 0,0602 \cdot \left(\frac{1}{\mu}\right) - 0,3816 \cdot \left(\frac{l_d}{h_m}\right) \cdot \mu$	0,98	0,01
2	$\left(\frac{l_d}{h_m}\right) \geq 1$	$Q_p = 1,102 - 0,05054 \cdot \left(\frac{l_d}{h_m}\right) + 0,3054 \cdot \left(\frac{h_m}{l_d}\right) - 1,65 \cdot \mu + 0,005359 \cdot \left(\frac{1}{\mu}\right) + 1,556 \cdot \left(\frac{l_d}{h_m}\right) \cdot \mu$	0,96	0,06

Beide Modelle weisen einen R²-Wert > 0,95 und einen kleinen RMSE-Wert auf, was auf eine gute Genauigkeit des Modells bei der Vorhersage des Geometriefaktors hinweist. Damit wurde die Kalibrierung des schnellen analytischen Kaltwalzmodells abgeschlossen.

Als nächstes wurden alle 3 kommerziellen Kaltbänder im Walzharten Zustand aus AP4 auf ihre Vickershärte hin untersucht, um ein Modell für die Vorhersage der Kaltbändeigenschaften zu erstellen. Alle Ergebnisse der Härteprüfung sowie Zugversuche sind in Tabelle 4-10 zusammengefasst.

Tabelle 4-10: Kaltbändeigenschaften im walzharten Zustand

Table 4-10: Cold strip properties in roll-hardened state

Stahl-hersteller	Ausgangs- dicke, h_0 [mm]	Zieldicke, h_1 [mm]	φ_{eq}	Vickers Härte	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]
A	3,8	1	1,54	237	780	786
B	2,0	1	0,78	204	632	649
C	2,5	1	1,05	223	684	712

Unter Verwendung der in Tabelle 4-10 zusammengefassten Ergebnisse wurde das Modell zur Vorhersage der Kaltband-Streckgrenze und der Zugfestigkeit mit der Matlab Curve-Fitting Toolbox gefittet. Tabelle 4-11 fasst die gefitteten Modelle zusammen.

Tabelle 4-11: Vickershärte und Umformgrad basiertes Modell zur Vorhersage der Kaltbändeigenschaften

Table 4-11: Vickers hardness and equivalent plastic strain based model for prediction of cold strip properties

Modellierungsansatz	Modell	R^2	RMSE
$H_v = k \cdot c \cdot (\varphi_{eq})^n$	$H_v = 1200 \cdot 0,1807 \cdot (\varphi_{eq})^{0,218}$	0,96	4,65
$YS = a_0 + a_1 \cdot H_v$	$YS = -282,2 + 4,435 \cdot H_v$	0,93	28,05
$UTS = b_0 + b_1 \cdot H_v$	$UTS = -203,6 + 4,157 \cdot H_v$	0,98	13,89

Abschließend werden sowohl das Modell für den Geometriefaktor als auch das Modell für die Kaltbändeigenschaften in das schnelle analytische Kaltwalzmodell integriert und anhand von experimentellen Ergebnissen validiert. Die Ergebnisse dieser Validierung des schnellen analytischen Kaltwalzmodells sind in Abbildung 4-19 dargestellt. Die Abweichungen zwischen den experimentellen und simulierten Ergebnissen sind weniger als 10%, was bereits auf eine gute Genauigkeit des Kaltwalzmodells hinweist. Somit wurde die Modellierung des Kaltwalzens erfolgreich abgeschlossen.

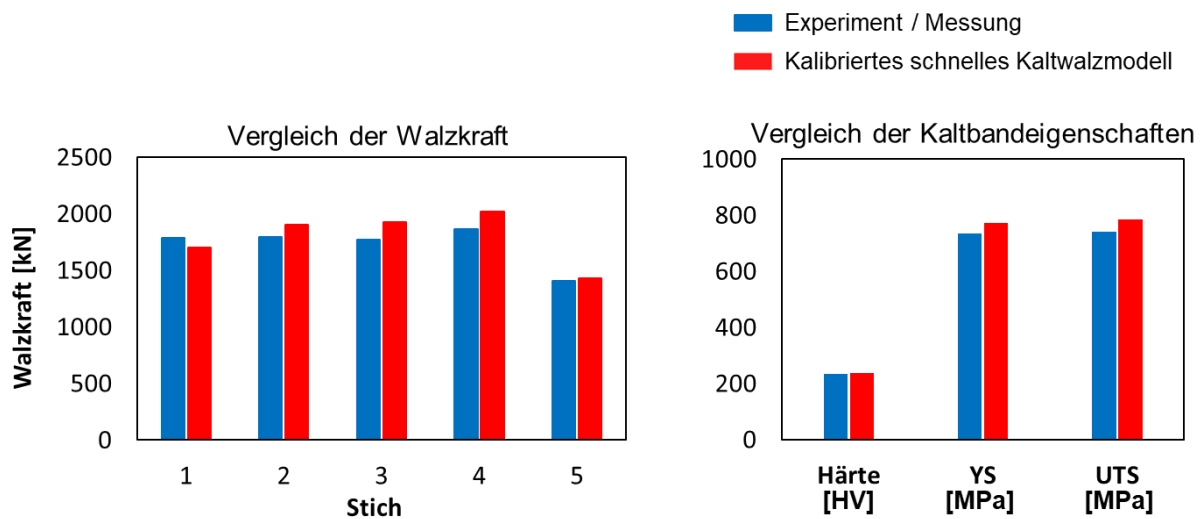


Abbildung 4-19: Validierung des schnellen Kaltwalzmodells sowie des integrierten Modells zur Vorhersage der resultierenden Kaltbändeigenschaften

Figure 4-19: Validation of fast cold rolling model as well as the integrated model for prediction of cold strip properties

4.5.2.2 Modellierung der Tiefziehprozess / Modelling of deep drawing process

Die technische Spannungs-Dehnungs-Kurve, die aus Zugversuchen an kommerziellen Kaltband des Stahlherstellers A ermittelt wurde, wurde zur Modellierung der Referenz-Fließkurve für das FE-Tiefziehmodell verwendet. Zu diesem Zweck wurde, wie in 4.5.2.2 beschrieben, der McConnell-Lenard Ansatz verwendet und mit Matlab gefittet.

$$\sigma = A * (1 + B * \varphi)^C \quad (4-2)$$

mit $A = 166,5 [-]$
 $B = 78,35 [-]$
 $C = 0,274 [-]$

Die gefittete Kaltband Fließkurve nach dem McConnell-Lenard Ansatz ist in Abbildung 4-20 dargestellt.

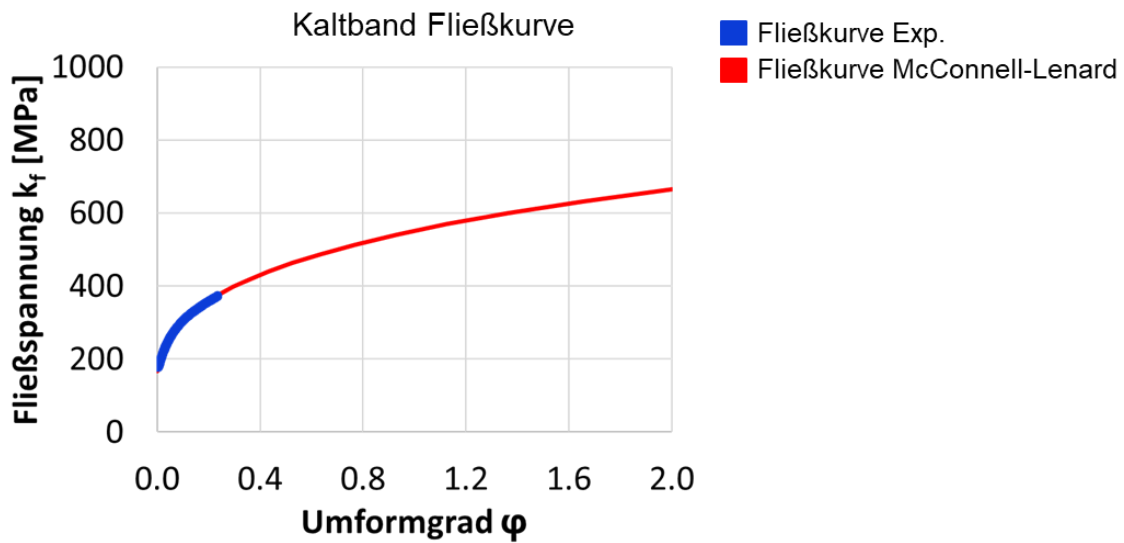


Abbildung 4-20: Modellierung der Kaltband Fließkurve nach McConnell-Lenard Ansatz für die Implementierung in der FE-Tiefziehmodell

Figure 4-20: Modelling of cold strip flow curve using McConnell-Lenard model for implementing in FE deep drawing model

Die modellierte Kaltband Fließkurve wurde anschließend zur Erstellung eines FE-Tiefziehmodells verwendet. Nachfolgend wurde eine Konvergenzanalyse durchgeführt, um die FE-Netzgröße zu optimieren und so die Rechenzeit ohne signifikanten Genauigkeitsverlust zu minimieren. Für die Konvergenzanalyse wurden 3 Simulationen mit Elementen Größe von 1 mm, 2 mm und 3 mm auf einem HPC-Linux-Cluster mit 4 Kernen in Abaqus 2019 durchgeführt. Die Ergebnisse der Konvergenzanalyse sind in Abbildung 4-21 dargestellt.

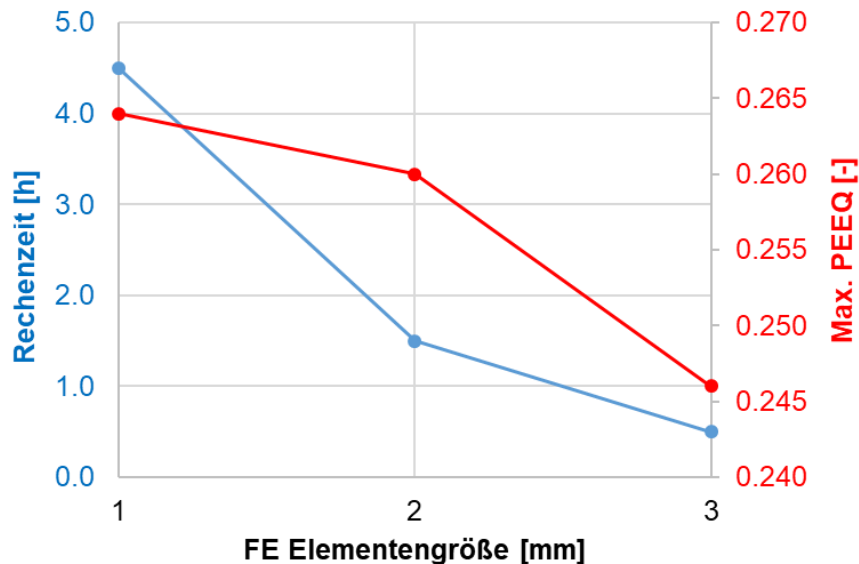


Abbildung 4-21: Konvergenzanalyse des FE-Tiefziehmodells für Elementgrößen von 1 mm, 2 mm und 3 mm.

Figure 4-21: Convergence analysis of FE deep drawing model for element size of 1 mm, 2 mm and 3 mm.

Die Ergebnisse der Konvergenzanalyse zeigen, dass die Simulation mit einer Elementgröße von 3 mm eine Rechenzeit von lediglich 0,5 Stunden erforderte, während die Simulation mit einer Elementgröße von 1 mm 4,5 Stunden dauerte. Allerdings zeigte der Vergleich der maximalen Werte der Vergleichsformänderung im Kreuznapf noch starke Abweichungen, sodass die Elementkantenlänge von 3 mm unzulässig ist. Die Simulation mit einer Elementgröße von 2 mm hingegen hat sowohl eine vergleichsweise kurze Rechenzeit als auch keine signifikante Änderung der maximalen Formänderung und wurde daher als optimale Elementkantenlänge ausgewählt.

Anschließend wurde das FE-Tiefziehmodell für alle drei kommerziellen Kaltbänder validiert. Die entsprechenden Simulationsmodelle für Kaltband A, B und C wurden unter Verwendung der Kaltbandeigenschaften (Streckgrenze und Zugfestigkeit) erstellt, die auf der Skalierung der Referenzkaltbandfließkurve erhalten wurden. Abbildung 4-22 zeigt den Vergleich der experimentellen und simulierten Ergebnisse für die maximale Tiefziehkraft und die maximale Ausdünnung.

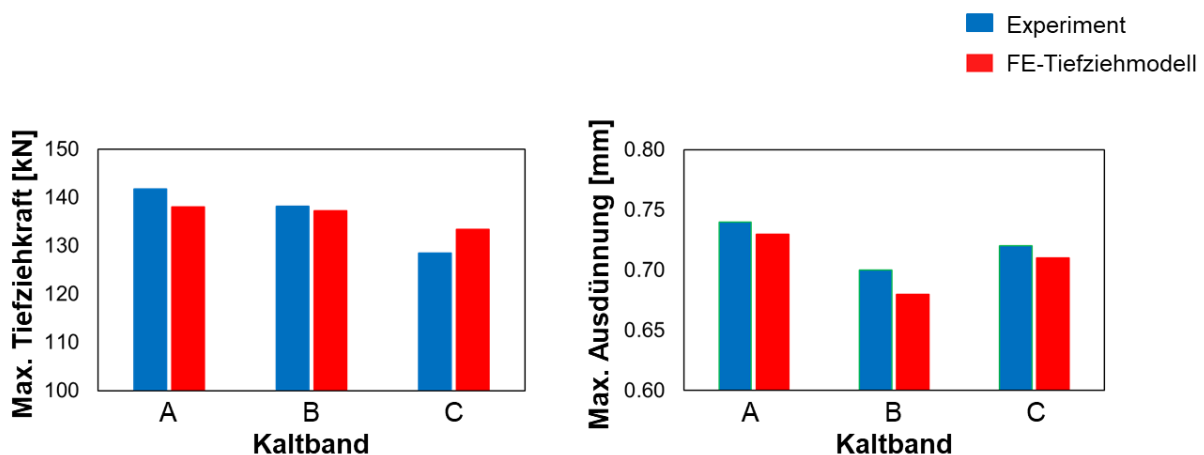


Abbildung 4-22: Vergleich zwischen experimentell und simulativ ermittelter, maximaler Tiefziehkraft und maximaler Ausdünnung zur Validierung des FE-Tiefziehmodells.

Figure 4-22: Comparison of experimental and simulative determined max. deep drawing force and max. thinning for validation of the FE deep drawing model.

Im nächsten Schritt wurde für alle drei kommerziellen Kaltbänder das Streuband der Kreuznapfeigenschaften experimentell und simulativ ermittelt. Dazu wurde der in Abschnitt 4.4.2 festgelegte Standard Tiefziehprozess verwendet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4-12 zusammengefasst.

Tabelle 4-12: Experimentell und simulativ ermitteltes Streuband der resultierenden Kreuznapfeigenschaften

Table 4-12: Experimentally and simulatively determined deviation in the cross die properties

		Stahlhersteller		
		A	B	C
Max. Ausdünnung [mm]	Experimentell (aus AP4)	0,74	0,70	0,72
	Simulativ	0,73	0,68	0,71

Abbildung 4-23 zeigt das aus AP4 experimentell ermittelte Streuband der maximalen Ausdünnung sowie das korrespondierende, simulativ ermittelte Streuband.

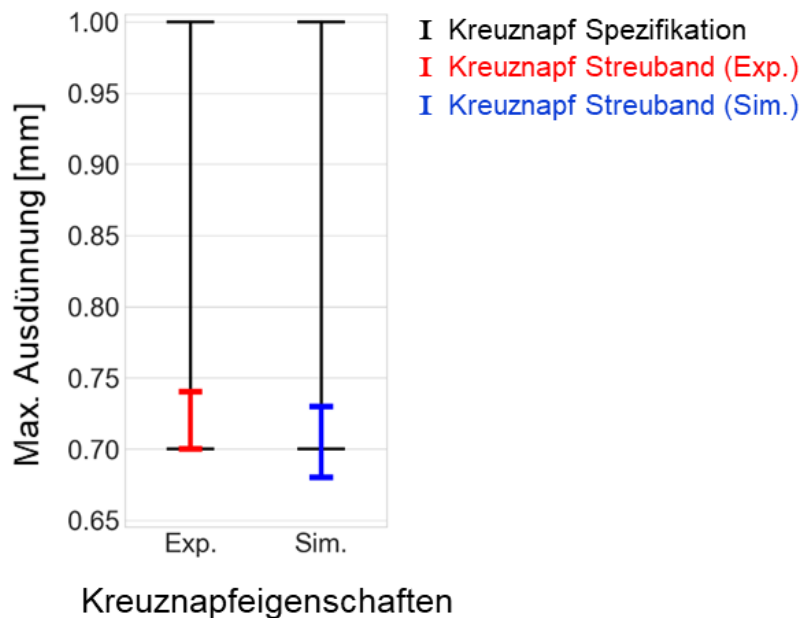


Abbildung 4-23: Gegenüberstellung des experimentell und simulativ ermittelten Streubands der maximalen Ausdünnung des Kreuznapfs unter Verwendung des Standard Tiefziehprozesses

Figure 4-23: Comparison of the experimentally and simulatively determined deviations in the maximum thinning of cross die specimen using the standard deep drawing process.

Die geringfügigen Abweichungen in den experimentellen und simulierten Ergebnissen können auf die Vereinfachungen und Annahmen zurückgeführt werden, die während der Modellierung des FE-Tiefziehprozesses getroffen werden. Außerdem wurde das experimentelle Streuband händisch vermessen und ist somit ebenfalls potentiell fehlerbehaftet.

4.5.3 Simulative Auslegung der Prozessparameter / Simulation based design of process parameter

Um Prozessparameter als Reaktion auf bekannte Materialeigenschaften gezielt auslegen zu können, wurde eine DoE-basierte Auslegung des Tiefziehprozesses

implementiert. Diese ist dazu in der Lage, Prozessparameter für einen optimalen Tiefziehprozess für benutzerdefinierte Kaltbandeigenschaften zu bestimmen.

4.5.4 Durchführung des Kaltwalzens / Execution of cold rolling experiment

Zunächst wurde ein einzelner Test-Kaltwalzversuch mit dem in Tabelle 4-13 gezeigtem Stichplan auf dem Bühler Universal Walzwerk durchgeführt.

Tabelle 4-13: Stichplan zur Durchführung des Test-Kaltwalzversuchs

Table 4-13: Pass schedule for cold rolling experiment

Stich	Start	1	2	3	4	5
Walzgut Höhe [mm]	3,80	2,75	2,05	1,55	1,15	1,00
Höhenabnahme [mm]	-	1,05	0,70	0,50	0,40	0,15
Höhenabnahme [%]	-	27,6	25,5	24,4	25,8	13,0

Für diesen Kaltwalzversuch wurde folgende Einstellungen/Abmessungen verwendet:

Quarto Aufbau

- Arbeitswalzenradius = 80 mm
- Stützwalzenradius = 205 mm
- Walzgeschwindigkeit = 7,2 m/s
- Walzgut Geometrie:
 - 400 mm * 300 mm * 3,8 mm (L*B*H)

Das erzeugte Kaltband wurde mittels Zugversuchen charakterisiert, um die Streckgrenze und Zugfestigkeit zu bestimmen. Die Ergebnisse der Zugversuche sind in Tabelle 4-14 zusammengefasst. Aufgrund der hohen Kaltverfestigung des Materials liegen die Eigenschaften deutlich außerhalb der Spezifikation, weshalb eine Glühbehandlung analog zur industriellen Glühbehandlung des kaltgewalzten Materials durchgeführt werden muss.

Tabelle 4-14: Zugfestigkeit und Streckgrenze des am IBF produzierten Kaltbands im walzharten Zustand, ermittelt mithilfe von Zugversuchen

Table 4-14: Yield strength and tensile strength of cold band after cold rolling determined using tensile tests

Kaltband Zustand	Eingangsmaterial	Steckgrenze, $R_{p0.2}$ [MPa]	Zugfestigkeit, R_m [Mpa]
Am IBF kaltgewalztes Material - Walzhart	Warmband A	702,6	774,6

Die Parameter der Glühung wurden in Zusammenarbeit mit dem PA festgelegt. Um die Freiheitsgrade möglichst gering zu halten, wurde lediglich die Glühdauer im Bereich

von 2 bis 8 Stunden variiert. Anschließend wurde das geglühte Material mittels Zugversuchen charakterisiert. Abbildung 4-24 zeigt die Streckgrenze und Zugfestigkeit der wärmebehandelten Bleche bei unterschiedlicher Glühdauer.

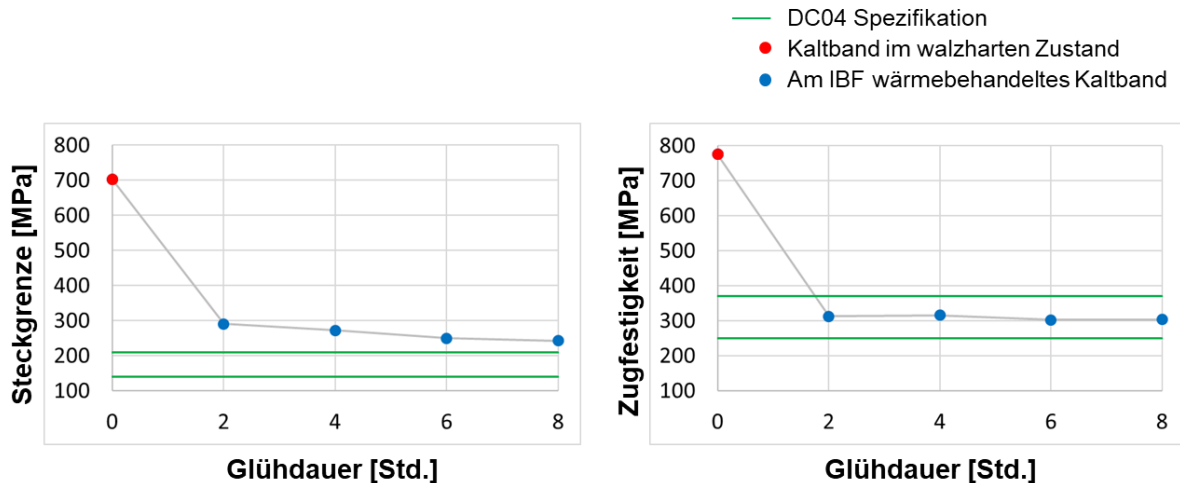


Abbildung 4-24: Streckgrenze und Zugfestigkeit des am IBF kaltgewalzten und geglühten Materials

Figure 4-24: Yield strength and tensile strength of at IBF cold rolled and subsequently heat treated sheets

Es ist zu erkennen, dass die Zugfestigkeit bereits nach einer Glühdauer von 2 Stunden innerhalb der DC04 Spezifikation liegt und diese bei erhöhter Glühdauer auch nicht mehr verlässt. Die Streckgrenze hingegen konnte auch nach der maximalen Glühdauer nicht innerhalb der Spezifikation gebracht werden. Aus diesem Grund wurde das am IBF gewalzte und geglühte Material lediglich zur Überprüfung der Arbeitshypothese der adaptiven Prozessführung verwendet, bei der Material außerhalb der Spezifikation gezielt in ein Gutteil überführt werden soll. Für die Arbeitshypothesen, die Material innerhalb der Spezifikation benötigen, wurde stattdessen auf das kommerzielle Kaltband von Stahlhersteller A zurückgegriffen.

4.5.5 Durchführung des Tiefziehens / Conducting the deep drawing

Um die einzelnen Arbeitshypothesen zu validieren, wurden drei unterschiedliche Arten von Tiefziehversuchen durchgeführt.

Versuchstyp I:

Versuchstyp I wurde durchgeführt, um die prozessübergreifende Datenerfassung, -speicherung und -übertragung zu validieren. In diesem Versuch wurden die implementierte Testumgebung, die modellbasierte Berechnung der Produkteigenschaften sowie der Datenaustausch über die entwickelte Datenplattform validiert.

Für Versuchstyp I wurde das kommerzielle Kaltband A, welches innerhalb des Streubands liegt, verwendet. Dieses besitzt die folgenden Eigenschaften:

- Streckgrenze: 178 MPa
- Zugfestigkeit: 294 MPa

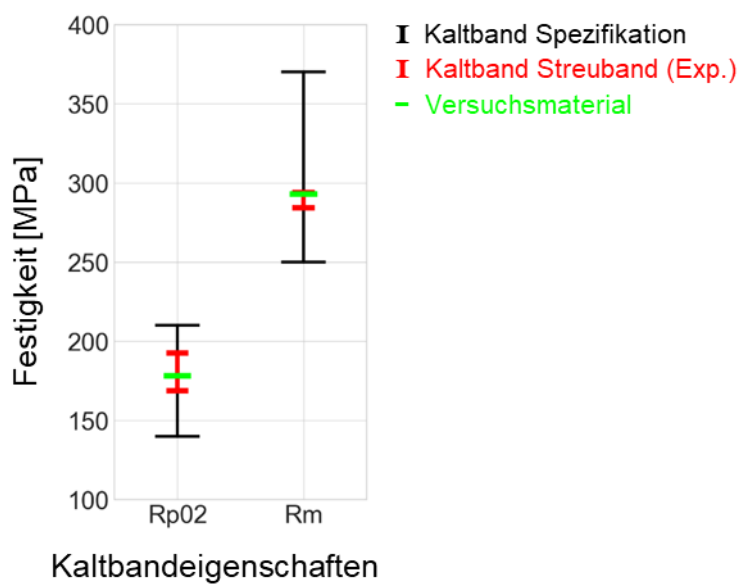


Abbildung 4-25: Eigenschaften des Kaltbands (grün), das für Validierungsversuch I verwendet wurde, zusammen mit der DC04-Spezifikation (schwarz) und dem experimentell ermittelten Kaltband-Streuband aus AP4 (rot)

Figure 4-25: Properties of cold strip used for validation test 1 (green) together with DC04-specification (black) and experimentally determined deviation in the in WP4 (red)

Die Eigenschaften des ausgewählten Kaltbands wurden über die Datenplattform mit dem virtuellen Unternehmen B geteilt. Nach Erhalt der Kaltbandeigenschaften wurde zunächst eine Tiefziehsimulation unter Verwendung der Standard-Tiefziehparameter aus AP4 gemäß dem in Abschnitt 3.5.5 beschriebenen Workflow durchgeführt. Anschließend wurde das Kaltband an der Laufer Tiefziehpresse tiefgezogen. Die Ergebnisse des Tiefziehversuchs sowie der dazugehörigen Simulation sind in Tabelle 4-15 zusammengefasst.

Tabelle 4-15: Zusammenfassung der Tiefzieh Simulations- und Versuchsergebnisse unter Verwendung des Standard Tiefziehprozesses

Table 4-15: Summary of the deep drawing simulation and experimental results using standard deep drawing process

Stahlhersteller			A
Tiefziehparameter	Kantenlänge Platine [mm]	270 mm	
	Niederhalterkraft Soll [kN]	200 kN	
Kreuznapfeigenschaften	Max. Ausdünnung [mm]	Sim.	0,70
		Exp.	0,73

Die Simulationsergebnisse zeigten, dass der Standard-Tiefziehprozess bei gegebenem Kaltband wie erwartet zu einem Tiefziehbauteil innerhalb der Spezifikation führte. Danach wurde das Kaltband experimentell mit dem gleichen Standard-Tiefziehparameter tiefgezogen. Die Charakterisierung der tiefgezogenen Bauteile weist

darauf hin, dass der Kreuznapf, wie erwartet, innerhalb der Spezifikation hergestellt wurde. Abbildung 4-26 zeigt die simulativen sowie experimentelle Ergebnisse des Tiefziehens unter Verwendung des Standardtiefziehprozesses für Kaltband innerhalb des Streubandes. Damit wurde die Funktionsweise der modellbasierten Berechnung von Kaltbandeigenschaften und deren Austausch mit dem virtuellen Unternehmen B über die Datenplattform inklusive der kompletten Infrastruktur validiert.

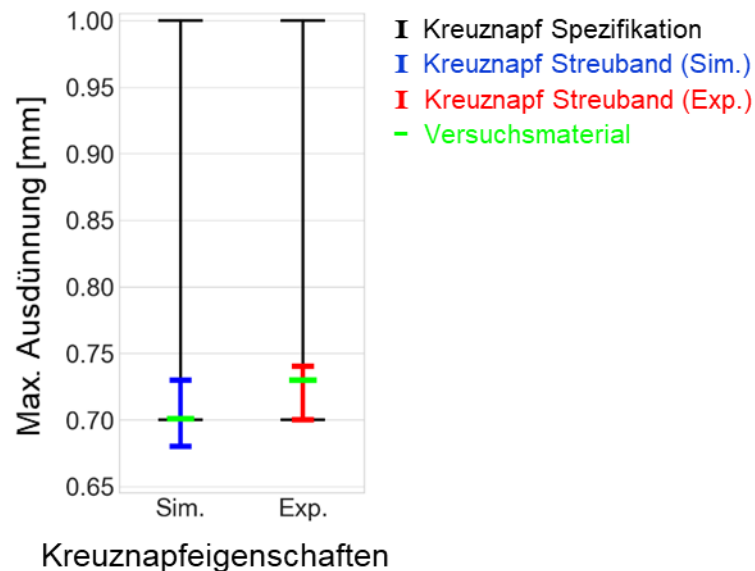


Abbildung 4-26: Experimentelle Ergebnisse und Simulationsergebnisse der Tiefziehversuche unter Verwendung der Standard-Tiefziehparameter

Figure 4-26: Experimental and simulation results for deep drawing tests using standard deep drawing process

Versuchstyp II:

Versuchstyp II wurde mit dem Ziel durchgeführt, das Streuband in den Kreuznapf-Eigenschaften zu reduzieren. Zu diesem Zweck wurden anhand der DoE-Ergebnisse die Tiefziehparameter so gewählt, dass gezielt ein Kreuznapf mit gewünschten Eigenschaften hergestellt werden kann. Für diese Versuche wurde das kommerzielle Kaltband innerhalb der Spezifikation aus AP4 von allen drei Stahlherstellern verwendet. Für jedes der Kaltbänder wurde das Design-of-Experiments (DoE) verwendet, um neue, optimierte Tiefziehprozessparameter zu bestimmen, die zu Kreuznapfen mit einer geringeren maximalen Ausdünnung führen. Es wurde zusätzlich sichergestellt, dass sich der neue Tiefziehprozess von dem Standard-Tiefziehprozess unterscheidet. Für die Durchführung des DoE wurden die Tiefziehparametergrenzen verwendet, die in Kapitel 4.4.2 festgelegt wurden. Abbildung 4-27 zeigt die Ergebnisse des Design-of-Experiments (DoE) für jedes Kaltband.

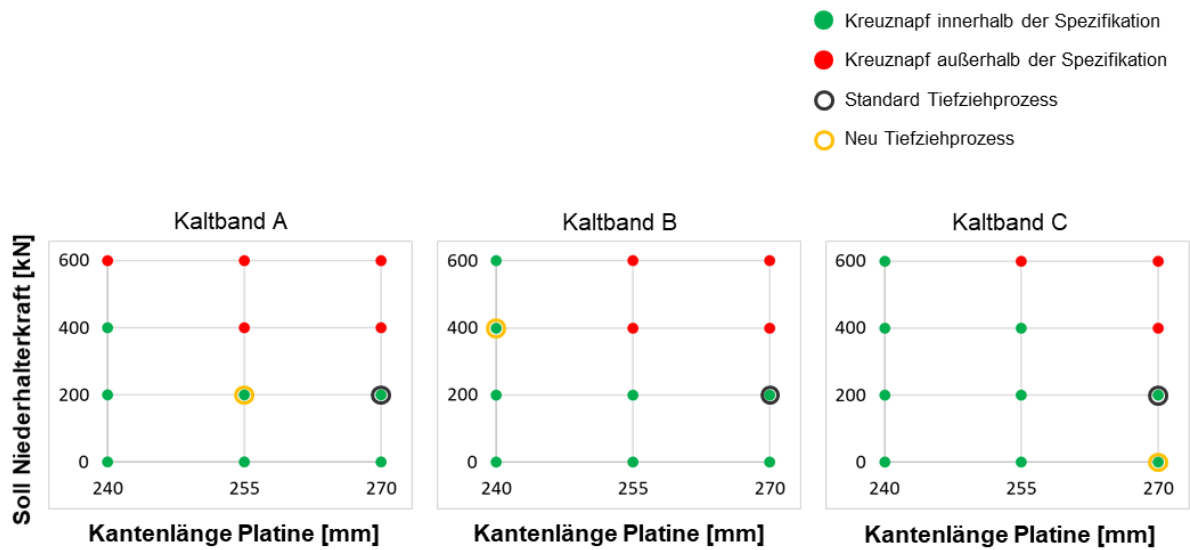


Abbildung 4-27: DoE-basierte Auslegung des Tiefziehprozesses für Kaltband A, B und C

Figure 4-27: DoE based design of deep drawing process for cold strip A, B and C

Kreise, die grün dargestellt sind, repräsentieren Kreuznäpfe innerhalb der Spezifikation, während rote Kreise die Kreuznäpfe außerhalb der Spezifikation darstellen. Der schwarze Kreis kennzeichnet die Kreuznäpfe, die unter Verwendung der Standard-Tiefziehparameter erzeugt wurden. Zur Minimierung des Kreuznapf Streubands wurden die Tiefziehparameter aus den DoE-Ergebnissen ausgewählt, welche die maximale Ausdünnung in dem Kreuznapf zwischen 0,72 und 0,74 mm begrenzen. Die final ausgewählten Tiefziehparameter für jedes Kaltband sind mit orangefarbenen Kreisen dargestellt. Abschließend wurden experimentelle Tiefziehversuche für jedes Kaltband unter Verwendung der aus dem DoE ausgewählten neuen Tiefziehparameter durchgeführt. Die Ergebnisse der ausgewählten Simulationen sowie die dazugehörigen experimentellen Ergebnisse sind in Tabelle 4-16 zusammengefasst.

Tabelle 4-16: Ergebnisse der über DoE ausgewählten Tiefziehsimulationen und der dazugehörigen experimentellen Versuche

Table 4-16: Results of deep drawing simulation and experiments using standard deep drawing process as well as DoE based selected new deep drawing process parameter

Tiefziehprozess	Stahlhersteller			A	B	C
Standard Tiefziehprozess	Tiefziehparameter	Kantenlänge Platine [mm]		270		
		Niederhalterkraft Soll [kN]		200		
	Kreuznapfeigenschaften	Max. Ausdünnung [mm]	Sim.	0,73	0,68	0,71
			Exp.	0,74	0,70	0,72
Optimierter Tiefziehprozess	Tiefziehparameter	Kantenlänge Platine [mm]		255	240	270
		Niederhalterkraft Soll [kN]		200	400	0
	Kreuznapfeigenschaften	Max. Ausdünnung [mm]	Sim.	0,74	0,72	0,74
			Exp.	0,73	0,75	0,74

Wie aus Abbildung 4-28 ersichtlich ist, konnte das resultierende Streuband durch die DoE-basierte Prozessauslegung sowohl experimentell als auch simulativ deutlich

verkleinert werden. Außerdem liegt nun auch das simulativ ermittelte Streuband vollständig innerhalb der definierten Spezifikation.

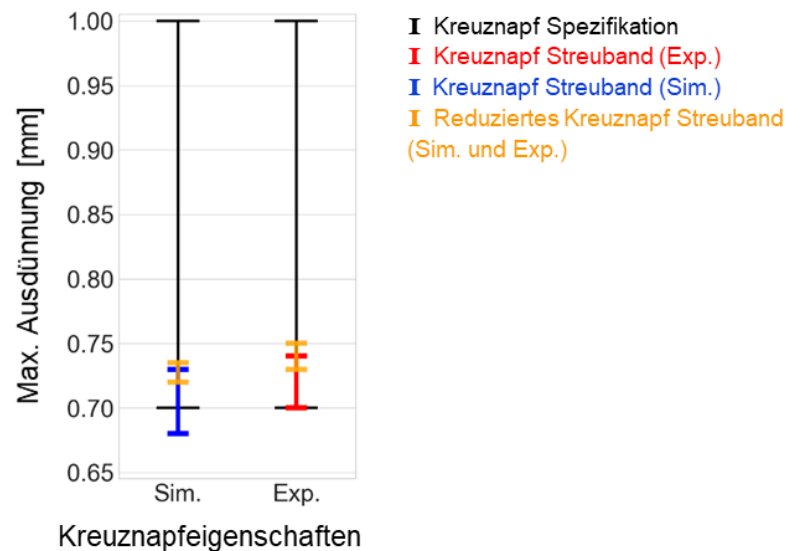


Abbildung 4-28: Reduziertes experimentelles und simulatives Streuband der Kreuznapfeigenschaften durch Verwendung der DoE-basierten Prozessauslegung.

Figure 4-28: Reduction of experimental and simulative deviations in cross die properties using DoE based process design

Versuchstyp III:

Versuchstyp III wurde mit dem Ziel durchgeführt, die Möglichkeit einer adaptiven Prozessführung zu untersuchen. Dazu soll aus Kaltband außerhalb der Spezifikation gezielt ein Kreuznapf innerhalb der Spezifikation hergestellt werden. Wie in Kapitel 4.5.4 beschrieben, wurde dazu das am IBF kaltgewalzte und geglühte Material verwendet, dessen Streckgrenze außerhalb des Streubandes liegt (s. Abbildung 4-29). Die genauen Eigenschaften des Kaltband außerhalb der Spezifikation sind die folgenden:

- Streckgrenze = 240 MPa
- Zugfestigkeit = 303 MPa

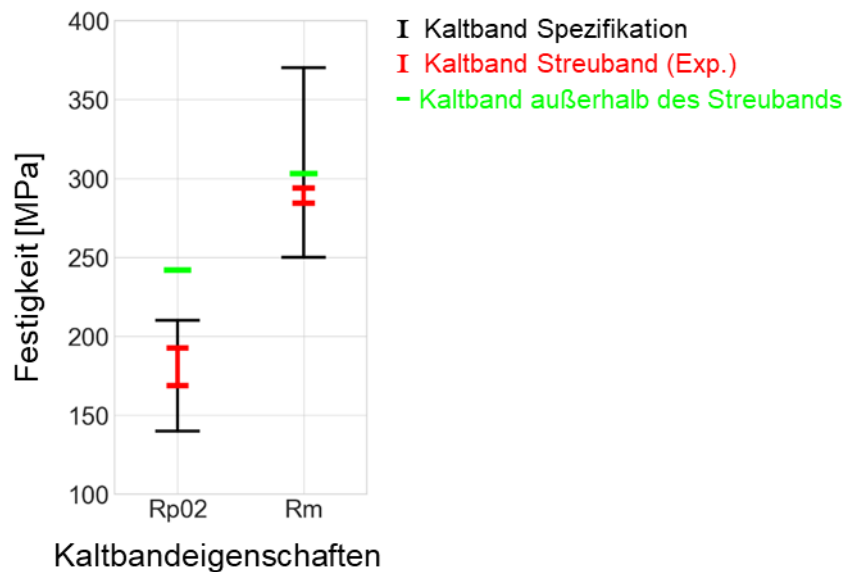


Abbildung 4-29: Für die Validierungsversuche III verwendetes Kaltband mit Eigenschaften außerhalb der Spezifikation

Figure 4-29: At IBF processed cold strip with properties outside the cold strip tolerance from WP4 for validation test III

Abbildung 4-29 zeigt die Kaltbändeigenschaften sowie die Kaltband Spezifikation und das Kaltband Streuband aus AP4. Die im Vergleich zu den kommerziell beschafften Kaltbändern kleinere Differenz zwischen Streckgrenze und Zugfestigkeit lässt auf eine geringere Kaltverfestigungsrate schließen, sodass das hier verwendete Material eher zur Ausdünnung neigt. Demnach ist zu erwarten, dass unter Verwendung der Standard Prozessführung ein Kreuznapf entsteht, der die zulässige maximale Ausdünnung unterschreitet. Zur Überprüfung der Hypothese wurde zunächst eine Tiefziehsimulation mit der Standard Prozessführung durchgeführt. Die erhaltenen Ergebnisse bestätigten die Hypothese, denn mit einer maximalen Ausdünnung von 0,66 mm liegt der Kreuznapf außerhalb der Spezifikation, die eine maximale Ausdünnung von 0,7 mm erlaubt. Um aus dem Material trotzdem ein Gutteil erzeugen zu können, wurde eine neue Prozessführung mittels DoE ausgelegt. Die ermittelten optimalen Prozessparameter lagen bei einer Platinen Kantenlänge von 245 mm und einer Soll-Niederhalterkraft von 0 kN (vgl. Standard Prozessführung: Platinen Kantenlänge = 270 mm, Niederhalterkraft Soll = 200 kN). In der Simulation ergab sich unter Verwendung der neuen Prozessparameter eine maximale Ausdünnung von 0,76 mm, die deutlich innerhalb der Spezifikation des Kreuznapfs liegt. Zur Validierung wurde zusätzlich ein experimenteller Kreuznapfversuch unter Verwendung der neuen Prozessparameter durchgeführt. Hier ergab sich eine maximale Ausdünnung von 0,77 mm, sodass die Arbeitshypothese und das Konzept der adaptiven Prozessführung als validiert angesehen werden können. Zur Verdeutlichung sind die Ergebnisse nochmals in Tabelle 4-17 und Abbildung 4-30 zusammengefasst.

Tabelle 4-17 : Zusammenfassung der Simulationsergebnisse und experimentellen Ergebnisse von Validierungsversuch III

Table 4-17: Summary of simulation and experimental results for validation test III

Tiefziehprozess				Kaltband Außerhalb der Streuband
Standard Tiefziehprozess	Tiefziehparameter	Kantenlänge Platine [mm]		270
		Niederhalterkraft Soll [kN]		200
	Kreuznapfeigenschaften	Max. Ausdünnung [mm]	Sim.	0,66
Opt. Tiefziehprozess	Tiefziehparameter	Kantenlänge Platine [mm]		245
		Niederhalterkraft Soll [kN]		0
	Kreuznapfeigenschaften	Max. Ausdünnung [mm]	Sim.	0,76
			Exp.	0,77

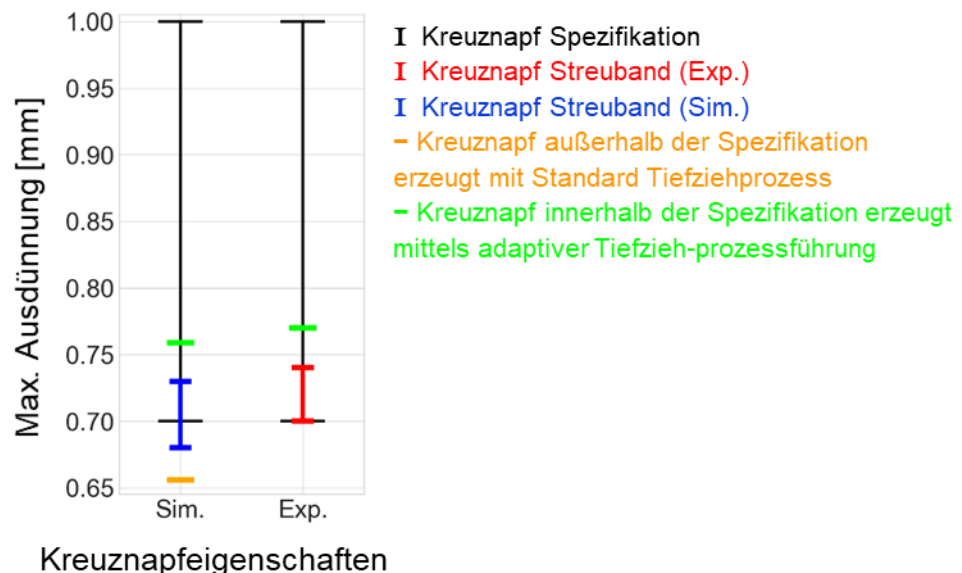


Abbildung 4-30: Validierung der adaptiven Prozessführung zur Erzeugung von Kreuznapfen innerhalb der Spezifikation aus Kaltband außerhalb der Spezifikation

Figure 4-30: Adaptive deep drawing process control for processing cold strip outside the tolerance to produce deep drawn component with its properties within the specification

4.5.6 Erzielte Ergebnisse / Achieved Results

Das Ziel von Arbeitspaket 5 und somit das fünfte Teilziel des Forschungsprojekts, bestehend aus der Entwicklung einer simulativen Abbildung der Modellprozesskette und der Durchführung der Validierungsversuche, wurde erfolgreich erreicht. Durch die Modellierung des Kaltwalz- und Tiefziehprozesses konnten die modellbasierten Produkteigenschaften für jedes Produkt berechnet und mittels DOE die Tiefziehparameter optimiert werden. Zuletzt wurden die Versuche erfolgreich durchgeführt und damit die Arbeitshypothese der datenbasierten Prozessführung und die Projektvision der adaptiven Prozessführung validiert

4.6 Arbeitspaket 6 / Work package 6

In AP6 wurden die Mehrwerte der datenbasierten Prozessführung betrachtet. Hier wurden die Ergebnisse der in AP5 durchgeführten Experimente und Simulationen analysiert, um den Mehrwert der datenbasierten Prozessführung zu bestimmen.

4.6.1 Analyse der experimentellen Ergebnisse / Analysis of experimental results

Um die Mehrwerte der prozessübergreifenden Datenerfassung, -speicherung und -übergabe zu untersuchen, wurden die drei Validierungsversuche in AP5 durchgeführt. Die Ergebnisse des Versuchstyps I haben die implementierte Testumgebung, bestehend aus Anlagen, Geräten, Messsystemen, Datenspeichern, Simulationsumgebungen und –tools, erfolgreich validiert. Dies gewährleistete, dass alle Prozessmodelle, Kommunikationsschnittstellen, Design-of-Experiments (DoE) und der Datenplattformprototyp wie geplant funktionierten. Die Ergebnisse des Versuchstyps II haben die Möglichkeit aufgezeigt, die Produkteigenschaften des Tiefziehprozesses gezielt einzustellen. Dies demonstriert, dass durch Anpassungen der Tiefziehparameter die Streuung der Tiefziehbauteileigenschaften reduziert werden konnte und die Produktqualität somit verbessert werden konnte. Die Ergebnisse des Versuchstyps III haben die Möglichkeiten und Vorteile der adaptiven Prozessführung aufgezeigt, indem die genauen Ausgangsmaterialeigenschaften berücksichtigt wurden, um Tiefziehprozesse so anzupassen, dass auch aus unzulässigem Material Gutteile erzeugt werden konnten. Dies wurde durch eine DoE-basierte Auslegung des Tiefziehprozesses erreicht, die optimale Tiefziehparameter lieferte. Dadurch konnte gezeigt werden, dass das Kaltband, das außerhalb des Spezifikationsbereichs lag, dennoch verwendet werden kann, um Kreuznäpfe innerhalb der Spezifikation zu erzeugen.

Damit sind folgende Mehrwerte identifiziert:

- **Modellbasierte Berechnung der Produkteigenschaften:**
Die Bestimmung der Eigenschaften einzelner Produkte in einer Charge ist aufgrund der gesteigerten Versuchskosten und des erhöhten Zeitaufwands wirtschaftlich nicht realisierbar. Aus diesem Grund erweist sich die modellbasierte Berechnung der Produkteigenschaften als vielversprechender Ansatz.
- **Verbesserung der Produktqualität:**
Mit der Möglichkeit, Produkteigenschaften durch eine gezielte Einstellung der Prozessparameter anzupassen, können Endprodukte mit einem geringeren Streuband hergestellt werden. Dies ermöglicht es Unternehmen, Produkte mit einer erhöhten Qualität herzustellen.
- **Adaptive Prozessauslegung:**
Durch die Möglichkeit, den Prozess durch eine Anpassung der Prozessparameter flexibel zu führen, wurde das Ausgangsmaterial, das außerhalb des Streubands lag, zu einem Gutteil verarbeitet. Dadurch wurde demonstriert, dass eine adaptive Prozessführung die Verarbeitung von Ausgangsmaterial mit einem breiteren Spektrum an Eigenschaften im Vergleich zur herkömmlichen Prozessführung mit festen Standard-Prozessparametern

ermöglicht. Somit kann der Prozess robust/flexibel gegenüber Abweichungen in den Produkteigenschaften gestaltet werden und Ausschuss vermieden werden, was zu einer erhöhten Wirtschaftlichkeit führt. Im Falle von Materialknappheit oder Lieferproblemen entlang der Prozesskette können Unternehmen zusätzlich entscheiden, gegebenenfalls Ausgangsmaterial mit anderen Spezifikationen oder Eigenschaften zu verarbeiten.

4.6.2 Analyse der simulativen Ergebnisse / Analysis of simulation results

Die Ergebnisse der in Kapitel 4.5.5 durchgeführten Modellvalidierung zeigen eine gute Genauigkeit zwischen den experimentellen Ergebnissen und den Simulationsergebnissen. Für das Modell des schnellen Kaltwalzens lag die maximale Differenz zwischen der simulierten und der experimentellen Walzkraft unterhalb von 10 %. Für das FE-Tiefziehmodell lag die Differenz zwischen der simulierten und der experimentellen maximalen Tiefziehkraft sowie der maximalen Ausdünnung im Tiefziehteil unter 5 %. Auch die vorhergesagten Produkteigenschaften stimmen sehr gut mit den experimentell gemessenen überein und zeigen somit, dass die modellbasierte Vorhersage von Produkteigenschaften in Kombination mit präzisen Simulationsmodellen einen wichtigen Stellhebel in der Prozessauslegung bieten kann.

4.6.3 Analyse des wirtschaftlichen Mehrwerts / Analysis of the economic added value

Aufgrund des steigenden Werts von Daten als Vermögenswert und des hohen Nutzenpotenzials ihrer Nutzung entscheiden sich immer mehr Unternehmen für die Umsetzung verschiedener datengesteuerter Anwendungsfälle, von der Verbesserung interner Prozesse und Produkte bis hin zur Zusammenarbeit in Lieferketten und dem unternehmensübergreifenden Datenaustausch, um den möglichen Nutzen der Lieferkette zu erhöhen. Digitalisierungsprojekte und datengesteuerten Anwendungsfälle sind jedoch mit gewissen Implementierungskosten verbunden: direkte finanzielle Investitionen, Personalkosten und Zeitaufwand sowie die Verlagerung des Schwerpunkts vom Tagesgeschäft auf Digitalisierungsprojekte. Daher müssen Unternehmen solche Projekte sorgfältig angehen und den Weg mit dem besten Kosten-Nutzen-Verhältnis wählen. Dazu ist es wichtig, den potenziellen Nutzen und die anstehenden Kosten zu kennen, insbesondere bei unternehmensübergreifenden Kooperationen. Intransparenter Nutzen, welcher von beiden austauschenden Parteien abhängt und fehlendes Wissen über die situativen und unternehmensspezifischen Faktoren, welche die Kosten- und Nutzensausprägungen beeinflussen könne, erschweren Investitionsentscheidungen und bringen Unternehmen dazu, sich gegen diese zu entscheiden, um das Risiko zu minimieren.

Bei der Recherche wurden fünf besonders relevante Ansätze zur Kosten-Nutzen-Analyse des Datenaustauschs in Lieferketten identifiziert (vgl. Kapitel 2.7). Alle diese Ansätze konzentrieren sich auf die Bewertung des Mehrwerts durch eine erhöhte Datenverfügbarkeit. Rückert et al., 2021, und Gelhaar et al., 2023, untersuchen den unternehmensübergreifenden Datenaustausch am Beispiel der Müllerei bzw. im Rahmen von Catena-X. Cheng und Westman, 2020, sowie King und Shrems, 1987,

untersuchen den allgemeinen Nutzen der Digitalisierung bzw. der Einführung von IT-Systemen. Zipfel et al. 2021 haben festgestellt, dass Informationen zwischen den Partnern der Lieferkette nicht ausgetauscht werden, und haben daher eine Methode zur Quantifizierung des Informationswerts entwickelt, um Anreize für Unternehmen zu schaffen, Informationen zur kurzfristigen Produktionssteuerung auszutauschen.

Diese Ansätze haben zwei entscheidende gemeinsame Aspekte. Erstens beweisen sie, dass der Daten- oder Informationsaustausch in einer Lieferkette von Vorteil ist und dass der Nutzen die investierten Kosten überwiegt. Zweitens ist die genaue Bestimmung des endgültigen Nutzens nur anhand von konkreten Beispielen möglich. Über verschiedene Branchen oder Unternehmen innerhalb einer Branche hinweg lassen sich diese Vorteile nur auf einer abstrakten Ebene beschreiben. Aus diesem Grund und mit der Absprache mit dem PA wurde eine Übersicht von möglichen Kosten- und Nutzenaspekten erstellt und anschließend Faktoren, die maßgeblich die Kosten- und Nutzenaspekte beeinflussen können, und deren Einfluss auf die Aspekte identifiziert. Diese Lösung ist allgemeingültig und kann von jedem Unternehmen der Stahlindustrie angewendet werden.

4.6.3.1 Überblick über Kostenaspekte

Wie in Abbildung 4-31 dargestellt, wurden insgesamt 18 Kostenaspekte aus sechs verschiedenen Kategorien identifiziert, die bei der Implementierung des unternehmensübergreifenden Datenaustauschs berücksichtigt werden müssen. Diese Kategorien ermöglichen eine einfache Zuordnung von Kosten zu den jeweiligen Aufgaben und Themen.

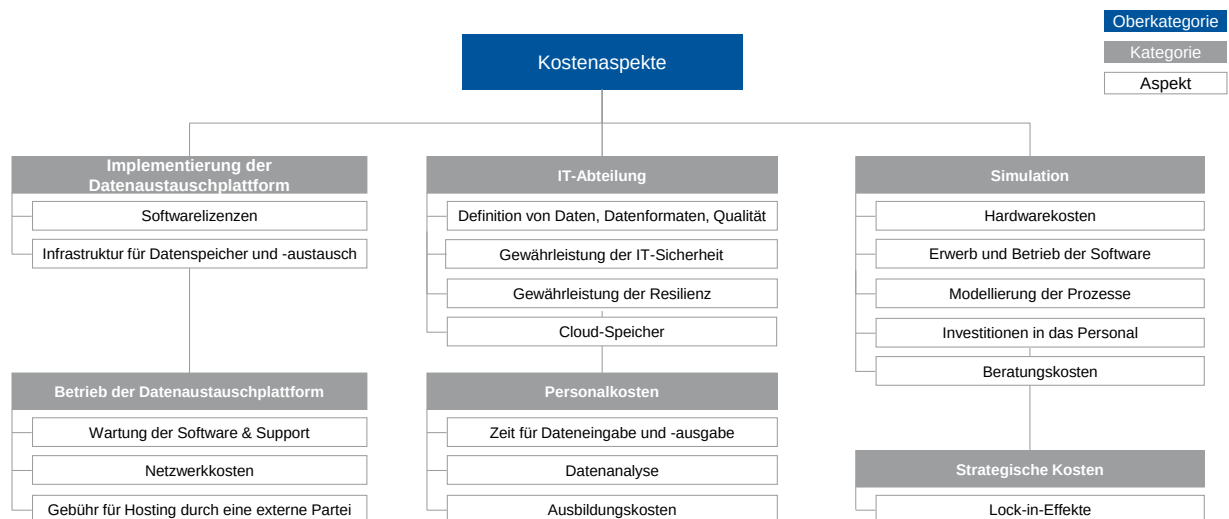


Abbildung 4-31: Überblick über relevante Kostenaspekte des unternehmensübergreifenden Datenaustauschs

Figure 4-31: Overview of relevant cost aspects of cross-company data exchange

4.6.3.2 Überblick über Nutzenaspekte

Insgesamt wurden 14 Nutzenaspekte aus drei verschiedenen Kategorien identifiziert, die sich auf den Mehrwert des unternehmensübergreifenden Datenaustauschs auswirken (s. Abbildung 4-32).

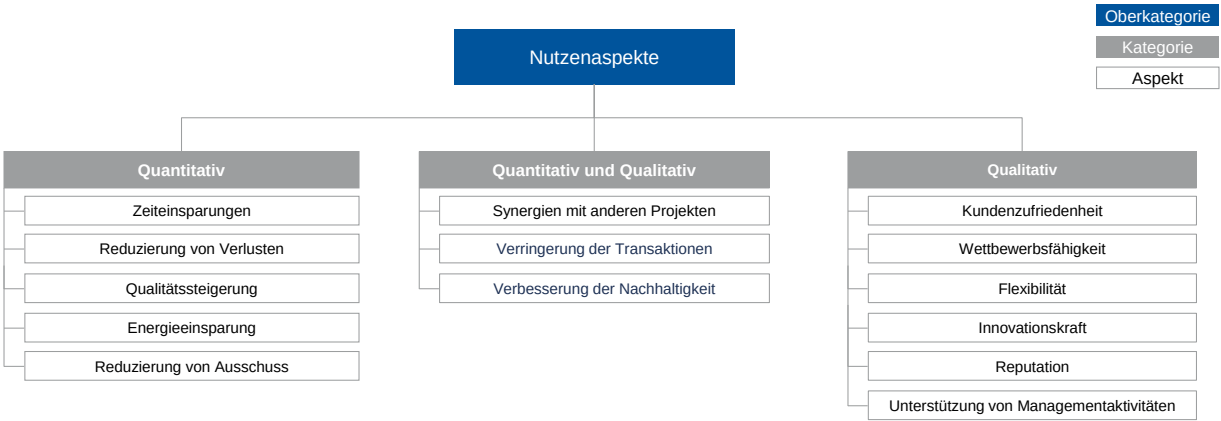


Abbildung 4-32: Übersicht der Nutzenaspekte des unternehmensübergreifenden Datenaustauschs
Figure 4-32: Overview of the benefits of cross-company data exchange

4.6.3.3 Überblick über Dimensionen und Einflussfaktoren

Dieses Unterkapitel erläutert und definiert die Dimensionen und die zugehörigen Faktoren. Anschließend wird die Auswirkung der Faktoren auf die zuvor eingeführten Aspekte dargestellt.

Die Dimension **strategische Eigenschaften** eines Unternehmens sind die Eigenschaften, die die Fähigkeit eines Unternehmens bestimmen, eine langfristige Ausrichtung und Wettbewerbsvorteile zu entwickeln und aufrechtzuerhalten. Diese Dimension umfasst die Einflussfaktoren **Marktmacht**, **Ressourcenverfügbarkeit** und **Transaktionsquantität**.

Marktmacht bezieht sich auf die Fähigkeit eines Unternehmens, den Preis und andere wirtschaftliche Bedingungen in einem bestimmten Markt zu beeinflussen. Dies kann durch Größe, Marktanteil, Produktdifferentiation oder Wettbewerbsvorteile verursacht werden. Die zugrunde liegenden Szenarien für verschiedene Marktstellungen werden durch unterschiedliche Marktformen definiert, je nach Anzahl der Anbieter und Nachfrager, z. B. Monopol/Monopson oder Oligopol/Oligopson [119]. Tabelle 4-18 zeigt den Einfluss hoher Marktmacht.

Tabelle 4-18: Einfluss steigender Marktmacht auf Kosten und Nutzen eines unternehmensübergreifenden Datenaustauschs

Table 4-18: The influence of increasing market power on the costs and benefits of cross-company data exchange

Oberkategorie	Kategorie	Aspekt	Änderung bei Monopolstellung
Nutzen	Quantitativ	Zeiteinsparungen	▲
	Quantitativ/ Qualitativ	Qualitätssteigerung	▲
	Qualitativ	Kundenzufriedenheit B2B	▼
Kosten	IT-Abteilung	Definition von Daten, Datenformaten, Qualität	▼
	Zeitbedingte Kosten	Zeit für die Dateneingabe und -ausgabe	▼
	Zeitbedingte Kosten	Datenanalyse	▼
	Strategische Kosten	Lock-in Effekte	▼

Die **Ressourcenverfügbarkeit** spiegelt die Fähigkeit eines Unternehmens wider, intern verfügbare Ressourcen bereitzustellen (insbesondere kurzfristig). Interne Ressourcen können in materielle, immaterielle und personelle Ressourcen unterteilt werden. Materielle Ressourcen sind zum Beispiel physische Ressourcen wie Maschinen. Der Begriff der immateriellen Ressourcen umfasst beispielsweise die Merkmale Technologie, Know-how sowie Reputation. Beispiele für personelle Ressourcen sind Mitarbeiter, Berufserfahrung und Einsatzflexibilität. Tabelle 4-19 zeigt den Einfluss einer zunehmenden Ressourcenverfügbarkeit auf Kosten und Nutzen.

Tabelle 4-19: Einfluss steigender Ressourcenverfügbarkeit auf Kosten und Nutzen des unternehmensübergreifenden Datenaustauschs

Table 4-19: Einfluss steigender Ressourcenverfügbarkeit auf Kosten und Nutzen des unternehmensübergreifenden Datenaustauschs

Oberkategorie	Kategorie	Aspekt	Änderung durch steigenden Faktor
Nutzen	Quantitativ/ Qualitativ	Synergien mit anderen Projekten	▲
	Qualitativ	Innovationskraft	▲
Kosten	Implementierung/Betrieb der Datenaustauschplattform	Ausbildungskosten	▼
	Implementierung/Betrieb der Datenaustauschplattform	Wartung der Software	▼
	IT-Abteilung	Gewährleistung von IT-Sicherheit	▼
	IT-Abteilung	Gewährleistung von Resilienz	▼
	Simulation	Modellierung der Prozesse	▼
	Simulation	Investitionen in das Personal	▼

Der Einflussfaktor **Transaktionsquantität** bezieht sich auf die Anzahl der Transaktionen, die in einer Geschäftsbeziehung stattfinden. Dieser Faktor kann verwendet werden, um die Beziehung zwischen Geschäftspartnern zu analysieren, da er Einblicke in die Intensität und Dauer des Datenaustauschs bietet. Zwei mögliche Szenarien könnten eine kurz- und eine langfristig orientierte Partnerschaft sein. Je höher beispielsweise die Transaktionsmenge ist, desto mehr Synergien können erzielt und die Fixkosten auf mehr Transaktionen verteilt werden. Die Auswirkungen dieses Faktors auf die Kosten und Nutzen sind in Tabelle 4-20 dargestellt.

Tabelle 4-20: Einfluss steigender Transaktionsquantität auf Kosten und Nutzen des unternehmensübergreifenden Datenaustauschs

Table 4-20: The influence of increasing transaction quantity on the costs and benefits of cross-company data exchange

Oberkategorie	Kategorie	Aspekt	Änderung durch steigenden Faktor
Nutzen	Quantitativ	Zeiteinsparungen	▲
	Quantitativ	Reduzierte Verluste	▲
	Quantitativ	Qualitätssteigerung	▲
	Quantitativ	Reduzierung von Ausschuss	▲
	Quantitativ/ Qualitativ	Synergien mit anderen Projekten	▲
	Qualitativ	Kundenzufriedenheit B2B	▲
Kosten	Investitionskosten	Alle Investitionen	▼
	Strategische Kosten	Lock-in Effekte	▲

Die Dimension **technische Eigenschaften** eines Unternehmens umfasst die technischen Merkmale, die sich auf die technische Infrastruktur des Unternehmens und die Informationstechnologie- und Kommunikationssysteme beziehen. Einflussfaktoren dieser Dimension sind der **Reifegrad der Digitalisierung** und die **Simulationsexpertise**.

Der **Reifegrad der Digitalisierung** kann anhand verschiedener Faktoren wie Ressourcen, Informationssysteme, Organisation und Unternehmenskultur bewertet werden. Er beschreibt den Fortschritt der Digitalisierung eines Unternehmens. Der "Industry 4.0 Maturity Index" wird verwendet, um den Reifegrad der Digitalisierung in sechs Stufen zu unterteilen [120]. Es besteht eine Beziehung zwischen dem Grad des Digitalisierungsreifegrads und den Kosten- und Nutzenaspekten. Tabelle 4-21 zeigt, dass ein steigender Grad des Digitalisierungsreifegrads positive Auswirkungen auf Kosten und Nutzen hat. Ein höherer Digitalisierungsreifegrad eines Unternehmens bedeutet, dass bereits einige Investitionen in die Digitalisierung getätigt wurden und bereits einige relevante Daten erfasst wurden. Das Teilen dieser Daten über bereits vorhandene Infrastrukturen bedeutet daher geringere Kosten und gleichzeitig hohen Nutzen.

Tabelle 4-21: Einfluss eines steigenden Digitalisierungsreifegrades auf Kosten und Nutzen des unternehmensübergreifenden Datenaustauschs

Table 4-21: The influence of increasing digitalization maturity on the costs and benefits of cross-company data exchange

Oberkategorie	Kategorie	Aspekt	Änderung durch steigenden Faktor
Nutzen	Quantitativ	Zeiteinsparungen	▲
	Quantitativ	Qualitätssteigerung	▲
	Quantitativ/ Qualitativ	Synergien mit anderen Projekten	▲
	Qualitativ	Innovationskraft	▲
Kosten	Implementierung/Betrieb der Datenaustauschplattform	Infrastruktur für Datenspeicher und -Austausch	▼
	IT-Abteilung	Definition von Daten, Datenformaten, Qualität	▼
	Simulation	Alle Ausgaben	▼
	Zeitbedingte Kosten	Datenanalyse	▼

Die **Simulationsexpertise** bezieht sich auf das Wissen innerhalb des Unternehmens, das notwendig ist, um Simulationen durchzuführen und zu interpretieren. Simulationen sind Computermodelle oder virtuelle Prototypen, die verwendet werden, um die Leistung, das Verhalten oder die Eigenschaften von Prozessen oder Produkten zu analysieren. Dies ermöglicht Kosteneinsparungen in realen Prozessen (s. Tabelle 4-22). Die Fähigkeit, umfassende Materialdaten (z. B. digitaler Zwilling) in Simulationsmodellen zu nutzen, ist für die adaptive Prozesssteuerung entscheidend.

Tabelle 4-22: Einfluss der Simulationsexpertise auf Kosten und Nutzen des unternehmensübergreifenden Datenaustausches

Table 4-22: The influence of simulation expertise on the costs and benefits of cross-company data exchange

Oberkategorie	Kategorie	Aspekt	Änderung durch steigenden Faktor
Nutzen	Quantitativ	Qualitätssteigerung	▲
	Quantitativ	Energieeinsparung	▲
	Quantitativ	Reduzierung von Ausschuss	▲
Kosten	Simulation	Erwerb und Betrieb der Software	▼
	Simulation	Modellierung der Prozesse	▼
	Simulation	Investitionen in das Personal	▼
	Simulation	Beratungskosten	▼

Die Dimension **Produkteigenschaften** beschreibt die qualitativen oder quantitativen Eigenschaften eines Produkts. Diese Dimension umfasst die Einflussfaktoren **Kosten und Komplexität eines Produkts** sowie die **Kritikalität**.

Die **Kosten eines Produkts** umfassen alle Aufwendungen, die für seine Herstellung, Vermarktung und Vertrieb anfallen [121]. Die **Produktkomplexität** bezieht sich auf die Anzahl und das Zusammenspiel verschiedener Komponenten und Prozesse, die für die Herstellung oder den Betrieb des Produkts erforderlich sind. Einerseits bedeutet eine höhere Komplexität eines Produkts höhere Herstellungskosten. Andererseits ist die Investition in die Digitalisierung teurer Produkte rentabler als für kostengünstige Produkte. Zum Beispiel ist die Verwendung von Finite-Elemente-Methoden (FEM) in der Automobilindustrie seit Jahrzehnten Standard, während sie für Verpackungsstähle noch in der Entwicklung ist [122]. Tabelle 4-23 zeigt, wie sich verschiedene Kosten und Nutzen aufgrund steigender Produktkomplexität ändern.

Tabelle 4-23: Einfluss steigender Produktkomplexität auf Kosten und Nutzen des unternehmensübergreifenden Datenaustauschs

Table 4-23: The influence of increasing product complexity on the costs and benefits of cross-company data exchange

Oberkategorie	Kategorie	Aspekt	Änderung durch steigenden Faktor
Nutzen	Quantitativ	Zeiteinsparungen	▲
	Quantitativ	Qualitätssteigerung	▲
	Quantitativ	Energieeinsparungen	▲
Kosten	Implementierung/Betrieb der Datenaustauschplattform	Ausbildungskosten	▲
	IT-Abteilung	Definition von Daten, Datenformaten, Qualität	▲
	IT-Abteilung	Gewährleistung von Resilienz	▲
	Simulation	Modellierung der Prozesse	▲
	Zeitbedingte Kosten	Datenanalyse	▲

Der zweite Einflussfaktor dieser Dimension ist die **Produktkritikalität**. Die Produktkritikalität bezieht sich auf die Bedeutung oder den Einfluss, den ein Produkt auf die Funktionsweise des endgültigen Gesamtprodukts am Ende der Wertschöpfungskette hat. Komponenten können je nach ihrer Kritikalität klassifiziert werden. Für eine nicht wesentliche Komponente wie Stahlblechpaneele und Abdeckungen ist die Kritikalität in der Regel gering, während sie für eine Komponente wie eine Bremsscheibe in Bezug auf Qualitäts- und Sicherheitsanforderungen hoch ist, was zu einer erhöhten Bedeutung des Produkts für das Gesamtsystem oder das endgültige Produkt führt. Je höher die Kritikalität eines Produkts ist, desto höher sind die Erwartungen an seine Qualität. Kann die Qualität nicht ordnungsgemäß sichergestellt werden, drohen strengere gesetzliche Vorschriften oder höhere Geldstrafen und Verluste. Im Fall eines kritischen Produkts sind Investitionen in Systeme zur Steigerung von Produktivität und Qualität, wie zum Beispiel ein Manufacturing Execution System oder eine Koordinatenmessmaschine, hoch, aber auch sinnvoll. Solche Investitionen können sicherstellen, dass das Unternehmen eine große Menge an Daten in der Produktion sammelt und speichert, die auch mit Partnern in der Lieferkette ausgetauscht werden können, um Synergien zu schaffen. Der Einfluss dieses Faktors ist in Tabelle 4-24 dargestellt.

Tabelle 4-24: Einfluss steigender Kritikalität auf Kosten und Nutzen des unternehmensübergreifenden Datenaustausches

Table 4-24: The influence of increasing criticality on the costs and benefits of cross-company data exchange

Oberkategorie	Kategorie	Aspekt	Änderung durch steigenden Faktor
Nutzen	Quantitativ	Zeiteinsparungen	▲
	Quantitativ/ Qualitativ	Reduzierte Verluste	▲
	Quantitativ/ Qualitativ	Kundenzufriedenheit	▲
Kosten	Implementierung/Betrieb der Datenaustauschplattform	Ausbildungskosten	▲
	IT-Abteilung	Gewährleistung der Resilienz	▲
	Simulation	Modellierung der Prozesse	▲
	Simulation	Investitionen in das Personal	▲
	Zeitbedingte Kosten	Datenanalyse	▲

4.6.4 Erzielte Ergebnisse / Achieved Results

Das sechste Teilziel, die **Bewertung des Mehrwerts** der datenbasierten Prozessführung, wurde erfolgreich erreicht. Durch die Analyse der Ergebnisse wurde die hohe Übereinstimmung der simulativen und reellen Versuche festgestellt, was die Nutzung der Modelle für eine adaptive Prozessführung ermöglicht. Die identifizierten Kosten- und Nutzenaspekte verdeutlichen die möglichen Investitionen und Vorteile des unternehmensübergreifenden Datenaustausches und die definierten Einflussfaktoren ermöglichen es den Unternehmen, den wirtschaftliche Mehrwert zu erhöhen.

verhindern. Die Verschlüsselung bietet eine zusätzliche Sicherheitsebene und gewährleistet, dass selbst bei einem erfolgreichen Angriff auf die Übertragung die Daten nicht in lesbarer Form abgefangen werden können. Wenn ein IT-Dienstleister dazwischengeschaltet ist, werden Daten auf diese Weise vom Missbrauch seitens des IT-Dienstleisters oder im Falle eines erfolgreichen Angriffs auf den IT-Dienstleister geschützt.

Darüber hinaus kann die Zwei-Faktor-Authentifizierung für den Zugriff auf Daten implementiert. Dies erhöht die Sicherheit erheblich, da sie sicherstellt, dass selbst bei Kompromittierung von Zugangsdaten ein zusätzliches Element für den Zugriff auf die Daten erforderlich ist.

Ein kontinuierliches Monitoring und Auditing der Plattform-Infrastruktur und des Datenverkehrs sind ebenfalls entscheidend, um verdächtige Aktivitäten zu erkennen, zu melden und darauf zu reagieren.

5.1.2 Standardisierungshandlungsempfehlungen (AP3) / Standardisation recommendations

Die Empfehlungen für die Standardisierung werden in drei Handlungsfeldern Datenaufnahme, -speicherung und -übermittlung vorgestellt. Diese Empfehlungen können sowohl von Unternehmen eigenständig umgesetzt, als auch zur Entwicklung konkreter branchenübergreifenden Standards genutzt werden.

5.1.2.1 Datenaufnahme

Im Allgemeinen wird eine Veränderung der grundsätzlichen **Sichtweise auf Daten** innerhalb der Industrie empfohlen. Anstatt sich auf traditionelle Text-Dokumente zu beschränken, sollten Daten als wertvolles Asset wahrgenommen werden. Unternehmen sollen Daten nicht nur für Informationszwecke nutzen, sondern als einen Input für datenbasierte Analysen, Entscheidungsfindung und Automatisierung. Relevante Daten sollen maschinenlesbar sein und die richtigen Stellen (z. B. IT-Systeme oder Maschinen) weitergeleitet werden.

Weiterhin soll geprüft werden, was der aktuelle Stand des Maschinenparks und der IT-Systeme ist, um passende Technologien zur **standardisierten Datenerfassung** zu identifizieren. Wie vorher identifiziert, existieren mehrere Möglichkeiten, Daten z. B. aus Maschinen und Anlagen oder IT-Systemen **automatisiert zu erfassen**. Durch eine automatisierte Datenerfassung können relevante Daten im Vergleich zur manuellen Erfassung schneller und fehlerarmer erhoben werden.

Um die Konnektivität zu Anlagen zu standardisieren, sollten die Anlagen **gemeinsame Kommunikationsprotokolle** und damit den gleichen "Konnektor" zwischen Maschinen- und Sensorebene und der virtuellen Welt verwenden. Die Anlagen sollten dann ein gemeinsames Vokabular verwenden, um die Informationen auf einheitliche Weise zu verstehen und dann auszutauschen. Die in den Standards beschriebenen Informationsmodelle müssen übernommen werden, um den Kontext, in dem die Begriffe in den Vokabularen verwendet werden, zu verdeutlichen. Für die semantische Interoperabilität wird die Asset Administration Shell (AAS) empfohlen. Bei der Anbindung von Maschinen und Anlagen soll ein Template definiert werden, das sowohl ein Standardvorgehen als auch ein für das Unternehmen passende

Kommunikationsstandard umfasst. Somit wird die Anbindung der Maschinen und Anlagen vereinfacht.

Für die strukturierte und fehlerarme manuelle Datenaufnahme sollen **passende IT-Systeme** (z. B. ERP, MES) und **Geräte** (z. B. Scanner, Tablets) eingesetzt werden, die Mitarbeitende unterstützen und die Qualität der Daten sofort bei der Eingabe überprüfen (z. B. Format oder Plausibilität).

Unternehmen sollen sowohl für sich intern als auch gemeinsam mit ihren Partnern **relevante Datenkategorien, -punkte und -formate definieren**, die tatsächlich erhoben werden sollen. Es ist nicht zielführend, alle möglichen Daten zu erfassen. Große Mengen von Daten aus verschiedensten Quellen diverser Prozesse erhöht die Komplexität und reduziert daher die Wahrscheinlichkeit der tatsächlichen Nutzung der Daten.

Durch die Umsetzung dieser Empfehlungen können Unternehmen eine Datenbasis von hoher Qualität aufbauen, die in folgenden Schritten sowohl intern als auch extern (z. B. durch Partner) effektiv genutzt werden kann.

5.1.2.2 Datenspeicherung

Um eine standardisierte Datenspeicherung sowie einfachere Erreichbarkeit der Daten im Unternehmen zu gewährleisten, ist es entscheidend, eine klare **Definition führender IT-Systeme und ihrer Funktionen** vorzunehmen. Es sollte festgelegt werden, welche IT-Systeme in welchen Bereichen eingesetzt werden und welche spezifischen Aufgaben sie erfüllen sollen. Darüber hinaus ist es wichtig, festzulegen, welches IT-System für die Datenerfassung verwendet wird und in welchem System die Daten gespeichert werden sollen. Dies ermöglicht eine einheitliche Struktur und eine nahtlose Integration von Daten entlang der gesamten Geschäfts-, Entwicklungs- und Produktionsprozesse. Durch die klare Definition der IT-Systeme und ihrer Funktionen können produzierende Unternehmen effizientere Datenübertragungsprozesse, vor allem intern zwischen eignen Abteilungen etablieren, was als eine wichtige Grundlage für den unternehmensübergreifenden Austausch bildet.

Durch die Definition führender IT-Systeme für Datenspeicherung wird auch das Konzept von **Single Source of Truth** etabliert. Das bedeutet, dass im Unternehmen klar definiert sein sollte, an welchem Ort sich die aktuellen und verlässlichen Daten befinden. Dies kann beispielsweise auch durch die Implementierung einer zentralen Datenbank oder eines Datenmanagementsystems erreicht werden. Dieser eine Speicherort soll einerseits als Senke für alle relevanten Daten dienen und diese langfristig aufbewahren. Andererseits gilt dieser Speicherort dann als Datenquelle für alle anderen an den Daten interessierten Parteien. Indem alle Parteien auf diese Datensammlung zugreifen, wird sichergestellt, dass jeder stets auf dem neuesten Stand der Informationen ist und veraltete oder inkonsistente Daten gemieden werden.

Des Weiteren ist es notwendig, **klare Systemgrenzen zu definieren**, die den Speicherort und die Verarbeitung von Daten festlegen. Es sollte festgelegt werden, welche Daten zentral gespeichert werden und welche zunächst am Endknoten transformiert und aggregiert werden sollen. Zentrale Systeme dienen als verlässlicher Ort für grundlegende allgemeine Daten (z. B. Informationen zur Auftragserfüllung oder einem Produkt), während am Endknoten spezifische Daten verarbeitet werden (z. B.

Maschinenparameter oder Simulationsdaten). Durch diese Festlegung wird sichergestellt, dass relevante Daten an den geeigneten Stellen erfasst, gespeichert und verarbeitet werden. Die zentralen Systeme bieten eine einheitliche Datenbasis und erleichtern die Standardisierung, Konsistenz und Integration. Gleichzeitig ermöglichen die Endknoten die Anpassung an individuelle Prozesse und lokale Anforderungen.

Komplementär zu der Definition der Systemgrenzen soll festgelegt werden, **wo und wie Daten aggregiert und transformiert werden**, um aussagekräftige Informationen zu generieren (s. Abbildung 5-2). Anstatt sich auf Rohdaten zu konzentrieren, sollten die Transformationsprozesse darauf abzielen, relevante Informationen aus den Daten zu extrahieren. Dies kann durch Filterung, Zusammenfassung, Berechnungen oder andere Datenverarbeitungstechniken erfolgen.

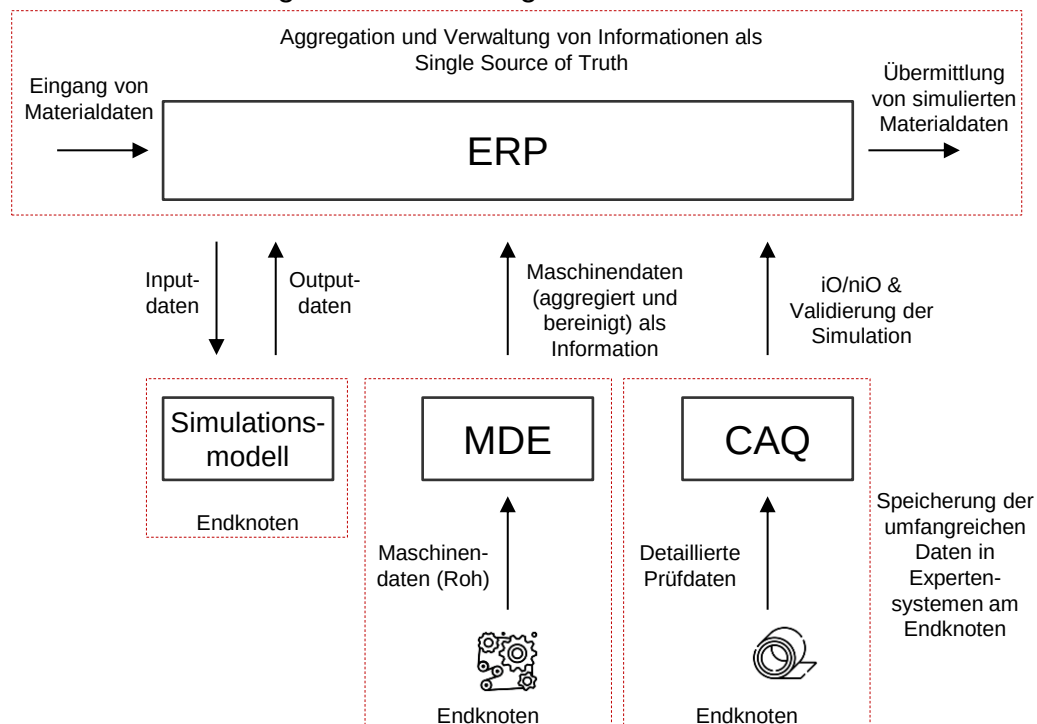


Abbildung 5-2: Beispiel der IT-Architektur und Systemgrenzen im Forschungsprojekt

Figure 5-2: Beispiel der IT-Architektur und Systemgrenzen im Forschungsprojekt

5.1.2.3 Datenübertragung

Um den Datenaustausch in der Stahlindustrie optimal zu gestalten, ist es wichtig, zunächst **geeignete Anwendungsfälle im Unternehmen zu definieren**, bei denen der Austausch von Materialdaten einen klaren Mehrwert bieten kann. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde besonders der Anwendungsfall des Materialdatenaustauschs detailliert betrachtet. Dabei stellte sich heraus, dass dieser Anwendungsfall hohe Anforderungen an die Simulationsfähigkeiten beider beteiligter Unternehmen (Datenbereitsteller und -nutzer) stellt. Bei der Definition der Anwendungsfälle sollen daher nicht nur die Fähigkeiten des eigenen Unternehmens betrachtet werden (z. B. welche Daten erhoben und geteilt werden können), sondern auch, ob diese Daten dem Partnerunternehmen einen Mehrwert bieten können (z. B., ob das Partnerunternehmen diese Daten überhaupt bei eigenen Prozessen einsetzen

kann). Darauf aufbauend soll eine vertragliche Regelung ausgearbeitet werden, damit beide Parteien die Vorteile des Datenaustausches bekommen können.

Im Unternehmen sollen darüber hinaus **klare Verantwortlichkeiten für den Datenaustausch festgelegt** werden, um die Qualität der übermittelten Daten zu überwachen und einen erfolgreichen Austausch sicherzustellen. Diese Verantwortlichen haben auch die Aufgabe, gemeinsam mit dem Partnerunternehmen geeignete Formate und Umfänge festzulegen, beispielsweise die Anzahl oder Position der erforderlichen Messdatenpunkte. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde erkannt, dass diese Definition stark von den Fähigkeiten der eingesetzten Technologien abhängt, in unserem Fall der verwendeten Simulationsmodelle, und daher nur begrenzt standardisierbar ist. Es ist wichtig, dass die Verantwortlichen eng mit den technischen Experten zusammenarbeiten, um die bestmögliche Balance zwischen Datenqualität und technischer Machbarkeit zu finden und so einen effizienten Datenaustausch zu gewährleisten.

Die **Übertragung der vereinbarten Daten soll automatisiert** erfolgen, denn so wird Effizienz bei großen Datenmengen erreicht. Statt einer Einzelaktion wird die Datenübermittlung zu einer regelmäßigen Aktivität, die kontinuierlich und effizient durchgeführt wird. Durch die Implementierung automatisierter Prozesse werden manuelle Eingriffe minimiert, was die Fehleranfälligkeit reduziert, und die Geschwindigkeit und Konsistenz der Datenübermittlung verbessert. Die Aufnahme, Transformation und Übermittlung von Materialdaten werden in einem nahtlosen Ablauf automatisiert, wodurch Ressourcen und Zeit eingespart werden. Dies fördert nicht nur eine reibungslose Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Unternehmen, sondern ermöglicht auch eine bessere Entscheidungsfindung auf der Grundlage aktueller und präziser Daten. Eine gut geplante Automatisierung der Datenübermittlung stellt somit einen bedeutenden Schritt hin zu einer effektiven und effizienten Standardisierung des Datenaustauschs in der Stahlindustrie dar.

Die Analyse der Anforderungen der Unternehmen in der Stahlindustrie im Vergleich zu den vorhandenen technologischen Fähigkeiten hat gezeigt, dass bereits gut einsatzfähige Lösungen existieren. Insbesondere empfiehlt sich die Nutzung von **International Data Spaces (IDS)** als vielversprechender Ansatz. IDS ermöglicht einen effizienten und sicheren unternehmensübergreifenden Datenaustausch, wobei hohe Standards für Datensicherheit und -kontrolle gewährleistet sind. Diese Technologie bietet außerdem die Möglichkeit, Dienstleistungsanbieter sicher einzubinden, die die bereitgestellten Daten analysieren und nutzen können, um wertvolle Erkenntnisse zu gewinnen und sie wiederum weiterzugeben.

5.1.3 Empfehlungen zur Prozessmodellierung und Verwendung von DoE zur Prozessoptimierung - (AP5) / Recommendations for process modelling and implementation of DoE for process optimization

Im Projekt konnte erfolgreich gezeigt werden, dass schnelle Modelle in Kombination mit Modellen zur Vorhersage von Produkteigenschaften genutzt werden können, um genaue Kenntnis über den Zustand jedes einzelnen Produkts zu erlangen. Da diese Modelle aufgrund der sehr kurzen Rechenzeiten echtzeitfähig sind, bieten sie zukünftig

eine vielversprechende Methode für Industrieunternehmen, detailliertere Produktinformationen bereits vor dem Fertigungsprozess zur Verfügung zu haben und diese in der Prozessauslegung zu berücksichtigen. Alternativ können die großen Datensätze, die Industrieunternehmen in den vergangenen Jahren und Jahrzehnten erfasst haben, genutzt werden, um datenbasierte Modelle zu entwickeln und zu trainieren, die den gleichen Zweck erfüllen. In diesem Projekt wurden nur skalare Kaltbadeigenschaften ausgetauscht. Deswegen verwendet das Tiefzieh-FE-Modell eine skalierbare Referenzfließkurve, welche als Reaktion auf Schwankungen in den gemessenen Eingangsfließkurven adaptiert werden kann. Dadurch kann die Genauigkeit der Simulationsergebnisse weiter verbessert werden. Sofern diese Methodik nicht bereits Einklang in der Modellierung innerhalb der Industrieunternehmen findet, bietet sie eine Möglichkeit zur Verbesserung der Qualität der jeweiligen Simulationsergebnisse.

Es konnte ebenfalls gezeigt werden, dass das Design of Experiments eine vielversprechende Methode bietet, um bei bekannten Materialeigenschaften optimierte Prozessparameter zur Steigerung der Produktqualität auszulegen oder Ausschuss durch die Überführung von Material außerhalb der Spezifikation in ein Gutteil zu vermeiden. Beides führt zu einer Steigerung der Effizienz und bietet Industrieunternehmen somit Möglichkeiten zur Steigerung der eigenen Wirtschaftlichkeit.

5.1.4 Maximierung des Nutzens - (AP6) / Maximising the benefits

Neben der Auswahl einer passenden Technologie sollen geeignete Anwendungsfälle zwischen den Partnern einer Lieferkette ausgearbeitet werden. Es soll sichergestellt werden, dass beiden Unternehmen der Mehrwert des Datenaustausches klar sind und die notwendigen Kompetenzen auf beiden Seiten verfügbar sind (z. B. Simulationsmodelle und das entsprechende Know-How). Somit wird sichergestellt, dass die Kosten bzw. Aufwände nicht nur auf einer Seite entstehen und dass Daten tatsächlich genutzt werden, was eine zentrale Anforderung zur Entstehung des unternehmensübergreifenden Nutzens darstellt. Im Dialog zwischen dem Unternehmen können auch konkrete prozessspezifischen Daten definiert werden, die mit geringem Aufwand erhoben und übermittelt werden können, die aber einen erheblichen Nutzen für den Datennutzer ermöglichen.

Um den potenziellen Mehrwert des unternehmensübergreifenden Datenaustauschs zu maximieren, müssen die Einflussfaktoren sorgfältig berücksichtigt werden. Hier sind Handlungsempfehlungen, um diesen Einflussfaktoren gerecht zu werden und den Mehrwert zu steigern

Marktmacht

Unternehmen sollten Kooperationen und Partnerschaften mit anderen Marktteilnehmern eingehen, um ihre Marktmacht zu bündeln und somit eine stärkere Verhandlungsposition zu erlangen. Durch die Kooperation können gemeinsame Interessen gegenüber größeren und marktstärkeren Unternehmen besser vertreten. In einem weiteren Schritt können die Verbände branchenübergreifende Standards

definieren, um kleinere Unternehmen zu unterstützen und die Menge und Komplexität der eingesetzten Technologien und Datenaustauschansätze zu minimieren.

Transaktionsquantität

Die Kosten bzw. Aufwände können minimiert werden, wenn der Datenaustausch kontinuierlich stattfindet. Durch eine intensive Zusammenarbeit mit Partnern wird, die die Anzahl der Transaktionen erhöht. Durch eine effiziente und transparente Kommunikation können mehr Transaktionen ermöglicht werden, was zu Kosteneinsparungen und einem höheren Nutzen für alle beteiligten Parteien führt.

Reifegrad der Digitalisierung

Unternehmen sollten ihre Digitalisierung kontinuierlich vorantreiben, um große technologische Schulden zu vermeiden. Durch die Digitalisierung internen Prozesse und Aufbau einer industriellen Datenbasis wird eine Grundlage für weitere Aktivitäten, unter anderem auch für den unternehmensübergreifenden Datenaustausch gelegt. Die Synergien in den Digitalisierungsprojekten können genutzt werden, um mit einer Investition unterschiedliche Mehrwerte zu erreichen.

Simulationsexpertise

Für den konkreten Fall der adaptiven Prozessführung ist das Simulations-Know-How unerlässlich. Unternehmen sollten in die Schulung und Weiterentwicklung ihrer Mitarbeitenden investieren, um die Simulationsexpertise zu verbessern. Eine fundierte Simulationsexpertise ermöglicht es Unternehmen, Simulationen effektiv zu nutzen und die gewonnenen Erkenntnisse in den Datenaustausch zu integrieren. Simulationsmodelle können auch von Partner in der Lieferkette gemeinsam entwickelt werden, um die Aufwände zu reduzieren. Somit können auch die notwendigen Daten und Simulationsoutputs bzw. -inputs definiert werden.

Produktkomplexität und **Produktkritikalität** lassen sich nicht einfach und schnell beeinflussen. Jedoch können die Erkenntnisse des Projekts bei der Entwicklung einer Produktstrategie unterstützen oder bei der Entscheidung helfen, ob eine adaptive Prozessführung sich tendenziell lohnen würde.

6 Zusammenfassung / Summary

Die Prozessketten der Metallumformung bestehen in der Regel aus mehreren Unternehmen, wobei jedes Unternehmen das Halbzeug zur Erreichung der gewünschten geometrischen und mechanischen Eigenschaften verarbeitet, bis das Endprodukt hergestellt ist. Aufgrund des hohen Zeit- und Kostenaufwands der experimentellen Bestimmung von Produkteigenschaften werden Produkte nur stichprobenartig kontrolliert. Daher ist der genaue Zustand jedes einzelnen Produkts einer Charge und damit auch die Schwankungen der Produkteigenschaften innerhalb der Spezifikationen unbekannt. Somit können Zulieferer ihren Kunden nicht immer alle produktbezogenen Informationen weiterleiten. Die fehlende Kenntnis des genauen Zustands einer größeren Anzahl von Produkten führt zu Ausschuss in den nachfolgenden Verarbeitungsprozessen, da diese in der Regel mit einer Standardprozessführung durchgeführt werden und eine Reaktion auf Schwankungen oder gar Abweichungen der Eigenschaften des Eingangsmaterials nicht möglich ist. Auch die gezielte Einstellung von definierten Endprodukteigenschaften anstelle eines Streubands durch adaptive Prozessparameteranpassungen als Reaktion auf die genauen Eigenschaften des Eingangsmaterials ist nicht möglich. Daher müssen sich Kunden auf die stichprobenartigen Messungen des Zulieferers sowie der eigenen Wareneingangskontrolle verlassen, was dazu führt, dass Kunden Toleranzen für ihre Lieferanten festlegen, die enger gefasst sind als eigentlich nötig. Dies kann zu erhöhten Kosten sowie Ausschuss auf Seiten des Zulieferers führen und somit die Wirtschaftlichkeit der Prozesskette senken. Um diese Problematik zu adressieren, bestand das Ziel dieses Projekts darin, eine modellbasierte Vorhersage von Produkteigenschaften und eine gesicherte und standardisierte Weitergabe dieser zwischen Unternehmen zu ermöglichen, sodass die Eigenschaften jedes einzelnen Produkts bekannt sind. Diese Kenntnis soll wiederum dafür genutzt werden, in der Prozesskette nachfolgende Prozesse modellbasiert so zu adaptieren, dass das Streuband der resultierenden Produkteigenschaften verkleinert wird und sogar Ausschuss vermieden werden kann, indem unzulässiges Material außerhalb der Spezifikation in ein Gutteil überführt werden kann. Um die gesicherte und standardisierte Weitergabe von Daten entlang der Prozesskette zu ermöglichen, bestand ein weiteres Teilziel darin, eine übergeordnete, unternehmensübergreifende Datenplattform zu konzeptionieren.

Zur Realisierung der Projektziele wurden zwei unterschiedliche Stränge verfolgt: Die Erhöhung der Datenverfügbarkeit sowie die Untersuchung des Einflusses der Prozessparameter und der Eingangseigenschaften auf die resultierenden Produkteigenschaften (s. Abbildung 6-1).

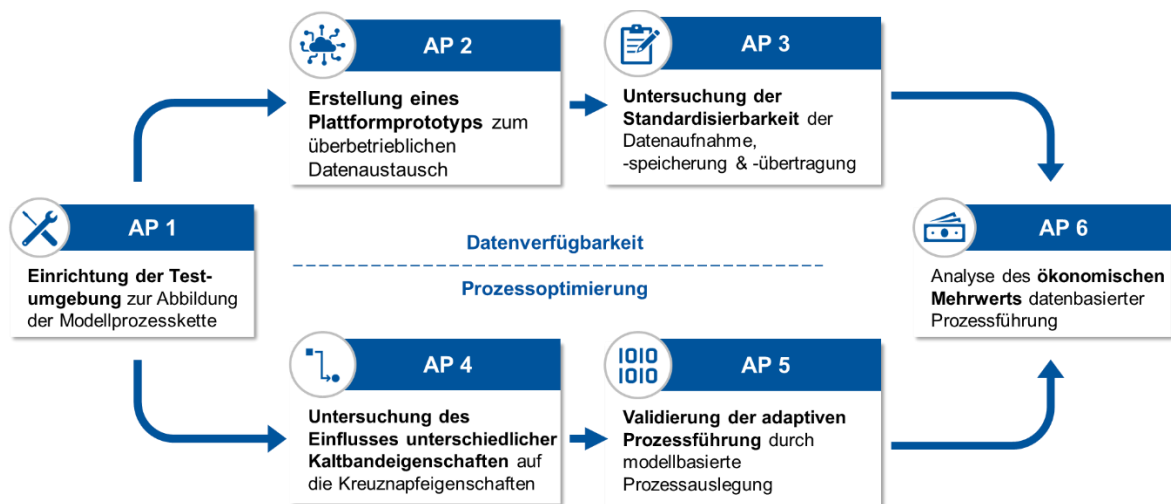


Abbildung 6-1: Konsolidiertes Vorgehen des Forschungsprojekts

Figure 6-1: Consolidated Approach of the Research Project

Zunächst wurde die **Testumgebung** für die Demonstratorprozesskette, bestehend aus zwei virtuellen Unternehmen, eingerichtet. Das erste Unternehmen fungiert als Zulieferer und beschäftigt sich mit dem Kaltwalzen, während das zweite Unternehmen als Kunde agiert und sich mit dem Tiefziehen befasst. Für die Einrichtung der Testumgebung wurden die am IBF verfügbaren Hardwarekomponenten (Maschinen, Werkzeuge, Workstations, Messsysteme etc.) sowie Softwarekomponenten (Simulationsumgebungen) verwendet.

Zur Validierung des Konzepts der datenbasierten adaptiven Prozessführung wurde zunächst eine **Datengrundlage** geschaffen. Dazu wurden kommerzielle Kaltbänder mit gleicher Spezifikation von drei unterschiedlichen Stahlherstellern beschafft und hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften im Zugversuch charakterisiert. Durch einen Vergleich der Messergebnisse wurden die Eigenschaftsschwankungen des Eingangsmaterials trotz gleicher Spezifikation ermittelt. Anschließend wurden die Kaltbänder unter Verwendung einer Standardprozessführung tiefgezogen und die Blechdickenverteilung sowie die maximale Ausdünnung der erzeugten Kreuznäpfe bestimmt. Die Messergebnisse wurden mit den Eigenschaftsschwankungen des Eingangsmaterials korreliert und zur Ermittlung des Streubands der Kreuznapfeigenschaften verwendet. Dieses wurde als Pseudo-Kreuznapfspezifikation verwendet, innerhalb welcher die Eigenschaften aller im Projekt erzeugten Kreuznäpfe liegen sollten, um als Gutteil bewertet zu werden.

Zur modellbasierten Berechnung der Produkteigenschaften wurde als nächstes die **Demonstratorprozesskette simulativ nachgebildet**. Für die Modellierung des Kaltwalzprozesses wurde ein schnelles analytisches Walzmodell für das Kaltwalzen mittels FE-Simulationen kalibriert. Für die Modellierung des Tiefziehprozesses wurde ein FE-Tiefziehmodell verwendet. Zur Vorhersage der Produkteigenschaften nach dem Kaltwalzen wurde ein Modell durch experimentelle Messungen kalibriert, das die resultierende Streckgrenze und Zugfestigkeit in Abhängigkeit des Umformgrads und der Vickers Härte beschreibt. Dieses wurde in das schnelle analytische Walzmodell integriert. Die Produkteigenschaften des Kreuznapfs können durch eine Ausgabe der Blechdickenverteilung direkt aus dem FE-Modell erhalten werden. Zusätzlich wurde

das entwickelte Tiefziehmodell mit Ansätzen des Design of Experiments (DoE) gekoppelt, um eine adaptive Prozessauslegung / -optimierung zu gewährleisten.

Zur **Validierung** der **Projekthypothese** und der **Projektvision** der datenbasierten adaptiven Prozessführung wurden drei Arten von Tiefziehversuchen durchgeführt. Der erste Versuchstyp wurde mit Kaltband innerhalb des Kaltbandstreubands durchgeführt, um die Einrichtung der Testumgebung sowie die Datenerfassung, Datenspeicherung und Datenübertragung und den Ansatz der modellbasierten Berechnung der Produkteigenschaften zu validieren. Der zweite Versuchstyp wurde mit allen drei kommerziellen Kaltbändern innerhalb des Streubands durchgeführt. Durch eine optimierte Auswahl der Tiefziehprozessparameter mithilfe der Ergebnisse des DoE als Reaktion auf die genauen Eingangseigenschaften des Kaltbands wurde gezeigt, dass das Eigenschaftsstreuband der erzeugten Kreuznäpfe erfolgreich verkleinert werden konnte. Der dritte Versuchstyp wurde mit Kaltband außerhalb der Spezifikation durchgeführt. Durch die DoE basierte Auslegung neuer Tiefziehprozessparameter wurde gezeigt, dass auch Kaltbänder außerhalb der Spezifikation so verarbeitet werden können, dass wieder Kreuznäpfe innerhalb der Spezifikation erzeugt werden, die bei Verwendung der Standardprozessführung zu Ausschuss geführt hätten.

Zur Realisierung der adaptiven Prozessführung werden detaillierte Daten zum Produkt seitens des Lieferanten benötigt. Zum Austausch dieser Daten wurde ein Konzept und ein Prototyp einer Datenplattform entwickelt. Die **Anforderungserhebung** erfolgte durch Interviews mit produzierenden Unternehmen und IT-Unternehmen. Sicherheitsaspekte, insbesondere die Datenkontrolle und -sicherheit gegenüber Dritten, standen hierbei im Vordergrund. Zudem wurde festgehalten, dass Unternehmen vorzugsweise maschinenlesbare Daten austauschen möchten. Die Skalierbarkeit der Plattform und ein möglichst geringer Implementierungs- sowie Verwaltungsaufwand sind ebenfalls von hoher Bedeutung.

Die Auswahl der Basistechnologie erfolgte durch die Bewertung unterschiedlicher Technologien anhand der erhobenen Anforderungen. Die **IDS-Technologie** erwies sich als optimale Wahl, da sie nicht nur technische Standards vorgibt, sondern auch das gesamte Konzept des überbetrieblichen Datenaustauschs beschreibt. Zusätzlich erfüllt sie Sicherheitsanforderungen und unterstützt das Konzept der Datenplattform.

Um die Effizienz des Datenaustausches zu erhöhen, wurde die Standardisierbarkeit des Datenaustausches untersucht. Standardisierung ist entscheidend, um Interoperabilität, Kompatibilität, Konformität, Qualität, Sicherheit, Effizienz, Produktivität, Innovation, Kosteneffizienz und die Verringerung von Handelsbarrieren zu fördern. Die Notwendigkeit der Standardisierung ist angesichts der zunehmenden Komplexität der Lieferketten und der Generierung einer steigenden Menge von Daten sehr hoch.

Zur Einordnung und Strukturierung von Standardisierungsaktivitäten wurde ein Framework entwickelt. Im Projekt wurde identifiziert, dass es bereits gut etablierte Standards auf technischer Ebene (z. B. für Sensoren und Komponenten) gibt, aber offizielle Standards für die unternehmensinterne Datenintegration und den unternehmensübergreifenden Datenaustausch fehlen. Nach dem Vergleich des aktuellen Standes der Standardisierung in der Industrie mit den verfügbaren Standards und Normen wurden Empfehlungen für die Verbesserung der Standardisierung in der

Industrie entwickelt, um eine schnellere Anpassung, insbesondere durch KMU, zu ermöglichen. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse des Projekts in Standardisierungsberichten veröffentlicht, um zukünftige Forschungs- oder Industrieprojekte zu unterstützen und von den Erkenntnissen zu profitieren.

Die gesammelten Erkenntnisse wurden im letzten Arbeitspaket zusammengeführt, um den tatsächlichen Mehrwert des Datenaustausches zu untersuchen. Dafür wurden zunächst die Ergebnisse der Simulationen und Experimente analysiert, die zur Validierung der Projekthypothesen und Projektvision durchgeführt wurden. Die Analyse der Simulationsergebnisse hat den Mehrwert des Ansatzes der modellbasierten Berechnung von Produkteigenschaften zur Durchführung einer datenbasierten Prozessführung und zu Erhöhung der Wirtschaftlichkeit durch die Reduzierung von Ausschuss und die Optimierung der Produktqualität aufgezeigt.

Weiterhin wurde untersucht, wie Unternehmen den Mehrwert des Datenaustausches erhöhen können. Dafür wurden zunächst alle Aspekte identifiziert, die alle möglichen Kosten und Nutzen umfassen. Anschließend wurden sieben Einflussfaktoren identifiziert, die in strategische, technische und produktbezogene Dimensionen eingeteilt sind und die möglichen Kosten und Nutzen maßgeblich beeinflussen. Durch die Berücksichtigung dieser Einflussfaktoren können Unternehmen gezielt die entstehenden Kosten in Bezug auf den Datenaustausch reduzieren und den gewonnenen Nutzen erhöhen.

7 Ausblick / Perspective

Das Forschungsprojekt hat wichtige neue Erkenntnisse bezüglich des unternehmensübergreifenden Datenaustauschs zur adaptiven Prozessführung in Lieferketten aufgedeckt. Jedoch gibt es weiterhin Bereiche, in denen zusätzliche Forschung von entscheidender Bedeutung ist, um die Implementierung und Optimierung von datengesteuerten Lösungen in Lieferketten zu verbessern. Im Folgenden werden einige Schlüsselbereiche für zukünftige Forschung identifiziert:

Weiterentwicklung der IDS-Technologie

Angesichts der Anforderungen seitens der Industrie eignet sich die Technologie am besten für den Datenaustausch. Sie ist jedoch relativ neu und bedarf einer weiteren Untersuchung in Bezug auf die Anwendbarkeit und tatsächliche Umsetzung in der Industrie. Die zukünftigen Projekte sollen diese Technologie einbeziehen und schrittweise weiterentwickeln.

Integration von Künstlicher Intelligenz (KI) und Predictive Analytics

Im Forschungsprojekt wurden Modelle verwendet, die dem Stand der Technik entsprechen. Die Integration von Künstlicher Intelligenz in Form von Machine Learning und Predictive Analytics in die Berechnung geeigneter Prozessparameter kann Unternehmen dabei unterstützen, datengetriebene Entscheidungen in Echtzeit schneller und mit geringerem Aufwand zu treffen. Im Projekt wurde das Design der Prozessparameter mittels der im Stand der Technik etablierten DoE-Methodik implementiert. Diese Methode liefert jedoch keine Echtzeit-Ergebnisse und lernt nicht aus ihren vorherigen Iterationen. Hier könnten die datenbasierten KI Methoden wie Reinforcement Learning für die Auslegung der Prozessparameter verwendet werden. Reinforcement Learning ist in der Lage, Echtzeit-Ergebnisse zu liefern und eröffnet somit die Möglichkeit der Echtzeit-Prozessadaption [123,124]. Das Konzept der unternehmensübergreifenden Datenplattform sieht vor, dass Drittanbieter mit erhöhter Simulationskompetenz deren Leistungen auf der Plattform anbieten können und anhand der Materialdaten Aussagen hinsichtlich optimaler Prozessparameter im nachfolgenden Schritt liefern können. Zukünftige Forschung sollte sich daher auf die Entwicklung von fortschrittlichen Algorithmen und Modellen konzentrieren, um den Nutzen des Datenaustauschs zu erhöhen und den Zugang zu dem optimierten Prozessparameter auch für Unternehmen ohne eigenes Simulations-Know-How zu ermöglichen.

Langfristige Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit

Es ist von entscheidender Bedeutung, zu verstehen, wie der unternehmensübergreifende Datenaustausch die Nachhaltigkeit der Lieferketten beeinflusst. Forschung sollte neben dem konkreten wirtschaftlichen Mehrwert für die Unternehmen auch die langfristigen ökologischen und sozialen Auswirkungen des

Datenaustauschs bewerten und Möglichkeiten zur Verbesserung der Nachhaltigkeit identifizieren.

Robuste Geschäftsmodelle für den Datenaustausch

Im Forschungsprojekt wurde lediglich ein Beispiel anhand einer Modellprozesskette untersucht, die am Ende der gesamten industriellen Prozesskette angesiedelt ist. Dabei haben der PA und externe Experten Bedenken geäußert, dass der Datenaustausch in diesem Beispiel nicht den größtmöglichen Mehrwert bietet, da die Einflussmöglichkeiten am Ende der Prozesskette vergleichsweise gering sind. Es ist daher wichtig, Geschäftsmodelle entlang der gesamten Prozesskette zu entwickeln, um den Nutzen des Datenaustausches anhand konkreter Anwendungsfälle sowie der vertrieblichen Kooperation der beteiligten Unternehmen zu definieren. Zukünftige Forschung sollte Geschäftsstrategien und -modelle untersuchen, die einen nachhaltigen und rentablen Datenaustausch in den gesamten Lieferketten unterstützen.

8 Zusammenstellung aller Veröffentlichungen / List of publications related to the project

Bereits veröffentlichte Dokumente:

- [Fjo21] Fjodorovs, N.; Marek, S.: E2E-Parameter: Überbetrieblicher Datenaustausch schafft Flexibilität und Transparenz in der Stahlindustrie. In: Unternehmen der Zukunft, Ausgabe 3, 2021, S. 70-73.
- [Fjo22] Fjodorovs, N.; Janßen, J.; Schröer, T.; Stich V.; Thakare, N.; Lohmar, J.; Hirt G.: Überbetrieblicher Datenaustausch als Voraussetzung für adaptive Produktion. In: Konferenzband Aachener Stahlkolloquium, 2022, S. 293-302.

Vorgesehene Veröffentlichungen:

- Veröffentlichung: Identification of Factors Influencing Cost And Benefit Aspects Of Cross-Company Data Exchange Using The Example Of The Steel Industry. Auf der International Conference on Transport and Logistics (Oktober 2023)
- Veröffentlichung der drei Standardisierungsberichte (voraussichtlich Dezember 2023)

9 Literaturverzeichnis / Bibliography

References

- [1] Salzgitter Flachstahl. Datenblatt S355 JR.
- [2] Thyssenkrupp Hohenlimburg GmbH. Produktinformation S355JR.
- [3] Hirt G. Introduction to Metal Forming.
- [4] Kopp R., W.H., 1999. Einführung in die Umformtechnik.
- [5] O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, J.Z. Zhu, 2013. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals 7.
- [6] Cheng, A.H.-D., Cheng, D.T., 2005. Heritage and early history of the boundary element method. *Engineering Analysis with Boundary Elements* 29 (3), 268–302.
- [7] Gustafson, K., 1998. Domain decomposition, operator trigonometry, Robin condition, in: Mandel, J., Farhat, C., Cai, X.-C. (Eds.), *Domain Decomposition Methods* 10, vol. 218. American Mathematical Society, Providence, Rhode Island, pp. 432–437.
- [8] Philip M. Morse and Herman Feshbach, 1955. *Methods of theoretical physics*. Morse1955MethodsOT.
- [9] Padmanabhan, R., Oliveira, M.C., Alves, J.L., Menezes, L.F., 2007. Influence of process parameters on the deep drawing of stainless steel. *Finite Elements in Analysis and Design* 43 (14), 1062–1067.
- [10] Atul S, T., Babu, M.C.L., 2019. A review on effect of thinning, wrinkling and spring-back on deep drawing process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 233 (4), 1011–1036.
- [11] Anjami, N., Basti, A., 2011. A Comparison between Isothermal and Coupled Thermo-Mechanical FE Analyses of the Ring Rolling Process. *AMR* 264-265, 235–240.
- [12] Behrens, B.-A., Bouguecha, A., Hadifi, T., Hirt, G., Franzke, M., Santaella, M.L., 2011. FEM-Simulation des Werkzeugversagens bei Warmmassivumformprozessen infolge thermisch-mechanischer Materialermüdung. *Schmiede-Journal*, 42–46.
- [13] Bambach, M., Hirt, G., Ames, J., 2005. Quantitative Validation of FEM Simulations for Incremental Sheet Forming Using Optical Deformation Measurement. *AMR* 6, 509–516.
- [14] S. Seuren, M. Philipp, M. Bambach, G. Hirt, 2009. Determination of a Geometric Factor for the Calculation of Roll Force in Plate Rolling by means of Finite Element Simulations.
- [15] Kopp, R., Karhausen, K., Schneiders, R., 1993. Application of FEM to Prediction of Microstructure in Hot Forming of Metals, in: *Proceedings of the Fourth International Conference on Technology of Plasticity*. ICTP 1993, Beijing, China. 05. - 09. September. International Academic Publishers, Beijing, China, pp. 1203–1211.

- [16] The European Steel Association (n.d.). European Steel in Figures 2022.
- [17] Lenard, J.G., 2014. Primer on Flat Rolling, Second Edition ed. Elsevier, Oxford, 408 pp.
- [18] S. Seuren, M. Bambach, G. Hirt, J. Willkomm, C. Bischof, M. Bucker, 2013. Analyse von Sensitivitäten bei der Modellierung des Grobblechwalzens.
- [19] Johannes Lohmar, Markus Bambach, Gerhard Hirt, Thomas Kiefer, Daniel Kotliba, 2013. INVERSE MODELING TECHNIQUES FOR THE PRECISE PREDICTION OF ROLLING FORCES AND TORQUES IN HEAVY PLATE ROLLING.
- [20] MISIRLI, M., AYDAY, A., 2022. A New Process Optimization Of Deep Drawing Part For Sheet Metal Forming In Automotive Industry. Politeknik Dergisi 25 (2), 879–885.
- [21] Dieter, G.E., 1988. Mechanical Metallurgy. McGraw Hill, London, 766 pp.
- [22] Ikumapayi, O.M., Afolalu, S.A., Kayode, J.F., Kazeem, R.A., Akande, S., 2022. A concise overview of deep drawing in the metal forming operation. Materials Today: Proceedings 62 (4), 3233–3238.
- [23] Kopeliovich D., 2013. Deep drawing.
http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=deep_drawing.
- [24] Liewald M., 2017. Deep Drawing, in: Produ, T.I.A.f., Laperrière, L., Reinhart, G. (Eds.), CIRP Encyclopedia of Production Engineering. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 1–6.
- [25] Deng Z. Entwicklung einer Prozesssimulationsmethodik für die gasbasierte Warmblechumformung mittels eines Benchmark-Tests. Masterarbeit.
- [26] Yann Jansen, Roland Logé, Marc. Milesi, Stephan. Manov, 2012. Using Cross Stamping to Test Zinc Sheets Formability. Key Engineering Materials 504-506, 65–70.
- [27] Ramazani, A., Abbasi, M., Prah, U., Bleck, W., 2012. Failure analysis of DP600 steel during the cross-die test. Computational Materials Science 64 (2/3), 101–105.
- [28] F. Yates, 1964. Sir Ronald Fisher and the Design of Experiments. Biometrics.
- [29] Fisher, R., 1935. The Design Of Experiments. Oliver And Boyd, London.
- [30] Durakovic, B., 2017. Design of experiments application, concepts, examples: State of the art. PEN 5 (3).
- [31] DOUGLAS C. MONTGOMERY, 2013. Design and analysis of experiments, Eighth edition ed. John Wiley & Sons Inc, Hoboken, NJ, 758 pp.
- [32] Box, George E.P., Hunter, J. Stuart, & Hunter, William G., 1978. Statistics for Experimenters: An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building.
- [33] Ait-Amir, B., Pougnet, P., El Hami, A., 2015. Meta-Model Development, in: , Embedded Mechatronic Systems 2. Elsevier, pp. 151–179.
- [34] Viana, F.A.C., 2016. A Tutorial on Latin Hypercube Design of Experiments. Qual. Reliab. Engng. Int. 32 (5), 1975–1985.

- [35] OPC Foundation, 2018. OPC Unified Architecture: Interoperabilität für Industrie 4.0 und das Internet der Dinge.
- [36] MTConnect, 2023. MTConnect standardizes factory device data. <https://www.mtconnect.org/>. Accessed 15 August 2023.
- [37] Nastase, L., 2017. Security in the Internet of Things: A Survey on Application Layer Protocols, in: 2017 21st International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS). 2017 21st International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS), Bucharest, Romania. 29.05.2017 - 31.05.2017. IEEE, pp. 659–666.
- [38] Dai, R., Kerber, E., Reuter, F., Stumm, S., Brell-Cokcan, S., 2020. The digitization of the automated steel construction through the application of microcontrollers and MQTT. *Constr Robot* 4 (3-4), 251–259.
- [39] Pigan, R., Metter, M., 2008. Automating with PROFINET: Industrial communication based on industrial Ethernet, 2nd rev. and expanded ed. ed. Publicis Pub, Erlangen, 462 pp.
- [40] Yang, M., Li, G., 2014. Analysis of PROFINET IO Communication Protocol, in: 2014 Fourth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control. 2014 Fourth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), Harbin. 18.09.2014 - 20.09.2014. IEEE, pp. 945–949.
- [41] Bedenbender, H., Bock, J., Boss, B., Diedrich, C., Garrels, K., Graf Gatterburg, A., Heidrich, K., Hillermeier, O., Rauscher, B., Sauer, M., Schmidt, J., Werner, T., Zimmermann, P., 2019. Verwaltungsschale in der Praxis: Wie definiere ich Teilmodelle, beispielhafte Teilmodelle und Interaktion zwischen Verwaltungsschalen (Version 1.0).
- [42] Plattform Industrie 4.0. Verwaltungsschale im Detail: von der Idee zum implementierbaren Konzept.
- [43] Gusmeroli, S., Dalle Carbonare, D., 2020. Big Data challenges in Smart Manufacturing Industry.
- [44] Finger, J., 2012. Erfolgreiche ERP-Projekte: Ein Rezeptbuch für Manager. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 140 pp.
- [45] Kletti, J., 2015. MES - Manufacturing Execution System: Moderne Informationstechnologie unterstützt die Wertschöpfung. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 298 pp.
- [46] iba AG, 2023. iba-System. <https://www.iba-ag.com/de/iba-system>. Accessed 10 July 2023.
- [47] Brüggemann, H., Bremer, P., 2020. Grundlagen Qualitätsmanagement: Von den Werkzeugen über Methoden zum TQM. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 309 pp.
- [48] Ćwikła, G., 2013. Methods of Manufacturing Data Acquisition for Production Management - A Review. *AMR* 837, 618–623.
- [49] Beyer, M.A., Laney, D., 2012. The Importance of “Big Data” A Definition. Gartner.

- [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkozje\)\)/reference/referencespapers.aspx?referenceid=1644565](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkozje))/reference/referencespapers.aspx?referenceid=1644565). Accessed 25 July 2023.
- [50] Gosewehr, F., Wermann, J., Borsych, W., Colombo, A., 2017. Specification and Design of an Industrial Manufacturing Middleware.
- [51] IBM, 2023. What is Middleware? <https://www.ibm.com/topics/middleware>. Accessed 10 July 2023.
- [52] Solace, 2023. What are Event Brokers? <https://docs.solace.com/Get-Started/what-are-event-brokers.htm>. Accessed 10 July 2023.
- [53] Bellemare, A., 2020. Building Event-Driven Microservices.
- [54] Boyes, H., Hallaq, B., Cunningham, J., Watson, T., 2018. The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework. *Computers in Industry* 101, 1–12.
- [55] Schuh, G., Stich, V., Basse, F., Franzkoch, B., Harzenetter, F., Luckert, M., Prote, J., Reschke, J., Schmitz, S., Tücks, G., Weißkopf, J., 2017. Change Request im Produktionsbetrieb, in: Brecher, C., Klocke, F., Schmitt, R., Schuh, G. (Eds.), *Internet of Production für agile Unternehmen*. AWK Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium 2017, 18. bis 19. Mai, 1. Auflage ed. Apprimus Verlag, Aachen, pp. 109–131.
- [56] Seagate Technology, 2020. Rethink Data: Put More of Your Business Data to Work- From Edge to Cloud.
- [57] Forschungsbeirat Industrie 4.0, 2022. Aufbau, Nutzung und Monetarisierung einer industriellen Datenbasis.
- [58] Quick, A., Lettau, U., 2022. Messdaten umfassend und ganzheitlich nutzen – ein Ansatz zur Wertschöpfungssteigerung durch Digitalisierung. 36. Aachener Stahlkolloquium Umformtechnik, 303–312.
- [59] Klaeger, T., Gottschall, S., Oehm, L., 2021. Data Science on Industrial Data—Today’s Challenges in Brown Field Applications. *Challenges* 12 (1), 2.
- [60] Debicki, T., 2020. Influence Of API Interfaces On Data Exchange And Information Sharing In The Transport And Logistic Sector. 20th international scientific conference Business Logistics in Modern Management, 361–374.
- [61] Huttunen, H., Seppälä, T., Lähteenmäki, I., Mattila, J., 2019. What Are the Benefits of Data Sharing? Uniting Supply Chain and Platform Economy Perspectives.
- [62] Costa, B., Pires, P., 2014. Evaluating a Representational State Transfer (REST) Architecture.
- [63] Feng, X., Shen, J., Fan, Y., 2009. REST: An Alternative to RPC for Web Services Architecture. 2009 First International Conference on Future Information Networks.
- [64] World Wide Web Consortium, 2008. Extensible Markup Language (XML) 1.0 (Fifth Edition). <https://www.w3.org/TR/2008/REC-xml-20081126/>. Accessed 12 July 2023.
- [65] Pezoa, F., Reutter, J., Suarez, F., Ugarte, M., Vrgoc, D., 2016. Foundations of JSON Schema, 263–273.

- [66] Ben-Kiki, O., Evans, C., döt Net, I., 2021. YAML Ain't Markup Language (YAML™) version 1.2.2. <https://yaml.org/spec/1.2.2/>. Accessed 12 July 2023.
- [67] Red Hat, 2023. What is YAML? <https://www.redhat.com/en/topics/automation/what-is-yaml>. Accessed 12 July 2023.
- [68] BMWK, 2023. Warum brauchen wir GAIA-X? Was ist der Mehrwert? BMWI. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/FAQ/Dateninfrastruktur/faq-projekt-gaia-x-02.html>. Accessed 12 July 2023.
- [69] Dietz, M., Khan, H., Rab, I., 2020. How do companies create value from digital ecosystems?
- [70] Tingelhoff, F., Elshan, E., Ebel, P., 2022. Designfaktoren zur Wertmaximierung von B2B Datenaustausch in datengetriebenen Plattform Ökosystemen. HMD (5), 1323–1339.
- [71] Simpson, T.W., Maier, J.R., Mistree, F., 2001. Product platform design: method and application. Res Eng Design (1), 2–22.
- [72] BDI, 2020. Deutsche digitale B2B-Plattformen: Auf Deutschlands industrieller Stärke aufbauen. Ein Ökosystem für B2B-Plattformen fördern.
- [73] BMWI, 2021. Digitale Ökosysteme in der Industrie – Typologie, Beispiele und zukünftige Entwicklung.
- [74] Catena-X, 2023. Vision & Goals. <https://catena-x.net/en/vision-goals>. Accessed 12 July 2023.
- [75] Bahija, J., Malika, E., Mostapha, A., 2016. Electronic Data Interchange In The Automotive Industry in Morocco: Toward The Optimizazion Of Logistics Information Flows. European Scientific Journal, ESJ 12 (3), 186.
- [76] Vrobová, P., Cempírek, V., Bartuska, L., Stopková, M., 2018. arious Electronic Data Interchange (EDI) Usage Options and Possible Substi-tution. Naše more 65 (4), 187–191.
- [77] Schuh, G., Stich, V., 2013. Logistikmanagement: Handbuch Produktion und Management 6. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [78] Gleißner, H., Femerling, C., 2013. Logistics. Basics - exercises - case studies: Springer Texts in Business and Economics. Springer, Cham, Heidelberg.
- [79] Bujak, A., Gurak, M., Jagodziński, J., 2018. Electronic data interchange (EDI) compliant with EDIFACT as compared to other communication standards in telematics. Archives of Transport System Telematics 11 (4), 10–17.
- [80] Andonov, V., Kisimov, V., Stoyanova, T., Sterev, N., 2020. Data Transfer Protocols For Business Social Networking, in: 13th IADIS International Conference Information Systems. IADIS, Sofia, Bulgaria.
- [81] Shazad, S., 2012. What is EDI and How does it work? Hochschule Furtwangen University.
- [82] Klapita, V., 2021. Implementation of Electronic Data Interchange as a Method of Communication Between Customers and Transport Company. Transportation Research Procedia 53, 174–179.

- [83] Puica, E., 2020. Cloud Computing in Supply Chain Management and Economic, Environmental and Social Impact Analysis. *Informatica Economica* 24 (4), 41–54.
- [84] Giannakis, M., Spanaki, K., Dubey, R., 2019. A cloud-based supply chain management system: effects on supply chain re-sponsiveness. *Journal of Enterprise Information Management* 32 (4), 585–607.
- [85] Bruque-Cámara, S., Moyano-Fuentes, J., Maqueira-Marín, J.M., 2016. Supply chain integration through community cloud: Effects on operational performance. *Journal of Purchasing and Supply Management* 22 (2), 141–153.
- [86] Malik, M.I., Wani, S.H., Rashid, A., 2018. Cloud Computing-Technologies. *International Journal of Advanced Research in Computer Science* 9 (2), 379–384.
- [87] Puthal, D., Sahoo, B., Mishra, S., Swain, S., 2015. Cloud Computing Features, Issues, and Challenges: A Big Picture, in: , *International Conference on Computational Intelligence and Networks*. IEEE, pp. 116–123.
- [88] Tiwari, A., Jain, M., 2015. Analysis Of Supply chain management in Cloud Computing. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering* 3 (5), 152–155.
- [89] Goyal, S., 2014. Public vs Private vs Hybrid vs Community - Cloud Computing: A Critical Review. *International Journal of Computer Network and Information Security* 6 (3), 20–29.
- [90] Rieken, R., 2015. Datensicherheit als Herausforderung im Cloud-Computing-Trend, in: C. Linnhoff-Popien, M. Zaddach, A. Grahl (Eds.), *Marktplätze im Umbruch. Digitale Strategien für Services im Mobilen Internet*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 751–759.
- [91] Dutta, P., Choi, T.-M., Somani, S., Butala, R., 2020. Blockchain technology in supply chain operations: Applications, challenges and research opportunities. *Transportation research. Part E, Logistics and transportation review*.
- [92] Wan, P.K., Huang, L., Holtskog, H., 2020. Blockchain-Enabled Information Sharing Within a Supply Chain: A Systematic Literature Review. *IEEE Access* 8, 49645–49656.
- [93] Rejeb, A., Keogh, J.G., Simske, S.J., Stafford, T., Treiblmaier, H., 2021. Potentials of blockchain technologies for supply chain collaboration: a conceptual framework. *The International Journal of Logistics Management* 32 (3), 973–994.
- [94] Sheth, H., Dattani, J., 2019. Overview of Blockchain Technology. *Asian Journal For Convergence in Technology* 5 (1), 1–3.
- [95] Morkunas, V.J., Paschen, J., Boon, E., 2019. How blockchain technologies impact your business model. *Business Horizons* 62 (3), 295–306.
- [96] Li, D., Wong, W.E., Guo, J., 2020. A Survey on Blockchain for Enterprise Using Hyperledger Fabric and Composer, in: , *2019 6th International Conference on Dependable Systems and Their Applications (DSA)*. IEEE, pp. 71–80.
- [97] Guissani, G., 2022. The IDS approach for cross-sectorial sovereign data sharing as enabler for extended supply chains: a dive-in into the automotive domain. *Politecnico Di Milano, Milan, Italy*.

- [98] Pettenpohl, H., Spiekermann, M., Both, J.R., 2022. International Data Spaces in a Nutshell, in: Boris Otto, Michael ten Hompel, Stefan Wrobel (Eds.), *Designing Data Spaces*. Springer International Publishing, Cham, pp. 29–40.
- [99] Pauer, A., Nagel, L., Fedkenhauser, T., Fritzsche-Sterr, Y., Resetko, A., 2018. Data exchange as a first step towards data economy. PricewaterhouseCoopers, Düsseldorf.
- [100] Nagel, L., Lycklama, D., 2021. Design Principles for Data Spaces: Position Paper. International Data Spaces Association, Berlin.
- [101] Rückert, A., Frank, A., Gimpel, H., Starke, J., Heinzer, J., Trautmann, L., Stöter, M., Nüske, N., 2021. Ökonomische sowie ökologische Potenziale des unternehmensübergreifenden Datenaustauschs: Wie eine Umsetzung für Unternehmen sicher und erfolgreich gestaltet werden kann. Mai ILQ 2020 Trust 2 Value (1).
- [102] Gelhaar, J., Müller, P., Bergmann, N., Dogan, R., 2023. Motives and Incentives for Data Sharing in Industrial Data Ecosystems: An Explorative Single Case Study. *Proceedings of the 56th Hawaii International Conference on System Sciences*, 2023, 3705–3714.
- [103] Cheng, J., Westman, J., 2020. Effects of Digitalization in Steel Industry: Economic Impacts & Investment Model. Master-Thesis, Schweden.
- [104] King, J.L., Schrems, E.L., 1978. Cost-Benefit Analysis in Information Systems Development and Operation. *Computing Surveya Vol 10*. (No. 1), 19–34.
- [105] Zipfel, A., Herdeg, D., Theumer, P., 2021. Method for quantifying the value of information for production control in cross-company value-adding networks. *Procedia Manufacturing* 54, 1–6.
- [106] Stindt P., 2018. Ermittlung des Grenzziehverhältnisses von hoch Mangan Stählen im Kreuznapfversuch und Beschreibung des Versagens mit der FE-Simulation: Bachelorarbeit.
- [107] Wagner, C., Mueller, M., 2017. Walzautomat. User's Manual, Aachen, Germany, 45 pp.
- [108] Zhou Meng, 2023. Analyse der experimentellen und simulativen Ergebnisse zur Quantifizierung von Mehrwerten und Aufwänden des unternehmensübergreifenden Datenaustausches: Masterarbeit.
- [109] Letmathe, P., 2002. Flexible Standardisierung: Ein dezentrales Produktionsmanagement- Konzept für kleine und mittlere Unternehmen.
- [110] Shin, D.-H., Kim, H., Hwang, J., 2015. Standardization revisited: A critical literature review on standards and innovation. *Computer Standards & Interfaces*, 152–157.
- [111] Zhao, K., Xia, M.U., 2014. Forming Interoperability Through Interorganizational Systems Standards. *Journal of Management Information Systems*, 269–298.
- [112] Deutsches Institut für Normung e.V., 2023. Kosteneinsparungen: Dem Wettbewerb voraus. <https://www.din.de/de/ueber-normen-und-standards/nutzen-fuer-die-wirtschaft/kosteneinsparungen>. Accessed 12 July 2023.

- [113] Ahlemann, F., Dittes, S., Fillbrunn, T., Rehring, K., Reining, S., Urbach, N., 2022. Managing In-Company IT Standardization: A Design Theory. *Information Systems Frontiers*, 1161–1178.
- [114] Oeyen, C., 2023. Europäische Normen: ein Erfolgsfaktor für den EU-Binnenmarkt. <https://www.dke.de/de/normen-standards/normung-politik/europaeische-normen-erfolgsfaktor-eu-binnenmarkt>. Accessed 12 July 2023.
- [115] Perera, H., Nagarur, N., Tabucanon, M., 1999. Component part standardization: A way to reduce the life-cycle costs of products. *Int. J. Production Economics*, 109–116.
- [116] Linnartz, M., Leckel, A., 2020. Data Sharing im Supply-Chain-Management: Ein Assistenzsystem für die Bewertung und Gestaltung der Offenheit und des Vertrauensniveaus zwischen Supply-Chain-Partnern. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 563–566.
- [117] Project 44, 2023. Wir haben mit Hunderten von Supply-Chain-Experten gesprochen. <https://www.project44.de/blog/wir-haben-mit-hundert-von-supply-chain-experten-%C3%BCber-ihre-gr%C3%B6%C3%9Ften-herausforderungen-gesprochen-hier-erfahren-sie-was-sie-uns-gesagt-haben>. Accessed 12 July 2023.
- [118] Bretzke, W.-R., 2020. *Logistische Netzwerke*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 534 pp.
- [119] Stackelberg, H. von, 1934. *Marktform und Gleichgewicht*. J. Springer.
- [120] Schuh, G., Anderl, R., Dumitrescu, R., Krüger, A., Hompel, M. ten, 2020. *Industrie 4.0 Maturity Index: Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten*. UPDATE 2020. acatech Studie, München.
- [121] Kirchner, E., 2020. *Werkzeuge und Methoden der Produktentwicklung*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [122] Knieps, F., Köhl, M., Merklein, M., 2022. Drawing Capability of High Formable Packaging Steel: Comparison of Limiting Drawing Ratio and Forming Limit Curve. *Key Engineering Materials* 926, 933–938.
- [123] Idzik, C., Krämer, A., Hirt, G., Lohmar, J., 2023. Coupling of an analytical rolling model and reinforcement learning to design pass schedules: towards properties controlled hot rolling. *J Intell Manuf* 7 (3), 1103.
- [124] IDZIK Christian, GERLACH Jannik, BAILLY David, HIRT Gerhard (Ed.), 2023. Advanced automatic pass schedule design for hot rolling by coupling reinforcement learning with a fast rolling model. *Materials Research Forum LLC*.