

Integration von smarten Handwerkzeugen und digitalen Assistenzsystemen

**Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg**
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation (Monografie)

von
Simon Piontek

aus
Traben-Trarbach

2026

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödning
Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schüppstuhl

Tag der mündlichen Prüfung: 22.01.2026

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit entwickelt ein Konzept zur Integration von Smarten Handwerkzeugen und Digitalen Assistenzsystemen, um die Produktivität und Qualität bei der manuellen Montage komplexer, variantenreicher Produkte zu verbessern. Am Beispiel des Flugzeugbaus wird gezeigt, wie die entwickelten Lösungen den hohen Informationsaufwand und die Fehlerpotenziale papierbasierter Unterlagen und konventioneller Werkzeuge reduzieren können.

Aus einer Analyse der Praxis werden Prozessanforderungen abgeleitet, die Einflussfaktoren der Montageprozesse untersucht und die Potenziale sowie die Akzeptanz digitaler Assistenztechnologien bewertet. Darauf aufbauend wird ein vierstufiges Integrationsvorgehen konzipiert, das Smarte Handwerkzeuge und Digitale Assistenzsysteme in einer Softwareplattform zusammenführt.

Das *Digitale Assistenzsystem der Montage* unterstützt die Werker durch kontextgerechte Informationen zum Produkt, zu Arbeitsschritten und Werkzeugoperationen. Es visualisiert diese am CAD-Modell und zeigt aktuelle Prozessparameter an. Das *Smarte Handwerkzeug* kann verschiedene Werkzeugaufsätze nutzen und passt seine Prozessparameter je nach Kontext dynamisch an. Es sperrt oder gibt Werkzeugoperationen frei und dokumentiert diese anschließend luftfahrtsgerecht.

Die integrierte Nutzung erfolgt über zwei Betriebsmodi: Der *applikationsgesteuerte Modus* gibt die Werkzeugoperationen anhand des CAD-Modells vor; der *positionsgesteuerte Modus* erkennt die beabsichtigte Operation anhand der sensorisch erfassten Werkzeugposition. Die Softwareplattform verbindet die Teilsysteme und verarbeitet ihre Datenpakete über entwickelte Softwareservices. So werden Prozessfehler durch den Soll-Ist-Abgleich der Prozessparameter verhindert und Rückmeldedaten des Werkzeugs analysiert und dokumentiert.

Für die Erstellung der Inhalte unterstützt das *Digitale Assistenzsystem der Arbeitsvorbereitung* durch die teilautomatisierte Generierung von Arbeitsschritten auf Basis von ERP- und CAD-Daten. Die erstellten Inhalte werden über eine digitale Prozesskette nahtlos an die Teilsysteme übertragen.

Die Evaluation der prototypischen Entwicklung zeigt in einer Laborstudie eine gesteigerte Produktivität und Qualität gegenüber konventionellen Werkzeugen und papierbasierten Unterlagen. Außerdem belegt sie eine verringerte kognitive Belastung und eine hohe Gebrauchstauglichkeit. Beide Betriebsmodi erzielen ähnliche Effekte, wobei der applikationsgesteuerte Modus mit geringerem Vorbereitungsaufwand besonders flexibel genutzt werden kann. Demonstrationen und Befragungen verdeutlichen eine hohe Akzeptanz im Flugzeugbau und ein Transferpotenzial für weitere Branchen.

Wissen schafft Innovation

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding

Prof. Dr.-Ing. Jan Hendrik Dege

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Hintze

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Christian Nedeß

Anschrift:

Technische Universität Hamburg

Institut für Produktionsmanagement und -technik

Denickestraße 17

21073 Hamburg

Band 60:

Simon Piontek

Integration von smarten Handwerkzeugen und digitalen Assistenzsystemen

1. Auflage

Hamburg 2026

ISSN 1613-8244

DOI: <https://doi.org/10.15480/882.16738>

Copyright Simon Piontek 2026

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement und -technik der Technischen Universität Hamburg.

Mein besonderer Dank gilt dem Leiter des Instituts und Erstgutachter meiner Arbeit, Professor Hermann Lödding, für seine engagierte Betreuung, das entgegengebrachte Vertrauen sowie die vielen richtungsweisenden Anregungen und fachlichen Diskussionen, die meine Arbeit wesentlich geprägt haben. Besonders schätze ich seine Begeisterung für das Thema, die immer wieder neue Impulse gegeben hat. Ebenso danke ich Professor Thorsten Schüppstuhl für das Zweitgutachten und sein Interesse an meiner Arbeit sowie Professor Friedrich Wirz für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Dankbar bin ich auch meinen Kolleginnen und Kollegen am Institut, die ich während meiner Zeit dort kennenlernen durfte. Die Zusammenarbeit mit so vielen unterschiedlichen Menschen hat mir wertvolle Kontakte und neue Perspektiven eröffnet. Besonders bereichernd waren die zahlreichen Reisen im Rahmen meiner Forschung, die nicht nur beruflich interessant waren, sondern auch Gelegenheit boten, Freundschaften zu schließen. Ein herzlicher Dank gilt Silas Pöttker für die gemeinsame Zeit im Büro, in der wir nicht nur viel Freude hatten, sondern uns auch stets gegenseitig unterstützt haben – sowohl beruflich als auch privat. Ebenso danke ich Constantin Steffens für die innige Freundschaft, die vielen sportlichen Unternehmungen, motivierenden Impulse und seinen akribischen Input zur finalen Ausarbeitung.

Mein Dank gilt meinen Studierenden, die mich während dieser Zeit begleitet haben. Besonders hervorheben möchte ich Silvana Schmiel für ihre wertvolle Unterstützung bei der umfangreichen Evaluation und ihre langjährige Mitarbeit als Hilfswissenschaftlerin.

Meiner Familie danke ich von Herzen, die immer an mich glaubt und mich darin unterstützt, meine persönlichen Ziele und Wünsche zu verfolgen. Besonders danke ich meiner Mutter Elisabeth Piontek sowie meinen Brüdern David Piontek, Jonas Piontek und Sebastian Ball für ihr Vertrauen, ihren Rückhalt und den Stolz, den ich durchgängig erfahren darf. Meinem Vater Michael Piontek danke ich, der diesen Schritt leider nicht miterleben konnte, mich jedoch schon früh vielseitig geprägt und nachhaltig beeinflusst hat.

Mein größter Dank gilt meiner Freundin Mandy Jahrmatter, die mich während der anspruchsvollsten Phasen der Promotionszeit begleitet und mir durch ihre beständige Unterstützung, ihren emotionalen Rückhalt und ihre Stabilität stets Kraft geschenkt hat.

Hamburg im Februar 2026

Simon Piontek

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XI
Abkürzungsverzeichnis	XII
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung	2
1.2 Methodik und Aufbau der Forschungsarbeit	3
2 Stand der Technik und Wissenschaft	5
2.1 Produktionsmanagement	5
2.1.1 Zielgrößen	5
2.1.2 Teilbereiche	7
2.2 Faktor Mensch im Arbeitssystem	9
2.2.1 Manuelle Arbeitsprozesse	10
2.2.2 Menschzentrierte Entwicklung	12
2.3 Digitale Assistenzsysteme	14
2.3.1 Definition und Einordnung	14
2.3.2 Inhaltserzeugung und Kontextverwendung	15
2.3.3 Werkerassistenzsysteme	18
2.4 Smarte Handwerkzeuge	21
2.4.1 Grundlegende Funktionen	21
2.4.2 Integration von Inhalten und Produktionskontexten	22
2.4.3 Smarte und handgeführte Bohr- und Schraubsysteme	23
2.5 Softwareplattformen	25
2.5.1 Datenmodellierung und -übertragung	26
2.5.2 Plattformarchitekturen im Internet der Dinge	27
2.6 Anforderungen an die Gesamtentwicklung	28
3 Prozessanalyse	30
3.1 Manuelle Arbeits- und Informationsprozesse	30
3.1.1 Arbeitsvorbereitung im Flugzeugbau	30
3.1.2 Manuelle Montage im Flugzeugbau	35
3.1.3 Prozessdefizite	37
3.2 Analyse der Zielgrößen	39
3.2.1 Produktivitätsanalyse	39
3.2.2 Qualitätsanalyse	41
3.3 Anforderungen der Prozessanalyse	44

4	Nutzeranalyse	46
4.1	Einflussfaktoren auf den Menschen im Flugzeugbau	46
4.1.1	Modellierung von Einflussfaktoren	46
4.1.2	Relevanzbewertung der Einflussfaktoren	47
4.2	Analyse digitaler Assistenztechnologien	51
4.2.1	Technologiebewertung	51
4.2.2	Fundierung der Technologieentscheidung	54
4.3	Anforderungen der Nutzeranalyse	56
5	Integration Smarter Handwerkzeuge und Digitaler Assistenzsysteme	58
5.1	Zielbild der Entwicklung	58
5.2	Integrationsvorgehen und Systemarchitektur	61
5.2.1	Integrationsstufen und -anforderungen	61
5.2.2	Systemarchitektur	68
5.3	Entwicklung der Teilsysteme	70
5.3.1	Smartes Handwerkzeug	70
5.3.2	Digitales Assistenzsystem für die Arbeitsvorbereitung	76
5.3.3	Digitales Assistenzsystem für die Montage	84
5.4	Integration der Teilsysteme in der Softwareplattform	90
5.4.1	Datenorientierte Integration	90
5.4.2	Modellorientierte Integration	93
5.4.3	Funktionsorientierte Integration	97
5.4.4	Analyseorientierte Integration	104
5.5	Digitalisierter Montageprozess	106
5.5.1	Positionsgesteuerter Modus	106
5.5.2	Applikationsgesteuerter Modus	107
6	Evaluation	109
6.1	Laboruntersuchung	109
6.1.1	Hypothesen und Zielsetzung	109
6.1.2	Versuchskonzept	112
6.1.3	Ergebnisauswertung	116
6.2	Industrieuntersuchung	122
6.2.1	Akzeptanz und Nutzen im Flugzeugbau	122
6.2.2	Akzeptanz und Nutzen in anderen Branchen	123
6.3	Bewertung der Zielerfüllung	127
7	Schlussbetrachtung	130
7.1	Zusammenfassung	130
7.2	Ausblick für Industrie und Forschung	131
	Literaturverzeichnis	134
	Anhang	141

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1	Aufbau der Arbeit nach dem DSR-Ansatz i.A.a. [Hevn10, S. 16]	4
Abbildung 2.1	Modell der Arbeitsproduktivität (Ausschnitt) i.A.a. [Glö20, S. 53ff.] . .	6
Abbildung 2.2	Schematischer Aufbau eines Montageprozesses	10
Abbildung 2.3	Wandel der Montagekomplexitätsstrategien i.A.a. [Born20, S. 14]	11
Abbildung 2.4	Leistungsbereitschaft und Fehleranzahl i.A.a. [Bjer55, S. 107]	12
Abbildung 2.5	Menschzentrierte Entwicklung (abg. nach [Weid15, S. 16])	13
Abbildung 2.6	Assistenz der Informationsverarbeitung (abg. nach [Born20, S. 69]) . .	14
Abbildung 2.7	Inhaltserzeugung und Kontextverwendung in Assistenzsystemen	16
Abbildung 2.8	Zusammenhänge im Kontext der manuellen Produktion	17
Abbildung 2.9	Überblick zu digitalen Werkerassistenzsystemen	18
Abbildung 2.10	Inhalts- und Kontextintegration in Smarten Handwerkzeugen	22
Abbildung 2.11	Überblick zu smarten, handgeführten Bohr- und Schraubsystemen	24
Abbildung 2.12	Netzwerkprotokolle im Schichtmodell (abg. nach [Firo20, S. 111]) . .	26
Abbildung 2.13	Funktionsebenen einer Softwareplattform i.A.a. [Firo20, S. 175]	27
Abbildung 3.1	Informationsquellen und -senken in der Sektionsmontage	31
Abbildung 3.2	Ausschnitt einer Montagehilfe	34
Abbildung 3.3	Standardprozess in der Flugzeugmontage	36
Abbildung 3.4	Mitarbeiterzustände in der manuellen Flugzeugmontage	40
Abbildung 3.5	Tätigkeitsanteile mit Fokus auf das Handhaben	41
Abbildung 3.6	Fehlerkategorien mit Fokus auf die Bohrungsfehler	42
Abbildung 4.1	Einflussfaktoren auf Werker (i.A.a. [Pion23, S. 3])	47
Abbildung 4.2	Bewertung der Zielgrößenwirkung der Einflussfaktoren	48
Abbildung 4.3	Technologieakzeptanz der Assistenztechnologien (i.A.a. [Pion23, S. 5])	53
Abbildung 4.4	Wirkungs-Akzeptanz-Matrix der Assistenztechnologien [Pion23, S. 5]	55
Abbildung 5.1	Konventionelle und durchgängig digitalisierte Prozesskette	59
Abbildung 5.2	Ausgangszustand der Softwareplattform	62
Abbildung 5.3	Softwareplattform nach der datenorientierten Integration	63
Abbildung 5.4	Softwareplattform nach der modellorientierten Integration	64
Abbildung 5.5	Softwareplattform nach der funktionsorientierten Integration	66
Abbildung 5.6	Softwareplattform nach der analyseorientierten Integration	67
Abbildung 5.7	Systemarchitektur als Überblick über das Konzept	68
Abbildung 5.8	Komponenten des Smarten Handwerkzeugs (i.A.a. [Pion24, S. 430]) . .	71
Abbildung 5.9	Bildschirmzustände am Smarten Handwerkzeug	72
Abbildung 5.10	Positionserkennung der Werkzeugspitze	72
Abbildung 5.11	Rückmeldedaten für Bohreingriffe (a) und Schraubeingriffe (b)	74

Abbildung 5.12	Werkzeugschnittstelle zur Softwareplattform	75
Abbildung 5.13	Digitales Assistenzsystem für die Arbeitsvorbereitung	76
Abbildung 5.14	Erzeugung der Arbeitsschritte	78
Abbildung 5.15	Erzeugung und Zuordnung der Werkzeugprogramme	79
Abbildung 5.16	Erzeugtes und zugewiesenes Werkzeugprogramm im Assistenzsystem	80
Abbildung 5.17	Bohr- und Schraubaufsätze im Assistenzsystem	81
Abbildung 5.18	Zuordnung von Werkzeugprogrammen zum CAD-Modell	82
Abbildung 5.19	Fortschrittsbalken im Assistenzsystem (Ausschnitt)	83
Abbildung 5.20	Digitales Assistenzsystem für die Montage i.A.a. [Pion24, S. 432] . . .	84
Abbildung 5.21	Arbeitsplan im Digitalen Assistenzsystem der Montage	85
Abbildung 5.22	Darstellungsoptionen der Werkzeugoperationen im Assistenzsystem .	87
Abbildung 5.23	Struktur und Umsetzung des Werkzeugbereichs im Assistenzsystem . .	88
Abbildung 5.24	Werkzeugzustände im Montageassistenzsystem i.A.a. [Pion24, S. 432]	89
Abbildung 5.25	Fehlerbehebung im Montageassistenzsystem	90
Abbildung 5.26	Datenmodelle Smartes Handwerkzeug und Smarter Werkzeugaufsatz .	94
Abbildung 5.27	Datenmodell Werkzeugprogramm und -operation	95
Abbildung 5.28	Datenmodell Rückmeldedaten	96
Abbildung 5.29	Verarbeitung der Positionsdaten im positionsgesteuerten Modus	98
Abbildung 5.30	Wahl der Werkzeugoperation im applikationsgesteuerten Modus	99
Abbildung 5.31	Service: Parametereinstellung und Werkzeugfreigabe	100
Abbildung 5.32	Service: Rückmeldedatenanalyse und -dokumentation	102
Abbildung 5.33	Service: Fehlererzeugung und Werkzeugblockade	104
Abbildung 5.34	Digitalisierter Montageprozess im positionsgesteuerten Modus	106
Abbildung 5.35	Freigegebenes Werkzeug im positionsgesteuerten Modus	107
Abbildung 5.36	Digitalisierter Montageprozess im applikationsgesteuerten Modus . . .	107
Abbildung 5.37	Freigegebenes Werkzeug im applikationsgesteuerten Modus	108
Abbildung 6.1	Versuchssystem für die Laboruntersuchung	112
Abbildung 6.2	Bohr- und Schraubvorrichtung	115
Abbildung 6.3	Ergebnisse der Produktivitätsuntersuchung (n = 20)	117
Abbildung 6.4	Ergebnisse der Qualitätsuntersuchung (n = 19; 940 Operationen) . . .	118
Abbildung 6.5	Ergebnisse zu Gebrauchstauglichkeit und kognitiver Belastung (n = 20)	121
Abbildung 6.6	Akzeptanz und Nutzen im Flugzeugbau (n = 6)	123
Abbildung 6.7	Akzeptanz und Nutzen im Handwerk (n = 14)	124
Abbildung 6.8	Akzeptanz und Nutzen in der Medizintechnikmontage (n = 3)	126

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1	Zeitaufwände der Arbeitsvorbereitung	33
Tabelle 3.2	Fehlerursachen in der manuellen Flugzeugmontage	43
Tabelle 4.1	Bewertungsschema für die Unterstützungsbewertung der Einflussfaktoren	49
Tabelle 4.2	Relevanzbewertung der Einflussfaktoren im Flugzeubau [Pion23, S. 4] . .	50
Tabelle 4.3	Technologiewirkung in der manuellen Flugzeugmontage [Pion23, S. 5] . .	52
Tabelle 4.4	Aussagen zur Technologieakzeptanz [Pion23, S. 4]	53
Tabelle 6.1	Versuchsplan für die Laboruntersuchung	114

Abkürzungsverzeichnis

AMQP	Advanced Message Queuing Protocol
CAD	Computer-aided Design
CoAP	Constrained Application Protocol
DIN	Deutsches Institut für Normung
DSR	Design Science Research
EASA	European Union Aviation Safety Agency
ERP	Enterprise Resource Planning
I2C	Inter-Integrated Circuit
ISO	International Organization for Standardization
LAN	Local Area Network
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
MTM	Methods-Time Measurement
NASA-TLX	National Aeronautics and Space Administration Task Load Index
NFC	Near Field Communication
OPC-UA	Open Platform Communications Unified Architecture
OSI	Open Systems Interconnection
PDM	Product Data Management
PERT	Program Evaluation and Review Technique
PLM	Product Lifecycle Management
SUS	System Usability Scale
TAM	Technology Acceptance Model
WLAN	Wireless Local Area Network

1 Einleitung

Die Automatisierung der industriellen Produktion stößt insbesondere für komplexe und variantenreiche Produkte an ihre Grenzen. Hier sind die Zugänglichkeiten für industrielle Anlagen oft eingeschränkt und die Aufwände für ihre Programmierung und Kalibrierung hoch. Ein großer Anteil der Arbeiten wird daher immer noch manuell durchgeführt. Alleine bei Airbus werden jedes Jahr im Durchschnitt 150 Millionen Nietbohrungen gesetzt, davon ungefähr 60 % mit manuellen Handwerkzeugen [Stuh19, S. 11ff.]. Pro Flugzeug sind das mehr als 230.000 Bohrungen, die im Jahr 2015 zur Hälfte der 260.000 registrierten Bauabweichungen führten und somit Kosten von ca. 200 Millionen Euro verursachten [AG15, S. 4].

Die Produktionsmitarbeiter arbeiten auch heute noch häufig mit papierbasierten Dokumenten und herkömmlichen Handwerkzeugen. Das ist aus mehreren Gründen problematisch:

1. Für die Arbeitsvorbereitung entstehen hohe Aufwände, um die Arbeitsunterlagen an die Varianten anzupassen.
2. Für die Montage entstehen hohe Aufwände, um aus den papierbasierten Dokumenten die richtigen Prozessparameter für eine Variante herauszusuchen.
3. Es entsteht das Risiko, falsche Prozessparameter (bspw. Drehmomente) auf den Werkzeugen einzustellen oder an den falschen Positionen zu arbeiten. Bei einer großen Anzahl von Werkzeugoperationen entstehen dadurch selbst bei einer niedrigen Fehlerquote hohe Fehlerkosten.
4. Die Dokumentation der Fertigungsschritte und die Qualitätskontrolle der Produkte erfordern viel Zeit, um die behördlichen Anforderungen im Flugzeugbau zu erfüllen.

Smarte Handwerkzeuge bieten prinzipiell ein großes Potenzial, die Mitarbeiter bei diesen Herausforderungen zu unterstützen. In der Prozessdurchführung ist es möglich, die Prozessparameter über eine Schnittstelle softwarebasiert einzustellen. Mit Hilfe von Sensoren können sie zudem Rückmeldedaten und Ist-Prozessparameter aufnehmen und zur Dokumentation in eine Datenbank schreiben. Eine breite Anwendung der Werkzeuge scheitert zurzeit jedoch an der mangelnden Verknüpfung mit dem aktuellen Kontext der Fertigung. Insbesondere stellen sich die Fragen:

- Wie können die notwendigen Prozessparameter mit geringem Aufwand digital erzeugt werden?
- Wie können die Prozessparameter zum richtigen Zeitpunkt passend zur spezifischen Werkzeugoperation an das Handwerkzeug übertragen werden?
- Wie können die erfassten Prozessparameter und Rückmeldedaten für jede Werkzeugoperation dokumentiert werden?

Digitale Assistenzsysteme ermöglichen es, den aktuellen Produktionskontext sensorisch zu erfassen und so Informationen für die manuellen Tätigkeiten situationsgerecht zu filtern und bereitzustellen. Sie verknüpfen dazu Informationen der Fertigungsschritte mit dem 3D-Modell und

der Stückliste des Produkts. Außerdem binden sie Datenbanken an und ermöglichen somit eine Dokumentation der durchgeführten Schritte. Die Assistenzsysteme können mit den Handwerkzeugen über bestehende Protokolle in industriellen Softwareplattformen verknüpft werden und bieten sich somit grundlegend als Lösung für die Fragen an.

Die Integration Smarterer Handwerkzeuge mit Digitalen Assistenzsystemen in einer Softwareplattform verspricht daher Synergieeffekte und signifikante Qualitäts- und Produktivitätsverbesserungen, ohne die benötigte Flexibilität der Mitarbeiter einzuschränken. Die Technologien sinnvoll miteinander zu verknüpfen und reibungslos in bestehende und menschenzentrierte Prozesse einzuführen ist entscheidend und gleichzeitig ein kompliziertes und noch tiefer zu erforschendes Thema [Born20, S. 205].

1.1 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein Gesamtsystem zu entwickeln, das Smarte Handwerkzeuge und Digitale Assistenzsysteme integriert, um Werker bei der Durchführung manueller Arbeitsprozesse zu unterstützen. Dazu soll ein Digitales Assistenzsystem Informationen bedarfsgerecht visualisieren und die Werkzeuge dynamisch mit Inhalten und Kontextinformationen versorgen, um so die Produktivität des Gesamtprozesses zu verbessern und die Qualität der Werkzeugeingriffe zu steuern.

Die Luftfahrtindustrie ist als variantenreiche Serienfertigung hochkomplexer Produkte mit langen Produktlebenszyklen ein besonders geeigneter Anwendungsfall. Auch für andere Branchen mit manuellen Arbeitsschritten verspricht die Integration Smarterer Handwerkzeuge und Digitaler Assistenzsysteme Verbesserungspotenziale. Das Gesamtsystem soll daher die Anforderungen der Luftfahrtindustrie erfüllen und für eine Vielzahl von weiteren Anwendungsfällen einsetzbar sein. Die Erstellung von Daten und Inhalten für die Assistenzsysteme und Werkzeuge sollte dazu idealerweise generisch und ohne Mehraufwände in den indirekten Unternehmensbereichen möglich sein. Als Idealbild dient eine durchgängige digitale Prozesskette, die die Daten des 3D-Modells über die Arbeitsvorbereitung, Fertigung und Montage mit dem Ist-Zustand des Produkts verknüpft. Weiterhin sollten die Systeme menschenzentriert gestaltet werden, um die Akzeptanz und somit ihre tatsächliche Nutzung in der Praxis zu fördern. Es ergeben sich die folgenden Teilziele der Arbeit:

Untersuchung der Anforderungen manueller Arbeit im Flugzeugbau Das zu entwickelnde Gesamtsystem soll insbesondere die Anforderungen manueller Prozesse und Arbeitskräfte im Flugzeugbau unterstützen. Dazu sind sowohl die aktuellen Prozesse der Arbeitsvorbereitung und Montage, die Produktivität und Qualität der Montageprozesse als auch die Akzeptanz und Anforderungen der Endnutzer zu untersuchen. Diese bilden die Grundlage für die Entwicklung der Werkzeuge, Assistenzsysteme und der Softwareplattform.

Entwicklung Digitaler Assistenzsysteme für die Arbeitsvorbereitung und Montage Das Digitale Assistenzsystem für manuelle Arbeitsprozesse soll die Werker bei der Beschaffung und

Verarbeitung von Informationen unterstützen und neben klassischen Elementen digitaler Arbeitsunterlagen auch Schnittstellen zu den Smarten Handwerkzeugen umfassen. Die Qualität der Werkzeugoperationen soll gesteigert werden, indem Funktionen zur Steuerung der Werkzeuge umgesetzt und die Daten der Werkzeuge ausgewertet werden. Die Transparenz des Werkzeugzustands soll erhöht werden, indem die ausgewerteten Daten im Assistenzsystem visualisiert werden. Zusätzlich soll ein Digitales Assistenzsystem für die Arbeitsvorbereitung entwickelt werden, das möglichst generisch Inhalte für die digitalen Arbeitsunterlagen und die Smarten Handwerkzeuge erzeugen kann. Ziel ist es, eine möglichst flexible Nutzung zu gewährleisten, ohne zusätzliche Aufwände für die Informationsbereitstellung zu erzeugen.

Entwicklung einer Softwareplattform zur Integration der Teilsysteme Zur Integration der Digitalen Assistenzsysteme mit den Smarten Handwerkzeugen soll ein strukturiertes Vorgehen entwickelt und anhand der Entwicklung einer Softwareplattform umgesetzt werden. Diese sollte die Schnittstellen, zentrale Datenbanken sowie Logiken für die Datenverarbeitung und die daraus resultierende Interaktion der Teilsysteme bereitstellen. Die Plattform soll aktuelle industrielle Standards berücksichtigen und die Funktionen des Gesamtsystems zielgerecht ermöglichen.

Bewertung des praktischen Nutzens und der Transfermöglichkeiten Der Nutzen des entwickelten Gesamtsystems soll insbesondere für die manuellen Arbeitsprozesse bewertet werden. Dazu muss einerseits die Wirkung auf die Zielgrößen Produktivität und Qualität untersucht werden. Andererseits sollte die Akzeptanz der Endnutzer im Flugzeugbau sowie der Nutzergruppen anderer Branchen untersucht werden, um den Transfer der Lösung in weitere Industrien zu bewerten.

1.2 Methodik und Aufbau der Forschungsarbeit

Die Methodik der Arbeit folgt dem Entwicklungsansatz des Design Science Research (DSR) für Informationssysteme nach Hevner [Hevn10]. Abbildung 1.1 verdeutlicht den Forschungsansatz und ordnet die Kapitel der Arbeit zu.

Der DSR-Ansatz teilt die Entwicklung in die drei Betrachtungsebenen Umfeld, Forschung und Wissensbasis ein. Zentrales Element des Forschungsansatzes sind drei kontinuierlich durchgeführte Zyklen: Der *Relevanz-Zyklus* betrachtet die Menschen, Technologien sowie die Organisation des Einsatzumfeldes, um einerseits Anforderungen an die Gesamtentwicklung abzuleiten und andererseits die Entwicklungsergebnisse zu validieren. Der *Rigor-Zyklus* bezweckt den Abgleich der Forschung mit der aktuellen Wissensbasis. Zum einen sollen die Grundlagen und Methoden gefunden werden, die für die sorgfältige Entwicklung der Digitalen Assistenzsysteme benötigt werden. Zum anderen sollen die Ergebnisse und Erkenntnisse aus der Forschung in den Stand der Wissenschaft einfließen, um die Wissensbasis zu verbreitern. Der *Design-Zyklus* bezieht sich auf die iterative Entwicklung von Theorien und Entwicklungsergebnissen sowie deren Evaluation und Anpassung, bis die Zielerfordernisse erfüllt sind.

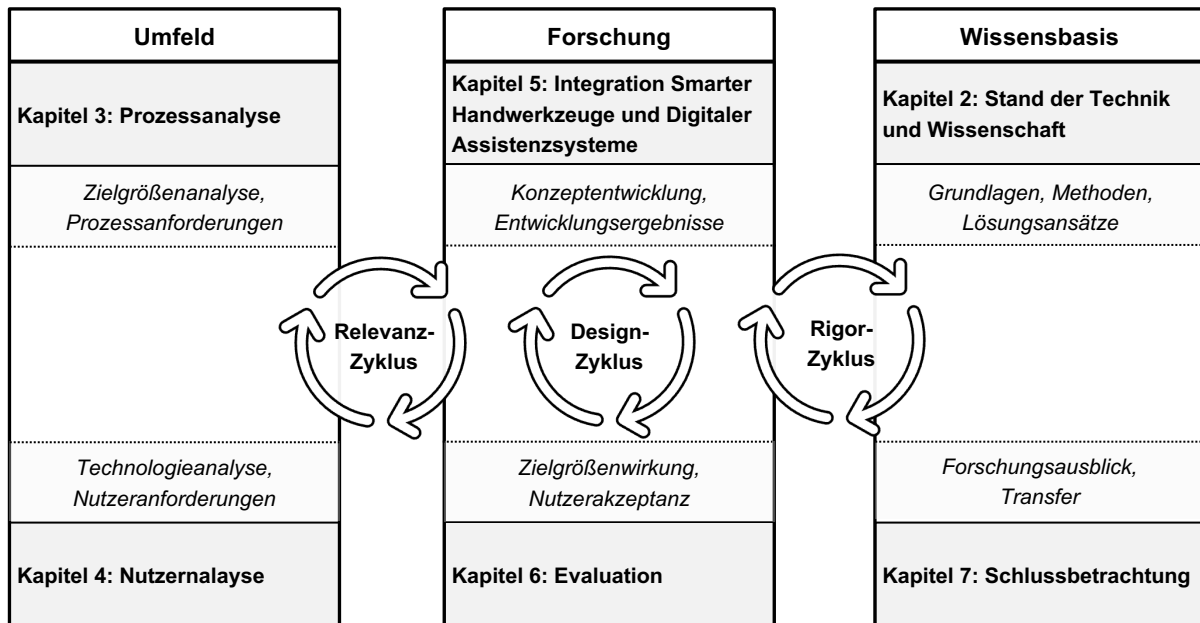


Abbildung 1.1: Aufbau der Arbeit nach dem DSR-Ansatz i.A.a. [Hevn10, S. 16]

Kapitel 2 gibt einen Überblick zu theoretischen Grundlagen und insbesondere zum Stand der Technik von Digitalen Assistenzsystemen, Smarten Handwerkzeugen und Softwareplattformen und bestimmt somit die aktuelle Wissensbasis.

Kapitel 3 analysiert die manuellen Prozesse der Arbeitsvorbereitung und Montage im Flugzeugbau sowie die Zielgrößen Produktivität und Qualität, um aus dem Umfeld die relevanten Anforderungen der Prozesse abzuleiten.

Kapitel 4 analysiert die Einflussfaktoren auf den Menschen im Flugzeugbau und bewertet verschiedene Technologien zu seiner Unterstützung, um Anforderungen der Endnutzer zu ermitteln.

Als Teil des *Design-Zyklus* zeigt Kapitel 5 zuerst ein Zielbild auf und entwickelt anschließend ein Konzept für die Systemarchitektur und ein Vorgehensmodell zur funktionsgerechten Integration Digitaler Assistenzsysteme mit Smarten Handwerkzeugen. Weiterhin beschreibt es die Entwicklung der Assistenzsysteme, die Smarten Handwerkzeuge sowie deren Integration anhand des Konzepts. Das Kapitel schließt mit einer Beschreibung, wie das Gesamtsystem in einem digitalisierten Arbeitsablauf genutzt werden kann.

Kapitel 6 erläutert die Evaluation der Gesamtentwicklung, unterteilt in eine quantitative Untersuchung im Labor sowie eine qualitative Untersuchung in der Industrie. Neben der Verbesserung der Zielgrößen wird hier die Gebrauchstauglichkeit der Systeme und ihr Transfer in andere Branchen untersucht.

Als Abschluss fasst Kapitel 7 die Ergebnisse der Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick für Industrie und Forschung.

2 Stand der Technik und Wissenschaft

Dieses Kapitel beschreibt die Grundlagen für das Verständnis der Arbeit und führt in den aktuellen Stand der Technik und Wissenschaft ein. Abschnitt 2.1 erläutert das Produktionsmanagement mit seinen Zielgrößen und den wesentlichen Wirkzusammenhängen. Abschnitt 2.2 beschreibt die Merkmale manueller Arbeitsprozesse und wie sie gestaltet werden können, dass sie den Fähigkeiten und Anforderungen von Menschen entsprechen (menschzentrierte Entwicklung). Weiterhin erörtert das Kapitel den Wissensstand zu Digitalen Assistenzsystemen (Abschnitt 2.3), Smarten Handwerkzeugen (Abschnitt 2.4) und Softwareplattformen (Abschnitt 2.5). Schwerpunkt ist jeweils die Erzeugung und Nutzung von Inhalten und die Erfassung, Übertragung und Verarbeitung von Kontextinformationen. Abschnitt 2.6 schließt das Kapitel mit einer Zusammenfassung der Defizite ab.

2.1 Produktionsmanagement

Der Produktionsprozess nutzt die Elementarfaktoren Arbeitskräfte, Betriebsmittel und Werkstoffe und kombiniert diese, um Güter oder Leistungen herzustellen [Neb11, S. 11]. Die Aufgabe des Produktionsmanagements ist es, diesen Prozess dispositiv zu gestalten und zu lenken, um so die monetären und zeitlichen Ziele und die Qualitätsziele des Unternehmens zu erreichen [Zäp21, S. 30f.]. Dazu werden Zielgrößen festgelegt und über verschiedene Stell- und Regelgrößen beeinflusst [Kell22, S. 22]. Unterabschnitt 2.1.1 beschreibt die Zielgrößen Produktivität und Qualität; Unterabschnitt 2.1.2 erläutert analog, mit welchen Maßnahmen Unternehmen die Zielgrößen beeinflussen können.

2.1.1 Zielgrößen

Die Zielgrößen von produzierenden Unternehmen lassen sich in die Dimensionen Zeit, Kosten und Qualität einordnen [Löd14, S. 23f.]. Die Integration von Smarten Handwerkzeugen und Digitalen Assistenzsystemen zielt vor allem darauf, die Produktivität und Qualität manueller Arbeitsprozesse zu verbessern.

Produktivität

Die Produktivität beschreibt das Verhältnis von Output zu Input [West06, S. 65] und beschreibt damit quantitativ, wie effizient der Produktionsprozess funktioniert. Der Output wird entsprechend des Abgangs einer Periode in Vorgabestunden oder in Stück dargestellt [Löd14, S. 24]. Je nach Betrachtungsbereich kann der Input verschiedene Ausprägungen annehmen [Bokr06, S.

9]. Für Digitalisierungsmaßnahmen manueller Arbeit wird insbesondere die Arbeitsproduktivität betrachtet. Sie ist als Verhältnis der Menge produzierter Gutteile zur bezahlten Arbeitszeit der Mitarbeiter definiert [Glö20, S. 53f.] (Gleichung 2.1).

$$\text{PRO}_{\text{Arbeit}} = \frac{\text{Output}}{\text{Input}} = \frac{\text{AB}_{\text{gut}}}{\text{ZAR}_{\text{bez}}} = \frac{\text{AB} - \text{AU}}{\text{ZD} + \text{ZA} + \text{ZPA} + \text{ZUA}} \quad (2.1)$$

mit $\text{PRO}_{\text{Arbeit}}$: Arbeitsproduktivität [Stk./Std.]
 AB_{gut} : Menge Gutteile (Abgang Gutteile) [Stk.]
 ZAR_{bez} : bezahlte Arbeitszeit [Std.]
 AB : gesamte produzierte Menge (Abgang) [Stk.]
 AU : Ausschuss [Stk.]
 ZD : Durchführung der Arbeitsaufgabe [Std.]
 ZA : Auslastungsverluste [Std.]
 ZPA : geplante Abwesenheit [Std.]
 ZUA : ungeplante Abwesenheit [Std.]

Die bezahlte Arbeitszeit lässt sich demnach in die vier Regelgrößen *Durchführung der Arbeitsaufgabe*, *Auslastungsverluste*, *geplante Abwesenheit* und *ungeplante Abwesenheit* gliedern, die sich wiederum in feinere Stellgrößen aufteilen. Gestaltungsmaßnahmen am Arbeitssystem beziehen sich insbesondere auf die Stellgrößen der Durchführung der Arbeit sowie der Auslastungsverluste während der Anwesenheitszeit. Abbildung 2.1 zeigt das Modell der Arbeitsproduktivität mit Fokus auf diese Regelgrößen.

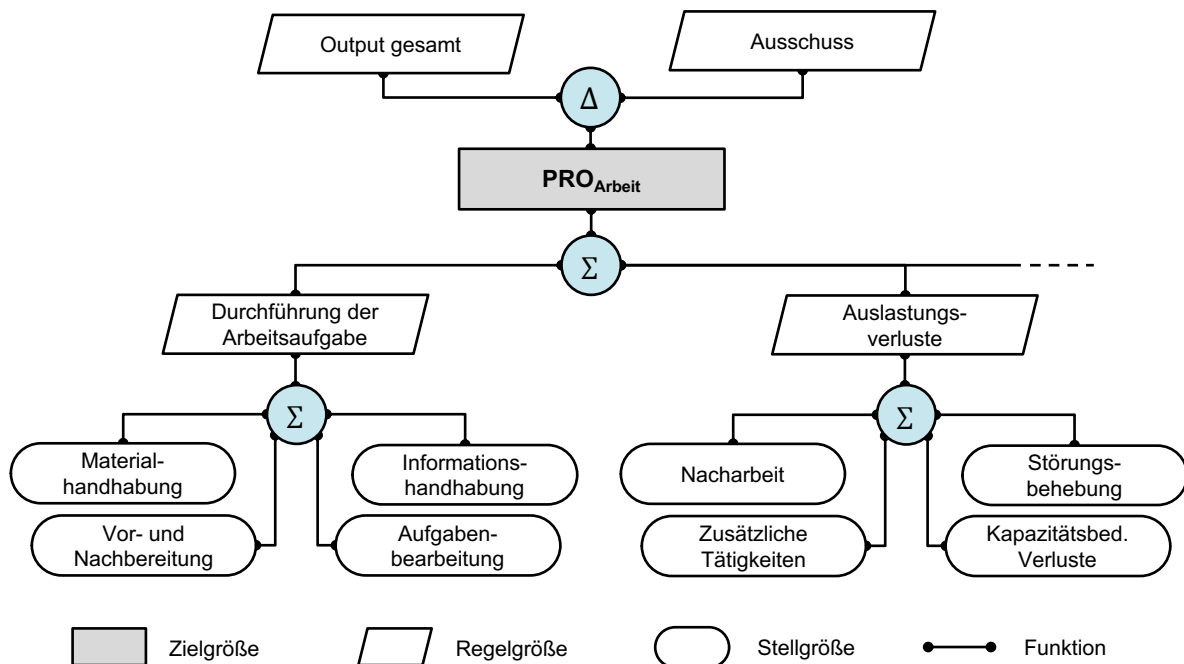


Abbildung 2.1: Modell der Arbeitsproduktivität (Ausschnitt) i.A.a. [Glö20, S. 53ff.]

Qualität

Die DIN-Norm 9000 definiert Qualität als Grad, in dem die inhärenten Merkmale eines Objektes Anforderungen erfüllen [DIN15b, S. 39]. Diese Definition bezieht sich insbesondere auf das Produkt. Für diese Arbeit relevanter ist die Qualität des Produktionsprozesses, weil das Digitale Assistenzsystem insbesondere darauf zielt, Prozessfehler zu vermeiden.

Die Prozessqualität ist direkt verantwortlich für die Erzeugnisqualität und somit die zentrale Voraussetzung zur Realisierung der Kundenzufriedenheit [Maty13, S. 241]. Zur Messung der Prozessqualität gibt es statistische Ansätze, wie die Prozessfähigkeitsuntersuchung, die über große Stichprobenumfänge und die Betrachtung von Kennwerten und Vertrauensbereichen eine detaillierte Bewertung einzelner Prozesse erlaubt [Brun16, S. 221]. Eine einfachere Bewertung ergibt sich in der Praxis aus der Qualitätsprüfung in den einzelnen Phasen der Produktion [Domb88, S. 14] und somit der Betrachtung von Prozessfehlern.

Nakajima [Naka88] führt als Teilgröße der sog. Gesamtanlageneffizienz den Qualitätsgrad als Verhältnis von produzierten Gutteilen zur gesamten produzierten Menge ein [Maty13, S. 194] (siehe Gleichung 2.2). Analog kann der Qualitätsgrad auch für manuelle Arbeitsprozesse genutzt werden. Neben der produzierten Menge an Gutteilen kann zusätzlich die Anzahl notwendiger Nacharbeiten betrachtet werden.

$$Q_{\text{Grad}} = \frac{AB_{\text{gut}}}{AB} = \frac{AB - AU}{AB} \quad (2.2)$$

mit Q_{Grad} : Qualitätsgrad [-]
 AB_{gut} : Menge Gutteile (Abgang Gutteile) [Stk.]
 AB : gesamte produzierte Menge (Abgang) [Stk.]
 AU : Ausschuss [Stk.]

In der Luftfahrt ist es besonders wichtig, Prozessfehler zu erkennen und zu vermeiden, weil diese die Flugsicherheit gefährden und katastrophale Konsequenzen nach sich ziehen können. Daher definieren Luftfahrtbehörden Prozessanforderungen an den Flugzeugbau und die europäische Union stellt verschiedene Luft- und Raumfahrtnormen bereit [Hins23, S. 9].

2.1.2 Teilbereiche

Nach Lödding [Löd14] lässt sich jeder übergeordneten Zielgröße ein Fachgebiet des Produktionsmanagements zuordnen. Das Produktivitätsmanagement betrachtet die Reduktion der Kosten für die Produktion über die Beeinflussung des Inputs der Produktivität. Das Qualitätsmanagement beeinflusst die Qualität der Produktionsprozesse, um Ausschuss und Nacharbeit zu verringern. Die Produktionsplanung und -steuerung adressiert die Zielgröße Zeit, um Aufträge termingerecht und mit niedrigen Durchlaufzeiten fertigzustellen [Löd14, S. 23]. Die einzelnen Fachgebiete sind komplex und lassen sich in ihren Zielen vereinbaren, weshalb eine getrennte Betrachtung der Themen sinnvoll ist [Löd14, S. 32].

Produktivitätsmanagement

Im Produktivitätsmanagement zielen Prozessoptimierungen und Digitalisierungsmaßnahmen insbesondere darauf, den Input zu verringern [Bokr06, S. 11]. Um diese Maßnahmen konsequent an verbesserungsrelevanten Mitarbeiterzuständen zu orientieren, definiert Tietze einen Regelkreis des Produktivitätsmanagements [Tiet17, S. 117]. Der Zyklus basiert darauf, Mitarbeiterzustände zu erheben und mit Hilfe von Tätigkeits- und Objekthierarchien zu aggregieren. Ziel ist es insbesondere, unproduktive Zustände im Arbeitsablauf zu erkennen. Die Analyse von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen erlaubt es, sinnvolle Methoden auszuwählen und durch ihre Anwendung die Produktivität zu steigern. Die Erhebung erfolgt klassischerweise über manuelle Zeitaufnahmen. Digitale Ansätze ermöglichen es, den Aufwand für die Erfassung und Auswertung von Mitarbeiterzuständen zu verringern [Grab20, S. 115].

Das Wirkmodell nach Glöckner [Glö20] (siehe Abbildung 2.1) ermöglicht dann eine detaillierte Analyse der Wirkungszusammenhänge. So können Methoden und neue Technologien in ihrer Wirkung auf die einzelnen Stellgrößen untersucht werden, um die Gesamtwirkung auf die Produktivität einzuschätzen. Die tatsächliche Produktivitätswirkung wird erst erreicht, wenn die Verbesserung eingeführt und die neu benötigten Kapazitäten berechnet und angepasst wurden [Grab20, S. 105].

Digitalisierungsmaßnahmen zur Produktivitätssteigerung zielen oft auf die direkten Bereiche und erzeugen dafür Mehraufwände in den Redaktionsprozessen. Bisherige Ansätze des Produktivitätsmanagements müssen an die fortschreitende Digitalisierung angepasst werden und vor allem auch die wachsenden Kosten in den indirekten Bereichen betrachten [Jesk21, S. 7]. Die Einführung digitaler Maßnahmen sollte daher bestenfalls verbesserungsrelevante Mitarbeiterzustände unterstützen und gleichzeitig Funktionen für eine einfache oder automatisierte Erstellung und Bereitstellung der Daten beinhalten.

Qualitätsmanagement

Das Qualitätsmanagement betrachtet die Verbesserung der Produktionsfaktoren und -prozesse, um eine ausreichende Produktqualität für den Kunden zu erzeugen. Es teilt sich in die Aufgaben Qualitätsplanung, Qualitätslenkung, Qualitätssicherung und Qualitätsverbesserung auf [DIN15b, S. 37f.], [Neb11, S. 923]. Die Qualitätsplanung gestaltet und entwickelt neue Produkte und Prozesse [Segh07, S. 149] und definiert dazu Anforderungen, Ziele und Pläne sowie Mittel zur Realisierung der Qualität [Neb11, S. 927]. Die Qualitätslenkung sorgt insbesondere für die Einhaltung der Anforderungen bei der Ausführung der Prozesse sowie für das Messen der Produkt- und Prozessqualität [Segh07, S. 174f.]. Die Qualitätssicherung sorgt für zusätzliche Prüfungen der Qualitätsmerkmale des Produktes, um die Erfüllung der Kundenanforderungen sicherzustellen [Neb11, S. 928]. Das Ziel der Qualitätsverbesserung ist es, den Qualitätsstandard der Produktion kontinuierlich zu erhöhen und neue Potenziale zu generieren [Segh07, S. 207].

Qualitätssteigerung Die Verbesserung der Qualität sollte alle Aufgaben des Qualitätsmanagements betrachten. Hierzu gibt es verschiedene Methoden und Werkzeuge. Methoden sind strukturierte Vorgehen für die Aufgaben. Werkzeuge, wie z.B. Ursache-Wirkungs-Diagramme, unterstützen diese Methoden auf instrumentaler Ebene [Schr09, S. 132]. Ein wesentliches Ziel der Arbeit ist es, Fehler in manuellen Arbeitsprozessen durch Digitalisierungsmaßnahmen zu vermeiden. Eine wichtige Grundlage hierfür ist die Poka-Yoke-Methode (japanisch für “Fehler vermeiden”) nach Shingo [Shin86]. Kern der Methode ist es, unbeabsichtigte Fehler systematisch zu erkennen und zu vermeiden. Hierzu werden Arbeitsplätze, Prozesse oder Betriebsmittel umgestaltet [Shin86, S. 99f.].

Digitalisierte Poka-Yoke-Systeme können große Datenmengen sensorisch erfassen und verarbeiten, um aktorisch in den Produktionsprozess einzugreifen und die Qualität zu steuern [Rome22, S. 7]. Dadurch können Fehler vermieden und Daten für die Qualitätssicherung generiert werden. Durch die Analyse von Vergangenheitsdaten können Unternehmen Fehlerursachen erkennen und beheben und so die Qualität auch langfristig verbessern.

Zertifizierungen Unternehmen können sich nach DIN 9001 [DIN15a] zertifizieren lassen, um Kunden ein effektives Qualitätsmanagementsystem zu bestätigen. Für den Flugzeugbau ergänzt die DIN 9100 [DIN18] weitere Anforderungen an die Überwachung und Dokumentation von Prozessen, das Risikomanagement und die Verifizierungsanforderungen [Hins14, S. 4]. Hinzu kommen behördliche Anforderungen der European Union Aviation Safety Agency (EASA), die insbesondere in Part 21/G für die Herstellung von Flugzeugen festgehalten sind. Im Vergleich zu anderen Branchen ergeben sich dadurch für den Flugzeugbau deutliche Mehraufwände für die Datenerhebung und -dokumentation, um Prüf- und Verifizierungsanforderungen zu erfüllen und sämtliche Herstellungsprozesse und Bauabweichungen zu dokumentieren [Hins23, S. 37]. Für die Entwicklung eines Digitalen Assistenzsystems sind diese Erfordernisse strukturiert zu erfassen, um zugelassen und implementiert werden zu können. Ziel ist es, Ausschuss und Nacharbeit der Produktionsprozesse zu reduzieren und Aufwände für erforderliche Nebentätigkeiten zu reduzieren.

2.2 Faktor Mensch im Arbeitssystem

Der Mensch führt in vielen Arbeitssystemen physikalisch flexible und kognitiv anspruchsvolle Tätigkeiten aus. Insbesondere manuelle Montageprozesse in variantenreichen Fertigungen stellen ein breites Spektrum an Anforderungen, die von den Werkern erfüllt werden müssen. Unterabschnitt 2.2.1 geht auf die Merkmale manueller Arbeitsprozesse mit Fokus auf die Herausforderungen und Probleme der variantenreichen Serienmontage ein. Unterabschnitt 2.2.2 beschreibt, wie Technologien gemeinsam mit den Endnutzern entwickelt werden können, um diese effektiv zu entlasten und zu unterstützen.

2.2.1 Manuelle Arbeitsprozesse

Als Arbeitskraft nutzt der Mensch Werkzeuge und andere Hilfsmittel, um zielgerichtet Produkte herzustellen [Neb11, S. 167]. Die Betriebsmittel, Produktionsstrukturen und Anforderungen an die Mitarbeiter unterscheiden sich von dabei von Produkt zu Produkt.

Grundlagen industrieller Montageprozesse

Die Aufgabe der industriellen Montage ist es, eine Vielzahl von einzelnen Bauteilen zu einem komplexen Produkt mit verschiedenen Funktionen zusammenzubauen. Die Montage umfasst damit alle Vorgänge, die nötig sind, um die Bauteile zu verbinden. Dazu gehören das Bearbeiten der Werkstücke (z.B. Bohren), das Handhaben, das Fügen sowie die Prüfung der Prozessschritte und mögliche Sonderoperationen am Werkstück [Lott12, S. 1f.], [Röc23, S. 109]. Der Montageprozess besteht damit aus verschiedenen Montageschritten, die Hilfsmittel wie Werkzeuge und Dokumente nutzen, um jeweils einzelne Bauteile zu bearbeiten, um sie zu Baugruppen und Produkten zu fügen. Abbildung 2.2 zeigt den beschriebenen Aufbau eines Montageprozesses.

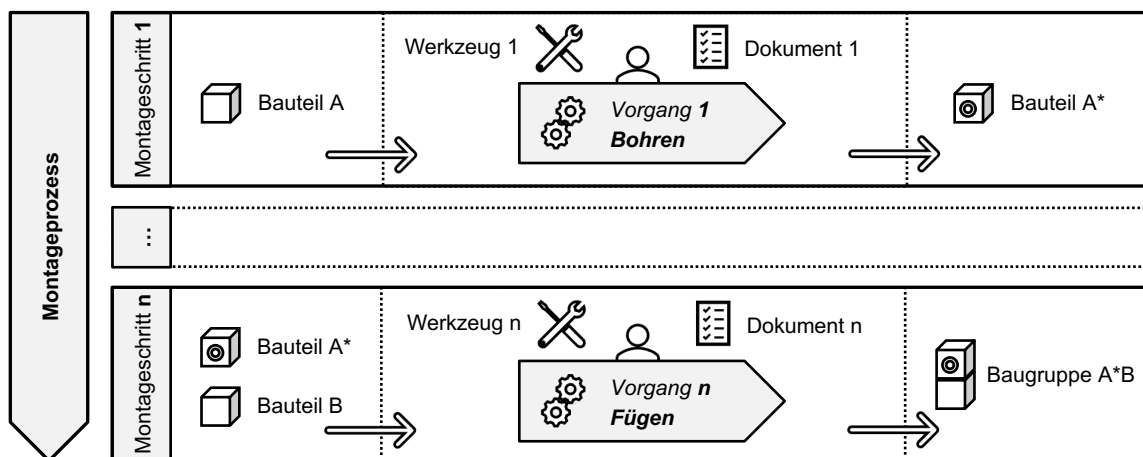


Abbildung 2.2: Schematischer Aufbau eines Montageprozesses

Je nach Produkt und Fertigungsprinzip nimmt die Montage dabei verschiedene Formen an. Nach Wiendahl [Wien14] werden klassische Montageprozesse an der Arbeitsfolge orientiert, wodurch Fertigungslinien oder Montageinseln mit festen Arbeitsplätzen (inklusive Werkzeugen und Hilfsmitteln) und beweglichem Personal entstehen. Bei der Montage von komplexen Großprodukten wird hingegen in einer Baustellenmontage gearbeitet. Das Produkt bleibt stationär und das Personal bewegt sich mit den Werkzeugen und Hilfsmitteln um das Produkt oder im Produkt [Wien14, S. 275ff.]. Die Aufwände für die Beschaffung von Materialien, Werkzeugen und Informationen erhöhen sich dadurch insbesondere für die variantenreiche Serienmontage, wie z. B. im Flugzeugbau [Lott12, S. 148].

Abbildung 2.3 verdeutlicht den Wandel der Marktanforderungen, der eingesetzten Montageinnovationen und der Komplexitätsmanagementstrategien über den Zeitverlauf. Der Anteil der Einzel- und Kleinserienmontage erhöht sich entsprechend der Marktanforderungen nach variantenreichen Produkten. Der konventionelle Ansatz, Komplexität zu reduzieren, indem Prozesse in

möglichst kleine Arbeitspakete mit hohem Wiederholungsgrad aufgeteilt werden, verliert dadurch an Bedeutung. Anstelle von mechanischer Optimierung wird versucht, die Werker über Digitalisierungsmaßnahmen, wie bspw. Digitalen Assistenzsystemen oder Smarten Handwerkzeugen, zu unterstützen und die Komplexität so zu beherrschen [Born20, S. 14].

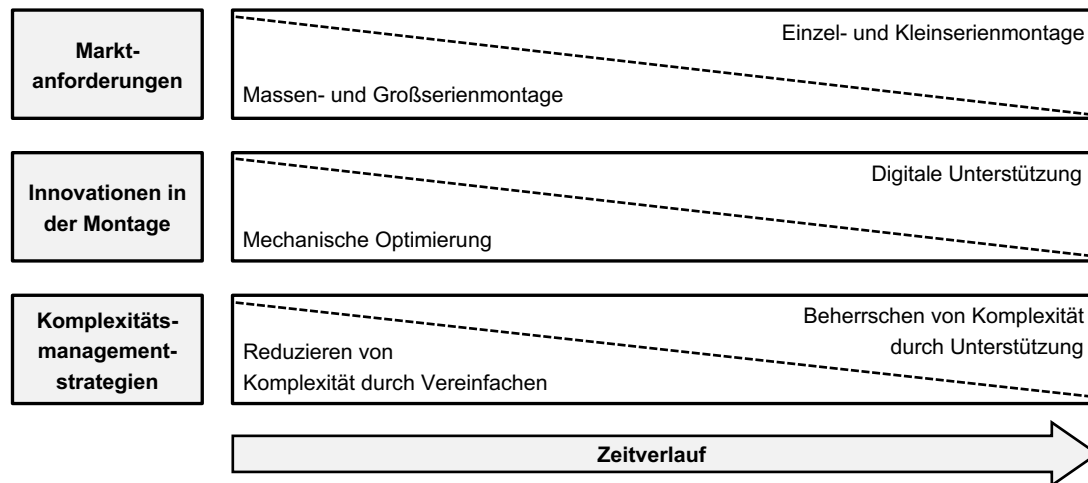


Abbildung 2.3: Wandel der Montagekomplexitätsstrategien i.A.a. [Born20, S. 14]

Herausforderungen in der variantenreichen Serienmontage

Für eine zielgerichtete Entwicklung von Digitalisierungsmaßnahmen müssen die entsprechenden Herausforderungen der Arbeitskräfte verstanden und unterstützt werden. In der variantenreichen Serienmontage stellen sich zwei zentrale Herausforderungen für Werker: die effektive Vermeidung von Prozessfehlern und die produktive Beschaffung von Informationen. Beide Herausforderungen stehen in einem Zielkonflikt zueinander.

Effektive Vermeidung von Prozessfehlern Prozessfehler entstehen in der variantenreichen Serienmontage insbesondere dadurch, dass sich ähnliche manuelle Arbeitsvorgänge mit teilweise variablen Prozessparametern wiederholen. Der Mensch ist für solche Prozesse zwar grundlegend geeignet, da er hochflexibel und kognitiv leistungsfähig ist. Er unterliegt allerdings ergonomischen, physischen und psychischen Belastungen, wodurch die Leistungsbereitschaft und -abgabe über den Verlauf eines Arbeitstages variiert [Bjer55, S. 107]. Abbildung 2.4 verdeutlicht den durchschnittlichen Verlauf der Fehleranzahl von Montagemitarbeitern über einen Arbeitsalltag und zeigt den geschätzten Zusammenhang mit der physiologischen Leistungsbereitschaft auf.

Durch die Ermüdungserscheinungen treten insbesondere bei ähnlichen, aber variantenreichen Vorgängen wiederholt Fehler auf. Beispiele sind das Bohren von Nietlöchern mit verschiedenen Durchmessern und Drehgeschwindigkeiten im Flugzeugbau, oder das Schrauben mit unterschiedlichen Drehmomenten bei der Montage von Medizintechnik. Ein wiederholtes Überprüfen der bereitgestellten Informationen würde die Prozessqualität erhöhen, aber die Arbeitsproduktivität negativ beeinflussen. Die Nutzung Smarter Handwerkzeuge kann hingegen manuelle Montageprozesse qualitätslenkend und ohne zusätzliche Prüfaufwände unterstützen.

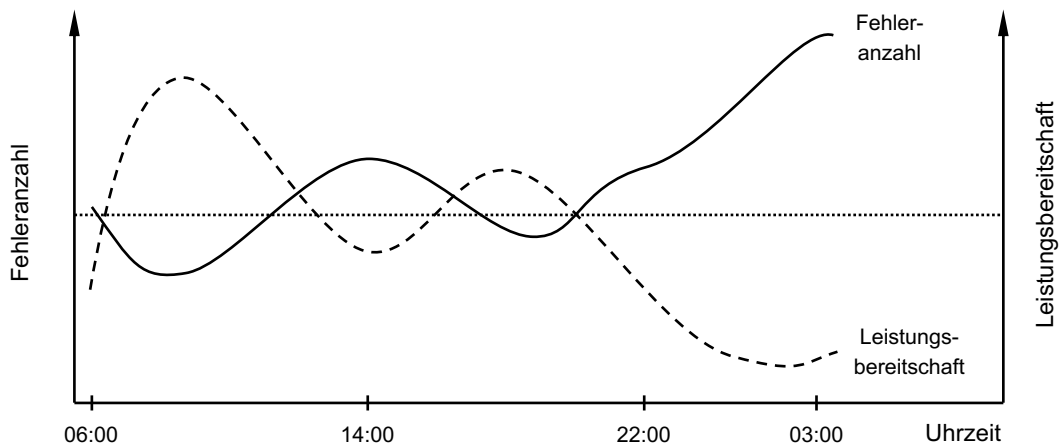


Abbildung 2.4: Leistungs-bereitschaft und Fehleranzahl i.A.a. [Bjer55, S. 107]

Produktive Beschaffung von Informationen Die steigende Produkt- und Prozesskomplexität erhöht die benötigte kognitive Leistung zur Informationsbeschaffung. In einem variantenreichen Montageprozess treffen Werker eine Vielzahl von Entscheidungen über zu verwendende Teile, Werkzeuge und Prozessparameter. Damit erhöht sich neben der Menge an Informationen auch der Aufwand für deren Suche in den Dokumenten [Born20, S. 50f.]. In einer Baustellenmontage erhöht sich dieser Aufwand zusätzlich durch die Größe des Produktes, die Menge an Informationen und die räumliche Verteilung der Hilfsmittel.

Für einen verlässlichen und produktiven Montageablauf müssen die Informationen fehlerfrei für jedes Bauteil und jeden Vorgang bereitgestellt werden. Den einzelnen Vorgängen sollten idealerweise kritische Maße, Drehmomente und andere Parameter direkt zugeordnet sein [Lott12, S. 163]. Entsprechend gestaltete Digitale Assistenzsysteme können die Produktivität der Informationsbeschaffung daher signifikant steigern (siehe [Hala18, S. 145]). Um die Effektivität und Akzeptanz solcher Digitalisierungslösungen zu gewährleisten, müssen die Menschen als Nutzer in den Entwicklungsprozess eingebunden werden.

2.2.2 Menschzentrierte Entwicklung

Auch technisch funktionale Digitale Assistenzsysteme können scheitern, wenn sie von den Werkern nicht akzeptiert werden. Ziel der menschzentrierten Entwicklung ist es, die Anforderungen der *Nutzer* und der *Prozesse* bei der Entwicklung technischer Unterstützungssysteme zu berücksichtigen [Weid15, S. 12], [Schm20, S. 27], sodass die Werker die Unterstützungssysteme kompetent nutzen und die verbesserten Prozesse wie geplant durchführen können [Röc23, S. 18f.]. Die Akzeptanz Digitaler Assistenzsysteme und anderer technischer Unterstützungssysteme ist daher eine zentrale Entwicklungsherausforderung bei der Digitalisierung manueller Arbeitsprozesse [Baue14, S. 592]. Der Umfang der technischen Herausforderungen kann jedoch dazu führen, dass die technische Machbarkeit im Fokus steht und die Anforderungen und Wünsche der Endnutzer nicht genügend beachtet werden [Wolf19, S. 7], [Weid15, S. 110].

Nach DIN 9241 [DIN20, S. 13f.] muss der Ansatz dazu

- ein umfassendes Verständnis der Arbeiter, ihrer Aufgaben und ihres Arbeitsumfeldes erzeugen,
- die Nutzer während der Entwicklung einbeziehen,
- die Lösung fortlaufend benutzerzentriert evaluieren und anpassen und dabei
- die gesamte Nutzererfahrung berücksichtigen.

Abbildung 2.5 verdeutlicht den Unterschied im Ablauf traditioneller Entwicklungsansätze zu einem menschenzentrierten Entwicklungsansatz. Die menschenzentrierte Entwicklung bezieht die Nutzer öfter und interaktiver ein als traditionelle Ansätze und betrachtet auch arbeitswissenschaftliche Kriterien, wie bspw. die Sozialverträglichkeit und die Beeinträchtigungsfreiheit [Schm20, S. 27]. Dazu führt der Ansatz zusätzlich die *Bedarfsanalyse* als Phase ein. Die Nutzer werden so bereits zu Beginn der Entwicklungszeit einbezogen, um wichtige Entwicklungsinformationen zu erhalten. Die Zeiten für die *Technologieentscheidung* und *Entwicklung* verringern sich durch diese Informationen tendenziell. Die partizipatorische, fortlaufende und zyklische Evaluierung während des Entwicklungsprozesses ist entscheidend, da eine Beurteilung des Bedarfs an technologischen Unterstützungsfunktionen im Voraus schwer durchzuführen ist [Weid15, S. 19]. Die gesamte Entwicklungszeit bis zur *Anwendung* kann dadurch jedoch verlängert werden, da traditionelle Ansätze die Nutzer lediglich über die Entscheidungen und Ergebnisse informieren.

Die menschenzentrierte Entwicklung wird in dieser Arbeit als Ansatz für die Digitalen Assistenzsysteme und Smarten Handwerkzeuge sowie deren Integration in einer Softwareplattform angewendet, um ein technisch funktionales und gut akzeptiertes Entwicklungsergebnis zu erhalten.

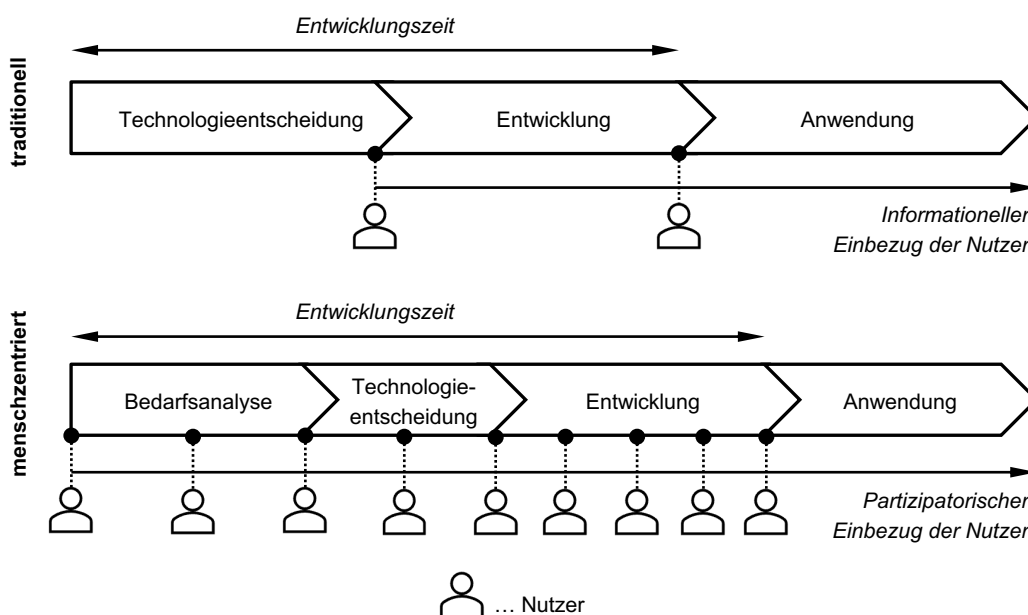


Abbildung 2.5: Menschenzentrierte Entwicklung (abg. nach [Weid15, S. 16])

2.3 Digitale Assistenzsysteme

Digitale Assistenzsysteme unterstützen Arbeiter bei manuellen Prozessen, indem sie Informationen zum Arbeitsvorgang und zum aktuellen Produktionskontext erzeugen. Unterabschnitt 2.3.1 definiert Digitale Assistenzsysteme und ordnet sie in ihre Unterstützungsarten ein. Unterabschnitt 2.3.2 beschreibt anschließend wie Digitale Assistenzsysteme in der Produktion Daten erfassen und verarbeiten und Inhalte erzeugen können. Zuletzt erklärt und vergleicht Unterabschnitt 2.3.3 bestehende Werkerassistenzsysteme anhand dieser Möglichkeiten.

2.3.1 Definition und Einordnung

Im industriellen Kontext sind Digitale Assistenzsysteme technische Systeme, die Werker bei der Bearbeitung von Fertigungs- und Montageaufgaben unterstützen, ohne sie zu ersetzen [Mark21, S. 228]. Klassischerweise stellen sie dazu alle relevanten Informationen zum aktuellen Arbeitsvorgang über Tablets, Computer oder Datenbrillen bereit. Im engeren Sinne ist ein Digitales Assistenzsystem die Schnittstelle des Menschen zum Arbeitssystem und somit zu Datenbanken, Sensoren und Maschinen [Hold17, S. 145]. Entscheidend ist, dass der Mensch die Kontrolle über den Prozess behält und das System bedient. Andernfalls handelt es sich um eine Substitution oder die Automatisierung eines Prozesses [Weid15, S. 13]. Je nach Zielsetzung können kompensatorische Funktionen, gesundheitlich erhaltende Funktionen und erweiternde Funktionen, z. B. zur Erhöhung der Arbeitsqualität, unterschieden werden [Apt18, S. 19ff.].

Digitale Assistenzsysteme können sensorisch, kognitiv und physisch unterstützen [Apt18, S. 19]. Damit beeinflussen sie unterschiedliche Phasen im Modell der Informationsverarbeitung nach [Wick98, S. 17]. Abbildung 2.6 zeigt das Modell und verdeutlicht die drei Unterstützungsarten.

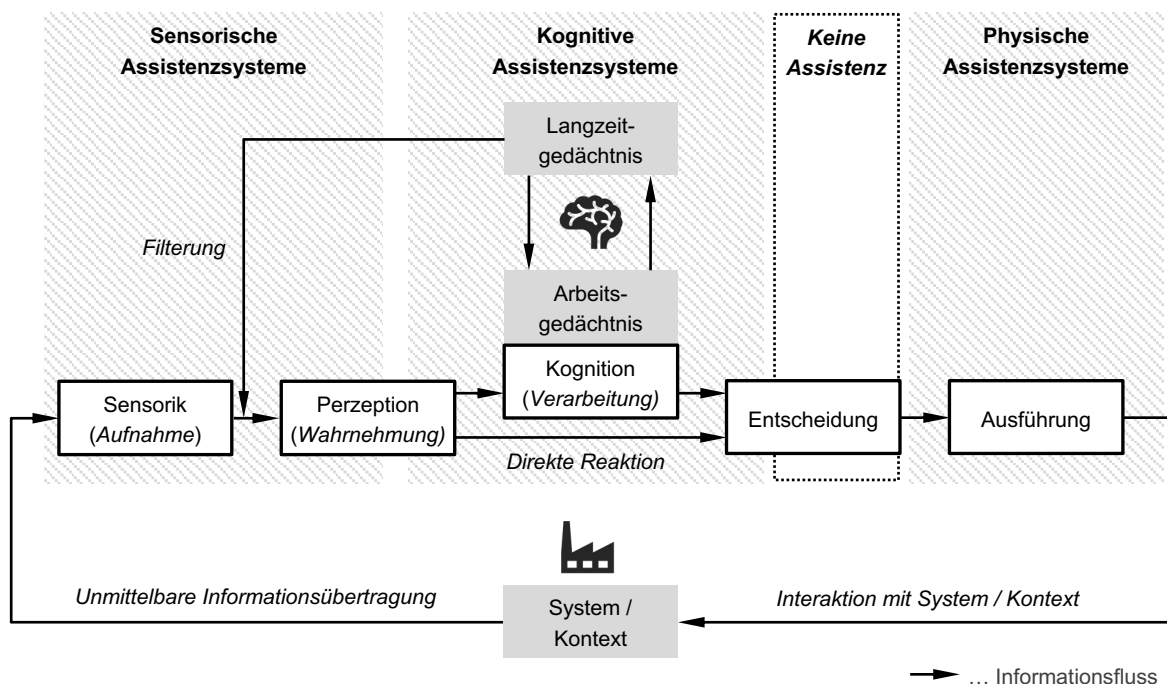


Abbildung 2.6: Assistenz der Informationsverarbeitung (abg. nach [Born20, S. 69])

Sensorische Assistenzsysteme unterstützen die Aufnahme und die Wahrnehmung von Informationen aus der Umwelt bzw. dem Kontext. Dazu nutzen sie Sensoren, um Daten aufzunehmen, zu aggregieren und für die Nutzer aufzubereiten, wodurch der menschliche Wahrnehmungsprozess entlastet wird. *Kognitive Assistenzsysteme* verbessern die Wahrnehmung und Verarbeitung von Informationen, indem sie z. B. Daten zur Arbeitsaufgabe, zum Produkt oder zu Stücklisten übersichtlich darstellen. Sie unterstützen damit indirekt die bewusste Entscheidung für Aktionen, verbessern aber auch unbewusste, direkte Reaktionen. *Physische Assistenzsysteme* unterstützen die tatsächliche Ausführung der Aktion durch mechanisch-motorisch entlastende Systeme wie Exoskelette [Kell19, S. 442], [Schm20, S. 13ff.].

Assistenzsysteme erlauben damit eine weitreichende Unterstützung der Informationsverarbeitungsprozesse der Arbeitskräfte. Allerdings unterstützen sie die *Entscheidung* für Aktionen nur indirekt und führen sie nicht durch. Dies ist mit Blick auf die Schwankungen der menschlichen Leistungsfähigkeit und die steigenden Produkt- und Prozesskomplexitäten (vgl. Unterabschnitt 2.2.1) problematisch. Durch eine Fehlentscheidung, wie z. B. die Nutzung eines falschen Werkzeugs, verringert sich direkt die Qualität des Prozesses. Um die Entscheidung direkt zu unterstützen, sollten Digitale Assistenzsysteme Inhalte der Arbeitsaufgabe mit aufgenommenen Kontextinformationen verbinden und so autonom Aktionen vorschlagen oder restriktiv Aktionen ausschließen können.

2.3.2 Inhaltserzeugung und Kontextverwendung

Eine dynamische Informationsbereitstellung mit Digitalen Assistenzsystemen zeigt die Informationen zum Produkt und Arbeitsvorgang situationsgerecht und bedarfsorientiert an, um kognitive Prozesse zu entlasten [Hala18, S. 145], [Jesk21, S. 149]. Die Informationen müssen dazu zuerst redaktionell als Inhalt für die Digitalen Assistenzsysteme erzeugt und dann über die Verarbeitung des aktuellen Kontextes situationsgerecht bereitgestellt werden. Die Inhalte können entweder statisch oder generisch erzeugt werden. Die Assistenzsysteme unterstützen die Erstellung über Eingabemöglichkeiten oder erstellen die Inhalte idealerweise automatisiert, um manuelle Aufwände zu reduzieren. Die Assistenzsysteme müssen zusätzlich Kontextänderungen über Nutzereingaben oder Sensoren erfassen, die Inhalte filtern und dann so verwenden, dass sie kognitiv einfach aufgenommen werden oder für weitere Unterstützungstechnologien genutzt werden können [Hinr16, S. 5]. Abbildung 2.7 verdeutlicht die Möglichkeiten der Inhaltserzeugung und Kontextverwendung, die im Folgenden näher beschrieben werden.

Inhaltserzeugung Als Inhalte sollen Daten und Informationen bezeichnet werden, die über redaktionelle Prozesse in das benötigte Format des Digitalen Assistenzsystems überführt werden. Der Redaktionsprozess beschreibt die Planung, Erstellung, Prüfung und Finalisierung der Inhalte durch die Arbeitsvorbereitung [Melu22, S. 25]. Typische Inhalte sind Arbeitsanweisungen, technische Illustrationen oder CAD-Modelle sowie erweiterte Stücklisten, die wichtige Attribute mit zu montierenden Bauteile verbinden. Die Inhaltserzeugung erfolgt idealerweise vollständig, fehlerfrei und aufwandsarm [Melu22, S. 51].

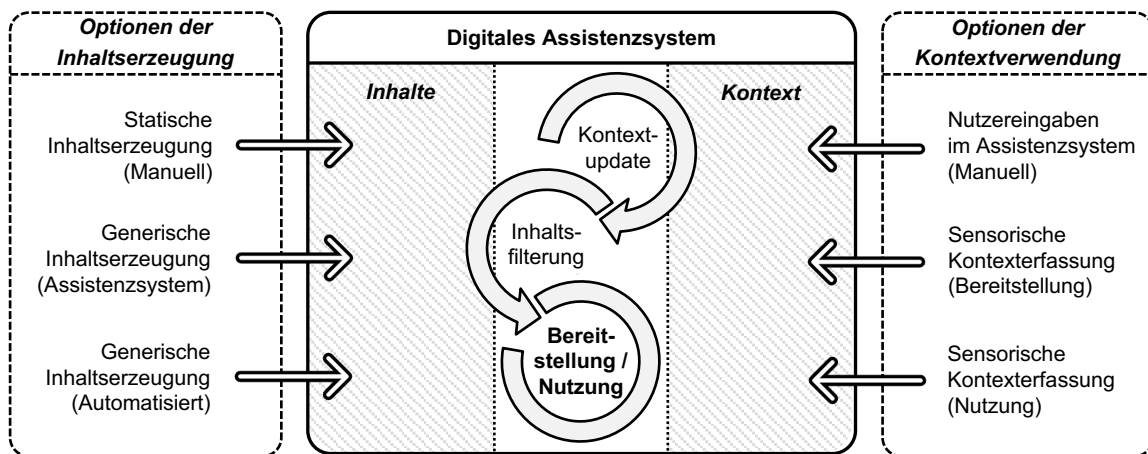


Abbildung 2.7: Inhaltserzeugung und Kontextverwendung in Assistenzsystemen

Häufig werden die Inhalte für statische Anwendungsfälle mit hohem Redaktionsaufwand *manuell* erzeugt, da keine flexible Nutzung für verschiedene Szenarien vorgesehen wird. Für eine Fertigungslinie mit festen Arbeitsplätzen und hohem Wiederholungsgrad ist dieser Ansatz sinnvoll. Für eine variantenreiche Baustellenmontage mit beweglichen Arbeitskräften wird jedoch ein flexibles Assistenzsystem benötigt, das Inhalte *generisch* mit Hilfe vorgesehener Funktionen erzeugen kann. Optimalerweise wird der Prozess über Schnittstellen zu Unternehmenssystemen (ERP, PDM, PLM) unterstützt, um Inhalte (teil-) *automatisiert* zu erzeugen und zu verknüpfen.

Kontextverwendung Unter Kontext versteht man im Allgemeinen alle Informationen, die die aktuelle Situation eines Objektes beschreiben [Dey00, S. 4]. Dazu gehören unter anderem örtliche und zeitliche Informationen sowie Informationen zu Zustand und Aktivität des Objektes und Bezüge zu weiteren Objekten [Bert21, S. 38]. Abbildung 2.8 visualisiert die Objekte und ihre Zusammenhänge im Kontext der manuellen Produktion und definiert dazu Kontextinformationen. In einer manuellen Montage sind die *Arbeitskraft*, die *Werkzeuge*, das *Produkt* und die *Arbeitsaufgabe* die zu beachtenden Objekte. Das zentrale Bezugselement ist die *Arbeitsaufgabe* [Dey00, S. 7], die Anforderungen an den Zustand der Arbeitskräfte, Werkzeuge und Produkte stellt. Die Werkzeuge, Arbeitskräfte und Produkte müssen diese Anforderungen erfüllen, um eine hohe Prozessqualität zu gewährleisten. Dazu stellt die *Arbeitsaufgabe* Prozessanforderungen zu Aufgabenorten und Aufgabenparametern in Abhängigkeit vom aktuellen Prozessfortschritt und Bearbeitungsstatus. Die *Arbeitskraft* muss die korrekte Arbeitsposition einnehmen und die passende Tätigkeit ausführen, um den Prozess zu bearbeiten. Dabei beeinflusst sie die bereits geleistete Arbeitszeit und die aktuelle Leistungsfähigkeit. Das im Prozess verwendete *Werkzeug* muss die korrekten Werkzeugpositionen einnehmen und die richtigen Prozessparameter verwenden. Es kann entweder im Eingriff oder pausiert sein und ist abhängig vom Wartungsintervall. Als Prozessergebnis muss das *Produkt* die richtigen Qualitätsmerkmale erfüllen und mit den korrekten Bauteilpositionen gefertigt sein. Es kann sich entweder in Bearbeitung befinden oder pausiert sein und erfüllt zeitliche Anforderungen durch den aktuellen Baufortschritt. Für eine Überprüfung oder Verbesserung der Prozessqualität müssen die Kontextinformationen der Objekte erfasst und verwendet werden.

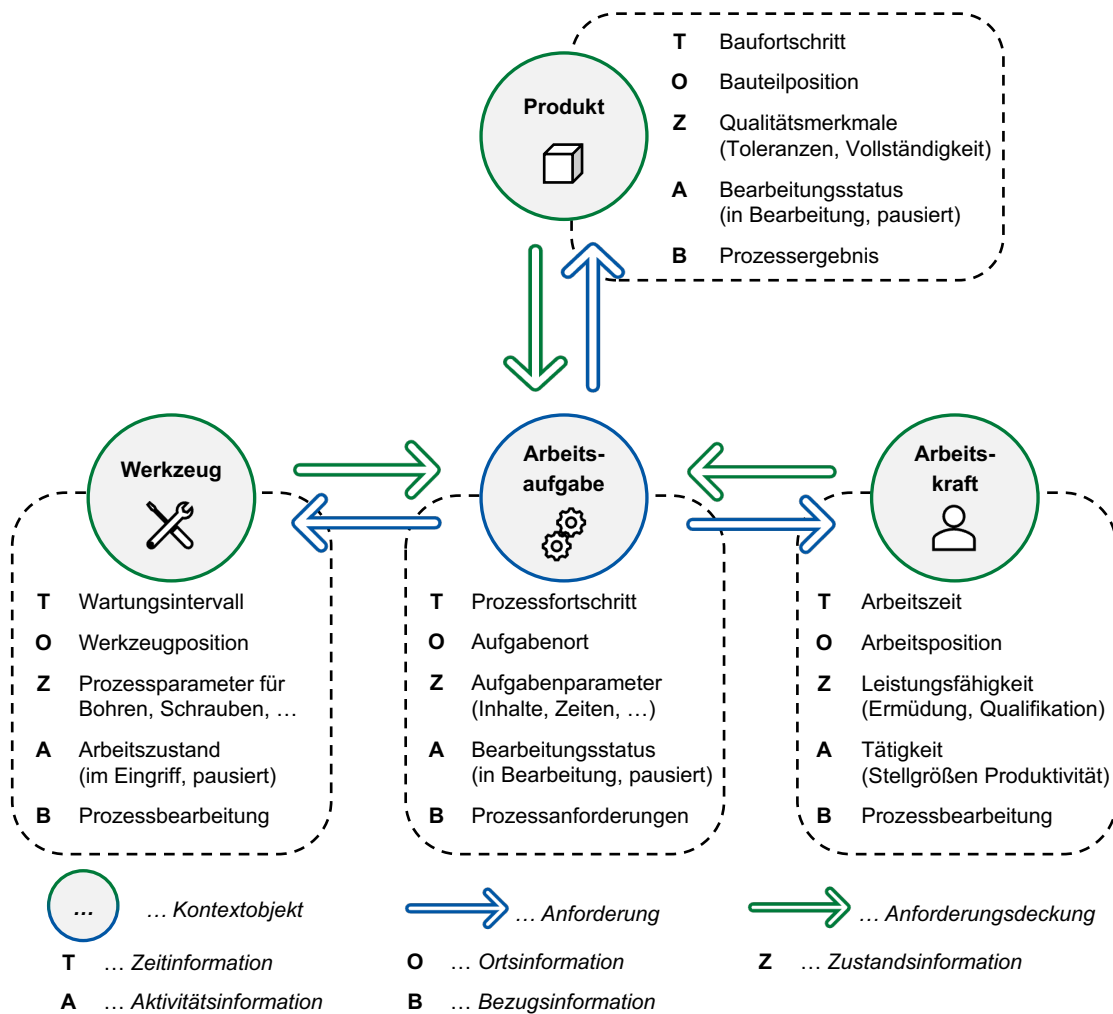


Abbildung 2.8: Zusammenhänge im Kontext der manuellen Produktion

Viele Assistenzsysteme erfassen den Fortschritt des Arbeitsplans lediglich über *manuelle Eingaben* der Nutzer. Zur Erfassung qualitätsrelevanter Kontextinformationen müssen zusätzlich Sensoren in das Assistenzsystem eingebunden werden [Born20, S. 198]. Die Verwendung der sensorisch erfassten Kontextinformationen teilt sich in die *Bereitstellung* und *Nutzung* der Daten. Die Bereitstellung ist die Darstellung der aufbereiteten Informationen im Anzeigemedium der Arbeiter. Die Nutzung hingegen ist die Ableitung von Handlungen (*Entscheidung*) für die Werker oder auch die Weiterleitung und Informationsverarbeitung durch Maschinen oder vernetzte Betriebsmittel wie Smarte Handwerkzeuge (*Entscheidung* und *Ausführung* von Aktionen) [Jesk21, S. 13]. Dazu müssen die Sensoren in das Digitale Assistenzsystem eingebunden und die zu steuern den Maschinen und Werkzeuge integriert werden. Die Fusion der Sensorik und Aktorik und ihre Steuerung ist in der manuellen Produktion eine komplexe Aufgabe. Die entstehenden hybriden Systeme ermöglichen es jedoch, mentale und physische Tätigkeiten zu unterstützen [Weid16, S. 55].

2.3.3 Werkerassistenzsysteme

Werkerassistenzsysteme sind Digitale Assistenzsysteme, die Arbeitskräfte in der Produktion unterstützen. Je nach Anwendungsfall und Branche kann die Ausgestaltung der Systeme sehr variieren. Mark [Mark21] und Zheng [Zhen24] führen systematische Analysen zum Stand der Technik und zukünftiger Entwicklungen durch und greifen damit eine Vielzahl von Lösungen aus Forschung und Industrie auf. Abbildung 2.9 zeigt eine Auswahl der untersuchten Assistenzsysteme und ordnet diese hinsichtlich der implementierten Inhaltserzeugung und Kontextverwendung ein. Im Folgenden werden die Lösungen beschrieben.

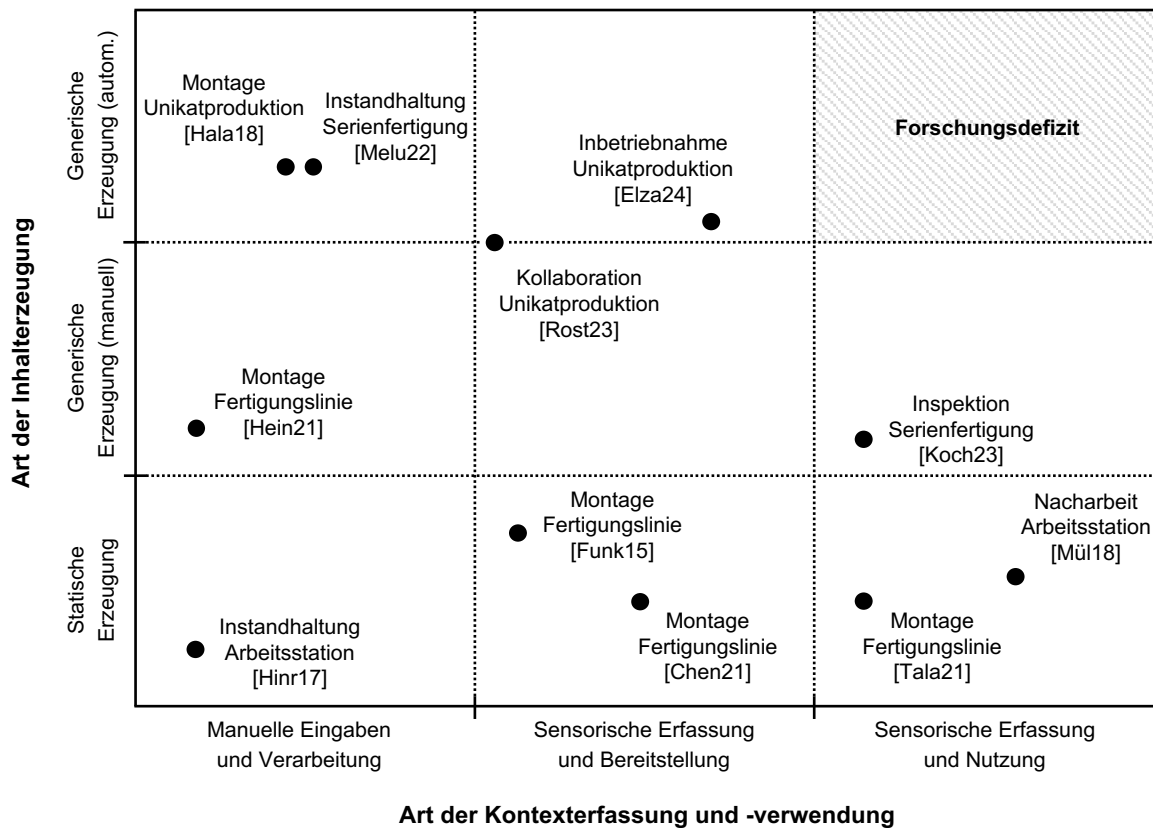


Abbildung 2.9: Überblick zu digitalen Werkerassistenzsystemen

Manuelle Eingaben und Kontextverarbeitung Hinrichsen et al. entwickeln ein Assistenzsystem, das statisch erzeugte Instandhaltungsaufgaben über einen Projektor auf die Arbeitsstation der Werker überträgt [Hir17, S. 1574]. Heinz et al. implementieren ein Assistenzsystem für mehrere Arbeitsstationen, das Funktionen zur Erstellung von Arbeitsaufgaben beinhaltet und diese über Projektion oder Bildschirme schrittweise und an die individuelle Mitarbeiterleistung angepasst bereitstellt [Hein21, S. 11f.]. Die Inhaltserzeugung wird jedoch von Prozessexperten als ressourcenintensiv bewertet [Hein21, S. 16]. Für eine örtlich flexiblere Unterstützung entwickelt Halata ein Augmented-Reality-gestütztes Assistenzsystem, das Montagearbeiter in der Unikatproduktion schrittweise mit übersichtlichen Arbeitsinhalten versorgt [Hala18, S. 55ff.]. Halata betrachtet weiterhin den Aufwand der Inhaltserzeugung und stellt fest, dass dieser nicht höher sein sollte als die Einsparung in den direkten Bereichen. Dazu entwickelt er Funktionen, um Inhalte wie Arbeitslisten und Abstandsmaße automatisch aus Stücklisten und Produktdaten

zu erzeugen [Hala18, S. 67ff.]. Meluzov entwickelt für die Wartung und Instandhaltung einerseits ein Assistenzsystem, das Informationen in Augmented Reality visualisiert und andererseits Assistenzsysteme zur (teilautomatisierten) Erstellung und Verwaltung der Inhalte [Melu22, S. 50]. Er zeigt damit zusätzliche Einsparungen in den indirekten Bereichen auf [Melu22, S. 108].

Alle vier Assistenzsysteme verwenden Schaltflächen, um den Produktionskontext über manuelle Eingaben zu verarbeiten und die Inhalte für die aktuelle Arbeitsaufgabe zu filtern. Halata und Meluzov erfassen zudem die relative Position des Tablets, um die Informationsdarstellung an die Nutzerposition anzupassen [Hala18, S. 83], [Melu22, S. 86]. Die Arbeitsproduktivität wird bei allen Systemen gesteigert. Halata stellt insbesondere für komplexe Produkte Einsparungen von ca. 30 % in der Informationshandhabung fest [Hala18, S. 143].

Sensorische Erfassung und Kontextbereitstellung Chen et al. nutzen ein Kamerasystem, um den Baufortschritt des Produktes zu erfassen und einen Sprachassistenten, um auf Fragen der Nutzer zur Arbeitsaufgabe zu antworten [Chen21, S. 82118ff.]. Das Assistenzsystem visualisiert einen übergeordneten Montageplan über einen Bildschirm am Arbeitsplatz und stellt Bilder und Textinformationen zu Nutzerfragen bereit. Funk et al. verfolgen einen ähnlichen Ansatz und erfassen den Baufortschritt und die Handposition der Nutzer über eine Tiefenkamera [Funk15, S. 187]. Über ein Projektionssystem wird angezeigt, welches Bauteil aus dem Lager geholt werden soll und wo es zu montieren ist. Beide Assistenzsysteme sind arbeitsplatzgebunden und nutzen statische Inhalte. Um Kollaborationsprozesse im Schiffbau zu verbessern, gestaltet Rost Digitale Assistenzsysteme, die indirekte und direkte Bereiche miteinander vernetzen [Rost23, S. 107ff.]. Werker können damit Störungen am Bauteil sensorisch erfassen und mit lokalisierten Fotos dokumentieren, wodurch Bauleiter eine Aktion zur Störungsbehebung über das Assistenzsystem anweisen können. Dazu übernehmen die Assistenzsysteme Daten aus bestehenden Unternehmenssystemen und bereiten sie generisch auf. Elzalabany entwickelt ein Assistenzsystem, das die notwendigen Abnahmetests zur Inbetriebnahme von Schiffen über die Einbindung von Sensoren unterstützt [Elza24, S. 75ff.]. Zusätzlich zur Anbindung an Unternehmenssysteme entwickelt Elzalabany weitreichende Funktionen zur automatisierten Planung von Inbetriebnahmetests [Elza24, S. 107ff.].

Die erläuterten Assistenzsysteme nutzen interne oder externe Sensoren, um Informationen zum Kontext zu erfassen und für die Softwarefunktionen bereitzustellen. In den Montageassistenzsystemen wird insbesondere der Baufortschritt erfasst, um die Arbeitsinhalte automatisiert zu filtern. Funk et al. stellen deutliche Verbesserungen der Arbeitsproduktivität und Prozessqualität für Probanden mit kognitiven Beeinträchtigungen fest [Funk15, S. 190]. Die maritimen Assistenzsysteme nutzen die sensorische Kontexterfassung für Zusatzfunktionen, wodurch Rost eine Verringerung von 20 % in den Entstörzeiten erreicht [Rost23, S. 128] und Elzalabany eine Reduktion der Durchführungszeiten von Inbetriebnahmetests von 22 % feststellt [Elza24, S. 156].

Sensorische Erfassung und Kontextnutzung Koch et al. konzipieren ein Assistenzsystem, um manuelle Inspektionen im Flugzeugbau zu unterstützen und entwickeln dazu eine Softwareplattform, die smarte Messmittel, Lokalisierungstechnologien und Projektoren mit Datenbanken

und Nutzeranwendungen integriert [Koch23, S. 764ff.]. Die im Assistenzsystem angelegten Aufgabenorte der Inspektionen werden über die Projektoren kontextgerecht zur aktuellen Aufgabe in den Arbeitsbereich der Werker projiziert. Über die Positionserfassung der smarten Messmittel können die aufgenommenen Messwerte dokumentiert und zugeordnet werden. Talacio et al. entwickeln ein Assistenzsystem für einen Montagearbeitsplatz und integrieren dazu Projektoren, eine Kamera, ein Mikrofon und eine Nutzeranwendung [Tala21, S. 448 ff.]. Über die Kamera kann die Korrektheit und der Fortschritt eines Arbeitsschrittes erfasst werden. Das Assistenzsystem gibt Hinweise bei fehlerhaften Prozessschritten und visualisiert die nächsten Arbeitsinhalte automatisch. Müller et al. entwickeln analog ein Assistenzsystem für einen Nacharbeitsplatz und integrieren dazu zusätzlich ein Positionserkennungssystem und einen smarten Drehmomentschlüssel [Mül18, S. 145 f.]. Die statisch erzeugten Inhalte passen sich an die Produktvariante, den Fehlercode und das Qualifikationslevel der Arbeitskraft an. Der resultierende Arbeitsplan wird mit Hilfe der Anwendung und des Projektors visualisiert und über die Kamera und die Positionserkennungssysteme überprüft. Die Autoren deuten zusätzlich an, dass Prozessparameter für den Drehmomentschlüssel kontextabhängig konfiguriert werden können [Mül18, S. 144].

Die beschriebenen Assistenzsysteme erfassen Teile des Produktionskontextes sensorisch und nutzen die daraus erzeugten Informationen, um steuernd in den Prozess einzugreifen. Insbesondere die Positionserfassung der Messmittel und Werkzeuge erlaubt es, Messwerte genau zuzuordnen oder Prozessparameter wie die notwendigen Drehmomente abzuleiten. Die Autoren vermuten positive Auswirkungen auf Produktivität und Qualität, führen aber keine ausführlichen Evaluationen durch.

Forschungsdefizit Das Forschungsziel dieser Arbeit, den Produktionskontext sensorisch zu erfassen und zu nutzen und gleichzeitig die notwendigen Inhalte automatisiert zu erstellen, wird von keinem der untersuchten Assistenzsysteme erreicht. Wenige Arbeiten thematisieren explizit die automatisierte und generische Erzeugung der Arbeitsinhalte. Lediglich Halata [Hala18] und Meluzov [Melu22] entwickeln ausführliche Ansätze für das Informationsmanagement Digitaler Assistenzsysteme, mit denen Arbeitspläne (teil-)automatisiert erstellt werden können. Insbesondere die Assistenzsysteme mit sensorischer Kontexterfassung und -nutzung für die Aktionsauswahl oder Weiterleitung zu vernetzten Betriebsmitteln nutzen großteils eine statische Inhaltserzeugung. Gerade hier entsteht jedoch ein Mehraufwand, um Informationen, wie die Prozessparameter und Positionen von Werkzeugoperationen, zu erzeugen und den Arbeitsaufgaben und Produkten zuzuordnen. Viele der Assistenzsysteme betrachten außerdem stationäre Arbeitsplätze. Eine flexible Verarbeitung der Kontextinformationen für Großprodukte mit Baustellencharakter untersuchen lediglich Rost [Rost23] und Elzalabany [Elza24].

2.4 Smarte Handwerkzeuge

Smarte Handwerkzeuge sind digital aufgerüstete und handgeführte Werkzeuge, die Daten speichern, empfangen und / oder versenden können [Jain21, S. 151]. Über die Integration von Inhalten und Produktionskontexten können die Werkzeuge so verschiedene Funktionalitäten bereitstellen, um Arbeiter in manuellen Prozessen zu unterstützen. Unterabschnitt 2.4.1 stellt Funktionsbausteine und grundlegend resultierende Funktionen vor. Unterabschnitt 2.4.2 geht auf die Möglichkeiten der Integration von Inhalten und Informationen des Produktionskontextes ein, Unterabschnitt 2.4.3 ordnet dazu abschließend den aktuellen Stand der Technik Smarter Handwerkzeuge zum Bohren und Schrauben ein.

2.4.1 Grundlegende Funktionen

Die grundlegenden Funktionen Smarter Handwerkzeuge lassen sich aus den Funktionsbausteinen intelligenter Werkzeugmaschinen ableiten. Die Funktionsbausteine erzeugen durch eine Vielzahl von Sensoren, Aktoren und Recheneinheiten unterschiedliche Funktionen.

Die elementaren Funktionsbausteine intelligenter Werkzeugmaschinen sind nach Grosch et al. [Gros18, S. 23]:

- die Identifikation des individuellen und physischen Werkzeugzustandes,
- das Bereitstellen, Empfangen und Speichern von Daten,
- das Aufnehmen von prozessinternen Messgrößen und
- die Aktualisierung des aktuellen Aufenthaltsortes der Werkzeugspitze in Echtzeit.

Smarte Handwerkzeuge beinhalten diese Funktionsbausteine in unterschiedlichem Ausmaß. Die Möglichkeiten sind insbesondere über die Anzahl von Sensoren und Aktoren eingeschränkt. Diese steigern zwar den Umfang und die Genauigkeit der Funktionen, erhöhen allerdings auch das Gewicht und die Größe der Werkzeuge. Das steht im Widerspruch zu einer benutzerfreundlichen und ergonomischen Verwendung der Werkzeuge in manuellen Prozessen.

Durch die Verbindung der Funktionsbausteine mit externen Softwaresystemen ergeben sich Funktionen und Automatisierungsansätze für Smarte Handwerkzeuge, indem Inhalte und Kontextinformation bereitgestellt werden (vgl. Abbildung 2.10). Bspw. lassen sich aus dem aktuellen Werkzeugzustand und der letzten Werkzeugoperation Rückschlüsse auf die Maschine und auf die Prozessqualität ziehen [Bell24, S. 1]. Diese bilden die Grundlage, um Rückmeldungen für die Werker zu erzeugen und bereitzustellen (z.B. Werkzeug muss gewechselt werden oder Maschine muss gewartet werden) [Coll24, S. 6491]. Außerdem können die Werkzeugeingriffe und die verwendeten Prozessparameter automatisiert dokumentiert werden [Born20, S. 202]. Smarte Handwerkzeuge können zudem Prozessparameter empfangen und automatisch anpassen, um den aktuellen Kontextanforderungen der Arbeitsaufgabe zu entsprechen und dadurch fehlerhafte Werkzeugvorbereitungen zu vermeiden [Born20, S. 195]. Weitere Funktionalitäten sind denkbar und von der jeweiligen Tätigkeit und der sensorischen und aktorischen Ausstattung der Werkzeuge

abhängig. Ohne die Anbindung an externe Softwaresysteme zur Inhalts- und Kontextintegration können Smarte Handwerkzeuge ihre Funktionsbausteine nicht sinnvoll nutzen und bleiben weit hinter ihren Möglichkeiten zurück.

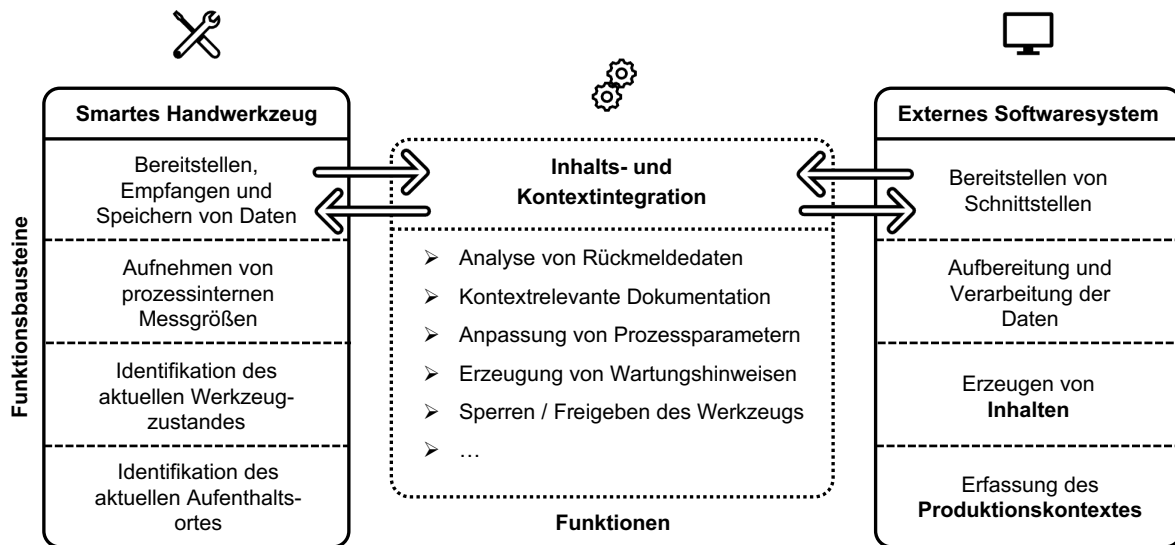


Abbildung 2.10: Inhalts- und Kontextintegration in Smarten Handwerkzeugen

2.4.2 Integration von Inhalten und Produktionskontexten

Im Vergleich zu intelligenten Werkzeugmaschinen sind Smarte Handwerkzeuge sehr klein, so dass eine Anbindung an externe Softwaresysteme notwendig ist, um die benötigten Berechnungen durchzuführen und die beschriebenen Funktionen bereitzustellen. Um sinnvolle Aktionen zu ermöglichen, müssen die Werkzeuge die vorliegende Aufgabe, den individuellen Werkzeugzustand und den aktuellen Produktionskontext verarbeiten (vgl. [Rose15, S. 602] zu teilautonomen Produktionsmitteln).

Dazu müssen die Softwaresysteme die Kommunikation und Verarbeitung von Daten gewährleisten, um Inhalte für die Werkzeuge zu erzeugen und den Produktionskontext zu erfassen sowie inhaltlich zu filtern [Sett22, S. 2], [Born20, S. 196]. Die Integration der Inhalte und des Produktionskontextes kann über verschiedene Modi erfolgen und ist eine bestehende Entwicklungsherausforderung [Weid15, S. 62], die die Flexibilität und Implementierung der Smarten Handwerkzeuge maßgeblich beeinflusst.

Inhaltsintegration Es kann zwischen einer statischen, flexiblen oder generischen Inhaltsintegration unterschieden werden. Die Inhalte sind *statisch* integriert, wenn sie für einen bestimmten Anwendungsfall fest in den Softwarecode für die Werkzeuge einprogrammiert sind. So kann an einem Arbeitsplatz ein definierter Prozess wiederholt mit den Werkzeugen durchgeführt werden. Die Inhalte sind *flexibel* integriert, wenn sie für einen größeren Anwendungsbereich fest in den Softwarecode der Werkzeuge einprogrammiert sind. Somit decken die Werkzeuge verschiedene Prozesse ab und können durch die Integration der Kontextinformationen auf den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden. Eine *generische* Inhaltsintegration bedeutet, dass Smarte

Handwerkzeuge im Rahmen ihrer Einsatzmöglichkeiten für beliebige Anwendungsfälle verwendet werden können. Dazu werden die Inhalte nicht fest im Softwarecode verankert, sondern können während des Betriebs übergeben oder angepasst werden. Das ist bspw. bei der Vernetzung mit Digitalen Assistenzsysteme der Fall, die für verschiedene Anwendungsfälle Inhalte für die Werkzeuge erzeugen und bereitstellen können.

Kontextintegration Smarte Handwerkzeuge benötigen Informationen über den aktuellen Produktionskontext (wie z.B. den Ort des Werkzeugeingriffs in Relation zum Produkt), um smarte Funktionen zu verwenden. Diese Kontextintegration erfolgt manuell oder automatisch. Bei der *manuellen* Kontextintegration filtern die Nutzer die Inhalte selbstständig, um Prozessparameter auf dem Werkzeug einzustellen oder Werkzeugoperationen zu dokumentieren. Bspw. kann auf smarten Schraubsystemen ein Drehmoment eingestellt und nach dem Eingriff über eine Schnittstelle ausgegeben werden, wodurch Nutzer eine Rückmeldung erhalten. Mit Hilfe von Sensoren und Aktoren ist eine *automatische* Kontextintegration möglich, in der ein Softwaresystem die erfassten Daten auswertet und nutzt. Hier lässt sich die Richtung der Datenübertragung unterscheiden. Teilt ein Smartes Handwerkzeug die Kontextdaten unidirektional mit der Software, werden Werkzeugoperationen situationsgerecht *dokumentiert*. Wertet die Software die Kontextdaten zusätzlich aus und übermittelt Daten an das Smarte Handwerkzeug zurück, unterstützt die automatische Kontextintegration die *Entscheidung* für Aktionen der Nutzer, indem bspw. automatisch Prozessparameter auf dem Werkzeug eingestellt werden.

2.4.3 Smarte und handgeführte Bohr- und Schraubsysteme

Der Großteil der Entwicklungen Smarter Handwerkzeuge bezieht sich auf die Montagetätigkeiten Bohren und Schrauben. Deswegen werden im Folgenden aktuelle smarte und handgeführte Bohr- und Schraubsysteme verschiedener Industrien vorgestellt. Abbildung 2.11 zeigt einen Überblick und ordnet die Lösungen hinsichtlich der implementierten Art der Inhalts- und Kontextintegration ein. Neben den aufgeführten Systemen gibt es eine Vielzahl Smarter Handwerkzeuge für chirurgische Eingriffe in der Humanmedizin (bspw. [Dari03], [Ivan24]). Diese werden im Hinblick auf die industrielle Produktion nicht berücksichtigt.

Manuelle Kontextintegration Parmar et al. entwickeln Smarte Handwerkzeuge zum Bohren, die mit einem personalisierten Datenhandschuh gekoppelt werden [Parm18, S. 1]. Über den Bildschirm auf dem Handschuh wählen die Werker die Werkzeugart für die aktuelle Arbeitsaufgabe aus. Das Werkzeug wird nur freigegeben, wenn die Qualifikation und Sicherheitsausrüstung des Nutzers den Anforderungen entspricht. Fehlhandhabungen der Werkzeuge soll durch Überprüfung der Arbeitskraftinformationen reduziert werden. Die Systeminhalte werden statisch für einen Anwendungsfall erzeugt. Dörr et al. entwickeln Sensorpakete, mit denen sie akkubetriebene Bohr- und Schraubwerkzeuge aufrüsten, um Rückmeldedaten zu den Werkzeugoperationen zu erzeugen und zu dokumentieren [Dör19, S. 799ff.]. Der aktuelle Kontext wird manuell erfasst und die Sensordaten werden dokumentiert und anhand statischer Testinhalte ausgewertet. Umer et al. integrieren smarte Schraubwerkzeuge mit einer Softwareanwendung, um Daten der Werk-

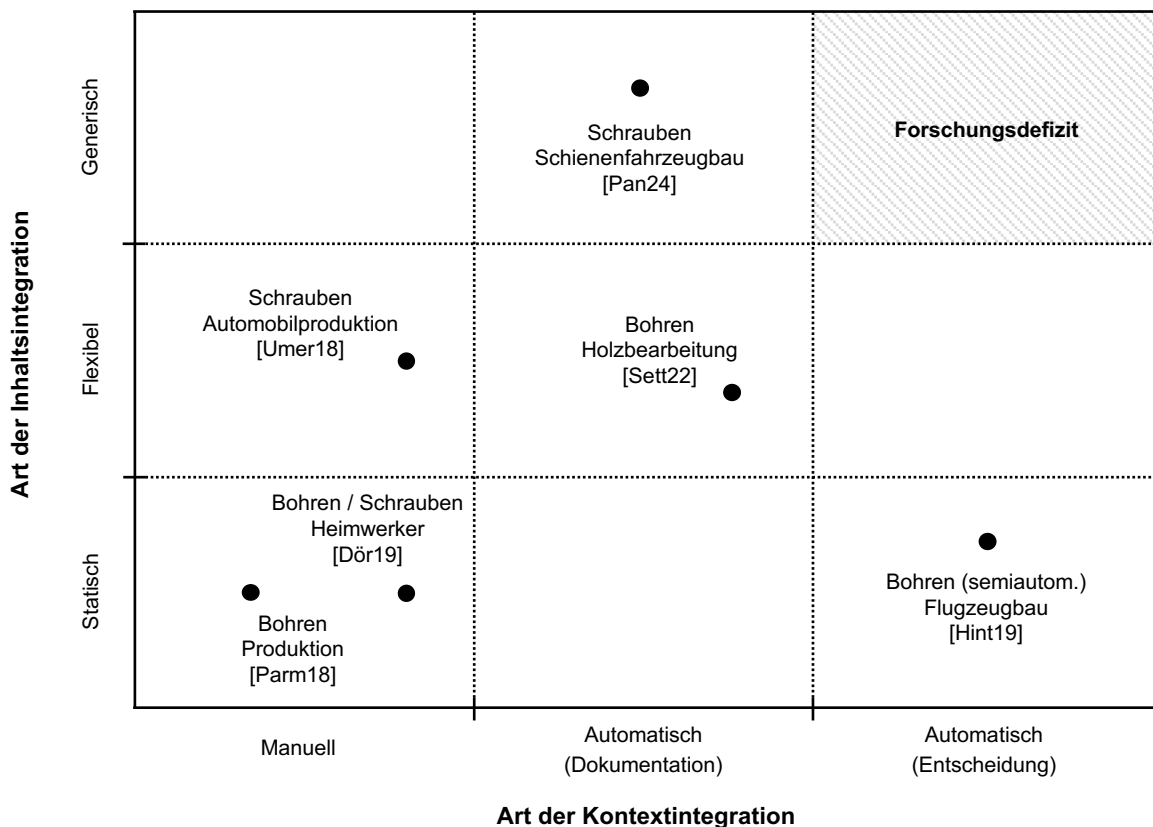


Abbildung 2.11: Überblick zu smarten, handgeführten Bohr- und Schraubsystemen

zeugoperationen in einer Datenbank zu dokumentieren und auszuwerten [Umer18, S. 1359f.]. Die Soll-Prozessparameter des aktuellen Kontextes werden manuell vom Werker in die Software eingegeben, um einen Abgleich der dokumentierten Drehmomente der Schrauber zu ermöglichen. Die Inhalte können flexibel am Arbeitsplatz erstellt werden.

Die beschriebenen Systeme sollen die Prozesssicherheit erhöhen und die Transparenz der Werkzeugeingriffe erhöhen. Keiner der Autoren führt eine Evaluation durch, um die Verbesserungen zu überprüfen.

Automatische Kontextintegration zur Dokumentation Settimi et al. rüsten eine kabelgebundene Bohrmaschine mit inertialen Messsensoren aus und integrieren das System mit einer Augmented-Reality-Brille und einer Softwareanwendung [Sett22, S. 2ff.]. Die Brille visualisiert den Nutzern den Bohrwinkel im Werkstück, erkennt die Position und Ausrichtung des Werkzeugs und zeigt Echtzeit-Rückmeldungen zur Bohrtiefe der Eingriffe an. Die Daten werden anschließend dokumentiert und in Relation zum Kontext ausgewertet. Das Gesamtsystem kann flexibel genutzt werden, da die Inhalte nach einer initialen Aufbereitung über die Augmented-Reality-Anwendung heruntergeladen werden können. Pan et al. integrieren smarte Schraubsysteme mit einer Handy-Applikation und einer Softwareanwendung, um Inhalte für Werker zu visualisieren und Daten vom Werkzeug zu dokumentieren [Pan24, 42 ff.]. Inhalte wie Arbeitsaufgaben und notwendige Prozessparameter werden in der Serveranwendung gespeichert. Der aktuelle Kontext wird über die Auswahl der Arbeitsaufgabe auf der Handy-Applikation integriert, um die Daten der Schrauboperationen zu dokumentieren.

Beide Systeme sollen die Prozessqualität steigern und die Kosten senken [Pan24, S. 48]. Die möglichen Verbesserungen werden jedoch nicht im Vergleich zu konventionellen Prozessen evaluiert.

Automatische Kontextintegration zur Aktionsauswahl Hintze et al. entwickeln smarte Bohrvorschubeinheiten und Handwerkzeuge und verbinden diese mit einem stationären Digitalen Assistenzsystem [Hint19, S. 5ff.]. Die Werkzeuge werden über ein Positionserkennungssystem im Raum lokalisiert und können so kontextgerecht und automatisiert mit Prozessparametern gespeist werden. Nach jeder Werkzeugoperation werden die Rückmeldedaten automatisch dokumentiert. Das System ist abhängig von der Nutzung von Bohrschablonen im Flugzeugbau und gibt den Werkern die nächste durchzuführende Werkzeugoperation vor. Der stationäre Charakter und die statische Inhaltsintegration schränkt die Nutzungsflexibilität ein. Die Ergebnisse sind vielversprechend, werden aber nicht in ihrer Zielgrößenwirkung evaluiert.

Forschungsdefizite Das Forschungsziel dieser Arbeit, die Inhalte generisch zu integrieren und den Kontext automatisch auszuwerten, um autonome Entscheidungen für zu nutzende Prozessparameter zu treffen, wird von keinem der untersuchten Systeme erfüllt. Hintze et al. [Hint19] integrieren als einzige den aktuellen Produktionskontext zur Steuerung von Prozessparametern der Werkzeuge. Das System arbeitet jedoch mit statischen Inhalten und ist in der Flexibilität eingeschränkt. Die Systeme der übrigen Autoren werden hauptsächlich zur Dokumentation der Werkzeugoperationen genutzt. Pan et al. [Pan24] entwickeln das flexibelste System und ermöglichen eine generische Inhaltsintegration über eine Softwareanwendung. Bemerkenswert ist, dass keine der Lösungen ausführlich zur Wirksamkeit evaluiert wird, was darauf schließen lässt, dass die Systeme sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium befinden. Insbesondere die manuelle Kontextintegration ist dabei fehleranfällig und wenig produktiv. Smarte Handwerkzeuge sind daher auf die automatische Integration von Inhalten und Kontexten dringend angewiesen, da ihre Anwendung sonst die vorhandenen Potenziale nur zu einem kleinen Teil ausschöpfen kann.

2.5 Softwareplattformen

Softwareplattformen sind im industriellen Internet der Dinge der Kern von Digitalisierungsmaßnahmen und ermöglichen es, smarte Produktionsmittel und digitale Anwendungen funktional zu vernetzen. Sie beinhalten nach [Firo20, S. 175]:

- Schnittstellen zur Datenübertragung,
- Datenbanken,
- Funktionen zur Datenaufbereitung und -verarbeitung (eng. Services),
- Funktionen zur Visualisierung der Datenpakete und
- Funktionen zur Bereitstellung von Softwareanwendungen (bspw. Digitale Assistenzsysteme).

Unterabschnitt 2.5.1 erläutert die Grundlagen zur Modellierung und Übertragung von Daten. Unterabschnitt 2.5.2 erörtert den Stand der Technik von Plattformarchitekturen und ihre Defizite.

2.5.1 Datenmodellierung und -übertragung

Informationen zwischen Softwaresystemen werden als Datenpakete versendet. Um die Informationen und deren Zusammenhänge sinnvoll auswerten zu können, sollten die Daten in Form von standardisierten und repräsentativen Datenmodellen abgebildet sein [Bert21, S. 29]. Die Datenmodelle erlauben verschiedenen Anwendungen und Systemkomponenten, miteinander zu kommunizieren und logische Funktionalitäten bereitzustellen [Rupp18, S. 4]. Die Modellierung erfolgt in der Regel über die Nutzung hierarchischer Notationen, die Schlüssel-Wert-Paare oder geordnete Listen unterstützen, um verschiedene Eigenschaften und Zusammenhänge von Prozessen oder Komponenten eindeutig zu beschreiben.

Sind die Daten sinnvoll modelliert, können sie zwischen Maschinen und Anwendungen übertragen werden. Das international standardisierte OSI-Referenzmodell (eng. Open Systems Interconnection) teilt die Übertragung in vereinfachter Form in fünf unabhängige Schichten ein (vgl. Abbildung 2.12). Dazu zählen in aufsteigender Reihenfolge die physikalische Schicht, die Sicherungsschicht, die Netzwerkschicht, die Transportschicht und die Anwendungsschicht. Im Senderpaket muss ein Datenpaket alle Schichten von der Anwendung bis zur physikalischen Übertragung durchlaufen, um von einem System ins nächste übermittelt zu werden. Im Empfängersystem durchläuft ein Paket die Schichten wiederum in umgekehrter Reihenfolge, bis es die Anwendung erreicht. Den einzelnen Schichten sind Protokolle zugeordnet, die definierte Regeln zur Kommunikation beinhalten [Schr16, S. 3ff.].

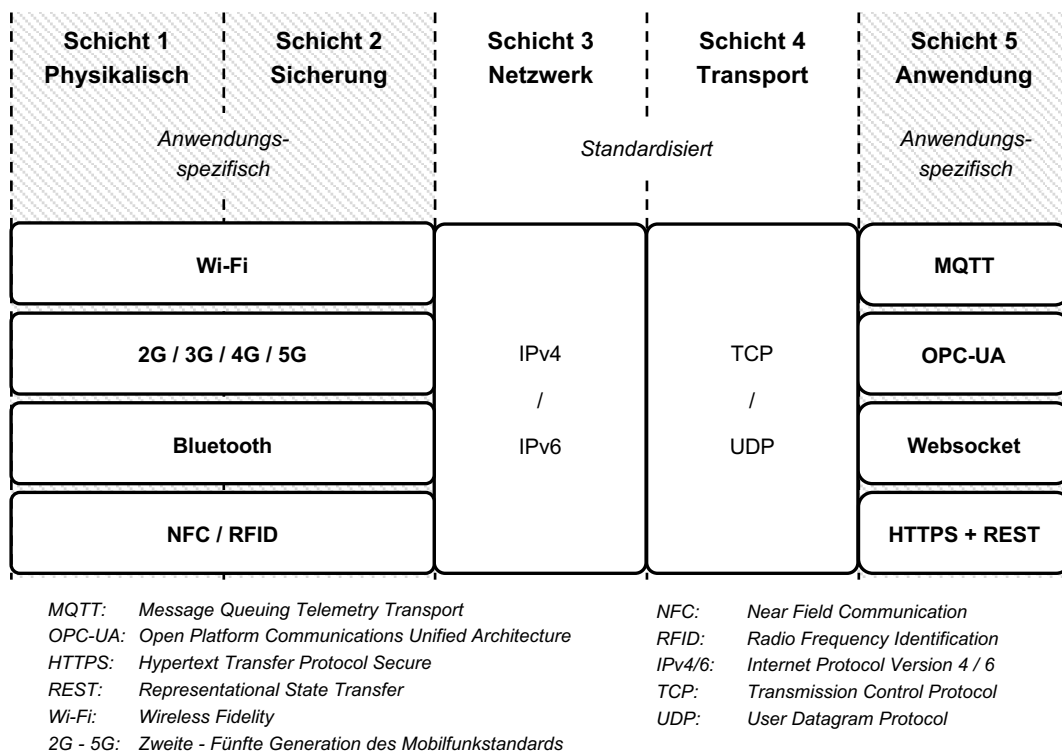


Abbildung 2.12: Netzwerkprotokolle im Schichtmodell (abg. nach [Firo20, S. 111])

Die Zusammenstellung der Protokolle wird als Protokoll-Stack bezeichnet und ist entscheidend für die Zielfunktionen zu integrierender Anwendungen und Systeme. Die Protokolle der Anwendungsschicht beeinflussen u.a. die Struktur, Verschlüsselung, Größe und Latenz der Datenpakete.

Die Protokolle der physikalischen Schicht und Sicherungsschicht bestimmen die Übertragungstechnologie und beeinflussen damit u.a. die Latenz, Reichweite, Sicherheit und den Energieverbrauch der Übertragung [Firo20, S. 111, S. 161ff.]. Für die funktionsgerechte Entwicklung von Digitalisierungsmaßnahmen in der Industrie sind demnach die Protokolle der Anwendungsschicht, der physikalischen Schicht und der Sicherungsschicht entscheidend und damit *anwendungsspezifisch*. Die Netzwerk- und Transportschicht ist in der Regel standardisiert. Im unteren Teil von Abbildung 2.12 sind wichtige Netzwerkprotokolle in das Schichtmodell eingeordnet.

2.5.2 Plattformarchitekturen im Internet der Dinge

Je nach physischer Umgebung und geplanter Funktionalität der zu vernetzenden Produktionsmittel und Anwendungen ergibt sich eine Vielzahl von Anforderungen an Softwareplattformen. Verschiedene Referenzarchitekturen für Softwareplattformen im industriellen Internet der Dinge erleichtern es den Entwicklern, wichtige Softwaremodule und Schnittstellen zu schaffen. Die ISO-Norm 30141 beschreibt eine entitätenbasierte Architektur, die physische und digitale Komponenten und ihre Verbindungen definiert [ISO18, S. 42f.]. Die Komponenten erfüllen verschiedene Aufgaben zur Interaktion mit Nutzern, mit Objekten, mit Netzwerken und zur Handhabung von Anwendungen, Funktionen und Ressourcen. Die Referenzarchitektur bietet einen Rahmen für die Entwicklung und Integration, beschreibt die einzelnen Komponenten jedoch nicht im Detail.

Firouzi et al. beschreiben eine Architektur mit verschiedenen Ebenen, die spezifischen Funktionen der Plattform entsprechen [Firo20, S. 175ff.]. Abbildung 2.13 stellt die Funktionsebenen dar. Die *Datenintegration* ermöglicht den Austausch von Daten zwischen Anwendungen und Geräten über Schnittstellen. Die *Datenspeicherung* bewahrt die ausgetauschten Daten und die *Datenverarbeitung* stellt Softwaremodule bereit, um auf die Datenströme zu reagieren. Die *Visualisierung und Kontrolle* erlaubt es, Datenpakete darzustellen und zu überprüfen. In der Funktionsebene *Gerätemanagement* können Nutzer alle vernetzten Produktionsmittel einsehen und konfigurieren. Als Querschnittsfunktion muss die Plattform alle Ressourcen, Schnittstellen und Anwendungen bereitstellen, entsprechend der Nachfrage skalieren und überwachen (*Orchestrierung*).

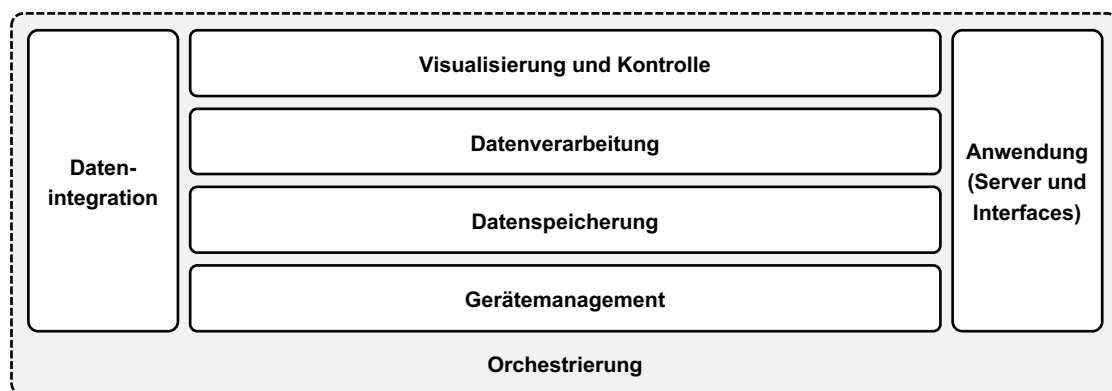


Abbildung 2.13: Funktionsebenen einer Softwareplattform i.A.a. [Firo20, S. 175]

Plattformarchitekturen beschreiben die verschiedenen Komponenten und Funktionen auf einem hohen Abstraktionsniveau, um individuelle Anpassungen zu ermöglichen. Allerdings wird die

Implementierung durch diesen niedrigen Detailgrad gleichermaßen erschwert. In der Industrie besteht ein umfassendes Verständnis dafür, dass es sinnvoll ist, smarte Produktionsmittel digital zu vernetzen. Gleichzeitig mangelt es jedoch an der Umsetzung dieser Maßnahmen. Eine detaillierte und doch generische Definition einer Plattform zur Integration von Smarten Handwerkzeugen und Digitalen Assistenzsystemen würde dieses Problem verbessern. Dazu müsste eine Softwareplattform mit einzelnen Schnittstellen, Datenübertragungsprotokollen und Softwaremodulen so definiert werden, dass sie für eine Vielzahl an Anwendungsfällen sinnvoll ist. Gleichzeitig sollte ein Vorgehensmodell entwickelt werden, das eine Implementierung der einzelnen Module ausgehend von den Zielfunktionen des geplanten Systems beschreibt, um den industriellen Transfer zu verbessern.

2.6 Anforderungen an die Gesamtentwicklung

Im Folgenden werden die aus dem Stand der Technik resultierenden Anforderungen an die Gesamtentwicklung zusammengefasst und festgehalten.

Produktionsmanagement Das Produktivitäts- und Qualitätsmanagement soll durch die Integration Smarter Handwerkzeuge und Digitaler Assistenzsysteme unterstützt werden. Dazu soll das Gesamtsystem die Arbeitsproduktivität der Werker verbessern, indem wichtige Informationen einfach und zum aktuellen Kontext gefiltert dargestellt werden. Gleichzeitig soll dadurch ein Mehraufwand für die Arbeitsvorbereitung vermieden werden. Weiterhin soll das Gesamtsystem die Qualität der manuellen Arbeitsprozesse steigern, indem Prozessfehler durch ein digitales Poka-Yoke-System verhindert werden. Außerdem sollen die spezifischen Dokumentationsanforderungen des Flugzeugbaus beachtet und unterstützt werden.

Manuelle Prozesse und menschenzentrierte Entwicklung In manuellen Arbeitsprozessen besteht ein Zielkonflikt zwischen der effektiven Vermeidung von Prozessfehlern und der produktiven Informationsbeschaffung für Werker. Um diesen Konflikt systematisch zu verbessern, soll eine Prozessanalyse und eine Produktivitäts- und Qualitätsanalyse für ein Anwendungsszenario im Flugzeugbau durchgeführt werden. Außerdem sollen die Anforderungen der Werker untersucht werden. Dazu müssen diese fortlaufend partizipatorisch in die Entwicklung einbezogen werden.

Digitale Assistenzsysteme und Smarte Handwerkzeuge Die Digitalen Assistenzsysteme sollen einerseits eine generische und teilautomatisierte Erzeugung von Inhalten ermöglichen und andererseits den Kontext automatisch erfassen und für die Auswahl von Aktionen nutzen, um den kompletten Arbeitsablauf zu unterstützen. Dazu können sie die aktuelle Arbeitsaufgabe und die interne Sensorik und Aktorik von Smarten Handwerkzeugen verwenden. Die Smarten Handwerkzeuge können von den Digitalen Assistenzsystemen profitieren, um produktivitäts- und qualitätssteigernde Funktionen zu ermöglichen. Dazu können sie die generisch erzeugten Inhalte verwenden und die verarbeiteten Kontextinformationen integrieren, um die werkzeuggebundenen

Arbeitsschritte zu unterstützen. Entscheidend ist besonders die Positionsfindung des Werkzeugs in Relation zum CAD-Modell des Produkts.

Softwareplattform Die Softwareplattform soll die Integration der Smarten Handwerkzeuge und Digitalen Assistenzsysteme ermöglichen und entsprechend der geplanten Funktionen des Systems für eine geeignete Datenintegration, -speicherung und -verarbeitung sorgen. Dazu müssen die Eigenschaften des Protokoll-Stacks und der damit zusammenhängenden Übertragungstechnologien mit den Anforderungen der Zielfunktionen und der Einsatzumgebung übereinstimmen. Weiterhin soll ein Mehrwert für die Entwicklung solcher Plattformen geschaffen werden, um den industriellen Transfer der Lösungen zu unterstützen. Dazu soll ein Vorgehensmodell zur Integration konzipiert werden und die Plattformarchitektur skalierbar und generisch aufgebaut sein. Die Plattform soll es außerdem ermöglichen, unterschiedliche Smarte Handwerkzeuge und weitere smarte Produktionsmittel zu integrieren und perspektivisch dafür sorgen, dass mehrere Mitarbeiter auf der gleichen Plattform simultan arbeiten können.

3 Prozessanalyse

Das folgende Kapitel analysiert manuelle Prozesse und Zielgrößen im Flugzeugbau, um Entwicklungsanforderungen abzuleiten. Dazu untersucht Abschnitt 3.1 detailliert den Prozess der Arbeitsvorbereitung sowie den grundlegenden manuellen Montageprozess in der Strukturmontage. Abschnitt 3.2 untersucht die Zielgröße Produktivität anhand von Unternehmensdaten zu Prozesszeiten und die Zielgröße Qualität anhand von Daten zu aufgetretenen Fehlern verschiedener Produktionsbereiche. Abschnitt 3.3 fasst die Analyseergebnisse zusammen und leitet Anforderungen an die Entwicklung und Integration von Smarten Handwerkzeugen und Digitalen Assistenzsystemen ab.

3.1 Manuelle Arbeits- und Informationsprozesse

Die manuellen Arbeits- und Informationsprozesse im Flugzeugbau werden im Folgenden anhand von zwei Produktionsstandorten eines großen europäischen Flugzeugherstellers analysiert. Der Fokus liegt auf Arbeitsstationen mit Baustellencharakter, die im Großteil der Prozesse genutzt werden. Unterabschnitt 3.1.1 beschreibt zuerst detailliert die aktuellen Dokumente zur Informationsbereitstellung für die Werker und analysiert dann den Prozess der Arbeitsvorbereitung mittels Expertenworkshops und Prozessdokumentationen. Unterabschnitt 3.1.2 untersucht die Standardtätigkeiten und Herausforderungen von Werkern in der Sektions- und Strukturmontage. Unterabschnitt 3.1.3 fasst abschließend die identifizierten Prozessdefizite zusammen.

3.1.1 Arbeitsvorbereitung im Flugzeugbau

Informationsbereitstellung

Zur Analyse des Arbeitsvorbereitungsprozesses wurde ein umfangreiches Gespräch mit einem erfahrenen Mitarbeiter der Arbeitsvorbereitung geführt. Dieser hat anhand interner Prozessdokumentationen erörtert, welche Dokumente den Werkern bereitgestellt werden, was diese beinhalten und mit welchen Systemen diese erstellt werden. Zu erstellen sind insbesondere:

- die *Bauunterlage*, die alle technischen Zeichnungen und Ansichten für die durchzuführenden Aufgaben beinhaltet,
- die *Stückliste*, die alle Positionsnummern und zugehörigen Bauteile umfasst und mit der Bauunterlage bereitgestellt wird,
- der *Arbeitsauftrag*, in dem die einzelnen Arbeitsvorgänge beschrieben und jeweils mit Referenzen zu anderen Dokumenten versehen werden,

- die *Montagehilfen*, die verschiedene Ansichten und Parameter für die durchzuführenden Bohrungen und Verschraubungen beinhalten und
- die *Achtungspunktblätter*, die wichtige Variantenänderungen beinhalten und visualisieren.

Die Dokumente nutzen verschiedene Schnittstellen und Referenzen, um aufeinander zu verweisen. Diese werden großteils über manuelle und sukzessive Eingaben in verschiedenen Systemen mit Medienbrüchen erstellt. Um ein besseres Verständnis für die benötigten Informationen, ihr Ursprungssystem (Quelle) und ihr Bereitstellungsmedium (Senke) zu erhalten, wurde eine detaillierte Informationsmodellierung mit einem erfahrenen Werker in der Sektionsmontage und einem Mitarbeiter der Arbeitsvorbereitung durchgeführt. Dazu wurde mittels eines Fragebogens jede Information aufgenommen und bewertet, die ein Werker benötigt. Zusätzlich wurde notiert, in welchem Dokument die Information bereitgestellt wird und was die Quelle der Information im Unternehmen ist. Jede Information wurde dann bezüglich ihrer Relevanz, Beschaffungshäufigkeit und Zuverlässigkeit bewertet. Abbildung 3.1 gibt einen Überblick über die Informationen mit ihren Quellen und Senken. Die Darstellung verdeutlicht, dass die Informationen aus separaten Ursprungssystemen (ERP- bzw. CAD-System) stammen, über den Prozess der Arbeitsvorbereitung aber in mehrere, sich referenzierende Dokumente übertragen werden. Wichtige Prozessparameter werden zusätzlich in Montagehilfen dargestellt, um der Komplexität entgegenzuwirken. Außerdem werden manuell Achtungspunkte erstellt, die wichtige Variantenänderungen hervorheben.

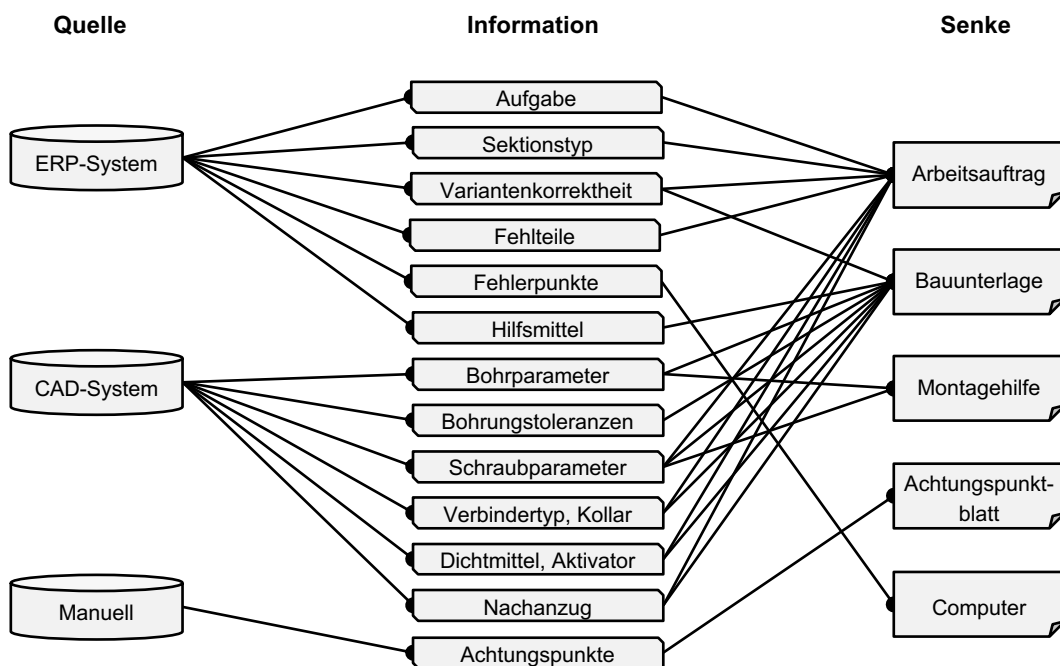


Abbildung 3.1: Informationsquellen und -senken in der Sektionsmontage

Etwa die Hälfte der Informationen wird über die Kombination des Arbeitsauftrages und der Bauunterlage bezogen. Der Großteil dieser Informationen wird dazu mehrmals täglich benötigt. Der Beschaffungsaufwand je Information wird auf ca. fünf Minuten geschätzt, die Zuverlässigkeit auf 95 %.

Prozesse und Aufwände in der Arbeitsvorbereitung

Vermerk: Die folgenden Analyseergebnisse sind im Rahmen einer betreuten Masterarbeit [Horn24] entstanden.

Die Arbeitsvorbereitung sollte idealerweise mit möglichst geringem Aufwand qualitativ hochwertige und fehlerfreie Inhalte für die Werker erzeugen und bereitstellen [Melu22, S. 51]. Um detailliert bewerten zu können, wie hoch der Aufwand und das Fehlerpotenzial der Arbeitsvorbereitung für die Erstellung der beschriebenen Dokumente ist, wurde ein zweiteiliger Workshop mit Ingenieuren der Konstruktion und Arbeitsvorbereitung durchgeführt. Der lange Produktlebenszyklus von Flugzeugen führt dazu, dass die Neuplanung und -konstruktion eines Flugzeugtypen selten vorkommt. Stattdessen betrachtet die Analyse daher den Prozess einer Variantenplanung von der konstruktiven Anpassung des CAD-Modells bis zur Bereitstellung neuer Arbeitsaufträge, Bauunterlagen, Montagehilfen und Achtungspunktblätter.

Das Ergebnis des ersten Workshopteils ist die Einteilung des Prozesses in abgrenzende Aufgabepakete und ihre Zuordnung zu den Phasen Konstruktion, Planung, Erstellung und Finalisierung. Als repräsentative Änderung einer Variante betrachtet die Analyse das Hinzufügen neuer Niete im CAD-Modell. Die Änderung hat Anpassungen der Bauzeichnungen und der benötigten Produktionsnormen zur Folge. Die Produktionsnormen definieren die technischen Fertigungsparameter der Niete und Nietlochbohrungen und werden auf den jeweiligen Detailansichten der Bauunterlage eingefügt. Nach der Konstruktionsphase hält die Arbeitsvorbereitung die Änderungsumfänge, Kennzahlen und Stücklistenänderungen in der Planungsphase fest und informiert verschiedene Abteilungen, die bspw. neue Fertigungshilfsmittel zur Station liefern oder neue Prüfpläne erstellen. Dann werden in der Erstellungsphase neue Stammdaten angelegt, Stücklisten, Arbeitsaufträge und Montagehilfen angepasst und neue Prüfpläne eingebunden. Die Finalisierung schließt den Prozess ab, indem alle Dokumente freigegeben, ausgedruckt und zum Arbeitsplatz geliefert werden. Tabelle 3.1 zeigt die 29 identifizierten Aufgaben und ordnet sie den beschriebenen Phasen im Prozess zu.

Die Tabelle zeigt weiterhin den durchschnittlich erwarteten Zeitaufwand der Aufgaben und ihren prozentualen Anteil am gesamten Prozess der Arbeitsvorbereitung. Mittels der Program Evaluation and Review Technique (PERT)-Methode [Malc59, S. 646ff.] bewerteten die Experten die Aufgaben im zweiten Workshopteil mit pessimistischen, realistischen und optimistischen Schätzwerten für den Zeitaufwand. Der erwartete Zeitaufwand E ergibt sich aus dem pessimistisch geschätzten Zeitaufwand P , dem optimistisch geschätzten Zeitaufwand O sowie dem realistisch geschätzten Zeitaufwand R und der abschließenden Multiplikation mit der Auftrittswahrscheinlichkeit im Projekt H (siehe Gleichung 3.1):

$$E = \frac{O + 4R + P}{6} \cdot H \quad (3.1)$$

Insgesamt ergibt sich eine geschätzte mittlere Projektzeit von 18,25 Stunden für die Einarbeitung einer Änderung für eine neue Flugzeugvariante. Die höchsten Zeitanteile ergeben sich für die

Fachzuordnung im Etagenwagen, die Erstellung von Montagehilfen sowie die Anpassung von Sonderprüfplänen. Tabelle 3.1 hebt diese drei Aufgaben hervor.

Tabelle 3.1: Zeitaufwände der Arbeitsvorbereitung

Nr.	Phase	Aufgabe	<i>E</i> [min]	Anteil [%]
1	K	Setzen der Niete im CAD-Modell	6,2	0,6
2	K	Erstellung/Pflegen der Bauzeichnungen	1,5	0,1
3	K	Einpflegen von Produktionsnormen	0,1	0,0
4	AV-P	Ansteuerung prüfen und eintragen	7,2	0,7
5	AV-P	Änderungsumfang ermitteln	20,8	1,9
6	AV-P	Kennzahlenblatt anlegen	68,3	6,2
7	AV-P	Stücklisten abgleichen	15,7	1,4
8	AV-P	Fertigungskonzept anpassen	29,3	2,7
9	AV-P	Informationen an Arbeitsplaner	1,2	0,1
10	AV-P	Fachzuordnung im Etagenwagen	160,8	14,7
11	AV-P	Werkzeugmaschinenprogramme beauftragen	16,7	1,5
12	AV-P	Fertigungshilfsmittel beauftragen	61,0	5,6
13	AV-P	Prüfplanung ansteuern	12,5	1,1
14	AV-E	Stammdaten anlegen	7,5	0,7
15	AV-E	Arbeitsplan kopieren und Stückliste passiv setzen	10,0	0,9
16	AV-E	Arbeitsplankopf anpassen	16,7	1,5
17	AV-E	Klassifizierung pflegen	1,5	0,1
18	AV-E	Arbeitsvorgänge prüfen und eingeben	61,7	5,6
19	AV-E	Prüfpläne und Standardpläne einbinden	7,9	0,7
20	AV-E	Stücklisten überarbeiten	29,3	2,7
21	AV-E	Materialbedarfsermittlung anstoßen	1,5	0,1
22	AV-E	Industrial Engineers ansteuern	30,8	2,8
23	AV-E	Montagehilfen erstellen	215,8	19,7
24	AV-E	Sonderprüfpläne anpassen	201,7	18,4
25	AV-E	Abarbeitspläne erstellen	72,0	6,6
26	AV-F	Pläne prüfen und drucken	32,5	3,0
27	AV-F	Pläne auf aktiv setzen	1,5	0,1
28	AV-F	Alte Pläne und Stücklisten auf passiv setzen	1,4	0,1
29	AV-F	Ansteuerung austragen	1,5	0,1
Σ			1094,4 (ca. 18,2 h)	100 %

Legende:

K = Konstruktion

AV-P = Arbeitsvorbereitung: Planung

AV-E = Arbeitsvorbereitung: Erstellung

AV-F = Arbeitsvorbereitung: Finalisierung

E = Erwartungswert

Die Erstellung von Montagehilfen hat mit 19,7 % den größten Anteil im Prozess. Die Montagehilfen stellen einzelne Niete und dafür durchzuführende Bohrungen mit farblich kodierten Punkten zweidimensional dar, um notwendige Prozessparameter für die Werkzeugoperationen zu visualisieren (vgl. Abbildung 3.2). Die Ansichten bestehen aus mehreren Ebenen und müssen mit einer Bildbearbeitungssoftware manuell von Ingenieuren erstellt und überlagert werden. Dazu greifen sie auf die in der Bauunterlage referenzierten Produktionsnormen zurück. Es fehlt eine digitale Prozesskette, die die Änderungen in die Informationssensoren überträgt. Hierdurch entstehen erhebliche Mehraufwände bei der Erstellung und Prüfung der Unterlagen. Für die Integration

von Smarten Handwerkzeugen und Digitalen Assistenzsystemen ist diese Erkenntnis besonders wichtig, da sowohl qualitätssteigernde als auch dokumentationsverbessernde Funktionalitäten die einzelnen Werkzeugoperationen und Prozessparameter als Datengrundlage benötigen.

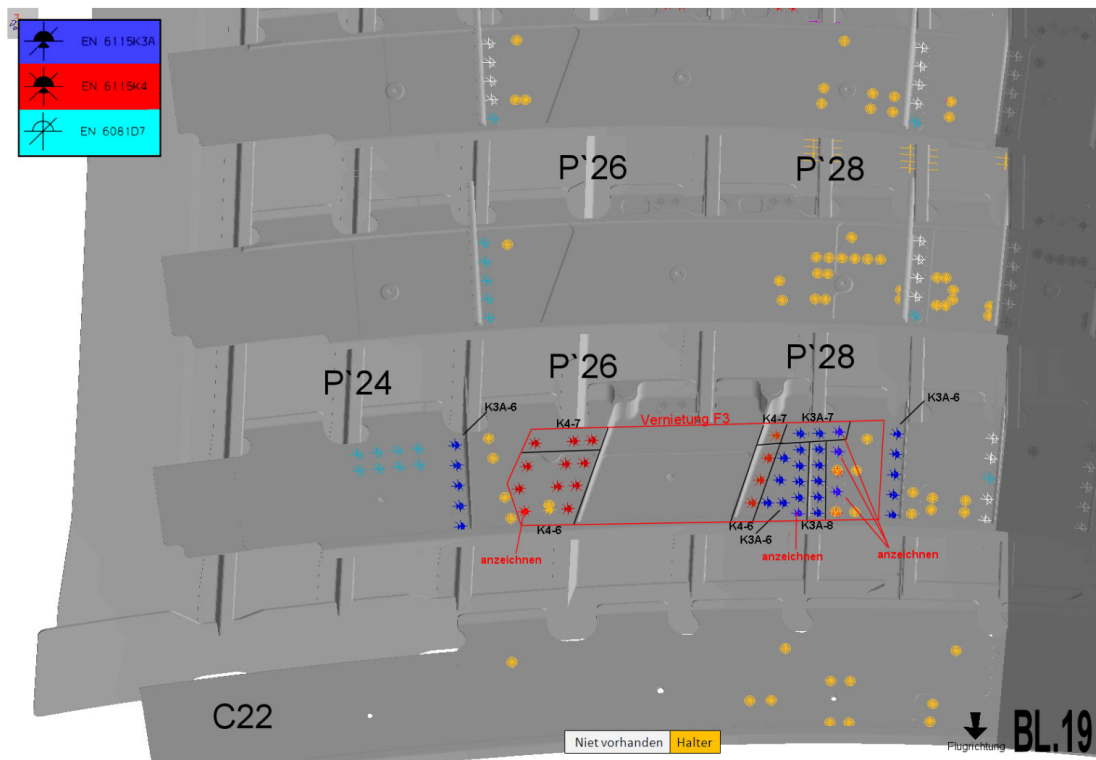


Abbildung 3.2: Ausschnitt einer Montagehilfe

Die Erstellung von Sonderprüfplänen nimmt mit 18,4 % den zweitgrößten Anteil im Prozess ein. Die Aufgabe passt Qualitätsüberprüfungen an die konstruktiven Änderungen am Flugzeug an. Die hohen Aufwände verdeutlichen, dass Funktionen zur Qualitätssicherung und zur automatisierten Dokumentation von Werkzeugoperationen einen hohen Mehrwert sowohl in den direkten als auch in den indirekten Bereichen schaffen können. Die Fachzuordnung im Etagenwagen hat den drittgrößten Anteil und bezieht sich auf die Zuordnung notwendiger Materialien zu spezifischen Fächern des Etagenwagens, die der Montagereihenfolge entsprechend angeordnet sind. Je nach Änderungsumfang können lange Bearbeitungszeiten entstehen.

Die PERT-Analyse zeigt, dass eine teilautomatisierte Inhaltserstellung und Qualitätsdokumentation in einem Digitalen Assistenzsystem für die Arbeitsvorbereitung über 38 % der Prozesszeit einer Variantenplanung adressieren und qualitativ verbessern könnte. Viele der kleineren Aufgaben, wie die Anpassung von Stücklisten, Kennzahlenblättern, Arbeitsaufträgen oder Abarbeitsplänen, könnten über die Einführung einer digitalen Prozesskette unterstützt werden. Damit ergeben sich in der Arbeitsvorbereitung Potenziale zur Einsparung von bis zu 60 % der geschätzten Gesamtzeit. Die hohe Anzahl der manuellen Schritte, mehrere Medienbrüche und die Komplexität der zu erstellenden Dokumente sind potenzielle Fehlerquellen, die in vermehrten Überprüfungen der Dokumente resultieren.

3.1.2 Manuelle Montage im Flugzeugbau

Um die Prozessabläufe und Defizite in der manuellen Flugzeugmontage zu analysieren, wurde eine viertägige Prozessbeobachtung vor Ort durchgeführt. Insgesamt konnten zwölf Strukturmechaniker in zwei Rumpfsektionen bei verschiedenen Prozessen beobachtet werden. Insbesondere wurde die Montage der äußeren Sitzschienen, die Montage von Verbindungsplatten an der Cargo-Tür und die Montage von Haltern an der Deckenschale untersucht. Die Arbeiten fanden innerhalb der bereits aus Schalenelementen zusammengefügt Sektionen statt. Informationen zu Problemen und Informationsbedarfen wurden aufgeschrieben und durch direkte Nachfragen ausdetailliert. Als Abschluss der Untersuchung wurden die Erkenntnisse in einem Workshop mit sieben Mitarbeitern, darunter Strukturmechaniker, Teamleiter, Entwicklungsingenieure und Produktionsleiter, geteilt und über qualitative Fragebögen validiert und erweitert (siehe Anhang A).

Standardprozesse in der Flugzeugmontage

Lange Produktlebenszyklen im Flugzeugbau führen neben der papiergebundenen Informationsbereitstellung dazu, dass die Montageverfahren überwiegend manuell und mit konventionellen Montagesystemen durchgeführt werden [Hins13, S. 179]. Aufgrund der Produktgröße und -komplexität sind die Prozesse schwierig automatisierbar. Grundlegend startet die Flugzeugmontage mit der Verbindung der einzelnen Schalenelemente zu einer Sektion, die mit quer verlaufenden Strukturelementen (Spante) und längs verlaufenden Verstärkungen (Stringer) stabilisiert werden. Die Sektionen werden daraufhin kundenindividuell mit mechanischen Elementen wie Haltern, Verbindungsplatten oder Sitzschienen ausgerüstet. Im Anschluss werden die einzelnen Sektionen zu einem Flugzeugrumpf gefügt. Trotz der großen Dimensionen ist bei der Positionierung der Bauteile und einzelnen Werkzeugoperationen höchste Präzision gefordert [Hins13, S. 185 f.].

Das häufigste Fügeverfahren im Flugzeugbau ist das Nieten mit verschiedenen Verbindertypen [Hins13, S. 179]. Weitere Fügeverfahren, wie das Kleben oder Schweißen, sind von geringerer Bedeutung [Engm18, S. 202]. Ein Großteil der Niete wird über das Aufschauben eines Schließrings (Hi-Lok oder Hi-Lite) oder das Einschrauben eines Gewindebolzens (Schraubniete) gesetzt [Engm18, S. 220ff.]. Die Verbindertypen erfordern enge Fertigungstoleranzen der Nietlochbohrungen, weshalb meist mehrere Bohrungen durchgeführt werden, um das Endmaß zu erreichen.

Abbildung 3.3 zeigt den grundlegenden manuellen Montageprozess. Initial positionieren und klemmen die Werker das zu fügende Bauteil mit Fertigungshilfsmitteln in der Sektion. Daraufhin übertragen sie die Vorbohrungen des Bauteils in die Struktur, bohren die Löcher auf und bringen diese, wenn es notwendig ist, mit einer Reibahle auf den notwendigen Enddurchmesser der Nietlochbohrung. Vor dem Nieten lösen die Werker die Bauteile, befreien sie von Spänen und positionieren sie wieder. Dann tragen sie Dichtmittel und Aktivator auf, um abschließend das Niet zu setzen und zu verschrauben. Je nach Verbindertyp ziehen sie das Niet nach einer Setzzeit nochmal auf ein bestimmtes Drehmoment an, bevor sie die Fertigungshilfsmittel wieder lösen.

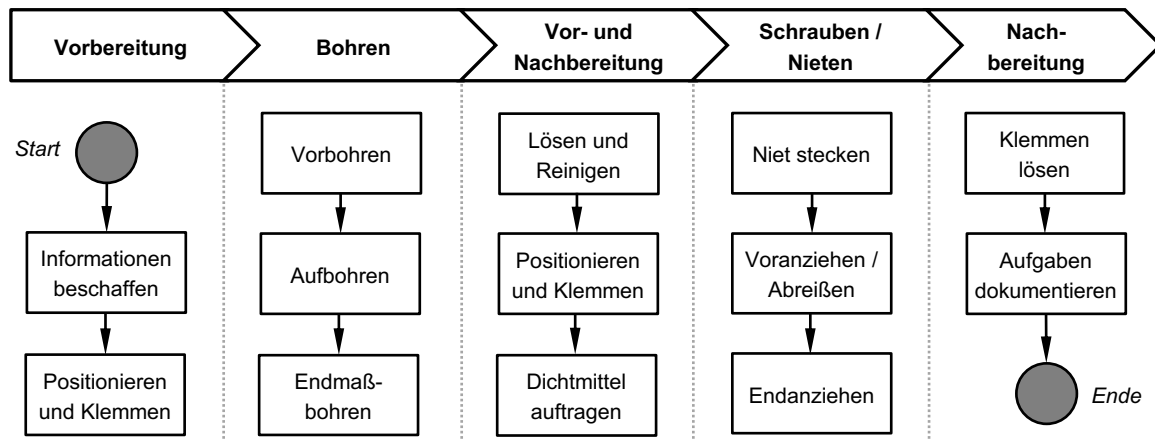


Abbildung 3.3: Standardprozess in der Flugzeugmontage

Der Prozess zeigt außerdem, dass die Werker initial Informationen beschaffen und abschließend die Aufgaben dokumentieren. Je nach Komplexität und Erfahrungswissen müssen die Werker aber auch innerhalb des Montageprozesses wiederholt nach Informationen suchen. Ebenso können sie zwischen den Prozessschritten einzelne Arbeitsvorgänge dokumentieren. Bei der Schichtübergabe wird dadurch erfasst, welche Arbeitsschritte abgeschlossen sind [Hins12, S. 182].

Herausforderungen in der Praxis

Die steigende Nachfrage nach Flugzeugen führt durch gleichbleibende Produktionsflächen und Betriebsmittelkapazitäten zu erhöhtem Zeitdruck, der zusätzlich durch die Nutzung von Akkordlohnzahlungen inzentiviert wird. Im Gegensatz dazu stehen die Qualitäts- und Dokumentationsanforderungen im Flugzeugbau. Zusätzlich zu diesem Zielkonflikt verdeutlichen die durchgeführten Prozessbeobachtungen und Befragungen der Strukturmechaniker eine Reihe von spezifischen Herausforderungen, die Werker in der Montage handhaben müssen.

Insbesondere das Bohren der Nietlöcher ist herausfordernd, da die Bohrungen großteils in erzwungenen Haltungen an schwierig zugänglichen Stellen gesetzt werden müssen. Die Werkzeuge müssen dazu korrekt ausgewählt werden, damit Prozessparameter wie der Bohrdurchmesser oder die Drehgeschwindigkeit den Anforderungen entsprechen. Zusätzlich müssen die Bohrungen senkrecht zur Werkstückoberfläche und mit der richtigen Vorschubgeschwindigkeit und -kraft gesetzt werden. Besonders bei modernen Leichtbauwerkstoffen, wie bspw. kohlefaserverstärkten Verbundwerkstoffen, führt eine Abweichung von diesen Parametern schnell zu Ausschuss oder kostenintensiver Nacharbeit. Diese Probleme werden durch den hohen Wiederholungsgrad und die unregelmäßige Variation der notwendigen Prozessparameter verstärkt. Analog müssen Schraub- und Nieteingriffe mit den korrekten Drehmomenten, Dichtmitteln und Setzzeiten durchgeführt werden.

Die Werker müssen diese Informationen aus verschiedenen komplexen Dokumenten beschaffen, was die Suche verlangsamt und die kognitive Informationsverarbeitung erschwert. Alternativ müssen sie auf Erfahrungswissen zurückgreifen und ein höheres Fehlerrisiko akzeptieren. Je nach beobachtetem Prozess und Werker unterscheidet sich die Nutzung von Erfahrungswissen und damit die Häufigkeit der Informationsbeschaffung deutlich.

In der Sitzschienenmontage beschaffen die Werker die Informationen zu Variantenänderungen hauptsächlich zu Beginn der Montage. Sie merken sich die restlichen Schritte und Parameter der Arbeitsaufgaben, die ihnen aufgrund des höheren Wiederholungsgrades bekannt sind. Bei der Montage der Verbindungsbleche im Cargo-Tür-Bereich hingegen teilen sich mehrere Werker einen einzelnen Satz an Informationsunterlagen. Sie arbeiten zwischen den Fachwerkstreben der unteren Schale und müssen dadurch häufig die Sektion verlassen, um Materialien zu beschaffen oder Informationen zu prüfen. Trotzdem verlassen sich die Werker weniger auf Erfahrungswissen, weil die Prozessparameter sehr variantenabhängig sind. Zur Haltermontage an der Decke der Sektion können die Werker einen Materialwagen mit zum Arbeitsplatz transportieren. Trotz geringerer Abhängigkeit von der Variante durchsuchen die beobachteten Werker die Unterlagen häufiger nach Informationen als in den anderen Prozessen.

Die Einhaltung der korrekten Prozessparameter bestätigt jeder Werker mit einem personalisierten Stempel, wenn die Arbeitsvorgänge abgeschlossen sind. Einen direkten Rückschluss zu einzelnen Werkzeugoperationen gibt es nicht. Wenn Prozessfehler entstehen und entdeckt werden, dokumentieren die Werker diese in einer Datenbank am Rechner der Arbeitsstation.

3.1.3 Prozessdefizite

In den aktuellen Prozessen der Arbeitsvorbereitung und manuellen Montage lassen sich Defizite feststellen, die die Qualität und Produktivität des Wertschöpfungsprozesses reduzieren. Die Defizite der Arbeitsvorbereitung sind direkt mit den Defiziten der manuellen Montage verbunden: Die Informationserstellung erfolgt über einen komplexen Prozess mit einer Vielzahl an Bearbeitern und zu erstellenden Dokumenten. Die resultierende Bereitstellung von papierbasierten und unübersichtlichen Unterlagen führt zu Ineffizienzen und Fehlerpotenzialen bei den manuellen Arbeitsprozessen der Sektionsmontage. Im Folgenden werden die Defizite der Arbeitsvorbereitung und der manuellen Montage zusammengefasst und erläutert.

Arbeitsvorbereitung

Die Analyse der aktuellen Prozesse der Arbeitsvorbereitung zeigt deutlich, dass zahlreiche manuelle Aufgaben nötig sind, um eine Vielzahl an Dokumenten zu erstellen. Die Teilprozesse sind fehleranfällig und zeitaufwendig und die generierten Dokumente enthalten eine breite Informationsvielfalt, die nicht kontextgerecht dargestellt wird. Eine digitalisierte Arbeitsvorbereitung kann Teilaufgaben automatisieren und damit eine Effizienzsteigerung und Qualitätsverbesserung in der Informationsbereitstellung und den nachfolgenden Produktionsprozessen bewirken. Dazu müssen verschiedene Defizite behoben werden.

Medienbrüche in der Informationserstellung Trotz der getrennten Informationsquellen (vgl. Abbildung 3.1) werden die Informationen des ERP- und CAD-Systems in Papierunterlagen für die Werker konvertiert. Zusätzlich erstellt die Arbeitsvorbereitung Montagehilfen, Achtungspunktblätter und Prüfpläne, um wichtige Informationen einfacher bereitzustellen. Änderungen im System

führen dadurch immer zum Austausch aller betroffenen Unterlagen. Jeder Medienbruch erhöht zudem das Risiko, Fehler in den Informationen zu erzeugen.

Erstellung sich gegenseitig referenzierender Dokumente Das System der Informationsbereitstellung mit Auftrag, Bauunterlage, Stücklisten und zusätzlichen Hinweisdokumenten erzeugt einen erhöhten Erstellungsaufwand und führt zu einer komplexen Informationsbereitstellung. Ungefähr 50 % der Informationen beziehen die Werker dadurch aus einer Kombination von Arbeitsauftrag und Bauunterlage. Sinnvoller erscheint ein Ansatz, in welchem alle relevanten Informationen unter einer Referenz (bspw. Projekt- oder Auftragsnummer) gebündelt werden und über diese Referenz in einem einzelnen Darstellungsmedium bereitgestellt werden.

Hoher Aufwand zur Erstellung von Montagehilfen und Prüfplänen Der Aufwand für die Erstellung der Montagehilfen und Prüfpläne ist hoch und verdeutlicht die Defizite der Kombination von Arbeitsauftrag und Bauunterlage. Insbesondere bei der Erstellung der Montagehilfen muss jedes einzelne Niet und jede damit zusammenhängende Werkzeugoperation händisch als Punkt visualisiert und mit Parametern hinterlegt werden. Es fehlt ein automatisierter Ansatz, um die benötigten Parameter zu bestimmen. Die Ingenieure leiten diese aus verschiedenen Informationen der Verbinder, der Fügestelle und des Produktionsstandards des jeweiligen Flugzeugs ab. Das erhöht einerseits die Fehlerpotenziale und macht andererseits weitere Prüfungen der Unterlagen notwendig. Die Erstellung der Prüfpläne könnte über einen digitalisierten Ansatz ebenfalls deutlich effizienter gestaltet werden.

Manuelle Montage

Die Analyse der manuellen Montageprozesse im Flugzeugbau offenbart mehrere Schwachstellen, die sowohl die Produktivität als auch die Qualität der Produktion beeinträchtigen. Der hohe Wiederholungsgrad bei zugleich geringfügigen Variantenänderungen – insbesondere bei schwer unterscheidbaren Werkzeugen und Prozessparametern – erhöht das Risiko von Fehlern bei langen Arbeitszyklen in der Flugzeugproduktion. Die aufwendige Informationssuche in papierbasierten Dokumenten und die manuelle Dokumentation des Arbeitsfortschritts verursachen einen hohen Arbeitsaufwand. Ein integrierter Digitales Assistenzsystem mit Smarten Handwerkzeugen hat das Potenzial, diese Defizite strukturiert zu beheben. Die Defizite werden im Folgenden aufgelistet und zusammenfassend näher erläutert.

Hoher Wiederholungsgrad mit kleinen Variantenänderungen Die Prozesse in der Sektionsmontage haben einen hohen Wiederholungsgrad und unterscheiden sich meist nur in den Prozessparametern einzelner Werkzeugoperationen, die über die Montagehilfen und Achtungspunktblätter ersichtlich sind. Bspw. bohren und nieten Werker über längere Perioden ausschließlich entlang einer Längsnaht oder einer Sitzschiene und müssen die Parameterunterschiede der Variante beachten. Dazu nutzen sie Werkzeuge mit kleinsten Durchmesser- oder Drehmomentunterschieden. Mit fortschreitender Ermüdung entstehen hohe Fehlerpotenziale und Folgekosten.

Komplexe Informationssuche in papierbasierten Unterlagen Die Informationsbereitstellung ist ineffizient und führt dazu, dass die Werker sich möglichst viele Informationen vormerken oder mit Erfahrungswissen handeln. Das steigert die Fehlerpotenziale zusätzlich, da wichtige Variantenänderungen übersehen werden können. Prozesse mit höherer Variantenabhängigkeit werden durch die Informationsbeschaffung unproduktiv: Die Werker müssen einzelne Prozessparameter nach Fertigungsbereich und angegebener Produktionsnorm in den Dokumenten suchen und ermitteln. Grundlegend werden Informationen zum falschen Zeitpunkt (zu früh) in der falschen Menge (zu viele) bereitgestellt. Die Suche wird so erschwert, weil unnötige Informationen den kognitiven Verarbeitungsprozess belasten.

Manuelle Dokumentation der Arbeitsschritte Die Werker markieren durchgeführte Aufgaben mit einem Stempel im Auftrag. Außerdem dokumentieren sie einzelne montierte Ausgleichsbleche oder abweichende Werkzeugoperationen und Prozessparameter. Die Qualitätsprüfung führen Mitarbeiter der Qualitätssicherung am Ende der Arbeitsaufträge durch, um den Zustand des Flugzeuges aufzunehmen. Die resultierende Dokumentation ist lückenhaft und führt zu erhöhten Prüfaufwänden. Wenn mehrere Werker an einem Prozess arbeiten, können zudem Fehler durch den undurchsichtigen Baufortschritt entstehen. Ebenso müssen die Werker den aktuellen Prozesszustand verbal an die nächste Schicht übergeben, weil dieser aus den gestempelten Arbeitsvorgängen nicht detailliert genug ersichtlich ist.

3.2 Analyse der Zielgrößen

Dieser Abschnitt untersucht den Zustand der Zielgrößen Produktivität und Qualität, um anschließend Anforderungen an die Gesamtentwicklung zu formulieren, die die Prozessdefizite gezielt beheben. Unterabschnitt 3.2.1 untersucht die Produktivität anhand von Zeitbausteinen, die der Analysepartner zur Planung der manuellen Prozesse nutzt. Unterabschnitt 3.2.2 untersucht die Qualität und wertet dazu Vergangenheitsdaten zu gemeldeten Qualitätsabweichungen aus.

3.2.1 Produktivitätsanalyse

Ziel der Produktivitätsanalyse ist es, die verbesserungsrelevanten Mitarbeiterzustände, Tätigkeiten und Objekte zu identifizieren und daraus Anforderungen an einen digitalisierten Arbeitsablauf abzuleiten. Dazu werden Zeitbausteine des MTM-Verfahrens (Methods-Time Measurement) verwendet. MTM zerlegt den Arbeitsablauf in kleinste Bewegungen bzw. Bewegungsabläufe des menschlichen Körpers und wird genutzt, um Arbeitsabläufe zu beschreiben, mit vorbestimmten Zeiten zu bewerten und zu gestalten [Bokr12, S. 89ff.]. Sämtliche manuellen Arbeitsprozesse des analysierten Flugzeugherstellers wurden durch einen iterativen Prozess in MTM-Elemente aufgeteilt.

Zur Analyse der Arbeitsproduktivität im Flugzeugbau wurde jeweils ein Teilprozess zwei verschiedener Flugzeugtypen ausgewertet. Dazu wurde die Montage des Fußbodenrostes im Flug-

zeugrumpf und die Montage der äußersten Sitzschiene in der Sektion ausgewählt. Die Daten wurden aus einem unternehmensinternen System in hohem Detailgrad exportiert. Daraufhin wurde jedes der 8.900 MTM-Elemente mit einer Tätigkeit-Objekt-Kombination (siehe [Tiet17, S. 47ff.]) und einer Bedingungsgröße versehen. Die Bedingungsgröße weist das MTM-Element jeweils einem Mitarbeiterzustand des Modells der Arbeitsproduktivität zu. Die attribuierten MTM-Elemente wurden abschließend zusammengeführt und die Zeiten kumuliert. So können relative Werte zu einzelnen Zuständen, Tätigkeiten, Objekten und deren Kombinationen generiert werden.

Abbildung 3.4 zeigt die zusammengeführten und relativen Mitarbeiterzustände der analysierten Teilprozesse. Auffällig ist, dass die Phase *Durchführung* beinahe die Hälfte der Mitarbeiterzustände einnimmt. Das ist auf den hohen Wiederholungsgrad der Werkzeugoperationen zurückzuführen. Den zweitgrößten Anteil der Mitarbeiterzustände nimmt die *Vorbereitung* ein, die zu ca. 56 % die Handhabung und Einstellung der Werkzeuge und zu 43 % die Handhabung der Werkstücke betrifft. Gelingt es, die Werkzeughandhabung mit den Smarten Handwerkzeugen bspw. durch die automatisierte Einstellung von Prozessparametern zu verbessern, wird die Produktivität der Werker deutlich gesteigert, weil die Werker in zwei Dritteln der Arbeitszeit ein Werkzeug nutzen.

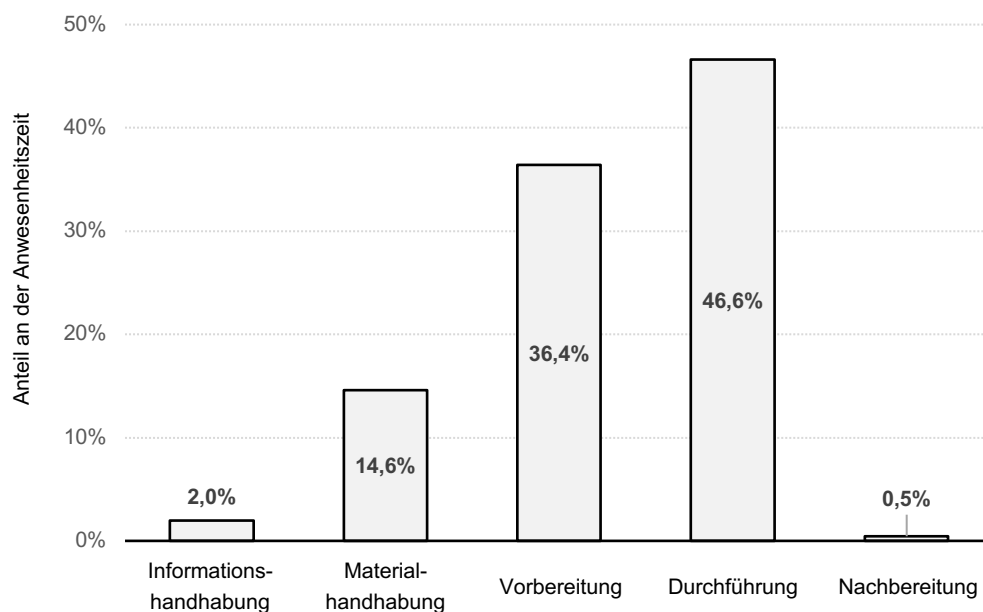


Abbildung 3.4: Mitarbeiterzustände in der manuellen Flugzeugmontage

Der sehr niedrige Anteil der *Informationshandhabung* lässt sich einerseits dadurch erklären, dass die MTM-Elemente für einen erfahrenen Mitarbeiter ausgelegt sind. Die Anteile sind voraussichtlich in der Qualifizierungsphase neuer Mitarbeiter höher. Andererseits wird nach Aussage eines Arbeitsplaners beim Analysepartner pro durchzuführender Bohrung und zu setzendem Niet ein kleiner Zeitanteil für eine potenzielle Informationshandhabung als Teil der Durchführungszeit einberechnet. Eine verbesserte Informationsbereitstellung sollte die aktuell notwendigen Parameter und Positionen der Werkzeugoperationen anzeigen, um diesen Zeitanteil zu reduzieren und die Produktivität zu erhöhen. Ein Smartes Handwerkzeug kann weiterhin die Notwendigkeit reduzieren, diese Informationen zu beschaffen und automatisch Parameter einstellen, um die Vorbereitungszeit zu reduzieren.

Abbildung 3.5 stellt die Tätigkeiten der Werker auf Grundlage der MTM-Analyse dar und hebt zusätzlich die Objekte der Tätigkeit *Handhaben* hervor. Die Ansicht verdeutlicht, dass die Werker ungefähr 40 % ihrer Zeit mit dem Handhaben von Objekten verbringen, wobei davon über 44 % auf die Werkzeuge entfallen. Außerdem zeigt sich, dass ungefähr ein Drittel der Zeit für die Herstellung der Nietlochbohrungen (*Bohren, Entgraten, Reiben, Senken, Fasen*) und ungefähr 14 % für das Fügen verwendet wird.

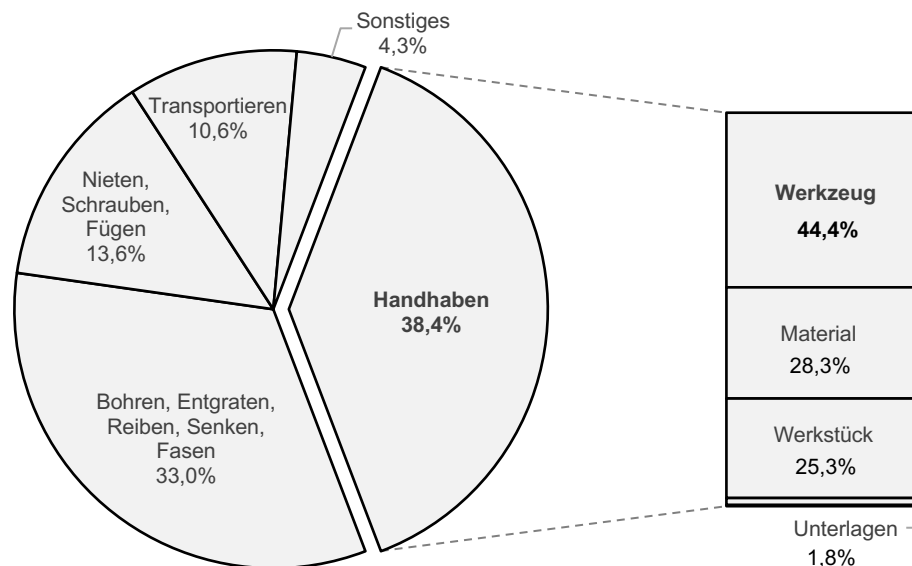


Abbildung 3.5: Tätigkeitsanteile mit Fokus auf das Handhaben

Die Analyse beruht auf Plan-Daten, die für erfahrene Strukturmechaniker ausgelegt sind und daher nur in geringem Umfang Informationszeiten beinhalten und keine Änderungen im Prozessablauf berücksichtigen. Auf Grundlage der Plan-Daten kann keine belastbare Aussage über die Bedeutung der Informationszeiten getroffen werden. Generell ist das Produktivitätspotenzial von der Anwendung abhängig und steigt mit höheren Informationszeiten. Die Entwicklung eines integrierten Gesamtsystems kann insbesondere Potenziale über die automatische Einstellung von Prozessparametern und die Verbesserung der Werkzeughandhabung schöpfen.

3.2.2 Qualitätsanalyse

Die Qualitätsanalyse untersucht Vergangenheitsdaten des Analysepartners zu entstandenen Prozessfehlern und deren Ursachen, um Anforderungen zur Fehlervermeidung im Zielsystem abzuleiten. Dazu wurden Qualitätsberichte drei verschiedener Produktionsbereiche betrachtet. Zwei der Berichte beziehen sich auf einen zwölfmonatigen Zeitraum in den Jahren 2021 und 2022 und einer der Berichte bezieht sich auf einen zehnmonatigen Zeitraum in den Jahren 2023 und 2024. In den Berichten ist ersichtlich, wieviele Prozessfehler insgesamt entstanden sind. Zusätzlich sind die Fehler in die drei Kategorien *Bohrungsfehler* (Bohrung entgegen der Bauunterlage), *Nietfehler* (Niet entgegen der Bauunterlage) und *Faserausriss* (Materialbeschädigung durch falsche Prozessparameter) eingeteilt.

Neben den Qualitätsberichten konnte weiterhin auf einen Datenbankauszug zugegriffen werden, in dem näher beschriebene Prozessfehler für fünf Produktionsbereiche festgehalten sind. Die Fehlerbeschreibungen wurden durch Werker dokumentiert und können genutzt werden, um diese den oben genannten Kategorien zuzuordnen und die Fehlerarten innerhalb Kategorien detaillierter zu betrachten.

Insgesamt ergeben sich mehr als 1.500 gemeldete Prozessfehler, die kategorisiert werden und ca. 640 gemeldete Prozessfehler aus dem Datenbankauszug, die für eine genauere Betrachtung der Fehler verwendet werden. Abbildung 3.6 zeigt die Verteilung der Fehlerkategorien mit detaillierter Betrachtung der Fehlerarten des Bohrens. Den größten Anteil nimmt die Fehlerkategorie *Faserausriss* ein, was die Anforderungen des manuellen Bohrens in kohlefaserverstärkte Verbundwerkstoffe verdeutlicht. Die Faserausrisse entstehen durch zu hohe Dreh- und Vorschubgeschwindigkeiten und Bearbeitungskräfte im manuellen Bohrprozess.

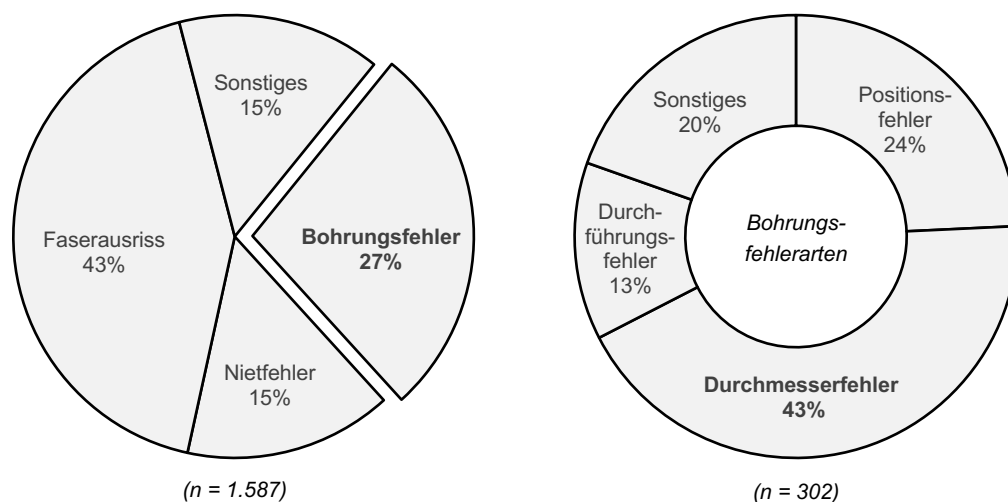


Abbildung 3.6: Fehlerkategorien mit Fokus auf die Bohrungsfehler

Die Kategorien *Bohrungsfehler* (27 %) und *Nietfehler* (15 %) nehmen gemeinsam einen großen Anteil der gemeldeten Prozessfehler ein. Als Haupttätigkeit der Werker betrachtet Abbildung 3.6 (rechts) im Detail die genauen Fehlerarten der Bohrungsfehler. 43 % der Bohrungsfehler entstehen durch die Auswahl eines falschen Durchmessers für den Eingriff, während weitere 24 % der Fehler durch eine falsche Positionierung der Werkzeuge entstehen. Beide Fehler verdeutlichen die beschriebenen Probleme der komplexen Informationsbereitstellung im Zielkonflikt von Produktivität und Qualität deutlich. 13 % der Bohrungsfehler sind Durchführungsfehler, wie bspw. zu tiefe Senkbohrungen oder Beschädigungen der Oberflächen. 15 % der Fehlerkategorien und 20 % der Fehlerarten werden in den Dokumenten nicht näher spezifiziert und sind deshalb als *Sonstiges* bezeichnet.

Um die Fehler gezielt zu beheben, müssen ihre Ursachen untersucht und durch das Zielsystem kontrolliert werden. Tabelle 3.2 verdeutlicht die Ursachen für die Fehlerarten. Grundsätzlich teilen sich die Fehlerursachen in die fehlende Gewährleistung eines notwendigen Werkzeugzu-

stands, die fehlerhafte Parametereinstellung bzw. -kontrolle und die fehlerhafte Durchführung der Werkzeugoperation auf.

Tabelle 3.2: Fehlerursachen in der manuellen Flugzeugmontage

Fehlerkategorie	Fehlerart	Fehlerursache
Bohrungsfehler Bohrungsfehler Bohrungsfehler Bohrungsfehler Nietfehler	Durchmesserfehler Drehgeschwindigkeitsfehler Positionsfehler Bohrwinkelfehler Drehmomentfehler	Prozessparameter
Bohrungsfehler Nietfehler Nietfehler Faserausriss Faserausriss	Durchführungsfehler Fremdkörperfehler Durchführungsfehler Vorschubkraftfehler Vorschubgeschwindigkeitsfehler	Durchführung
Faserausriss Sonstiges Sonstiges	Verschleißbedingter Fehler Verschleißbedingter Fehler Sonstiges	Werkzeugzustand

Die Integration von Smarten Handwerkzeugen und Digitalen Assistenzsystemen sollte Funktionen bereitstellen, die die Daten zu diesen Ursachen auswerten, um die Entstehung von Prozessfehlern zu reduzieren. Dazu sollten insbesondere die *Prozessparameter* kontrolliert werden, indem das Werkzeug aktuelle Kontextinformationen bereitstellt und das Digitale Assistenzsystem diese bereits vor dem Werkzeugeingriff auswertet. Dazu zählen der Durchmesser, die Drehgeschwindigkeit und das Drehmoment des Werkzeugs. Weiterhin sind die aktuelle Position der Werkzeugspitze und der Neigungswinkel des Werkzeugs in Relation zum Bauteil relevant und optimalerweise zu kontrollieren.

Das Zielsystem sollte den *Werkzeugzustand* kontinuierlich auswerten, um verschleißbedingte Fehler zu vermeiden. Dazu zählen bspw. der Verschleißzustand des Bohrers oder der Verschleißzustand von Werkzeugantrieben. Dazu könnten Daten zur Maschinentemperatur oder zu Zählerständen im Werkzeug ausgewertet werden.

Die Kontrolle der *Durchführung* als Fehlerursache ist die technologisch anspruchvollste, da sie von den individuellen Kompetenzen und der physiologischen Leistungsfähigkeit der Werker abhängt und durch die schwierigen Zugänglichkeiten in den Flugzeugsektionen zusätzlich erschwert wird. Verbesserungsmaßnahmen müssen im Prozess steuernd eingreifen oder Rückmeldungen an die Werker geben. Technologisch einfacher ist es, Hinweise mit dem Digitalen Assistenzsystem zu geben, um die Aufmerksamkeit bei herausfordernden Werkzeugoperationen zu fördern. Ein weiterer Ansatz ist es, Daten zum Prozess aufzunehmen und nach dem Eingriff auszuwerten. So können Fehler sofort erkannt werden, um Behebungskosten zu verringern. Außerdem würden die Rückmeldungen die Lernkurve verkürzen und damit langfristig die notwendigen Kompetenzen steigern.

3.3 Anforderungen der Prozessanalyse

Die Prozessdefizite und Erkenntnisse der Zielgrößenanalysen können als konkrete Entwicklungsanforderungen für die Integration von Smarten Handwerkzeugen und Digitalen Assistenzsystemen festgehalten werden. Im Folgenden werden die Anforderungen der Prozessanalyse (P) aufgelistet und erläutert.

Anforderung P1: Einfache, digitale Prozesskette für die Arbeitsvorbereitung

Die Mitarbeiter der Arbeitsvorbereitung sollen durch ein Digitales Assistenzsystem unterstützt werden, das eine einfache, digitale Prozesskette ermöglicht und Schnittstellen zum ERP- und CAD-System bereitstellt, um Inhalte für die Werker zu erzeugen. Die Prozesskette soll in einem System ablaufen, Medienbrüche vermeiden und Variantenänderungen möglichst aufwandsarm verarbeiten. Das Assistenzsystem muss die notwendigen Inhalte für die Integration mit Smarten Handwerkzeugen ohne zusätzliche Aufwände teilautomatisiert erzeugen können. Laut der PERT-Analyse betrifft das die Erstellung der notwendigen Werkzeugoperationen, inklusive der Koordinaten und Soll-Parameter. Dadurch entfallen die Aufwände zur Erstellung der Montagehilfen. Die Erstellung der Prüfpläne soll ebenfalls über die Funktionen der Smarten Handwerkzeuge und Digitalen Assistenzsysteme eingespart werden.

Anforderung P2: Einfache, kontextgerechte Informationsbereitstellung für die Werker

Die durch die Arbeitsvorbereitung erstellten Inhalte müssen kontextgerecht gefiltert und einfach verständlich dargestellt werden. Dazu soll ein Digitales Assistenzsystem entwickelt werden, das die Werker bei der Bearbeitung der Montageprozesse nutzen. Das Assistenzsystem soll Inhalte zu den durchzuführenden Werkzeugoperationen übersichtlich darstellen, sodass sie schnell gefunden und mit geringem kognitiven Aufwand verarbeitet werden können. Dazu können bspw. der Ort und die Soll-Parameter für jeden Eingriff direkt am CAD-Modell des Produktes dargestellt werden. Für die aktuelle Arbeitsaufgabe und ihre Kontextanforderungen sollen das Assistenzsystem nur die aktuell notwendigen Informationen anzeigen. Dazu muss der Produktionskontext erfassbar sein und über Nutzereingaben zur Arbeitsaufgabe geändert werden können. Entscheidend ist die Integration allgemeiner Arbeitsschritte und werkzeugabhängiger Arbeitsschritte in einer zentralen Arbeitsunterlage. Weiterhin soll das Digitale Assistenzsystem Informationen zum aktuellen Werkzeugzustand darstellen, um Handhabungs- und Transportaufwände zu reduzieren und Fehlerquellen zu identifizieren. Bspw. können aktuelle Prozessparameter, Werkzeugpositionen oder Verschleißinformationen angezeigt und Warnhinweise gegeben werden, bevor Toleranzbereiche überschritten werden.

Anforderung P3: Smartes Handwerkzeug mit Wechselköpfen zum Bohren und Nieten

Das zu entwickelnde Smarte Handwerkzeug soll sowohl für Bohrprozesse als auch zum Nieten (inklusive Schrauben) nutzbar sein. Es soll dazu schnell austauschbare Wechselköpfen nutzen, um Werkzeugwechsel zu vermeiden und die Handhabungsaufwände zu reduzieren. Dazu muss

das Werkzeug über eine Schnittstelle verfügen, die den aktuell ausgerüsteten Wechselkopf ausliest. Es muss mit Sensoren ausgestattet sein, die Informationen zum aktuellen Werkzeugzustand und den eingestellten Prozessparametern liefern. Dazu zählen der Bohrdurchmesser, die Drehgeschwindigkeit, das Drehmoment und, wenn technologisch möglich, die aktuelle Position der Werkzeugschneidspitze und der Neigungswinkel des Werkzeugs. Zusätzlich sollen Daten während der Durchführung von Werkzeugoperationen gesammelt werden, um diese zu verarbeiten und entweder in situ in den Prozess einzugreifen oder die Operation im Nachhinein zu bewerten und zu dokumentieren. Das Smarte Handwerkzeug muss abschließend über Aktorik verfügen, um verschiedene Fehlerursachen zu vermeiden. Dazu zählt insbesondere die Möglichkeit, das Werkzeug zu sperren oder freizugeben, damit Fehler verhindert werden können, bevor sie entstehen. Das Ausmaß und Gewicht der Sensoren und Aktoren darf die Nutzbarkeit des Werkzeugs nicht einschränken.

Anforderung P4: Softwareplattform und Services zur Kontrolle von Fehlerursachen

Um die Funktionen zur Zielgrößenverbesserung über das Smarte Handwerkzeug und die Digitalen Assistenzsysteme zu erzeugen, muss eine Softwareplattform entwickelt werden, die Schnittstellen für beide Systeme bereitstellt und deren Daten verarbeiten kann. Die Plattform soll verschiedene Services bereitstellen, um Fehlerursachen zu erfassen und zu vermeiden. Dazu sollen einerseits die Daten zum Werkzeugzustand verarbeitet werden, um steuernd auf das Werkzeug eingreifen zu können und Hinweise auf den Assistenzsystemen auszugeben. Andererseits sollen die Prozessparameter vor der Werkzeugoperation erfasst und verarbeitet werden, um diese mit den aktuell geforderten Soll-Prozessparametern der Arbeitsaufgabe (Kontextanforderung) abzugleichen. Das Smarte Handwerkzeug muss gesperrt werden, bevor Fehler entstehen und die Werker sollen über das Assistenzsystem über die Ursache informiert werden. Abschließend sollen die Daten zu den durchgeführten Werkzeugeingriffen verarbeitet und wenn möglich für die Steuerung des Prozesses oder Rückmeldungen an die Werker genutzt werden. Die Werkzeugoperationen müssen hinsichtlich ihrer Güte bewertet werden, um Fehler schnell zu erkennen, automatisch zu dokumentieren und Lerneffekte bei den Werker zu fördern.

4 Nutzeranalyse

Vermerk: Teile der Analyseergebnisse sind im Rahmen einer betreuten studentischen Projektarbeit [Schu22] entstanden, wurden ausgearbeitet und in [Pion23] publiziert.

Dieses Kapitel analysiert die Anforderungen der Nutzer des zu entwickelnden Gesamtsystems, um die Akzeptanz und Wirksamkeit der geplanten Lösung sicherzustellen. Abschnitt 4.1 untersucht die Einflüsse auf die Werker und ihren Unterstützungsbedarf. Abschnitt 4.2 analysiert verschiedene Assistenztechnologien, die die Werker bei der Beherrschung dieser Einflüsse unterstützen können. Dazu betrachtet der Abschnitt die prognostizierten Effekte der Technologien und die Technologieakzeptanz der Endnutzergruppe. Abschnitt 4.3 fasst die Ergebnisse der Nutzeranalyse zusammen und erhebt neue Anforderungen an die Gesamtentwicklung.

4.1 Einflussfaktoren auf den Menschen im Flugzeugbau

Die Werker im Flugzeugbau müssen als Endnutzer in den Entwicklungsprozess der Gesamtlösung einbezogen werden. Dazu sollte neben der Akzeptanz der Lösungselemente auch die wahrgenommenen Einflüsse und Unterstützungsbedarfe der Werker betrachtet werden. Hierfür wurde ein Workshop mit sechs Strukturmechanikern sechs verschiedener Produktionsbereiche des Flugzeugherstellers durchgeführt. In diesem wurden die Einflussfaktoren durch die Werker erhoben, verschiedenen Domänen zugeordnet und in ihrer Relevanz bewertet. Unterabschnitt 4.1.1 stellt die Einflussfaktoren und Domänen vor. Die Relevanz der einzelnen Faktoren im Arbeitsalltag der Werker wurde über den subjektiven Unterstützungsbedarf und dem vermuteten Effekt auf die Zielgrößen Produktivität und Qualität bewertet. Unterabschnitt 4.1.2 stellt das heuristische Vorgehen und die Ergebnisse vor.

4.1.1 Modellierung von Einflussfaktoren

Ziel des Workshops war es, die Einflussfaktoren auf Produktivität und Qualität in manuellen Prozessen zu modellieren, die über die Integration von Smarten Handwerkzeugen und Digitalen Assistenzsystemen verringert oder kontrolliert werden sollen. Die in der Prozessanalyse identifizierten Anforderungen sollen überprüft und ggf. erweitert werden, um die Akzeptanz und Nutzbarkeit der zu entwickelnden Lösung zu steigern.

Als Vorbereitung zum Workshop wurden verschiedene Einflussfaktoren identifiziert und an einem Whiteboard notiert. Mit dieser Grundlage wurden die Werker dazu aufgefordert, subjektiv relevante Einflussfaktoren ihres Arbeitsalltags zu ergänzen. In der Gruppe konnten die Faktoren in verschiedene Domänen eingeordnet werden, wodurch eine qualitative Übersicht zu den

Elementen und Faktoren der manuellen Montageprozesse entstand. Die Übersicht stellt die 35 identifizierten Einflussfaktoren dar, ohne ihre wechselseitigen Beziehungen zu berücksichtigen. Die individuellen Eigenschaften, Fähigkeiten und Qualifikationen der Werker werden nicht direkt betrachtet. Abbildung 4.1 zeigt das resultierende, menschenzentrierte Modell der Einflüsse auf Werker in manuellen Flugzeugmontageprozessen.

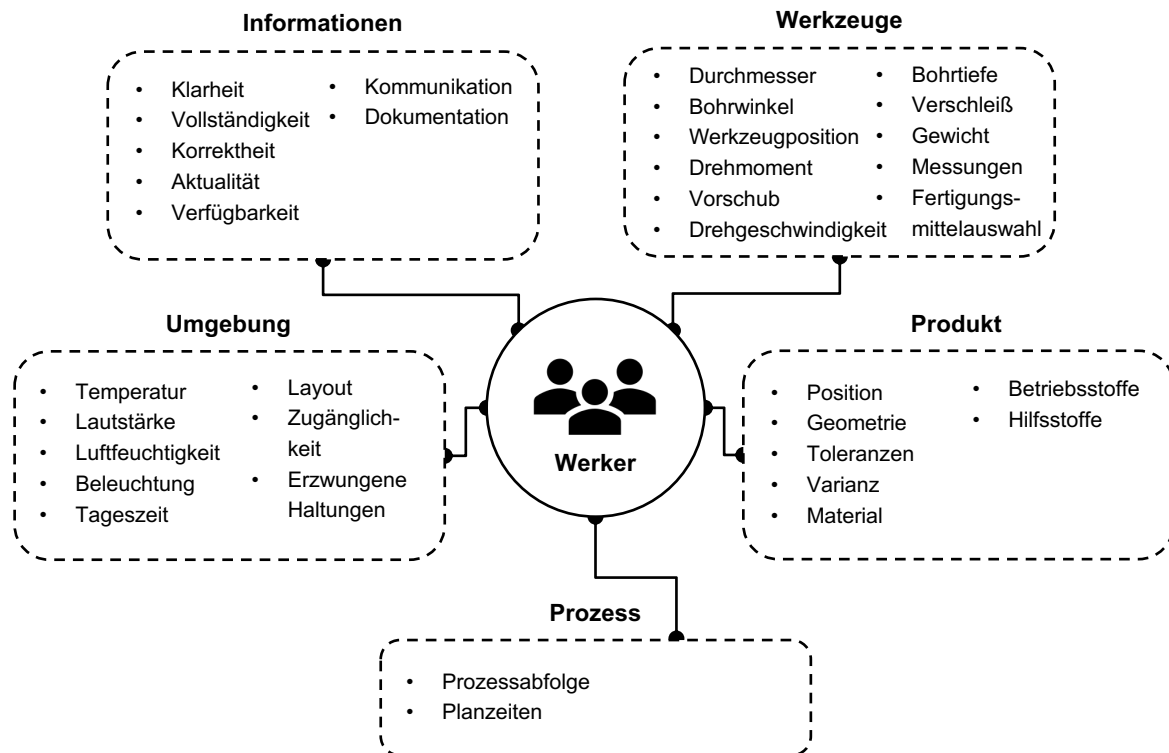


Abbildung 4.1: Einflussfaktoren auf Werker (i.A.a. [Pion23, S. 3])

Das Modell teilt die Einflussfaktoren in die fünf Domänen *Informationen*, *Werkzeuge*, *Umgebung*, *Produkt* und *Prozess* ein. Den größten Einfluss üben die Werkzeuge aus, da sie eine Reihe von Prozessanforderungen decken müssen. Zusätzlich zu den bereits genannten Prozessparametern führten die Werker die Bohrtiefe und das Gewicht der Werkzeuge als Faktoren auf. Die Einhaltung der Produkttoleranzen, Positionen und resultierenden Geometrien wurden explizit als herausfordernd bezeichnet. Ebenso erwähnten die Werker die schwierige Einhaltung der Planzeiten unter den herausfordernden Bedingungen der Arbeitsumgebung, wie bspw. den erzwungenen Körperhaltungen im Flugzeugrumpf. Die Einflussfaktoren der Informationen wurden nicht ergänzt, aber die Komplexität der Bauunterlage wurde besonders hervorgehoben.

4.1.2 Relevanzbewertung der Einflussfaktoren

Die Einflussfaktoren können teilweise sensorisch erfasst und technologisch kontrolliert werden. Um einerseits die Wahl der geplanten Integration aus Smarten Handwerkzeugen und Digitalen Assistenzsystemen zu überprüfen und andererseits detailliert festzustellen, welche Einflüsse kontrolliert werden sollen, müssen diese bezüglich ihrer Relevanz bewertet werden. Dazu nutzt die Forschungsarbeit einen heuristischen Ansatz, um die komplexen Faktoren einzuschätzen.

Zuerst bewertet der Ansatz den wahrgenommenen Unterstützungsbedarf der Werker für die einzelnen Einflussfaktoren mit einem Fragebogen (siehe Anhang B). In diesem wurden alle Faktoren auf einer Likert-Skala von 1 (wenig Unterstützung benötigt) bis 7 (Unterstützung ist essenziell) von den Werkern bewertet, wodurch sich der durchschnittlich wahrgenommene Unterstützungsbedarf pro Einflussfaktor berechnen lässt. Weiterhin wurden im Workshop jeweils drei Aufkleber an die Werker verteilt, die sie zu den subjektiv drei relevantesten Faktoren ihres Produktionsbereichs zuordnen konnten. Jeder Einflussfaktor erhält damit zusätzlich eine kumulative Anzahl an Aufklebern, die in die Heuristik einbezogen wird.

Weiterhin wird die Wirkung der Einflussfaktoren auf die Zielgrößen Produktivität und Qualität abgeschätzt. Dazu wird das Wirkmodell der Arbeitsproduktivität nach [Glö20] und die ersten Ansätze für ein Wirkmodell der Qualität nach Brosche [Bros19] genutzt, um die Anzahl der beeinflussten Stellgrößen argumentativ herzuleiten (siehe Anhang C). Die Argumentation verfolgt dabei lediglich das Ziel festzustellen, ob ein Wirkzusammenhang zwischen einem Einflussfaktor und einer Stellgröße existiert. Das Ausmaß des Einflusses wird nicht bewertet. Abbildung 4.2 verdeutlicht das Vorgehen. Bspw. beeinflusst der Einflussfaktor *Gewicht* der Werkzeuge die Stellgrößen *Vor- und Nachbereitung* und *Durchführung* der Regelgröße *Durchführung der Arbeitsaufgabe* und damit die Zielgröße *Produktivität*. Weiterhin beeinflusst der Einflussfaktor *Verschleiß* bspw. die Stellgröße *Arbeitsmittel* der Regelgröße *Streuung und Mittelwert* der Zielgröße *Qualität*.

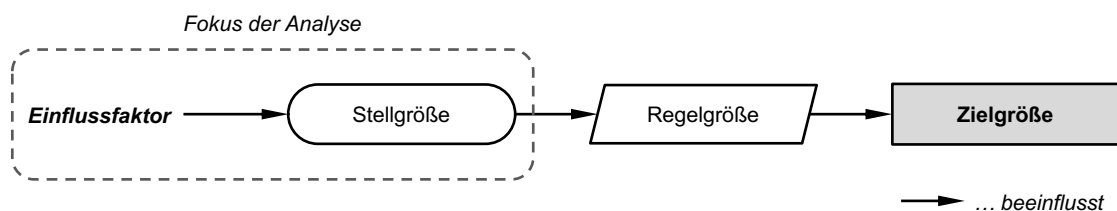


Abbildung 4.2: Bewertung der Zielgrößenwirkung der Einflussfaktoren

Die Gesamtbewertung der Relevanz für einen Faktor setzt sich folglich aus vier Komponenten zusammen. Das sind zusammenfassend

- der Mittelwert des wahrgenommenen Unterstützungsbedarfs UB ,
- die Anzahl der Aufkleber für die subjektiv wichtigsten Faktoren K_A ,
- die Anzahl der beeinflussten Stellgrößen im Produktivitätswirkmodell SG_P und
- die Anzahl der beeinflussten Stellgrößen im Qualitätswirkmodell SG_Q .

Aus allen Werten resultiert eine Relevanzbewertung mit den Kategorien *A* (hohe Unterstützungsrelevanz), *B* (mittlere Unterstützungsrelevanz) oder *C* (niedrige Unterstützungsrelevanz). Dazu werden Grenzwerte bestimmt, die eine analoge Kategorisierung in *A*, *B* und *C* für die Komponenten erlauben. Der Mittelwert des Unterstützungsbedarfs UB und der Aufkleberanzahl K_A werden zusammen betrachtet und erhalten eine gemeinsame Bewertung, während die Produktivitätswirkung SG_P und die Qualitätswirkung SG_Q jeweils eine Bewertung erhalten. Aus der Kombination der Einzelbewertungen entsteht eine Einordnung in die Gesamtkategorie. Tabelle 4.1 verdeutlicht die Grenzwerte der Komponenten und das Bewertungsschema. Da die Einflussfaktoren bereits

durch ihre Nennung im Workshop als wichtig erachtet werden können, beziehen sich die Grenzwerte jeweils auf die Verteilung der Einzelergebnisse.

Tabelle 4.1: Bewertungsschema für die Unterstützungsbewertung der Einflussfaktoren

Kriterium	Komponenten	Bewertungsregel
Unterstützungsbedarf	Wahrgenommener Unterstützungsbedarf und subjektive Wichtigkeit	A: $UB \geq 5,5$ oder $K_A \geq 2$ B: $UB \geq 5,0$ oder $K_A = 1$ C: alle anderen
Produktivität	Anzahl der betroffenen Stellgrößen im Produktivitätswirkmodell	A: $SG_P \geq 3$ B: $SG_P = 2$ C: $SG_P = 1$
Qualität	Anzahl der betroffenen Stellgrößen im Qualitätswirkmodell	A: $SG_Q \geq 2$ B: $SG_Q = 1$ C: $SG_Q = 0$
Gesamtkategorie	Kombination der bewerteten Kriterien Unterstützungsbedarf, Produktivität und Qualität	A: mindestens $2 \times A$ B: maximal $1 \times A$ oder $3 \times B$ C: alle anderen

Legende:

UB = Mittelwert des wahrgenommenen Unterstützungsbedarfs

K_A = Anzahl der Aufkleber für die subjektiv wichtigsten Faktoren

SG_P = Anzahl der beeinflussten Stellgrößen im Produktivitätswirkmodell

SG_Q = Anzahl der beeinflussten Stellgrößen im Qualitätswirkmodell

Tabelle 4.2 zeigt eine detaillierte Übersicht der Einflussfaktoren, mit ihren Ergebnissen der einzelnen Bewertungskomponenten und der resultierenden Kategorie der Relevanzbewertung. Auffällig ist, dass insbesondere die Einflussfaktoren der *Werkzeuge*-Domäne hohe Bewertungen sowohl für den subjektiven Unterstützungsbedarf als auch für die Zielgrößenwirkungen erhalten. Ursache hierfür ist, dass die Werkzeughandhabung den Großteil der Mitarbeiterzustände einnimmt. Der Werkzeugzustand und die Prozessparameter sind direkt für die Qualität des Endproduktes relevant.

Eine A-Bewertung erhalten in der *Werkzeuge*-Domäne die Einflussfaktoren *Durchmesser*, *Bohrwinkel*, *Werkzeugverschleiß* und *Werkzeuggewicht*. Das unterstreicht die Wichtigkeit, Prozessparameter schon vor dem Eingriff einzuhalten und einen einwandfreien Werkzeugzustand zu gewährleisten. Es hebt außerdem hervor, dass das zu entwickelnde Smarte Handwerkzeug ein möglichst geringes Gewicht haben sollte. Die Einhaltung der korrekten Vorschubparameter und Bohrtiefe erhalten trotz des großen Einflusses auf die Qualität die niedrigsten Bewertungen in der Domäne. Das lässt sich dadurch erklären, dass die Teilnehmer des Workshops ausnahmslos mehrjährige Erfahrung in ihrem Produktionsbereich aufweisen. Die korrekte Durchführung der Werkzeugeingriffe ist demnach eine geringere Besorgnis, als die Einhaltung der korrekten Prozessparameter vor dem Eingriff.

Weitere A-Bewertungen erhalten die Einflussfaktoren *Produktposition*, *Produktgeometrie* und *Planzeiten*. Das verdeutlicht den bereits beschriebenen Zielkonflikt zwischen hohen Qualitätsanforderungen im Flugzeugbau und einem erhöhtem Zeitdruck durch steigende Produktionsraten.

Tabelle 4.2: Relevanzbewertung der Einflussfaktoren im Flugzeubau [Pion23, S. 4]

Einflussfaktor	<i>UB</i>	<i>K_A</i>	<i>SG_P</i>	<i>SG_Q</i>	Relevanzbewertung
<i>[Werkzeuge]</i>					
Durchmesser	5.2	3	4	1	A
Bohrwinkel	5.8	-	4	1	A
Werkzeugposition	5.3	1	4	1	B
Drehmoment	4.8	1	4	1	B
Drehgeschwindigkeit	5.0	1	4	1	B
Bohrtiefe	4.7	-	4	1	B
Vorschub	4.5	-	4	1	B
Werkzeugverschleiß	5.8	4	3	2	A
Werkzeuggewicht	5.5	3	5	1	A
Messungen	4.8	1	3	1	B
Auswahl der Fertigungsmittel	5.3	-	2	1	B
<i>[Informationen]</i>					
Dokumentenklarheit	4.8	-	3	1	B
Dokumentenvollständigkeit	4.7	-	3	1	B
Dokumentenkorrektheit	4.7	-	3	1	B
Dokumentenaktualität	4.7	-	3	1	B
Dokumentenverfügbarkeit	4.3	-	3	1	B
Dokumentation	4.8	-	2	1	C
Kommunikation	5.2	-	3	1	B
<i>[Produkt]</i>					
Produktposition	5.5	-	3	2	A
Produktgeometrie	5.2	-	3	2	A
Produkttoleranzen	4.8	-	3	2	B
Betriebsmittel	4.3	-	3	1	B
Hilfsmittel	4.2	-	3	1	B
Varianz	5.3	-	3	1	B
Material	4.7	-	3	1	B
<i>[Prozess]</i>					
Prozessabfolge	4.0	-	1	1	C
Planzeiten	5.5	2	3	1	A
<i>[Umgebung]</i>					
Zugänglichkeit	5.0	-	2	2	B
Erzwungene Körperhaltungen	5.3	1	2	2	B
Arbeitsplatzlayout	4.8	-	2	2	B
Temperatur	5.7	-	2	1	B
Lautstärke	5.2	-	2	1	B
Luftfeuchtigkeit	4.7	-	2	1	C
Beleuchtung	5.3	-	2	1	B
Tageszeit	4.3	-	2	1	C

Legende:

UB = Mittelwert des wahrgenommenen Unterstützungsbedarfs

K_A = Anzahl der Aufkleber für die subjektiv wichtigsten Faktoren

SG_P = Anzahl der beeinflussten Stellgrößen im Produktivitätswirkmodell

SG_Q = Anzahl der beeinflussten Stellgrößen im Qualitätswirkmodell

4.2 Analyse digitaler Assistenztechnologien

Für die angestrebte Werkerunterstützung wurden zwei technologische Vorentscheidungen getroffen: die Verwendung Smarterer Handwerkzeuge und die Verwendung von Tablet-Computern als Basistechnologie für das Digitale Assistenzsystem. Die folgende Analyse digitaler Assistenztechnologien hat daher zwei Zielrichtungen: Sie soll zum einen prüfen, ob die Vorauswahl sowohl bezüglich ihrer Wirkung als auch bezüglich ihrer Nutzerakzeptanz sinnvoll ist. Zum anderen soll sie weitere Technologien identifizieren, die sich zur Werkerunterstützung eignen. Unterabschnitt 4.2.1 untersucht die Wirkung verschiedener Technologien auf die modellierten Einflussfaktoren und erörtert die Akzeptanz der Werker für diese Technologien. Unterabschnitt 4.2.2 vergleicht die einzelnen Technologiewirkungen und -akzeptanzen, um eine Auswahl an sinnvollen Assistenztechnologien zu treffen.

4.2.1 Technologiebewertung

Technologiewirkung

Die Wirkung verschiedener Technologien lässt sich heuristisch herleiten, indem die Effekte auf die modellierten Einflussfaktoren untersucht werden. Um die Effekte einzuschätzen, wird untersucht, inwieweit sie die kategorisierten Einflussfaktoren kontrollieren oder verbessern. Die Technologiewirkung ergibt sich aus der kumulierten Anzahl an Einflussfaktoren und der Multiplikation mit der jeweiligen Relevanzbewertung. Der Einfluss auf einen mit A bewerteten Faktor wird dreimal, der Einfluss auf einen mit B bewerteten Faktor zweimal und der Einfluss auf einen mit C bewerteten Faktor einmal gezählt. Die Beeinflussung aller 35 Faktoren würde zu einer maximalen Wirkung von 73 (100 %) führen. Gleichung 4.1 verdeutlicht die Berechnung.

$$TW = EF_A \cdot 3 + EF_B \cdot 2 + EF_C \cdot 1 \quad (4.1)$$

mit TW : Technologiewirkung [-]
 EF_A : Anzahl beeinflusster Faktoren der A -Kategorie [-]
 EF_B : Anzahl beeinflusster Faktoren der B -Kategorie [-]
 EF_C : Anzahl beeinflusster Faktoren der C -Kategorie [-]

Für die Bewertung müssen verschiedene Anwendungsfälle und Integrationen für die jeweilige Assistenztechnologie bedacht werden. So kann ein Exosklett bspw. den Einflussfaktor *Erzwungene Körperhaltungen* unterstützen, aber auch auf die Einflussfaktoren *Bohrwinkel*, *Vorschub*, *Werkzeuggewicht* oder *Messungen* einwirken. Dazu müsste das Exoskelett mit Sensorik und Aktorik über eine Softwareanbindung entsprechend kontextgerecht gesteuert werden. Die detaillierte Bewertung der Wirkung für jede Assistenztechnologie befindet sich in Anhang D. Tabelle 4.3 zeigt die Anzahl der beeinflussten A -, B - und C -Faktoren pro Technologie sowie die jeweils resultierende Technologiewirkung und sortiert die Technologien in absteigender Reihenfolge. Im Rahmen

des Workshops wurden elf Assistenztechnologien ausgewählt, die im industriellen Kontext bekannt sind und verschiedene Einflussfaktoren kontrollieren oder steuern können. Die Auswahl umfasst vier Technologien zur Informationsbereitstellung, drei Technologien zur Ausführungs- und Dokumentationsunterstützung und vier Technologien zur Datenerfassung und -auswertung.

Tabelle 4.3: Technologiewirkung in der manuellen Flugzeugmontage [Pion23, S. 5]

Technologie	A-Faktoren (3 Punkte)	B-Faktoren (2 Punkte)	C-Faktoren (1 Punkt)	Wirkung (max: 73)
Smarte Handwerkzeuge	3	9	2	29
Tablet / Handy	2	9	2	26
Smarte Brille	2	9	0	24
Projektion	2	7	0	20
Smarte Uhr	0	7	0	14
Exoskelett	2	4	1	15
Smarte Messmittel	2	3	1	13
Industrielle Bildverarbeitung	2	2	1	11
Umgebungssensorik	0	3	3	9
Blickerfassung	0	4	1	9
Bewegungserfassung	0	3	0	6

Die *Smarten Handwerkzeuge* erzielen die höchste Technologiebewertung, weil sich ein Großteil der Einflussfaktoren auf die Werkzeuge bezieht und diese gleichzeitig die höchsten Relevanzbewertungen erzielen. Als Medien zur Informationsdarstellung und -verarbeitung haben *Tablets / Handys* oder *Smarte Brillen* eine große Wirkung, da sie Informationen darstellen und Interaktionsmöglichkeiten für die Werker schaffen. *Tablets / Handys* haben eine geringfügig höhere Technologiewirkung als *Smarte Brillen*, da sie zusätzlich Funktionen zur Dokumentation beinhalten und über die Darstellungsform vereinfacht Informationen zu Prozessabläufen darstellen können.

Technologien wie die *Bewegungserfassung*, *Blickerfassung* oder *Umgebungssensorik* erhalten die niedrigsten Wirkungsbewertungen. Sie können zwar Einflussfaktoren der Umgebung erfassen, aber zumindest alleinstehend keine wesentlichen Prozessanteile unterstützen.

Technologieakzeptanz

Neben der Wirkung der Technologien ist die Akzeptanz der Endnutzergruppe von entscheidender Bedeutung. Um diese einzuschätzen, wurde eine Befragung mit 26 Werkern aus insgesamt acht Produktionsbereichen eines Flugzeugherstellers und eines Zuliefererunternehmens durchgeführt. In der Befragung wurden die Technologien jeweils mit einem Bild und der Beschreibung eines Anwendungsfalls im Flugzeugbau vorgestellt. Daraufhin konnten die Teilnehmer ihre Akzeptanz zur Technologie angeben (siehe Anhang E).

Dazu verwendet die Analyse das Technology Acceptance Model (TAM) nach Davis [Davi85]. Dieses nutzt verschiedene Aussagen zur wahrgenommenen Nützlichkeit und Benutzerfreundlichkeit, um die Technologieakzeptanz der Probanden einzuschätzen [Davi85, S. 24]. In der Regel

werden dazu pro Untersuchungselement sieben Aussagen gestellt. Um die Anzahl teilnehmender Werker zu erhöhen und die vollständige Bewertung von elf Assistenztechnologien zu erleichtern, wurde die Befragung auf fünf Aussagen pro Technologie beschränkt (siehe Tabelle 4.4). Die Probanden konnten jeweils ihren Grad der Zustimmung zu diesen Aussagen auf einer Likert-Skala von 1 (völlige Ablehnung) bis 7 (völlige Zustimmung) angeben.

Tabelle 4.4: Aussagen zur Technologieakzeptanz [Pion23, S. 4]

Nr.	Aussage	Typ
1.	Ich würde gerne mit X arbeiten.	Gesamt
2.	Ich denke, die Nutzung von X würde meinen Arbeitstag vereinfachen.	Nützlichkeit
3.	Ich denke, die Arbeitsqualität würde sich durch die Nutzung von X verbessern.	Nützlichkeit
4.	Es wäre einfach für mich, mich an X zu gewöhnen.	Benutzerfreundlichkeit
5.	Ich stelle mir die Nutzung von X klar und verständlich vor.	Benutzerfreundlichkeit

Aus den Antworten errechnet sich eine Gesamtpunktzahl sowie eine Punktzahl für die Benutzerfreundlichkeit und die Nützlichkeit der einzelnen Technologien. Abbildung 4.3 zeigt die Ergebnisse der Umfrage. Die Technologieakzeptanz wird als Durchschnitt der fünf Punktzahlen gebildet.

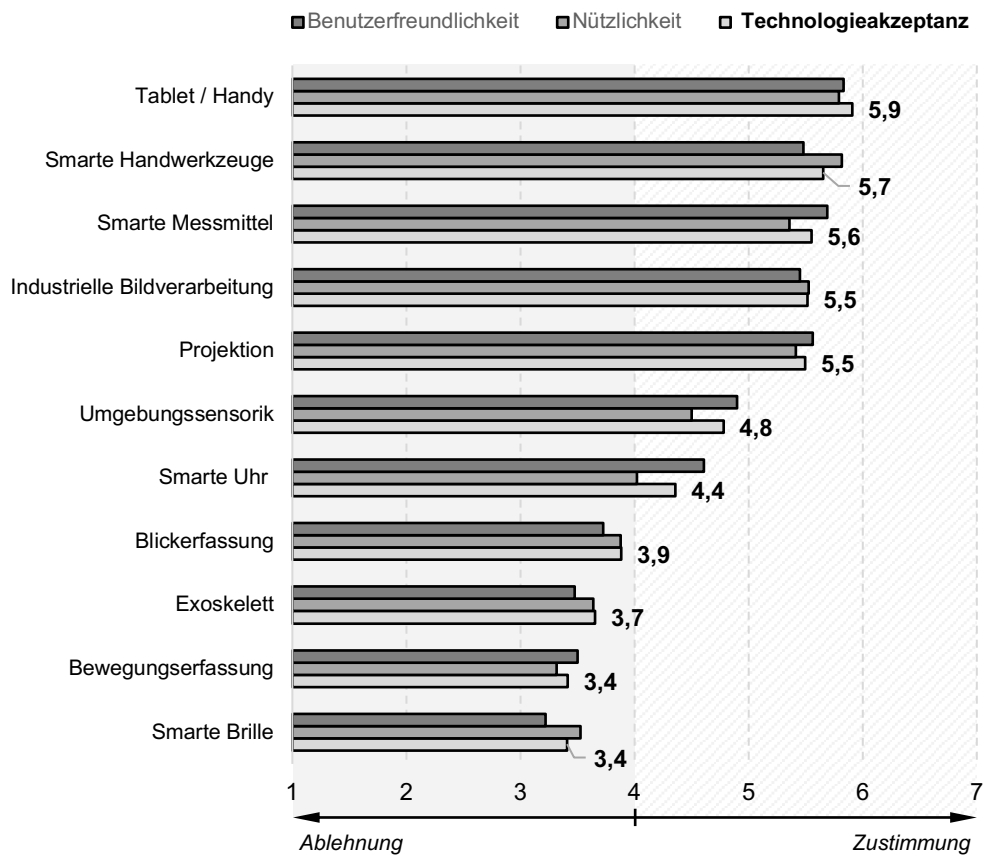


Abbildung 4.3: Technologieakzeptanz der Assistenztechnologien (i.A.a. [Pion23, S. 5])

Die Ergebnisse zeigen, dass Assistenztechnologien, die Daten zum Produkt oder zur Umgebung erfassen und verarbeiten, gut akzeptiert werden (*Industrielle Bildverarbeitung* und *Umgebungs-*

sensorik). Technologien, die Daten zu den Werkern aufnehmen, werden tendenziell abgelehnt (*Blickerfassung* und *Bewegungserfassung*). Sowohl *Smarte Handwerkzeuge* als auch *Smarte Messmittel* erzielen als Technologien, die die Ausführung und Dokumentation unterstützen, hohe Akzeptanzwerte. Auffällig ist, dass *Exoskelette* trotz der ergonomisch anspruchsvollen Tätigkeiten eher abgelehnt werden. Das kann daran liegen, dass die Skelette zwar Kräfte entlasten können, die Arbeit in schwer zugänglichen Arbeitsbereichen aber erschweren.

Die Assistenztechnologien zur kognitiven Unterstützung der Arbeiter erzielen unterschiedliche Ergebnisse in der Umfrage. *Tablets / Handys* erreichen die höchste Akzeptanzbewertung. Hierzu könnte beitragen, dass die Geräte eine Vielzahl von Anwendungsfällen abdecken können und auch im privaten Bereich täglich genutzt werden. Die Nutzung von *Projektion*, um Informationen im Arbeitsbereich der Arbeiter anzuzeigen, erreicht ebenfalls eine hohe Akzeptanzbewertung. Die Einstellung zur Nutzung von *smarten Uhren* ist neutral. Die Benutzerfreundlichkeit wird zwar etwas besser eingeschätzt, allerdings scheint die Nützlichkeit für die Nutzergruppe nicht ausreichend zu sein. Die niedrigste Bewertung erhalten *smarte Brillen*. Sie gelten als schwierig zu handhaben und werden entsprechend als nicht nützlich erachtet.

4.2.2 Fundierung der Technologieentscheidung

Die Integration von Smarten Handwerkzeugen und Digitalen Assistenzsystemen scheint sowohl einen hohen Nutzen für die Beherrschung der Einflussfaktoren und die Verbesserung der Zielgrößen zu haben und gleichzeitig auf eine hohe Akzeptanz der Endnutzer in der Flugzeugmontage zu treffen. Um die Technologieentscheidung visuell zu fundieren, können die erhobenen Daten gegenübergestellt und die Technologien gruppiert werden. Dazu stellt Abbildung 4.4 eine Wirkungs-Akzeptanz-Matrix auf und ordnet die Technologien in vier Quadranten mit jeweils allgemeinen Handlungsempfehlungen ein. Die Quadranten teilen sich entlang der Wirkungs- und der Technologieakzeptanz-Achse auf. Bei einem relativen TAM-Wert von 5,25 wird die erste Grenze gesetzt (ab 5 gilt ein TAM-Wert als positiv) und bei einer Wirkungsbewertung von 12,5 wird die zweite Grenze gesetzt.

In Quadrant *I* trifft eine hohe Akzeptanz auf eine hohe Wirkung. Die Technologien scheinen für eine Implementierung sinnvoll zu sein. In Quadrant *II* finden sich Technologien wieder, die Verbesserungen bewirken können, aber von den Arbeitern nicht akzeptiert werden. Vor einer Implementierung sollte daher ihre Benutzerfreundlichkeit erhöht werden. Trifft eine hohe Akzeptanz auf eine niedrige Wirkung (Quadrant *III*), sollte für die Technologie ein sinnvoller Anwendungsfall gefunden werden, der mehr Einflussfaktoren und Stellgrößen betreffen könnte. Ist weder die Akzeptanz noch die Wirkung als hoch einzuschätzen, ist die Assistenztechnologie vorerst nicht zu implementieren. Die Technologien aus Quadrant *IV* sollten zuerst eine sinnvolle Anwendung finden, um eine höhere Wirkung zu erzielen und möglicherweise bessere TAM-Bewertungen zu erhalten.

Neben *Tablets / Handys* und *Smarten Handwerkzeugen* sind weiterhin Technologien zur *Projektion* von Informationen in den Arbeitsbereich der Arbeiter interessant. So können bspw. durchzu-

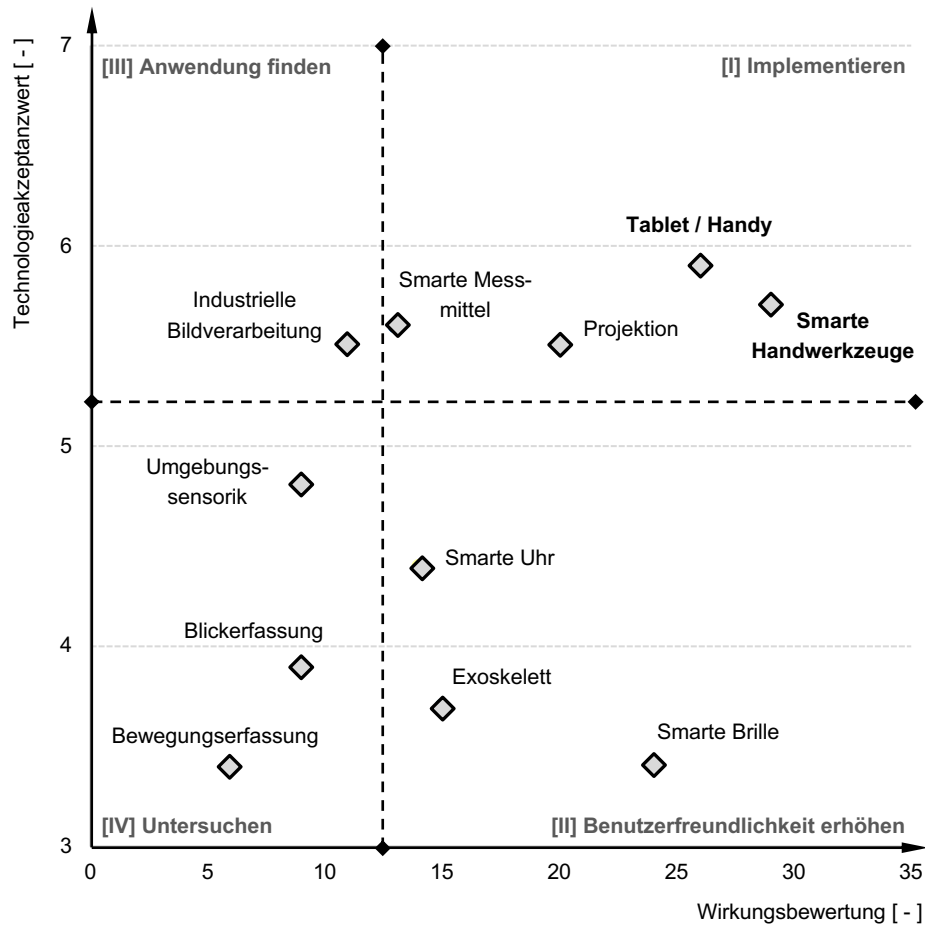


Abbildung 4.4: Wirkungs-Akzeptanz-Matrix der Assistenztechnologien [Pion23, S. 5]

führende Werkzeugoperationen inklusive der Prozessparameter auf die Bauteile projiziert werden. Das würde den kognitiven Verarbeitungsprozess zusätzlich entlasten, da die Informationen direkt am Bauteil verortet sind. Sowohl Wirkung als auch Akzeptanz der Lösung sind hoch. Weiterhin scheint die Implementierung *smarter Messmittel* sinnvoll zu sein. Diese könnten genutzt werden, um die Dokumentation von Messwerten zusätzlich zu automatisieren und damit Qualitätsmanagementprozesse im Flugzeugbau zu entlasten.

Eine hohe Akzeptanz erfährt auch die *industrielle Bildverarbeitung*. Diese kann genutzt werden, um die Qualität und Vollständigkeit der Bauteile und Produkte zu bewerten und zu dokumentieren. Die niedrige Wirkungsbewertung resultiert daraus, dass lediglich Einflussfaktoren zur Produkt-Domäne und zur Dokumentation verbessert werden. Eine Anwendung kann trotzdem sinnvoll sein, wenn die Qualitätsüberprüfung besonders relevant ist oder die Technologie mit weiteren Assistenzsystemen integriert wird. *Smarte Brillen* erzielen zwar eine sehr hohe Wirkungsbewertung, erhalten aber gleichzeitig die schlechteste Technologieakzeptanz. Vor einer Integration der Brillen muss die Benutzerfreundlichkeit also deutlich erhöht werden. Dazu zählen besonders die Bedienung und das Gewicht der Brillen für eine längere Nutzung.

Die Analyse digitaler Assistenztechnologien bestätigt einerseits die getroffene Vorauswahl von Smarten Handwerkzeugen und Tablets, denen Endnutzer sowohl eine hohe Wirkung als auch eine hohe Akzeptanz zusprechen. Andererseits zeigt sich, dass auch andere Technologien gut bewertet

werden. Die zu entwickelnde Lösung sollte daher möglichst technologieoffen gestaltet werden und z. B. unterschiedliche Schnittstellenprotokolle unterstützen, flexible Datenmodelle nutzen und so modularisiert werden, dass neue Funktionen schnell hinzugefügt werden können.

4.3 Anforderungen der Nutzeranalyse

Die Untersuchungsergebnisse zu Einflussfaktoren, Technologieakzeptanzen und -wirkungen können genutzt werden, um weitere Entwicklungsanforderungen für das Zielsystem festzuhalten. Im Folgenden werden die Anforderungen der Nutzeranalyse (N) beschrieben.

Anforderung N1: Unterstützung der Einflussfaktoren der Werkzeuge-Domäne

Die Nutzeranalyse verdeutlicht die Wichtigkeit der bereits in der Qualitätsanalyse festgestellten Prozessparameter, die durch die Entwicklungslösung kontrolliert werden sollen. Das zu entwickelnde Smarte Handwerkzeug sollte daher möglichst viele Einflussfaktoren der Werkzeuge-Domäne unterstützen, um eine hohe Akzeptanz der Werkern zu erhalten. Die Relevanzbewertung hebt dazu hervor, dass die Kontrolle des Gewichts und des Verschleißes der Werkzeuge besonders wichtig ist und dass der Durchmesser und der Bohrwinkel vor den Werkzeugoperationen kontrolliert werden sollte.

Anforderung N2: Werkzeugkommunikation mit geringer Latenzzeit

Zusätzlich wurde aus dem Gespräch im Workshop deutlich, dass die Werker die Einhaltung der Planzeiten herausfordernd finden. Das unterstreicht den bereits beschriebenen Konflikt von Produktivität und Qualität in der manuellen Flugzeugmontage. Für die Kommunikation mit dem Smarten Handwerkzeug bedeutet das, dass sämtliche Datenpakete mit niedrigen Latenzen übertragen und verarbeitet werden sollten. Insbesondere Funktionen zur Einstellung von Prozessparametern vor der Werkzeugoperation, Funktionen zur Blockade und Freigabe des Werkzeugs und Funktionen zur Dokumentation sollten so schnell ablaufen, dass die Werker in ihrer aktuellen Arbeitsweise nicht behindert werden.

Anforderung N3: Übersichtliche Informationsbereitstellung über das CAD-Modell

Die Informationen zur notwendigen Position und Geometrie von Bauteilen und Produkten sind besonders relevant und werden derzeit durch eine Vielzahl von 2D-Ansichten in der Bauunterlage dargestellt, was die Werker bemängeln. Die Technologiebewertung zeigt außerdem, dass Assistenztechnologien wie die Projektion oder industrielle Bildverarbeitung eine hohe Akzeptanz von den Werkern erfahren. Diese Technologien unterstützen insbesondere die Visualisierung der Produktpositionen und -geometrien oder die Überprüfung der Toleranzeinhaltung. Das Digitale Assistenzsystem sollte daher das CAD-Modell des Produktes anzeigen und so navigierbar sein, dass Geometrien und Positionen gut erkannt werden können. Wichtige Informationen könnten dazu direkt am Bauteil verortet werden und wenn möglich mit Koordinaten versehen werden, um

auch für Technologien wie die Projektion oder Augmented Reality verwendbar zu sein. Insbesondere sollten neben manuellen Arbeitsschritten auch die werkzeuggebundenen Arbeitsschritte dargestellt werden, um die Potenziale der Integration mit Smarten Handwerkzeugen zu nutzen.

Anforderung N4: Funktionale Skalierbarkeit des Gesamtsystems

Die Softwareplattform sollte so aufgebaut sein, dass weitere Assistenztechnologien und Funktionen aufwandsarm integriert werden können. Dazu sollten verschiedene Datenübertragungsprotokolle nutzbar sein, um individuelle Technologieanforderungen zu erfüllen. Die Daten könnten an einer zentralen Eventverteilung der Plattform gebündelt werden, damit Services an dieser Stelle anknüpfen und auf die Datenströme reagieren können. Das würde es ermöglichen, sukzessive Technologien aufwandsarm zu integrieren und Funktionen flexibel hinzuzufügen.

5 Integration Smarter Handwerkzeuge und Digitaler Assistenzsysteme

Vermerk: Teile des Konzepts wurden bereits in den Veröffentlichungen [Pion22] und [Pion24] publiziert.

Dieses Kapitel beschreibt die Entwicklung der Einzelsysteme und das Konzept zur Integration Smarter Handwerkzeuge und Digitaler Assistenzsysteme. Zuerst beschreibt Abschnitt 5.1 das Zielbild der Entwicklung. Anschließend erläutert Abschnitt 5.2 vier Integrationsstufen, die zu einer funktionsgerechten Vernetzung der Systemelemente führen und geht dann auf die Systemarchitektur ein, die einen Rahmen für die Ausgestaltung der Konzeptelemente darstellt. Abschnitt 5.3 beschreibt die Entwicklung des Smarten Handwerkzeugs, des Digitalen Assistenzsystems für die Arbeitsvorbereitung und des Digitalen Assistenzsystems für die Montage. Abschnitt 5.4 beschreibt die Integration der Teilsysteme über die Konzipierung der Softwareplattform, die die Datenübertragung, Datenmodelle und Services beinhaltet. Abschließend definiert Abschnitt 5.5 einen digitalisierten Montageprozess und beschreibt dazu, wie das Digitale Assistenzsystem der Montage und das Smarte Handwerkzeug in verschiedenen Betriebsmodi genutzt werden können, um werkzeugabhängige Arbeitsschritte zu bearbeiten.

5.1 Zielbild der Entwicklung

Um das Zielbild der Entwicklung zu verdeutlichen, beschreibt dieser Abschnitt im Folgenden den aktuellen Prozess von der Arbeitsvorbereitung bis zur Dokumentation der durchgeführten Werkzeugoperationen und stellt diesen dem Zielprozess der Integration von Smarten Handwerkzeugen und Digitalen Assistenzsystemen gegenüber (vgl. Abbildung 5.1). Analog zur Prozessanalyse (vgl. Abschnitt 3.1) bezieht sich die Beschreibung auf eine Variantenplanung im Flugzeugbau.

Konventionelle Prozesskette

Abbildung 5.1 (links) zeigt ein vereinfachtes Bild der *konventionellen Prozesskette* im Flugzeugbau mit 13 Schritten in den Bereichen Arbeitsvorbereitung, Montage und Qualitätssicherung.

Arbeitsvorbereitung Neue Kundenanforderungen erfordern konstruktive Anpassungen der Flugzeugsektionen, die durch die Mitarbeiter der Arbeitsvorbereitung in die CAD-Modelle eingearbeitet werden, indem sie bspw. neue Nieten in diese einfügen. Die Änderungen am CAD-Modell werden in eine Vielzahl von Bauzeichnungen übertragen – hier entsteht ein erster Medienbruch in der Arbeitsvorbereitung. Zusätzlich werden in den Bauzeichnungen die notwendigen Produk-

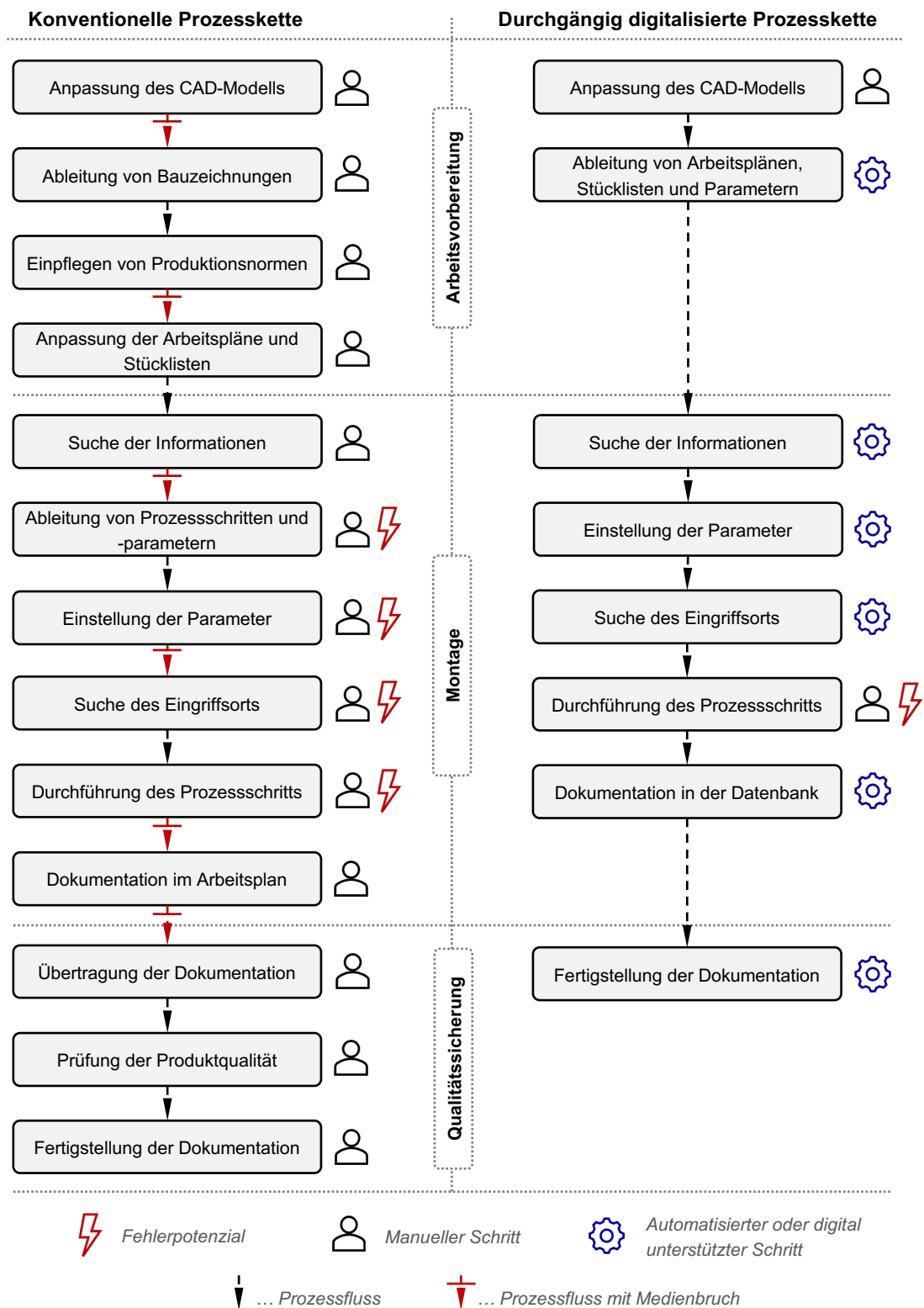


Abbildung 5.1: Konventionelle und durchgängig digitalisierte Prozesskette

tionsnormen vermerkt. Abschließend passt die Arbeitsvorbereitung in einem weiteren System die Arbeitspläne und Stücklisten an und stellt diese den Montagemitarbeitern ausgedruckt bereit. Die Schritte der Arbeitsvorbereitung erfolgen somit manuell und werden in drei verschiedenen Systemen durchgeführt.

Montage Die Montagemitarbeiter suchen alle Informationen in den bereitgestellten Papierunterlagen. Dazu suchen sie zuerst die laut Arbeitsplan durchzuführenden Werkzeugoperationen in den Bauzeichnungen. In den vermerkten Produktionsnormen der Zeichnungen suchen sie anschließend die notwendigen Prozessschritte und -parameter und stellen diese auf dem Werkzeug ein. Im dargestellten Prozess betrifft das vor allem die hinzugefügten Niete und die daraus resultierenden Werkzeugoperationen. Das Suchen des Eingriffsorts erfolgt wiederum über die Bauzeichnungen. Daraufhin führen die Werker die Werkzeugoperationen des Prozessschritts durch und dokumentieren ihre Vollständigkeit per Stempel im Arbeitsplan. In der Montage entstehen durch die Suche in verschiedenen Dokumenten und das manuelle Einstellen von Parametern, das Suchen des Eingriffsorts sowie das Durchführen des Prozessschritts häufig hohe zeitliche Aufwände und Fehlerpotenziale.

Qualitätssicherung Die Qualitätssicherung überträgt die im Arbeitsplan dokumentierten Prozessschritte in ein weiteres System, prüft anschließend umfassend die Produktqualität und stellt die Dokumentation abschließend fertig.

Durchgängig digitalisierte Prozesskette

Abbildung 5.1 (rechts) zeigt die *durchgängige* und mit Hilfe des Gesamtsystems *digitalisierte Prozesskette*. Sie ermöglicht eine automatisierte Übertragung von Änderungen am CAD-Modell über die Darstellung in einem Digitalen Assistenzsystem bis zur automatisierten Dokumentation in einer zentralen Datenbank.

Arbeitsvorbereitung Nachdem das CAD-Modell angepasst ist, kann ein Digitales Assistenzsystem der Arbeitsvorbereitung automatisiert die Arbeitspläne, Stücklisten und Prozessparameter der einzelnen Werkzeugoperationen aus dem Modell ableiten. Dazu ist ein Algorithmus notwendig, der die Produktionsnormen auf die Niete im CAD-Modell anwendet, um die durchzuführenden Werkzeugoperationen und ihre benötigten Prozessparameter abzuleiten.

Montage In der Montage zeigt ein Digitales Assistenzsystem den Arbeitern die Informationen kontextgerecht und gefiltert an, um die Suche der Informationen digital zu unterstützen. Ein Smartes Handwerkzeug kann die Prozessparameter kontextgerecht einstellen und in Kombination mit dem Digitalen Assistenzsystem oder anderen Assistenztechnologien, wie Projektionssystemen, beim Suchen des Eingriffsorts unterstützen. Die Arbeiter führen die Werkzeugoperationen mit dem Smarten Handwerkzeug durch. Dieses erzeugt Rückmeldedaten und sendet diese anschließend zu einer Softwareplattform, um den Fortschritt und die Qualität der Werkzeugoperationen automatisch in einer zentralen Datenbank zu dokumentieren.

Qualitätssicherung Die Qualitätssicherung greift auf diese Dokumentation der Prozessqualität zu und kann idealerweise ohne eine tatsächliche Prüfung der Produktqualität die Dokumentation fertigstellen. Müssen die Mitarbeiter Qualitätsmerkmale messen, ist es denkbar, dass sie smarte Messmittel nutzen, um die Messwerte automatisch in eine zentrale Datenbank zurückzuschreiben und somit die Dokumentation zu vervollständigen.

Die durchgängig digitalisierte Prozesskette verknüpft mehrerer Digitale Assistenzsysteme und Smarte Handwerkzeuge über eine zentrale Datenbank. Dadurch werden Änderungen am CAD-Modell automatisiert und ohne Medienbrüche für die Werker bereitgestellt. Durch die Integration der Systeme können die Fehlerpotenziale der manuellen Prozesse reduziert werden. Lediglich das tatsächliche Durchführen der Werkzeugoperationen verbleibt im Idealfall ein manueller Schritt mit Fehlerpotenzial. Zusätzlich ermöglicht die Prozesskette zeitliche Einsparungen in den Prozessschritten, indem Schritte automatisiert und unterstützt werden. Über die zentrale Datenbank entsteht ein geschlossener Kreis, vom (geänderten) CAD-Modell bis zur Dokumentation der durchgeführten Schritte und ihrer Qualität.

Entscheidend für die Nutzung von Smarten Handwerkzeugen ist die Kenntnis des Eingriffsorts. Die Suche kann entweder über eine kontextgerechte Darstellung anhand des CAD-Modells oder technologisch mit einem Positionserkennungssystem am Smarten Handwerkzeug unterstützt werden. Entsprechend stehen für die Integration Smarter Handwerkzeuge und Digitaler Assistenzsysteme insbesondere zwei Betriebsmodi im Fokus: ein rein *applikationsgesteuerter Modus* sowie ein technologisch unterstützter *positionsgesteuerter Modus*. Der Fokus der Entwicklung liegt primär auf der Montage. Die Arbeitsvorbereitung und Qualitätssicherung werden dementsprechend zweitrangig behandelt.

5.2 Integrationsvorgehen und Systemarchitektur

Dieser Abschnitt beschreibt das Integrationsvorgehen und die Systemarchitektur für das Gesamtsystem. Unterabschnitt 5.2.1 erläutert das Vorgehen zur Integration von Datenübertragungsprotokollen, Datenmodellen und Services und zur langfristigen Auswertung der Daten über eine Zeitreihen-Datenbank. Unterabschnitt 5.2.2 beschreibt die Systemarchitektur des Gesamtsystems und ordnet die darauffolgenden Abschnitte und Integrationsstufen darin ein.

5.2.1 Integrationsstufen und -anforderungen

Um Smarte Handwerkzeuge und Digitale Assistenzsysteme in einer Softwareplattform zu integrieren, müssen die verschiedenen Funktionsebenen der Plattformarchitektur im Internet der Dinge detailliert ausgestaltet werden (vgl. Abbildung 2.13). Dazu werden vier Integrationsstufen definiert:

- die *datenorientierte Integration*, um die Datenintegration und Datenübertragung zu gestalten,
- die *modellorientierte Integration*, um die Datenspeicherung und Datenbankmodelle zu gestalten,
- die *funktionsorientierte Integration*, um die Zielfunktionen des Gesamtsystems als Services zu entwickeln und damit die Datenverarbeitung zu gestalten sowie
- die *analyseorientierte Integration*, um die integrierten Datenströme langfristig auswerten und das Gesamtsystem optimieren zu können.

Das Vorgehen geht davon aus, dass die zu integrierenden Smarten Handwerkszeuge und Digitalen Assistenzsysteme grundlegend entwickelt und ihre zu realisierenden Zielfunktionen definiert sind. Eine weitere Prämisse ist, dass eine Softwareplattform in ihren Grundzügen besteht und die notwendige Orchestrierung von Ressourcen, Schnittstellen und Anwendungen ermöglicht. Abbildung 5.2 verdeutlicht den Ausgangszustand der Softwareplattform. Die Funktionsebenen *Gerätemanagement* und *Visualisierung und Kontrolle* können durch die Digitalen Assistenzsysteme gehandhabt werden, weshalb sich das Vorgehen insbesondere auf die anforderungsgerechte und skalierbare Gestaltung der *Datenintegration*, *Datenspeicherung* und *Datenverarbeitung* konzentriert.

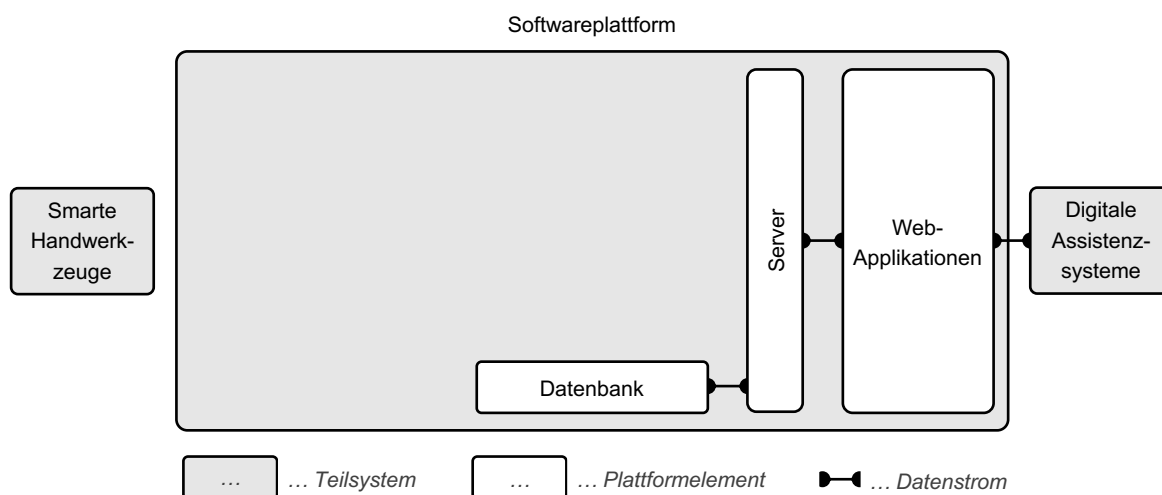


Abbildung 5.2: Ausgangszustand der Softwareplattform

Die Integrationsstufen werden sukzessive durchlaufen, um ein erstes funktionsfähiges Gesamtsystem zu entwickeln, können sich bei der Weiterentwicklung der Plattform oder der Funktionsbausteine der Teilsysteme jedoch wiederholen. Die Stufen werden im Folgenden anhand ihrer Aufgabenbereiche und individuellen Anforderungen erläutert. Die Plattformentwicklung bezieht sich exemplarisch auf die Smarten Handwerkszeuge und die Digitalen Assistenzsysteme, ist aber beliebig erweiterbar und auf andere Technologien anwendbar.

Datenorientierte Integration

Die datenorientierte Integration betrachtet die zu übertragenden Daten, die benötigt werden, um die geplanten Funktionen der Smarten Handwerkszeuge und Digitalen Assistenzsysteme zu realisieren. Die Daten müssen entsprechend dem OSI-Modell (vgl. Abbildung 2.12) zwischen Werkzeugen und Assistenzsystemen übertragen werden. Dazu müssen geeignete Protokoll-Stacks implementiert werden, die die individuellen Anforderungen der Datenströme und Einsatzumgebungen erfüllen. Insbesondere die Wahl der Protokolle für die Anwendungsschicht, die physikalische Schicht und die Sicherungsschicht sind wichtig, um die Zielfunktionen des vernetzten Gesamtsystems zu ermöglichen. Abbildung 5.3 zeigt den Zielzustand der Softwareplattform nach der datenorientierten Integration.

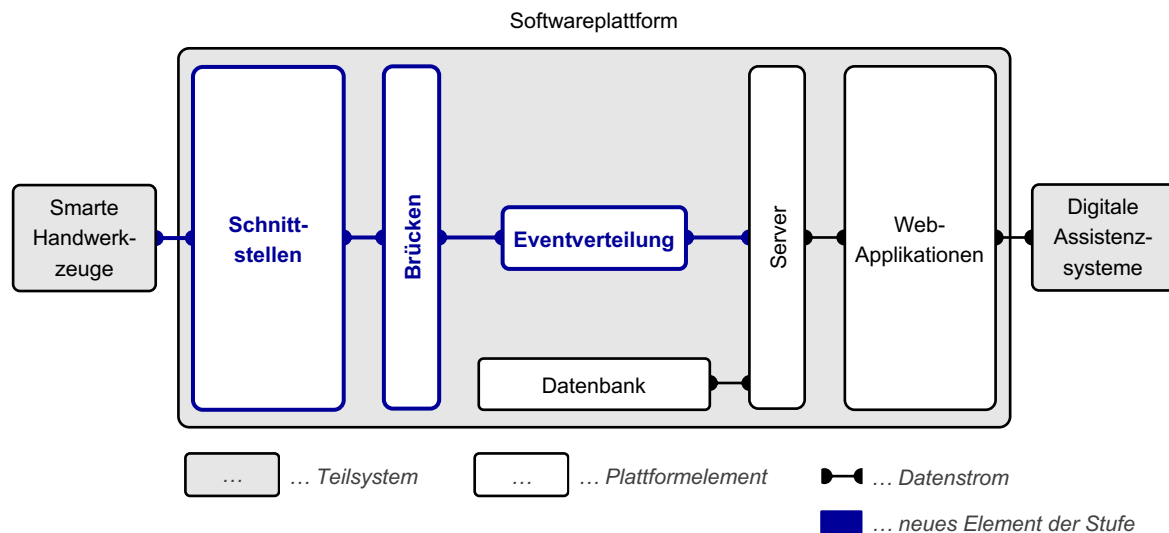


Abbildung 5.3: Softwareplattform nach der datenorientierten Integration

Schnittstellen Die Softwareplattform muss zuerst die Protokolle der Anwendungsschicht (vgl. Abbildung 2.12) über Schnittstellen bereitstellen. Die zu integrierenden Hardwaresysteme müssen ebenso die Möglichkeit haben, die selben Protokolle zu nutzen und sollten nicht an feste Schnittstellen bestimmter Anbieter gebunden sein. Danach muss eine Übertragungstechnologie für die physikalische Schicht und die Sicherungsschicht gewählt werden, welche die Datenpakete zwischen Softwareplattform und Smarten Handwerkzeugen transportiert.

Die Konfiguration der Schnittstellen und Übertragungstechnologien muss bestimmte Grundanforderungen erfüllen. Dazu zählen insbesondere hinreichend niedrige Latenzen der Datenübertragung (vgl. Anforderung N2), um Funktionen zu ermöglichen, die von Daten mehrerer Kontextobjekte abhängen [Silv18, S. 1234], [Bend21, S. 4]. Bspw. können Daten zur aktuellen Position des Werkzeugs mit den für das Produkt notwendigen Prozessparametern aus der Datenbank und den aktuell eingestellten Daten des Werkzeugs abgeglichen werden, um eine Reaktion an das Werkzeug zu senden. Eine hohe Latenzzeit würde die Nutzung der Smarten Handwerkzeuge bei jeder Werkzeugoperation verlangsamen und so zu niedrigen Akzeptanzen führen.

Eine weitere Grundanforderung in industriellen Anwendungen ist die Stabilität und Sicherheit der Datenübertragung [Mahm15, S. 6]. Das erfordert einerseits, dass Datenpakete mit wichtigen Informationen möglichst ohne Verlust übertragen und verarbeitet werden. Andererseits müssen diese Informationen vor unbefugten, externen Zugriffen geschützt werden. Die Sicherheit und Stabilität der Datenübertragung steht dabei oft im Zielkonflikt mit einer niedriglatenten Kommunikation. So muss zur verlustfreien Übertragung jedes Datenpaket beim Sender zwischengespeichert werden, bis dieser vom Empfänger eine Nachricht empfängt, die den Erhalt des Datenpakets bestätigt. Um eine erhöhte Sicherheit zu gewährleisten, müssen wiederum bestimmte Informationen zur Ver- und Entschlüsselung zusätzlich in die Datenpakete geschrieben werden, wodurch diese größer werden. Beides führt zu einer verlangsamt Übertragung.

Das bedeutet für die Integration Smarter Handwerkzeuge und Digitaler Assistenzsysteme, dass verschiedene Schnittstellen notwendig sind, um beide Anforderungen zu erfüllen. So können die

Zielfunktionen des Gesamtsystems in die jeweils notwendigen Datenströme aufgeteilt und ein Protokoll-Stack aufgebaut werden, der alle individuellen Anforderungen dieser Datenströme erfüllt. Für die Smarten Handwerkszeuge kann dadurch bspw. eine niedriglatente Datenübertragung für den Abgleich der Prozessparameter realisiert werden und gleichzeitig eine stabile und sichere Datenübertragung für mitarbeiterspezifische Daten oder Qualitätsdokumentationen ermöglicht werden. Neben den Protokollen der Anwendungsschicht muss eine Übertragungstechnologie implementiert werden, welche an die Eigenschaften der Einsatzumgebung angepasst ist und ausreichende Übertragungreichweiten, sinnvolle Bandbreiten und notwendige Durchdringungsfähigkeiten bereitstellt.

Brücken und Eventverteilung Die Daten müssen von jeder Schnittstelle zu einer zentralen Eventverteilung in der Softwareplattform übermittelt werden, um den Zugriff der Services auf die Daten zu vereinfachen. Dazu müssen Softwaremodule entwickelt werden, die Daten zwischen der Eventverteilung und der jeweiligen Schnittstelle übertragen. Diese Module bestehen aus zwei Schnittstellen und einer Konvertierungslogik der Datenpaketinhalte. Die Aufteilung in eine zentrale Eventverteilung und mehrere externe Schnittstellen ermöglicht es weiterhin, neue Assistenztechnologien und Funktionen mit individuellen Anforderungen an die Datenübertragung zur Softwareplattform hinzuzufügen, um die Softwareplattform funktional skalierbar zu gestalten (vgl. Anforderung N4).

Modellorientierte Integration

Sobald eine anforderungsgerechte Datenübertragung entwickelt wurde, müssen die Daten in der modellorientierten Integration in einer Datenbank strukturiert gespeichert werden. Dazu müssen Datenmodelle definiert werden, die den aktuellen Zustand der Teilsysteme und Prozesselemente in der Datenbank abbilden. Abbildung 5.4 zeigt den Zielzustand der Softwareplattform nach der modellorientierten Integration.

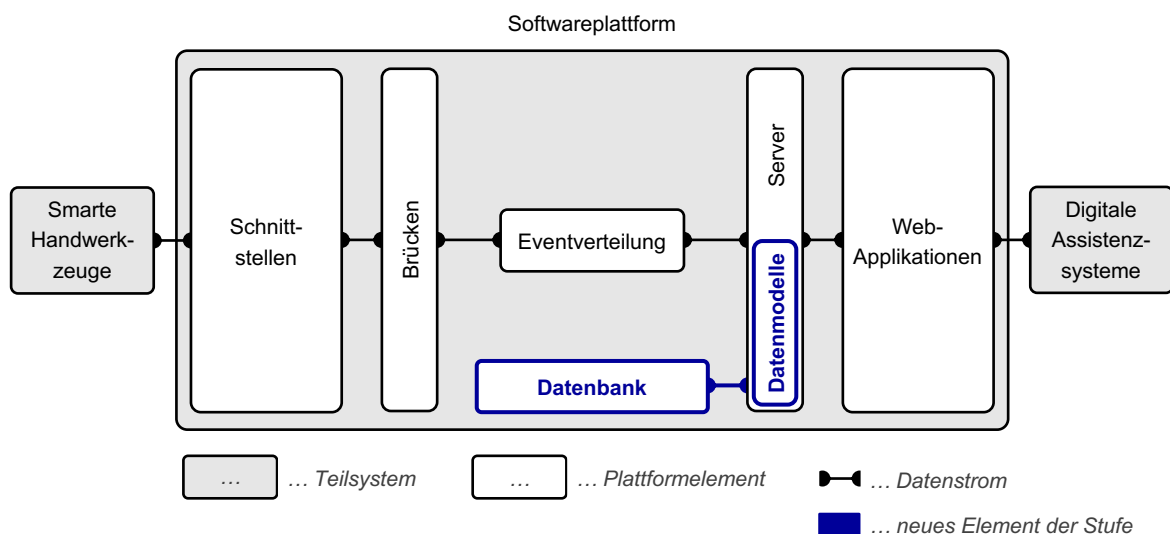


Abbildung 5.4: Softwareplattform nach der modellorientierten Integration

Datenmodelle Die Datenmodelle müssen so aufgebaut sein, dass sie die geplanten Zielfunktionen des Gesamtsystems ermöglichen. Dazu müssen sie insbesondere die relevanten Informationen der Kontextobjekte (vgl. Abbildung 2.8) als Variablen abbilden. Sie sollten die Informationen möglichst generisch abbilden, um für verschiedenste Anwendungsfälle nutzbar zu sein. Die Datenmodelle werden in der Regel weiter in Teilmodelle unterteilt, die entweder einzeln betrachtet und in den Applikationen gehandhabt werden sollen, oder die untereinander zugeordnet werden müssen. Bspw. kann ein Werker verschiedenen Aufträgen zugeordnet werden oder einem Auftrag können mehrere Smarte Handwerkzeuge zugeordnet werden. Für die Nutzung eines Werkzeugs mit Wechselaufsätzen zum Bohren und Schrauben sollte ein Datenmodell für das Smarte Handwerkzeug und ein Datenmodell für die jeweiligen Aufsätze angelegt werden, um eine Zuordnung und Handhabung der Einzelteile zu ermöglichen. Dabei sollte das Modell für die Wechselaufsätze generisch sein, so dass es sowohl Köpfe zum Bohren und Schrauben als auch für weitere Verfahren darstellen kann.

Datenbank Die Datenmodelle müssen in einer zentralen Datenbank angelegt werden, auf die durch den Server der Digitalen Assistenzsysteme zugegriffen werden kann. Dazu eignen sich dokumentenbasierte Datenbanken, da sie Daten in Form von textuellen Dokumenten mit semi-strukturierten und menschlich lesbaren Formaten abspeichern. Die Dokumente entsprechen damit dem Aufbau der Datenmodelle und können flexibel über Schlüssel-Wert-Paare angelegt werden und im Laufe der Nutzung angepasst oder erweitert werden. Jedes Dokument erhält weiterhin eine eindeutige Identifikationsnummer, was den Zugriff durch Digitale Assistenzsysteme erleichtert und die Zuordnung von Datenpaketen ermöglicht.

Dadurch kann jedes Datenpaket genutzt werden, um die Datenbank zu aktualisieren und so den aktuellen Zustand der Kontextobjekte abzuspeichern. Das ermöglicht es, die integrierten Smarten Handwerkzeuge und den aktuellen Fortschritt der Prozesse in den Digitalen Assistenzsystemen zu visualisieren. Weiterhin können dadurch Benutzerschnittstellen in den Applikationen geschaffen werden, die eine Anpassung der auf den Werkzeugen gespeicherten Daten ermöglichen. Dazu müssen die Änderungen in der Datenbank zu den betroffenen, integrierten Technologien übertragen und dort aktualisiert werden. Die modellorientierte Integration ermöglicht zusammenfassend das sinnvolle Speichern, Handhaben, Visualisieren und kontinuierliche Aktualisieren der Daten auf der Softwareplattform.

Funktionsorientierte Integration

Nachdem die Datenströme zwischen den Smarten Handwerkzeugen und Digitalen Assistenzsystemen implementiert sind und die Daten in sinnvollen Datenmodellen gespeichert und aktualisiert werden, realisiert die funktionsorientierte Integration die Zielfunktionen des Gesamtsystems. Dazu müssen *Services* entwickelt und als Softwaremodule an die zentrale Eventverteilung angeknüpft werden. Diese reagieren auf die Datenströme der vernetzten Teilsysteme und erzeugen eigene Datenpakete, um die Smarten Handwerkzeuge zu steuern oder Datenbankeinträge zu erstellen und anzupassen. Die *Services* müssen zusätzlich über eine Schnittstelle auf den Server der Web-Applikationen zugreifen können, um aktuelle Daten zu Aufträgen, Werkzeugoperatio-

nen oder Zuständen der Smarten Handwerkszeuge abfragen zu können. Abbildung 5.5 zeigt den Zielzustand der Softwareplattform nach der funktionsorientierten Integration.

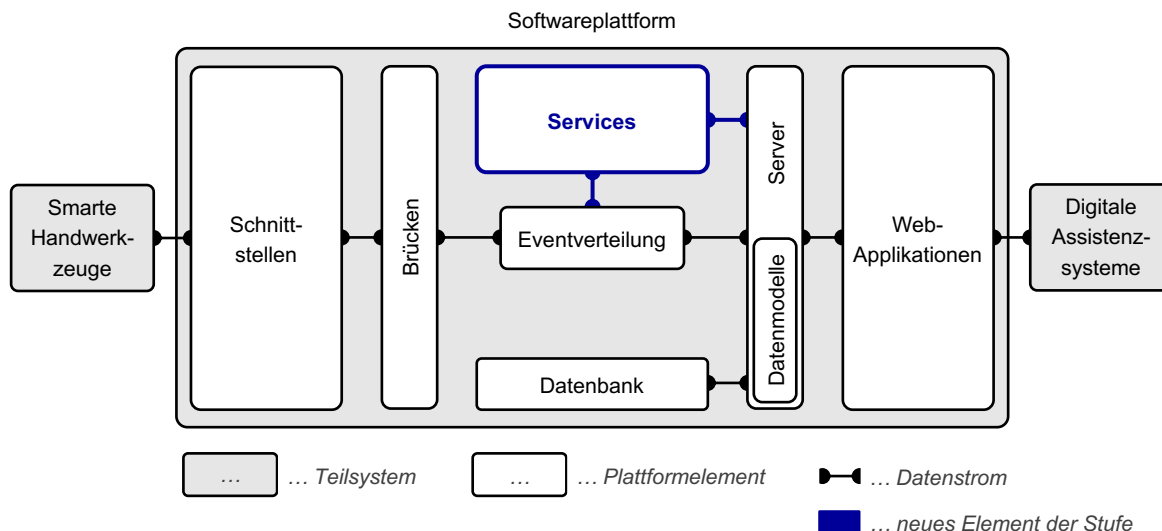


Abbildung 5.5: Softwareplattform nach der funktionsorientierten Integration

Die Services sollten nach den Zielfunktionen der Gesamtentwicklung (vgl. Anforderung **P4**) aufgeteilt werden, um die Verwendungszwecke der Softwaremodule klar abzugrenzen. So können die einzelnen Module und ihre exklusiven Funktionen stabiler und skalierbarer gestaltet werden, da sie keine direkten Abhängigkeiten besitzen und einfacher als parallele Prozesse mit eigenen Ausführungseinheiten und Rechenleistungen gestaltet werden können. Bspw. benötigt ein Service, der kontinuierlich alle Werkzeugpositionen und -parameter mit den durchzuführenden Werkzeugoperationen abgleicht, mehr Rechenleistung, als ein Service, der nur jedes Datenpaket nach einem Eingriff des Werkzeugs auswertet. Die Auswertung der Eingriffe sollte dabei nicht den Abgleich der Positionen und Parameter verzögern. Die Trennung der Services stabilisiert weiterhin das Gesamtsystem, da ein potenzieller Fehler in einem Softwaremodul die anderen Module nicht beeinflusst. Stattdessen kann die Softwareplattform einen direkten Neustart des Services orchestrieren, ohne laufende Prozesse zu unterbrechen.

Durch die Services wird also die Logik der Funktionen und damit die Datenverarbeitung auf der Softwareplattform umgesetzt. Die resultierende Struktur der Plattform ermöglicht es, einfach neue Funktionen hinzuzufügen und so bspw. bei der Integration weiterer Sensoren einen neuen Service zu entwickeln, der die zusätzlichen Kontextinformationen verarbeitet. Mit dem Abschluss der funktionsorientierten Integration sind die Smarten Handwerkszeuge und Digitalen Assistenzsysteme so weit integriert, dass die Zielfunktionen der Prozess- und Nutzeranforderungen erfüllt werden können.

Analyseorientierte Integration

Das Ziel der analyseorientierte Integration ist es, langfristige Verbesserungen für die Nutzer und die Prozesse zu ermöglichen. Der Kerngedanke ist, dass Potenziale aus den Zusammenhängen der übertragenen Datenpakete erkannt werden können, wenn diese in ausreichender Menge vorliegen. Das Kernelement der Integrationsstufe ist eine sog. Zeitreihen-Datenbank, die Pakete ausgewählter Datenströme mit Zeitstempeln abspeichert und einen schnellen Zugriff für Analysen großer Datenmengen ermöglicht. In Verbindung mit Daten zu Zielgrößen, die verbessert werden sollen, können Wirkungszusammenhänge gefunden werden. Die Digitalen Assistenzsysteme können durch die Erkenntnisse Arbeitsanweisungen und Bearbeitungsreihenfolgen festlegen, die bspw. die Bearbeitungsdauer eines bestimmten Prozesses reduzieren oder die Werker in der Sektion ergonomisch entlasten. Abbildung 5.6 zeigt den Zielzustand der Softwareplattform nach der analyseorientierten Integration.

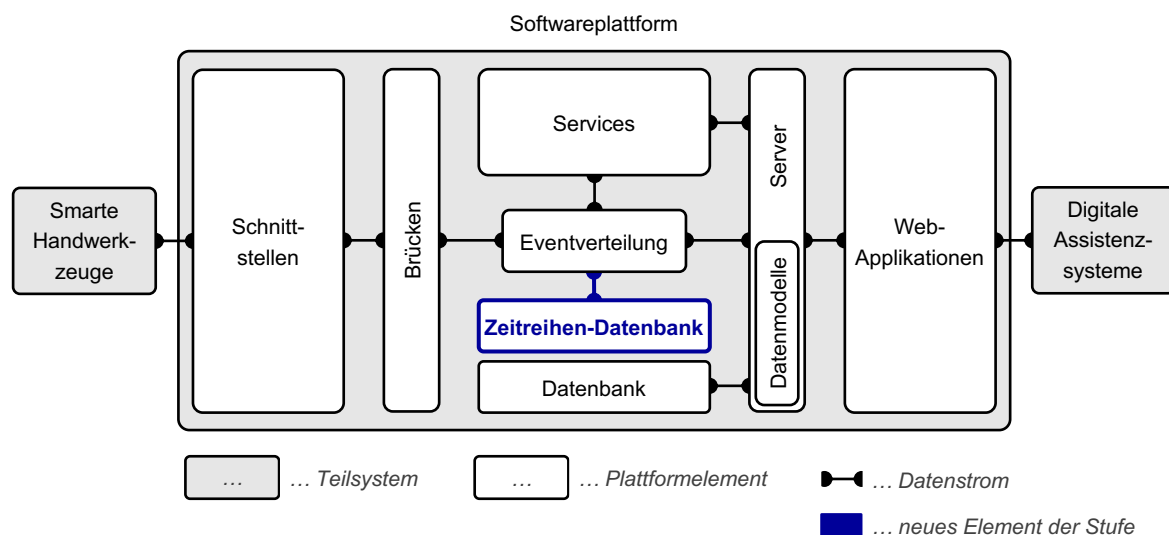


Abbildung 5.6: Softwareplattform nach der analyseorientierten Integration

Die Zeitreihen-Datenbank muss zuerst mit der zentralen Eventverteilung verknüpft werden. Dann muss festgelegt werden, welche Datenströme und Datenmengen über welchen Zeitraum gespeichert werden sollen, um einen Rahmen für die Analyse zu schaffen. Durch die Nutzung von künstlicher Intelligenz können die Daten ausgewertet werden, um die Prozesse mit Blick auf verschiedene Zielgrößen zu optimieren. Einen transparenteren Ansatz bietet eine manuelle Analyse der aufbereiteten Daten aus der Datenbank. Bspw. können zurückgelegte Wege der Werkzeuge untersucht werden, wenn es eine Lokalisierungstechnologie am Smarten Handwerkzeug gibt. Oder die Anzahl der durchgeführten Werkzeugwechsel kann in Abhängigkeit von der Bearbeitungsreihenfolge sowie die Rückmeldedaten der Werkzeuge in Abhängigkeit von der Arbeitsdauer untersucht werden. So können bei entsprechenden Erkenntnissen bspw. die physiologisch leichter durchzuführenden Werkzeugoperationen im Rahmen des Prozesses auf das Ende des Arbeitstages gelegt werden. Durch die manuellen Analysen können so für bestimmte Prozessinhalte schnell Verbesserungspotenziale erkannt werden. Die langfristige Untersuchung über künstliche Intelligenz verspricht größere Potenziale zu identifizieren, die z. B. zur Umstrukturierung der manuellen

Prozesse führen können und über kollaborative Assistenzsysteme eine Entlastung der Werker und Verbesserung der Zielgrößen ermöglichen.

5.2.2 Systemarchitektur

Aus den Integrationsstufen, den resultierenden Elementen der Softwareplattform und den abgeleiteten Anforderungen der Prozessanalyse (P) und Nutzeranalyse (N) ergibt sich die Systemarchitektur des Gesamtsystems. Abbildung 5.7 visualisiert diese Systemarchitektur, ordnet die Unterabschnitte des Konzeptkapitels ein und weist die Entwicklungsanforderungen den Elementen zu.

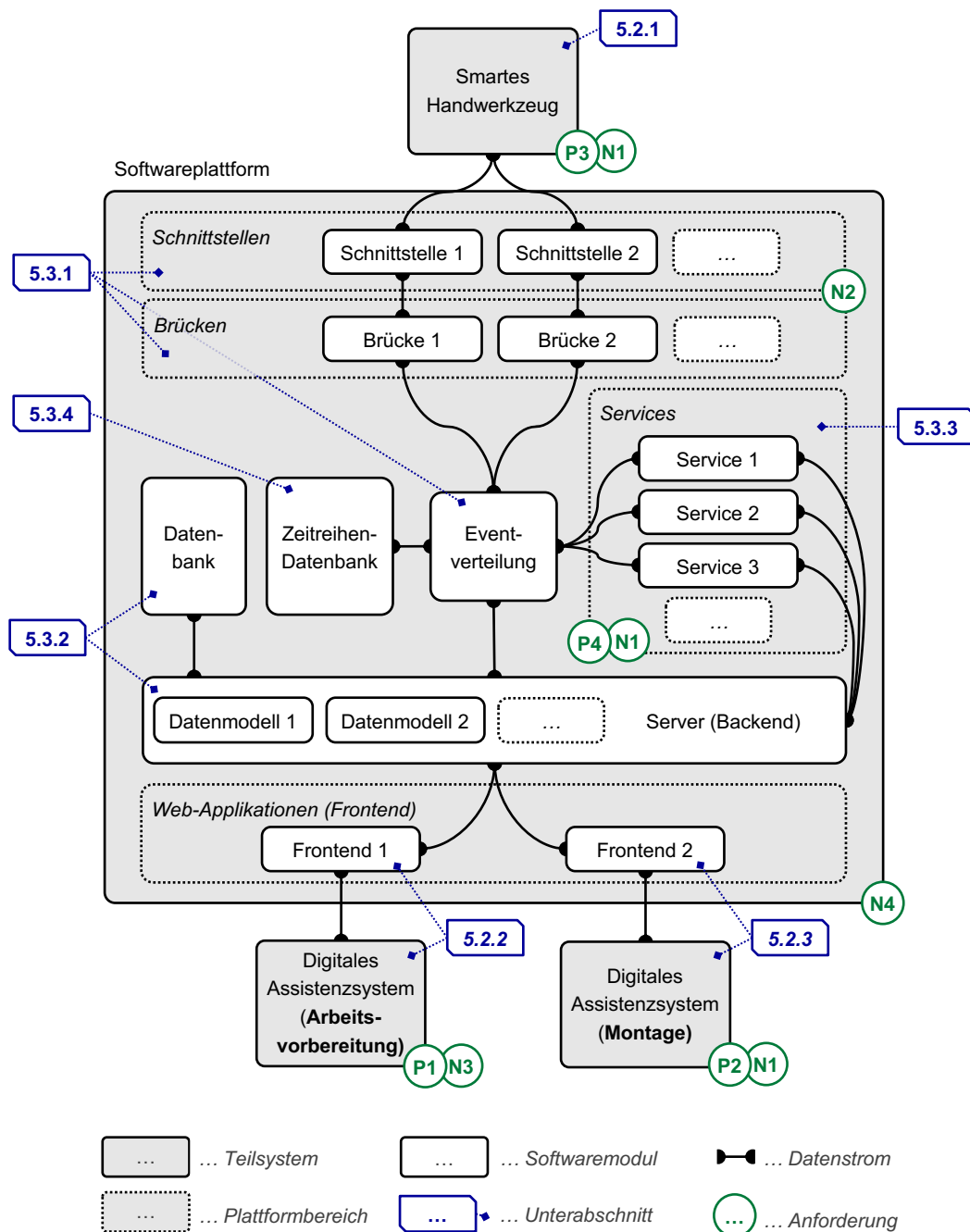


Abbildung 5.7: Systemarchitektur als Überblick über das Konzept

Das *Smarte Handwerkzeug* muss durch verschiedene Wechselköpfe Bohren und Nieten können, durch eingebaute Sensoren die aktuellen Prozessparameter und Werkzeugzustände erfassen und durch Aktoren steuerbar sein (vgl. Anforderung **P3**). Dazu sollen alle relevanten Einflussfaktoren der Werkzeuge-Domäne unterstützt werden (vgl. Anforderung **N1**). Das Werkzeug muss mit einer geeigneten Übertragungstechnologie eine Verbindung zu den Schnittstellen der Softwareplattform aufbauen.

Das *Digitale Assistenzsystem für die Arbeitsvorbereitung* muss eine generische und teilautomatisierte Erzeugung der Inhalte ermöglichen, die für das Montageassistenzsystem notwendig sind, und dazu Daten des ERP- und CAD-Systems nutzen. Insbesondere die notwendigen Inhalte für die Smarten Handwerkzeuge, wie die Prozessparameter und die Koordinaten von Werkzeugoperationen, sollen aufwandsarm erstellt werden (vgl. Anforderung **P1**). Die Inhalte sollen mit dem CAD-Modell verknüpft werden, um diese übersichtlich darzustellen (vgl. Anforderung **N3**).

Das *Digitale Assistenzsystem für die Montage* muss die Informationen zum Montageprozess einfach und kontextgerecht für die Werker bereitstellen. Neben Inhalten zu Arbeitsaufgaben und dem CAD-Modell des Produkts soll das Assistenzsystem insbesondere die Werkzeugoperationen mit Ort und Soll-Prozessparametern visualisieren und Echtzeitinformationen zum verbundenen Smarten Handwerkzeug liefern (vgl. Anforderung **P2**). Das System sollte den Werkern Rückmeldungen zum Status der notwendigen Einflussfaktoren der Werkzeuge-Domäne anzeigen. Bspw. können die Werkzeugposition, der aktuelle Bohrwinkel oder eingestellte Prozessparameter in Echtzeit aktualisiert werden (vgl. Anforderung **N1**).

Die *Schnittstellen, Brücken und Eventverteilung* sollen so ausgelegt werden, dass die Übertragung der Datenpakete zwischen Smarten Handwerkzeugen, Services und Digitalen Assistenzsystemen mit möglichst geringer Latenz erfolgt (vgl. Anforderung **N2**). Um Sicherheitsanforderungen, funktionsspezifische Anforderungen und Anforderungen zur Skalierbarkeit der Lösung zu erfüllen, sollen mehrere Netzwerkprotokolle genutzt werden können, die über Brücken zu einer zentralen Eventverteilung weitergeleitet werden. Eine *Datenbank und Datenmodelle* sollen die Grundlage für die Kommunikation der Teilsysteme und der Services schaffen. Die *Zeitreihen-Datenbank* ermöglicht langfristige Optimierungen durch Analysen der kommunizierten Datenpakete.

Die *Services* sollen insbesondere die erkannten Fehlerursachen kontrollieren (vgl. Anforderung **P4**). Dazu muss ein Service Datenpakete zu den Werkzeugzuständen verarbeiten, um die Werkzeuge vor einem Fehleingriff zu sperren. Ein weiterer Service muss die Ist-Prozessparameter der Werkzeuge abhängig von der Werkzeugposition und der durchzuführenden Aufgabe mit den Soll-Prozessparametern der Werkzeugoperationen abgleichen und das Werkzeug sperren oder mit einzustellenden Parametern versorgen. Ein dritter Service soll Rückmeldedaten zu den Werkzeugoperationen verarbeiten und ihre Qualität dokumentieren und an die Werker zurückmelden. Die Services sollen die Einflussfaktoren der Werkzeuge-Domäne kontrollieren, wenn die Sensoren und Aktoren der Werkzeuge das ermöglichen (vgl. Anforderung **N1**).

Ein zentraler Server stellt die *Softwareplattform* zur Verfügung (vgl. Anforderung **P4**) und basiert auf einem Open-Source-System, das containerisierte Softwareanwendungen bereitstellt und orchestriert. Die Container betreiben die *Softwaremodule* in der Systemarchitektur und integrieren

den Softwarecode dazu mit notwendigen Bibliotheken, Betriebssystemen und Einstellungen. Sie erhalten vom Server jeweils eine IP-Adresse und können ihre Anwendungen über Netzwerkports bereitstellen. So können die Digitale Assistenzsysteme als webbasierte Applikationen geräteunabhängig durch die Mitarbeiter genutzt werden. Außerdem ermöglichen Netzwerkprotokolle den Aufbau der Datenströme zwischen den einzelnen Softwaremodulen. Die Softwareplattform ermöglicht durch die definierten Plattformbereiche die funktionale Skalierbarkeit des Gesamtsystems (vgl. Anforderung **N4**), da neue Schnittstellen, Services und Applikationen aufwandsarm als Container zur Plattform hinzugefügt werden können.

5.3 Entwicklung der Teilsysteme

Dieser Abschnitt beschreibt die Entwicklung der Teilsysteme. Die Funktionen und Benutzerschnittstellen der Systeme wurden über viele Design-Zyklen entwickelt und werden im Folgenden teilweise bereits in ihrem integrierten Zustand beschrieben. Unterabschnitt 5.3.1 beschreibt die Entwicklung des Smarten Handwerkszeugs mit Fokus auf die Komponenten und Funktionen. Unterabschnitt 5.3.2 beschreibt das Konzept des Digitalen Assistenzsystems für die Arbeitsvorbereitung und die Entwicklung der Benutzerschnittstellen der Desktop-Anwendung. Unterabschnitt 5.3.3 erläutert das Konzept des Digitalen Assistenzsystems für die Werker und die Entwicklung der Benutzerschnittstellen der Tablet-Anwendung.

5.3.1 Smartes Handwerkzeug

Die Smarten Handwerkzeuge wurden prototypisch durch den Werkzeughersteller **Lübbering** entwickelt, der langjährige Erfahrungen im Flugzeugbau besitzt. Die Erkenntnisse der Analysen wurden kontinuierlich mit dem Unternehmen geteilt, um die Entwicklung kollaborativ zu gestalten. Insbesondere die Schnittstellen zur Softwareplattform, die Datenmodelle und die resultierende Kommunikation mit den Services wurden in Kooperation mit dem Hersteller entwickelt.

Komponenten des Smarten Handwerkszeugs

Abbildung 5.8 zeigt die Komponenten des Smarten Handwerkszeugs. Die Werkzeuge sind akkubetrieben, damit sie möglichst flexibel transportiert und genutzt werden können. Sie bestehen aus einem Grundkörper, an dem ein Bildschirm, ein Positionssensor und Schnittstellen für die Werkzeugaufsätze integriert sind. Die austauschbaren Werkzeugaufsätze können zum Bohren, zum Nieten oder zum Schrauben verwendet werden (vgl. Anforderung **P3**). Im Grundkörper und in den Schraubaufsätzen befinden sich Sensoren und Aktoren.

Der *Grundkörper* ist ein digitalisierter, aufgerüsteter Akkubohrer. Das bedeutet, dass er mit mehreren Platinen ausgestattet ist, die verschiedene Aufgaben erfüllen. Die Platinen können sowohl Daten der integrierten Sensoren und Aktoren als auch Daten externer Systeme empfangen, verarbeiten und als Informationen speichern. In der Maschine sind Sensoren zur Messung des Motor-

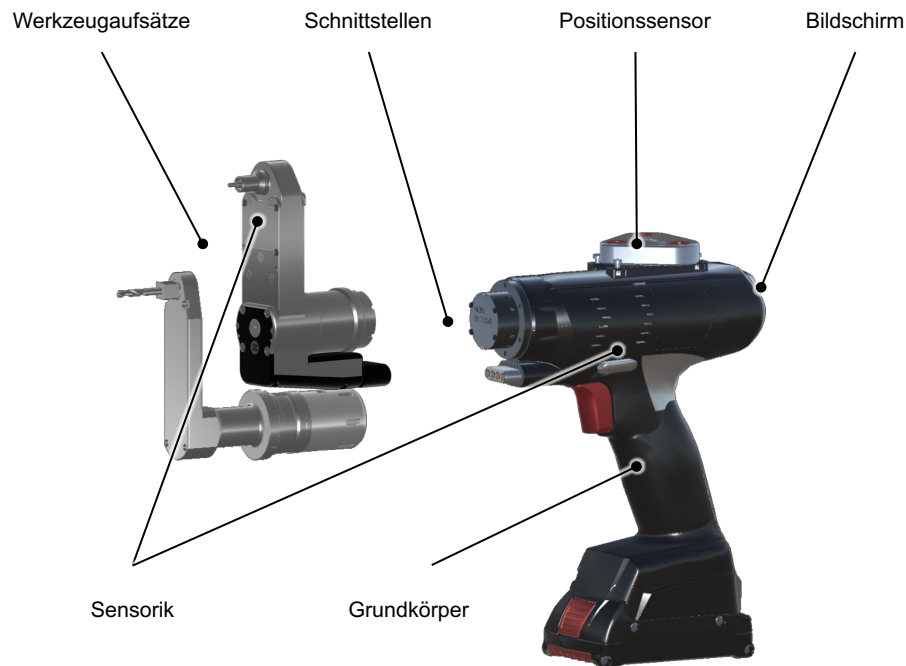


Abbildung 5.8: Komponenten des Smarten Handwerkzeugs (i.A.a. [Pion24, S. 430])

stroms, der Maschinentemperatur und der Winkelgeschwindigkeit (Gyroskop) eingebaut. Außerdem sind zwei Zähler im Werkzeug integriert, die nach jeder Werkzeugoperation iterativ erhöht werden. So können die Eingriffe insgesamt und die Eingriffe seit der letzten Instandhaltung des ausgerüsteten Werkzeugaufsatzes gezählt werden. Im Grundkörper werden außerdem die Daten zu Prozessparametern und Informationen der Werkzeugaufsätze zwischengespeichert.

Die *Werkzeugaufsätze* können über zwei *Schnittstellen* vom Grundkörper erkannt werden. Dazu ist in den Bohraufsätzen jeweils ein programmierbarer NFC-Chip (Near Field Communication) eingelassen, der beim Einstecken ausgelesen wird. Die Schraubenaufsätze verwenden eine I2C-Schnittstelle (Inter-Integrated Circuit), um die Daten zu übermitteln. Neben den Stammdaten sind auf den Aufsätzen die folgenden Prozessparameter gespeichert:

- der Bohrdurchmesser, der Senkwinkel und die Bohrerlänge bei Bohraufsätzen,
- die Bitlänge und das eingestellte Drehmoment bei Schraub-/Nietaufsätzen und
- die Drehgeschwindigkeit und Werkzeugfreigabe bei allen Aufsätzen.

Die Aufsätze sind als sog. Flachabtriebe umgesetzt, die es den Werkern ermöglichen, an schwer zugänglichen Stellen zu arbeiten. Dadurch beeinflussen sie jedoch das von der Maschine vorgegebene Drehmoment durch den Verschleiß und den Wirkungsgrad der Abtriebs. In den Schraubenaufsätzen ist daher zusätzlich ein wirkstellennaher Drehmomentsensor am letzten Zahnrad verbaut, der das tatsächlich wirkende Drehmoment misst.

An der Rückseite des Smarten Handwerkzeugs befindet sich ein *Bildschirm*, der den Freigabezustand, die Drehgeschwindigkeit und Fehlerzustände des Werkzeugs visualisiert. Der Bildschirm ist entweder grau und zeigt die Blockade des Werkzeugs an (vgl. Abbildung 5.9 (a)), grün und

zeigt die Freigabe sowie Drehgeschwindigkeit des Werkzeugs an (vgl. Abbildung 5.9 (b)) oder rot und zeigt einen Fehler an (vgl. Abbildung 5.9 (c)).

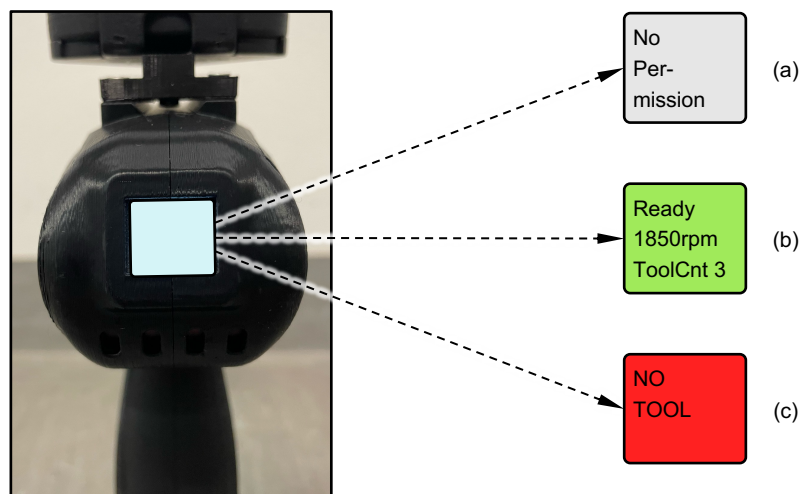


Abbildung 5.9: Bildschirmzustände am Smarten Handwerkzeug

Positionserkennung

Um die Position der Werkzeugspitze im Arbeitsraum als Kontextinformation verarbeiten zu können, wird ein Ultraschall-Positionserkennungssystem der Firma **Sarissa** verwendet. Abbildung 5.10 verdeutlicht die Funktionsweise des Systems.

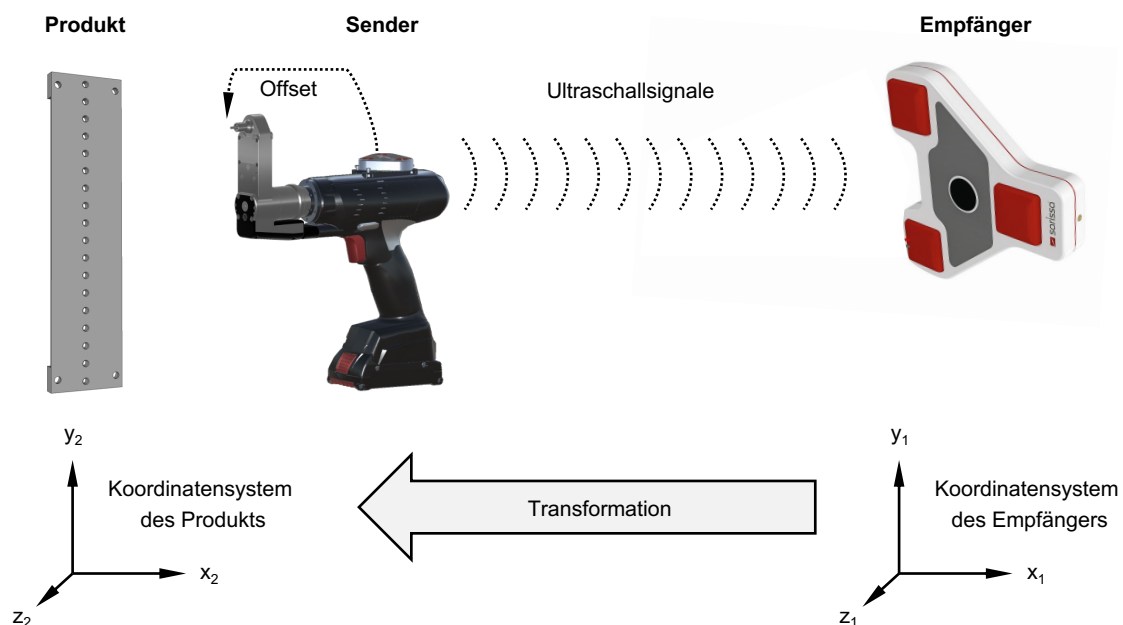


Abbildung 5.10: Positionserkennung der Werkzeugspitze

Der Positionssensor sendet acht mal die Sekunde Ultraschallsignale aus drei eingebauten Sendern, die von einem in der Umgebung montierten Empfänger mit drei Mikrofonen empfangen werden. Das System nutzt das Prinzip der Triangulation, um die Neigung und Position des Positionssensors aus den Zeitdifferenzen der Signale im Raum zu berechnen. Der Empfänger ist per LAN-Kabel

(Local Area Network) mit einem Computer verbunden, der die Berechnung durchführt. Aus der Position und Neigung des Sensors kann durch den sog. Offset die Position der Werkzeugspitze berechnet werden. Der Offset ist der Abstand zwischen der Position des Sensors und der Werkzeugspitze und wird initial für jeden Werkzeugaufsatz im Sarissa-System angelegt. Das System nutzt den aktuellen Neigungswinkel des Werkzeugs, um den Offset korrekt zu interpretieren. Für eine Kontrolle des Bohrwinkels ist die Genauigkeit der Winkelerkennung allerdings nicht ausreichend. Die Koordinaten müssen abschließend vom Koordinatensystem des Empfängers in das Koordinatensystem des Produktes transformiert werden, um die korrekten Kontextinformation ableiten zu können. Dazu wird das Positionserkennungssystem für das zu bearbeitende Produkt kalibriert.

Der verbundene Computer versendet abschließend die Positionsdaten der Werkzeugspitze über eine Schnittstelle an die Softwareplattform. Das System verwendet Ultraschall, um eine Genauigkeit im Millimeterbereich zu erreichen, die im Flugzeugbau für das Erkennen einzelner Niete notwendig ist. Der Ultraschall kann durch Hindernisse oder Druckluft zwischen Sender und Empfänger gestört werden. Der Empfänger sollte außerdem nicht weiter als drei Meter vom Positionssensor entfernt sein. Im Flugzeugbau sollten deshalb mehrere Empfänger in der Sektion montiert werden und zum Koordinatensystem des Flugzeugs kalibriert werden.

Funktionen des Smarten Handwerkzeugs

Die beschriebenen Komponenten ermöglichen in Verbindung mit der Softwareplattform die verschiedenen Funktionen der Smarten Handwerkzeuge, die die Anforderungen der Prozessanalyse (vgl. Anforderung **P3**) und Nutzeranalyse (vgl. Anforderung **N1**) erfüllen sollen. Der Fokus liegt darauf, die Fehlerursachen zu beheben und dabei die Einflussfaktoren der Werkzeuge-Domäne zu beachten.

Erkennen von Werkzeugzuständen (Anforderung P3) Ziel dieser Funktion ist es, Prozessfehler zu vermeiden, die durch einen mangelhaften Werkzeugzustand entstehen (vgl. Tabelle 3.2). Um Informationen zum aktuellen Werkzeugzustand zu erhalten, werden auf dem Smarten Handwerkzeug und den Werkzeugaufsätzen verschiedene Daten gespeichert. Dazu zählen die Maschinendaten, wie bspw. die Standzeit, die Temperatur oder die Kalibrierungsparameter und Übersetzungsstufen des ausgerüsteten Werkzeugaufsatzes. Außerdem zählen dazu die Stammdaten des Werkzeugs, wie bspw. die Seriennummer, die zugewiesene Arbeitsstation oder Abteilung.

Die Daten werden teilweise vom Werkzeug selbst ausgewertet und am integrierten Bildschirm angezeigt, müssen aber größtenteils durch die Softwareplattform verarbeitet werden. Das Werkzeug erkennt eigenständig, wenn kein Werkzeugaufsatz ausgerüstet ist und wenn die Motortemperatur zu hoch ist. Für alle weiteren Fälle müssen die Maschinen- und Stammdaten extern ausgewertet werden und dann abhängig vom Fehlertyp auf dem Werkzeug eingestellt werden. Dazu kann das Smarte Handwerkzeug den von der Softwareplattform übermittelten Fehlercode speichern und am Bildschirm darstellen. Bspw. kann das Werkzeug die integrierten Zähler iterativ pro Werkzeugoperation erhöhen, aber nicht auswerten. Dazu muss die Softwareplattform die Zähler mit festgelegten Grenzwerten vergleichen.

Kontrolle von Prozessparametern und Freigabe (Anforderung P3 und N1) Ziel dieser Funktion ist es, Prozessfehler zu vermeiden, die entstehen, weil Prozessparameter schon vor dem Werkzeugeingriff fehlerhaft eingestellt werden (vgl. Tabelle 3.2). Das Smarte Handwerkzeug ist dazu in der Lage, aktuelle Prozessparameter vom ausgerüsteten Werkzeugaufsatz auszulesen und auf der Maschine einzustellen. Gleichzeitig kann es Prozessparameter aus Datenpaketen der Softwareplattform entsprechend verarbeiten.

In Abhängigkeit von der aktuellen Werkzeugposition und Arbeitsaufgabe werden einerseits einstellbare Prozessparameter, wie die Drehgeschwindigkeit, übermittelt und auf dem Grundkörper und Werkzeugaufsatz eingestellt. Andererseits werden nicht einstellbare Prozessparameter, wie der Durchmesser oder das Drehmoment, mit den Soll-Prozessparametern des aktuellen Kontexts verglichen, um Prozessfehler zu vermeiden. Das Werkzeug ist dazu im Ausgangszustand immer gesperrt und wird erst freigeben und mit einstellbaren Prozessparametern konfiguriert, wenn die nicht einstellbaren Prozessparameter die Anforderungen des aktuellen Kontexts erfüllen.

Rückmeldedaten von Werkzeugoperationen (Anforderung P3) Ziel dieser Funktion ist es, Prozessfehler zu erkennen, die durch eine fehlerhafte Durchführung von Werkzeugoperationen entstehen (vgl. Tabelle 3.2). Eine Steuerung von Vorschubkraft und -geschwindigkeit während des Eingriffs könnte diese Fehler zwar vermeiden, würde aber das Gewicht und die Flexibilität des Werkzeugs deutlich einschränken. Stattdessen nimmt das Smarte Handwerkzeug für jede durchgeführte Werkzeugoperation Rückmeldedaten auf und sendet diese an die Softwareplattform, um Fehler früh zu erkennen und Lerneffekte bei den Werkern zu verstärken. Für Bohreingriffe nimmt das Werkzeug einen Strom-Zeit-Verlauf (vgl. Abbildung 5.11 (a)) und für Schraubeingriffe einen Drehmoment-Zeit-Verlauf auf (vgl. Abbildung 5.11 (b)). Aus den Verläufen ist grob ersichtlich, ob es sich um eine ordnungsgemäße Werkzeugoperation handelt. Für eine sichere Bewertung müssen die Daten allerdings durch die Softwareplattform ausgewertet werden, bevor sie dokumentiert werden können.

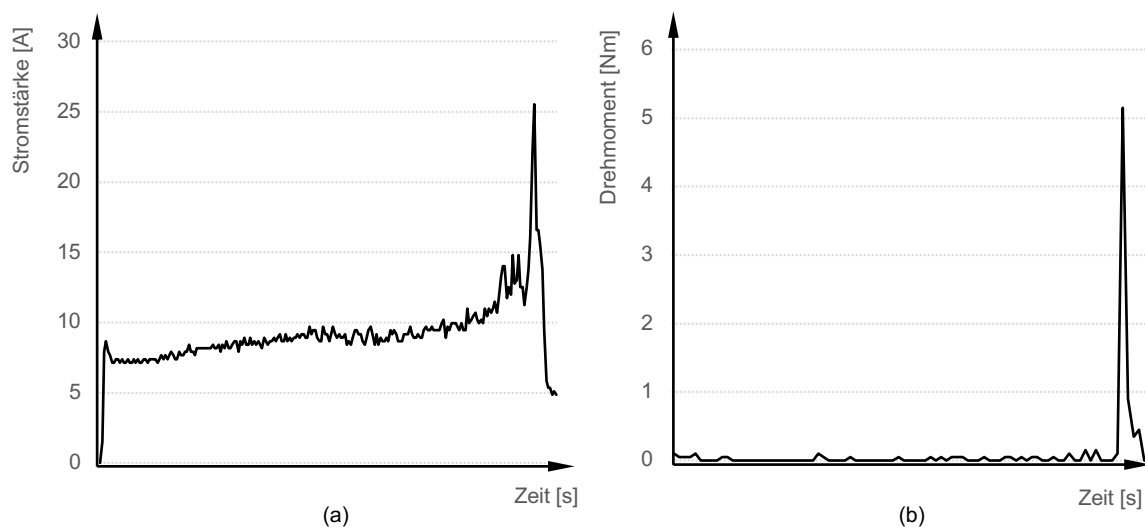


Abbildung 5.11: Rückmeldedaten für Bohreingriffe (a) und Schraubeingriffe (b)

Smarte Drehmomentsteuerung (Anforderung P3) Der typische Verlauf des Drehmoments über die Zeit bei einem Schraubeingriff (vgl. Abbildung 5.11 (b)) zeigt deutlich, dass der Anstieg zum notwendigen Drehmoment erst langsam und dann sehr rapide verläuft. Um das Drehmoment kontrollierter und mit höherer Genauigkeit zu erreichen, nutzt das Werkzeug eine smarte Drehmomentsteuerung. Diese teilt den Schraubprozess in mehrere Stufen auf, wobei sich die Drehgeschwindigkeit schrittweise zum Zieldrehmoment hin verringert. Dazu nutzt das Werkzeug die Rückmeldedaten der werkstellennahen Drehmomentsensorik der Schraubaufsätze und steuert während des Prozesses die einzelnen Phasen an. Für einen reibungslosen Ablauf muss die Softwareplattform für jede Fügestelle ein smartes Schraubprogramm aufbereiten und kontextgerecht an das Werkzeug senden.

Schnittstelle zur Softwareplattform (Anforderung P3) Um die Funktionen zu ermöglichen und das Gewicht dabei nicht zu stark zu erhöhen, nutzt das Smarte Handwerkzeug eine Bluetooth-Schnittstelle. Dadurch kann das Werkzeug eine Verbindung zu einem externen Mikrocomputer aufbauen, der wiederum über eine WLAN- (Wireless Local Area Network) oder LAN-Schnittstelle mit der Softwareplattform verbunden ist. Abbildung 5.12 verdeutlicht die Werkzeugschnittstelle zur Softwareplattform und zeigt zusätzlich die verbauten Platinen auf. Die Datenpakete der Softwareplattform können über den Mikrocomputer empfangen und an das Werkzeug weitergeleitet werden. Die Platinen im Werkzeug leiten die Datenpakete über die NFC- und I2C-Schnittstellen an die ausgerüsteten Werkzeugaufsätze weiter. Analog verlaufen die Daten andersherum von den Werkzeugköpfen bis zur Softwareplattform.

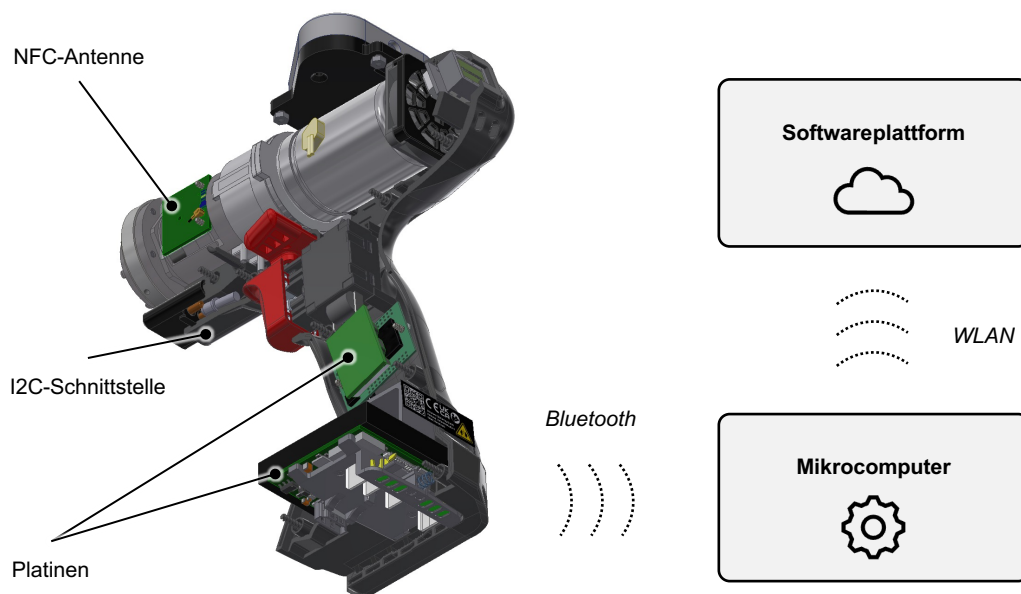


Abbildung 5.12: Werkzeugschnittstelle zur Softwareplattform

5.3.2 Digitales Assistenzsystem für die Arbeitsvorbereitung

Das Digitale Assistenzsystem für die Arbeitsvorbereitung wird entwickelt, um die Inhalte für das Digitale Assistenzsystem der Montage und für die Smarten Handwerkzeuge zu erzeugen. Ziel ist es, eine einfache, digitale Prozesskette zu konzipieren, die auf bestehende Informationsquellen, wie das ERP- und CAD-System zurückgreift und die Inhaltserzeugung generisch und teilautomatisiert ermöglicht (vgl. Anforderung **P1**). Als Ersatz für die manuell aufwändig erstellten Montagehilfen (vgl. Tabelle 3.1), fokussiert das System die teilautomatisierte Erstellung sog. *Werkzeugprogramme*, die die durchzuführenden Werkzeugoperationen mit ihren Koordinaten und Soll-Prozessparametern beinhalten. Die Werkzeugoperationen müssen mit dem CAD-Modell verknüpft werden, um eine übersichtliche Informationsbereitstellung zu ermöglichen (vgl. Anforderung **N3**).

Abbildung 5.13 zeigt die Web-Applikation des Digitalen Assistenzsystems der Arbeitsvorbereitung. Das System basiert auf den Softwareansätzen von Rost [Rost23] und Elzalabany [Elza24] und ermöglicht es, Inhalte in einem zentralen System ohne Medienbrüche zu erzeugen und bereitzustellen. Über den *Auswahlbereich* können die verschiedenen Module des Assistenzsystems ausgewählt werden, woraufhin die Benutzerschnittstellen der Module im *Anzeigebereich* dargestellt werden.

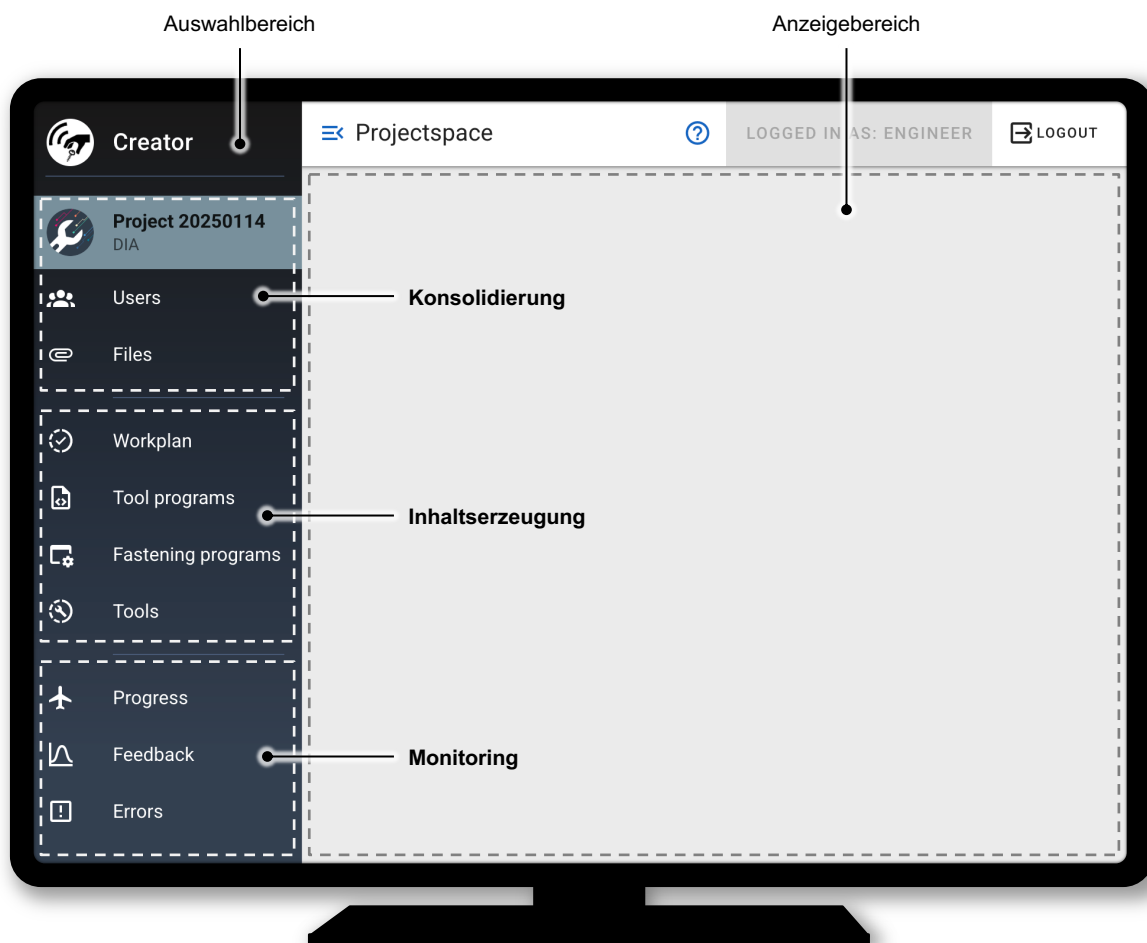


Abbildung 5.13: Digitales Assistenzsystem für die Arbeitsvorbereitung

Die Module des Assistenzsystems sind in drei Bereiche aufgeteilt. Ziel der *Konsolidierung* ist es, Nutzer und Dateien in Datenprojekten zu bündeln, um die Grundlage für die Erzeugung und Bereitstellung der Inhalte zu schaffen. Die *Inhaltserzeugung* umfasst Module, die für die Erstellung von Arbeitsplänen und Werkzeugprogrammen und für die Anpassung von Informationen der Smarten Handwerkzeuge und Aufsätze genutzt werden. Das *Monitoring* beinhaltet Ansichten zum Baufortschritt, den Rückmeldedaten und den Fehlerzuständen der Smarten Handwerkzeuge.

Konsolidierung von Dateien und Nutzern

Die Datenprojekte dienen als eindeutig identifizierbare Einheiten, die die Dateien, Nutzer und erzeugten Inhalte bündeln und für das Montageassistenzsystem und die Softwareplattform bereitstellen. Dazu enthält ein Datenprojekt einen Namen und eine eindeutige Identifikationsnummer, wie bspw. eine Auftragsnummer aus dem ERP-System. Wenn das Datenprojekt erstellt ist, kann der Projektbereich geöffnet werden, um die weiteren Module zu nutzen (vgl. Abbildung 5.13).

Nutzerverwaltung: Users-Modul Die *Nutzerverwaltung* erlaubt es, bereits im System angelegte Nutzer mit zum Datenprojekt hinzuzufügen und mit einer Rolle zu versehen. Dazu zählen insbesondere die Werker, welche über das Digitale Assistenzsystem der Montage auf die Datenprojekte zugreifen können. Außerdem zählen dazu Ingenieure der Arbeitsvorbereitung, um kollaborativ an der Inhaltserzeugung zu arbeiten oder Zugriff für die Monitoring-Module zu gewähren.

Dateiverwaltung: Files-Modul Die *Dateiverwaltung* wird genutzt, um die Dateien zum Datenprojekt hinzuzufügen, die für die Inhaltserzeugung notwendig sind. Dazu zählen ein ERP-Export, der die Arbeitsschritte für den durchzuführenden Auftrag beinhaltet, ein CAD-Modell und eine aus dem CAD-System exportierte Nietliste. Die Nietliste wird automatisch erzeugt, wenn neue Bauteile im CAD-System hinzugefügt werden und beinhaltet alle Niete des zu fertigenden Produktes und ihre Spezifikationen. Im industriellen Einsatz ist hier eine Schnittstelle zum ERP- und CAD-System sinnvoll, die diese Dateien automatisch aus den Systemen einbindet.

Die Modellqualität des CAD-Modells sollte vor dem Hochladen reduziert werden, um die Darstellung auch auf Endgeräten mit niedriger Rechenleistung zu ermöglichen. Rost untersucht dazu, wie sich die Güte der Modellqualität auf die Nutzerzufriedenheit auswirkt und stellt fest, dass erst eine Reduzierung auf 35 % der ursprünglichen Modellqualität zu einer merklichen Verschlechterung führt [Rost23, S. 75ff.]. Im Digitalen Assistenzsystem wird deshalb eine Logik genutzt, die das CAD-Modell in ein Oberflächenmodell mit 50 % der ursprünglichen Modellqualität konvertiert und die Dateigröße deutlich reduziert.

Inhaltserzeugung für das Montageassistenzsystem und die Smarten Handwerkzeuge

Vermerk: Die Ergebnisse zur teilautomatisierten Erzeugung der Arbeitspläne und Werkzeugprogramme sind im Rahmen einer betreuten Masterarbeit [Horn24] entstanden.

Das Assistenzsystem stellt verschiedene Module bereit, um Inhalte teilautomatisiert zu erzeugen. Für die Montage mit Digitalen Assistenzsystemen und integrierten Smarten Handwerkzeugen werden ein *Arbeitsplan* mit allen durchzuführenden Arbeitsschritten, mehrere *Werkzeugprogramme* mit allen durchzuführenden Werkzeugoperationen und eine Visualisierung des Produktes benötigt. Die Werkzeugoperationen der Nietprozesse können zusätzlich mit smarten *Schraubprogrammen* erweitert werden. Abschließend müssen die Smarten Handwerkzeuge im Datenprojekt angelegt werden, um die Grundlage der Kommunikation zwischen Assistenzsystem und Werkzeug zu schaffen und die Daten der *Werkzeuge und Aufsätze* zu konfigurieren.

Arbeitsplan: Workplan-Modul Halata entwickelt ein Vorgehen, um aus der Produktstruktur automatisch Arbeitspakete und Arbeitsschritte abzuleiten und für das Digitale Assistenzsystem zu erzeugen [Hala18, S. 113ff.]. Für die Unikatproduktion ist das sinnvoll, weil die Arbeitsabläufe sich von Produkt zu Produkt deutlich unterscheiden. Die variantenreiche Serienfertigung des Flugzeugbaus kennzeichnet allerdings ein hoher Wiederholungsgrad der Arbeitsschritte. Für die Erstellung des *Arbeitsplans* wird daher ein ERP-Export verwendet. Er stellt die dem Auftrag zugeordneten Arbeitsschritte, die normalerweise für den papierbasierten Arbeitsauftrag genutzt werden, in einem strukturierten Datenformat dar. Dieses Datenformat kann mit einem Algorithmus verarbeitet werden, um einzelne Arbeitsschritte mit Titel, Nummer und Beschreibung zu erzeugen. Die Arbeitsschritte werden den Bauteilen zugeordnet und initial als allgemeine Arbeitsschritte eingestuft (Typ) (vgl. Abbildung 5.14).

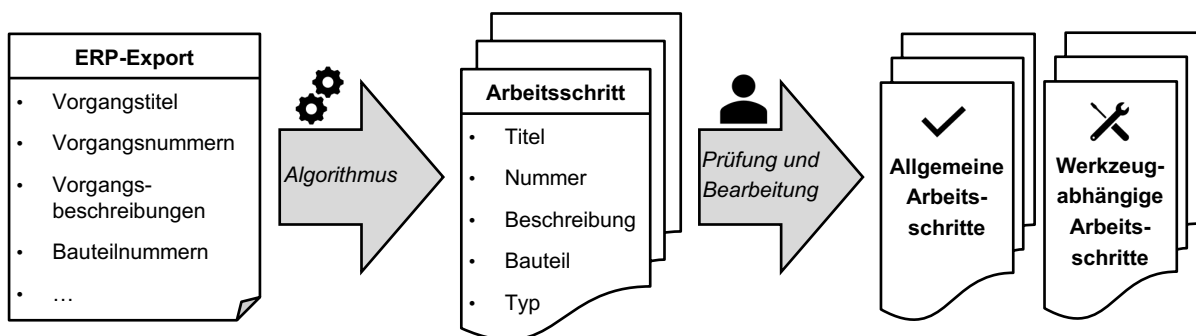


Abbildung 5.14: Erzeugung der Arbeitsschritte

Das Assistenzsystem zeigt die erzeugten Arbeitsschritte an, damit die Arbeitsvorbereitung die Schritte prüfen und bearbeiten kann. Insbesondere ist es wichtig, die werkzeugabhängigen Arbeitsschritte zu identifizieren und als solche zu kennzeichnen. Dazu passt die Arbeitsvorbereitung den Typ der Arbeitsschritte im Assistenzsystem an. Die Vorgänge im ERP-System verweisen lediglich auf Produktionsnormen und Montagehilfen und sind dementsprechend noch nicht mit Werkzeugoperationen verknüpft. Analog zu Meluzov können außerdem generisch Arbeitsschritte angelegt werden, um einen individuellen Arbeitsplan manuell zu erzeugen oder einzelne Arbeitsschritte zu den exportierten Arbeitsplänen hinzuzufügen [Melu22, S. 52].

Werkzeugprogramme: Tool-programs-Modul Um das Smarte Handwerkzeug mit Prozessparametern in Abhängigkeit vom Produktionskontext versorgen zu können, muss die Arbeitsvorbereitung sog. *Werkzeugprogramme* erzeugen und den werkzeugabhängigen Arbeitsschritten korrekt zuordnen. Die Werkzeugprogramme beinhalten eine Liste mit durchzuführenden Werkzeugoperationen und Referenzen zu Bauteilen und den zugewiesenen Arbeitsschritten. Die *Werkzeugoperationen* verbinden Koordinaten des Produktes mit Soll-Prozessparametern und im Fall eines Bohreingriffs zusätzlich mit dem notwendigen Bohrwinkel.

In der Regel verknüpft die Konstruktion die Bauteile im CAD-System mit Produktionsnormen und die Arbeitsvorbereitung nutzt die Normen anschließend, um die Montagehilfen zu erstellen (vgl. Tabelle 3.1 und Abbildung 3.2). Dieser Prozess wird im Assistenzsystem über einen Algorithmus weitestgehend automatisiert. Dazu nutzt das Digitale Assistenzsystem die importierte Nietliste, um *Prozessdatenbanken* zu filtern. Die Prozessdatenbanken stellen die Produktionsnormen des Herstellers dar, indem sie ausgewählte Informationen der Nietliste mit durchzuführenden Werkzeugoperationen tabellarisch verknüpfen. Abbildung 5.15 zeigt die Erzeugung und Zuordnung der Werkzeugprogramme im Assistenzsystem.

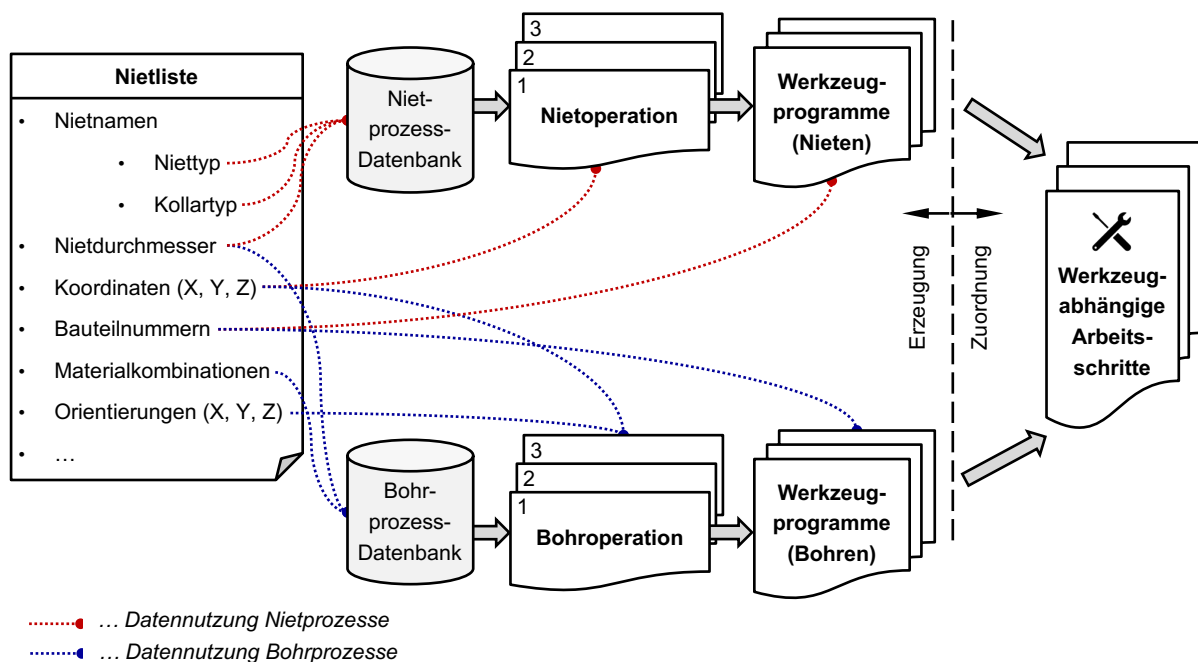


Abbildung 5.15: Erzeugung und Zuordnung der Werkzeugprogramme

Der Algorithmus ist in einen Prozess für Nietoperationen und einen Prozess für Bohroperationen aufgeteilt. Um die Nietoperationen zu erzeugen, filtert das Assistenzsystem die *Nietprozess-Datenbank* nach dem *Niettyp*, *Kollartyp* und *Nietdurchmesser*. Aus diesen Informationen leitet das Assistenzsystem ab, wie häufig und mit welchen Drehmomenten jedes Niet anzuziehen ist. Die resultierenden Nietoperationen erhalten anschließend die Koordinaten des zugehörigen Niets als Soll-Koordinaten. Analog filtert das Assistenzsystem die *Bohrprozess-Datenbank* mit den Daten zum *Nietdurchmesser* und zur *Materialkombination* der Fügestelle. Daraus ergibt sich für jedes Niet, wie viele Bohroperationen notwendig sind, um den Nietdurchmesser zu erreichen und mit welchen Durchmessern und Drehgeschwindigkeiten diese durchzuführen sind. Der Algorithmus

ordnet den Bohroperationen anschließend die Koordinaten und die Orientierung des Niets zu, was zusätzlich ermöglicht, die Bohrwinkel zu überprüfen. Das Assistenzsystem bündelt schließlich die Bohr- und Nietoperationen in Werkzeugprogramme. Dazu nutzt es die *Bauteilnummern* der Nietliste und die Bearbeitungsreihenfolge, die sich aus den Durchmessern der Bohroperationen oder der Art der Nietoperationen (Voranzug oder Endanzug) ergibt.

Die erzeugten Werkzeugprogramme müssen abschließend den werkzeugabhängigen Arbeitsschritten des Datenprojektes zugeordnet werden. Ein vollautomatisierter Ansatz sollte dazu die Bauteilnummer nutzen, die sowohl bei den Werkzeugprogrammen als auch bei den Arbeitsschritten hinterlegt ist. Im Digitalen Assistenzsystem muss die Arbeitsvorbereitung die Werkzeugprogramme noch manuell zuweisen. Das liegt daran, dass das ERP-System die werkzeugabhängigen Arbeitsschritte noch nicht entsprechend der Bearbeitungsreihenfolge aufteilt, sondern diese zusammenfasst (bspw. „Bohrungen von Bauteil A auf Bauteil B übertragen und nach Produktionsnorm X auf Enddurchmesser aufbohren.“). Diese Arbeitsschritte müssen zuerst manuell aufgeteilt werden und können dann über eine Schaltfläche im Assistenzsystem ausgewählt werden, um die Werkzeugprogramme zuzuordnen. Abbildung 5.16 zeigt ein erzeugtes und zugewiesenes Werkzeugprogramm und seine Werkzeugoperationen im Assistenzsystem. Die Werkzeugoperationen werden jeweils mit einem eindeutigen Identifikator, ihren X-, Y- und Z-Koordinaten, dem Status sowie den notwendigen Parametern dargestellt. Der verknüpfte Arbeitsschritt ist unter der Schaltfläche „Bound task“ zu sehen.

ID	X	Y	Z	Status	Parameters	Feedback	Actions
670ffbd6d26fa028eb625a76	-0.9522	-1.2312	0.1107	✘	3.3 [mm] 1900 [rpm]	🍃	✘
670ffbd6d26fa028eb625a79	-0.9923	-1.2312	0.1107	✘	3.3 [mm] 2050 [rpm]	🍃	✘
670ffbd6d26fa028eb625a7c	-1.023	-1.2312	0.1107	✘	3.3 [mm] 1800 [rpm]	🍃	✘
670ffbd6d26fa028eb625a7f	-1.0436	-1.2312	0.1107	✘	3.3 [mm] 2000 [rpm]	🍃	✘
670ffbd6d26fa028eb625a82	-1.082	-1.2312	0.1107	✘	3.3 [mm] 2100 [rpm]	🍃	✘

Rows per page: 10 1-5 of 5

0 %

Bound task
Task: Vorgang 3

Abbildung 5.16: Erzeugtes und zugewiesenes Werkzeugprogramm im Assistenzsystem

Das Digitale Assistenzsystem ermöglicht zusätzlich die generische Erzeugung von Werkzeugprogrammen. Dazu müssen die Koordinaten der Werkzeugoperationen aus dem CAD-Modell ausgelesen, mit Soll-Prozessparametern in eine vorgegebene Datenstruktur eingetragen und in

der Dateiverwaltung hochgeladen werden. Dieser Ansatz spart zwar keine Aufwände in der Arbeitsvorbereitung ein, ermöglicht es allerdings, das Gesamtsystem flexibel zu nutzen.

Schraubprogramme: *Fastening-programs-Modul* Zusätzlich zu den Werkzeugprogrammen bietet das Digitale Assistenzsystem der Arbeitsvorbereitung die Möglichkeit mehrstufige *Schraubprogramme* manuell zu erzeugen. Diese können für die smarte Drehmomentsteuerung der Werkzeuge genutzt werden (vgl. Unterabschnitt 5.3.1). Dazu müssen die Nutzer die Anzahl der Stufen wählen und Informationen zu Drehgeschwindigkeiten, Drehmoment und Grenzwerten eingeben. Die erzeugten Schraubprogramme können anschließend einzelnen Nietoperationen zugeordnet werden.

Werkzeuge und Aufsätze: *Tools-Modul* Damit das Gesamtsystem Informationen zu den Smarten Handwerkzeugen und den Wechselaufsätzen verarbeiten kann, müssen die *Werkzeuge* und *Aufsätze* als Inhalte im Assistenzsystem angelegt werden. Das Assistenzsystem erzeugt die *Werkzeuge* automatisch, sobald ein Smartes Handwerkzeug sich initial mit der Softwareplattform verbindet. Analog erzeugt das Assistenzsystem die *Aufsätze*, sobald ein verbundenes Smartes Handwerkzeug einen Werkzeugaufsatz ausrüstet.

Im Digitalen Assistenzsystem muss die Arbeitsvorbereitung die *Werkzeuge* und *Aufsätze* aus einer Liste auswählen und dem Datenprojekt zuordnen, woraufhin sie alle benötigten Informationen einsehen und bearbeiten können. Bspw. können Wartungsintervalle und Zähler zurückgesetzt werden oder Aufsatzdaten angepasst werden, falls neue Bohrer eingebaut wurden. Abbildung 5.17 zeigt die Informationen für einen Bohr- und einen Schraubaufsatz im Digitalen Assistenzsystem. Die Visualisierung stellt auf einen Blick die aktuellen Prozessparametern, Rüstzustände und Zähler dar und ermöglicht es zusätzlich, die Daten detailliert zu betrachten und die Aufsätze zu bearbeiten oder aus dem Datenprojekt zu entfernen.

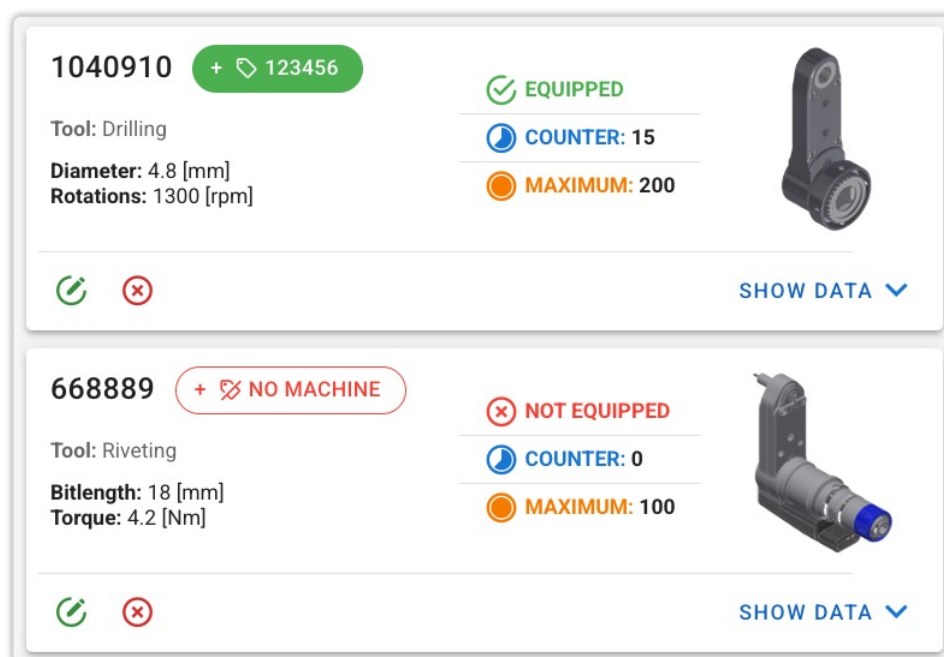


Abbildung 5.17: Bohr- und Schraubaufsätze im Assistenzsystem

Monitoring von Baufortschritt, Rückmeldedaten und Werkzeugfehlern

Die Module zum Monitoring werden genutzt, um den Fortschritt der erzeugten Arbeitspläne und Werkzeugprogramme und die dokumentierten Rückmeldedaten und Fehler der Smarten Handwerkzeuge einzusehen.

Baufortschritt: *Progress-Modul* In diesem Modul visualisiert das Digitale Assistenzsystem das CAD-Modell des zu bearbeitenden Produktes, den Bearbeitungsfortschritt der erzeugten Arbeitsschritte und Werkzeugoperationen. Die Arbeitsvorbereitung kann so überprüfen, ob die Zuordnung und Visualisierung der Werkzeugoperationen zum Produkt korrekt erfolgt ist (vgl. Anforderung N3). Abbildung 5.18 hebt ein am CAD-Modell visualisiertes Werkzeugprogramm im Progress-Modul hervor, das zuvor über die rote Schaltfläche ausgewählt wurde. Die blauen Kugeln stellen einzelne zu erledigende Werkzeugoperationen an ihren Soll-Koordinaten dar und visualisieren die notwendigen Prozessparameter in einem Fenster darüber.

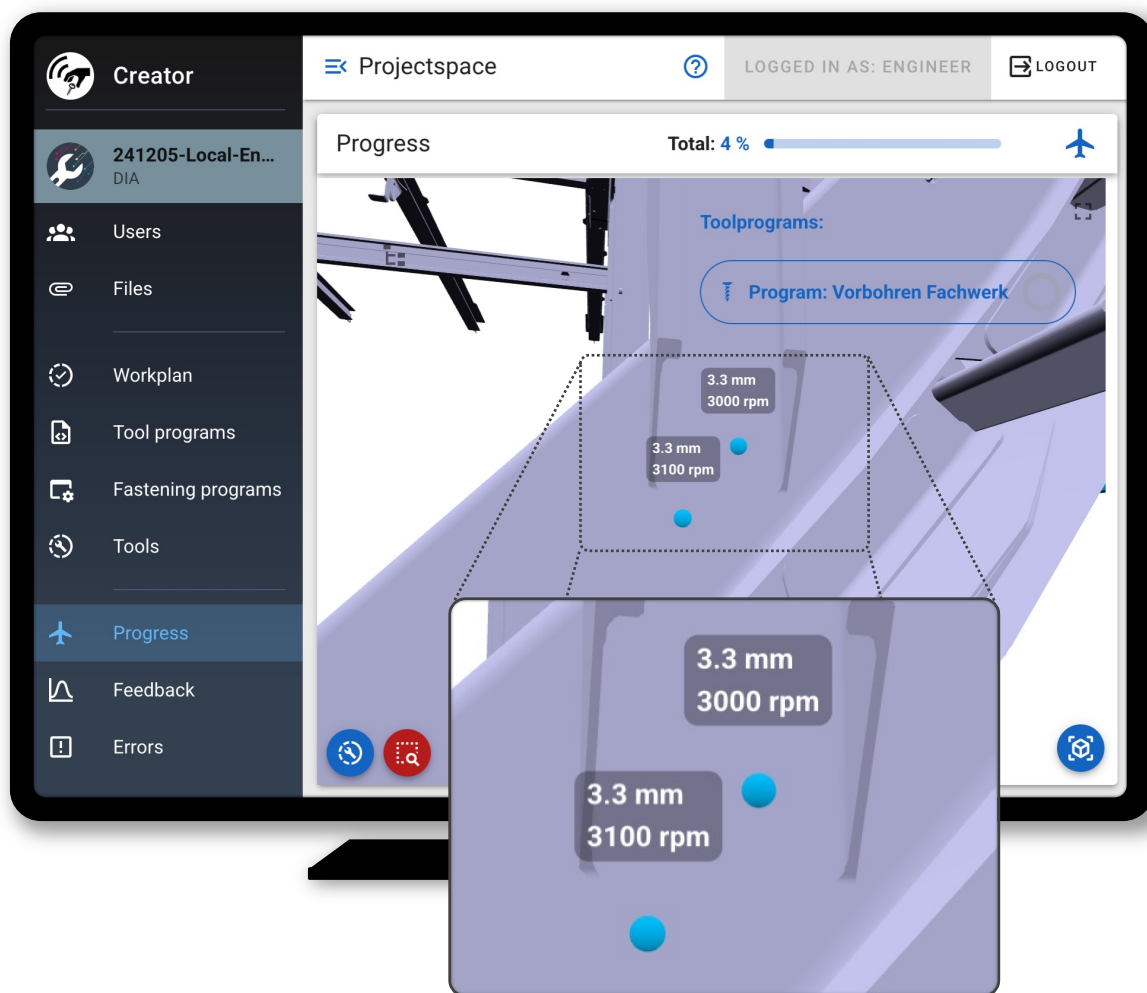


Abbildung 5.18: Zuordnung von Werkzeugprogrammen zum CAD-Modell

Um den Produktionsfortschritt und die Qualität zu überwachen, stellt das Modul verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Am oberen Bildschirmrand wird der Fortschritt als Balken und Prozentzahl dargestellt. Mit der blauen Schaltfläche unten links können zusätzlich Fortschrittsbalken zu den erzeugten Werkzeugprogrammen eingeblendet werden (vgl. Abbildung 5.19). Die

visualisierten Werkzeugoperationen zeigen außerdem anhand ihrer Farbe den Fortschritt und die Qualität der Bearbeitung an. Eine blaue Kugel muss noch bearbeitet werden, eine grüne Kugel wurde qualitativ in Ordnung bearbeitet und eine rote Kugel wurde qualitativ nicht in Ordnung bearbeitet. Alle Darstellungsmöglichkeiten aktualisieren sich, wenn ein Arbeitsschritt durch das Montageassistenzsystem abgeschlossen wird oder wenn eine Werkzeugoperation durchgeführt wird.

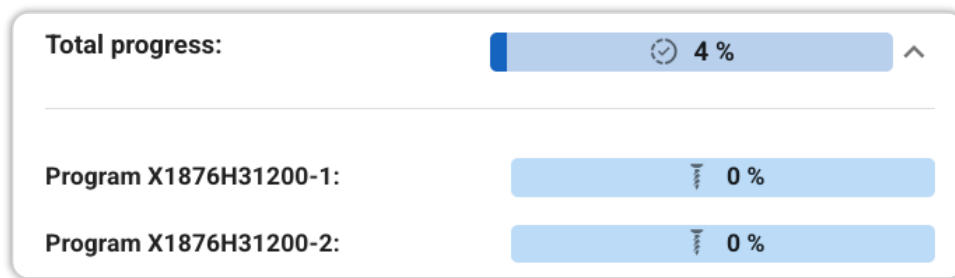


Abbildung 5.19: Fortschrittsbalken im Assistenzsystem (Ausschnitt)

Rückmeldedaten: *Feedback-Modul* Die von den Smarten Handwerkzeugen aufgenommenen und dokumentierten Rückmeldedaten (vgl. Abbildung 5.11) können im Digitalen Assistenzsystem betrachtet werden. Dazu dokumentiert das Gesamtsystem neben den Rückmeldedaten auch die Art der Operation, den Zeitpunkt und die genutzten Prozessparameter und verknüpft die Werkzeugoperation mit dem Produkt des Datenprojektes. Das Modul zeigt alle Rückmeldedaten der zum Datenprojekt zugehörigen Smarten Handwerkzeuge an. Jeder Eintrag zeigt zusätzlich an, ob die Werkzeugoperation qualitativ gut oder schlecht durchgeführt wurde.

Werkzeugfehler: *Errors-Modul* Alle Fehler, die auf einem der Smarten Handwerkzeuge des Datenprojektes entstehen, werden im Digitalen Assistenzsystem der Arbeitsvorbereitung dokumentiert angezeigt. Ebenso werden die behobenen Fehler in einer Liste dargestellt, um Rückschlüsse auf Probleme der Werkzeuge und die Behebungsauern zu schließen.

Digitale Prozesskette

Die Konsolidierung der Daten und Nutzer in einem Datenprojekt und die anschließende Inhaltserzeugung mithilfe der erläuterten Module schafft eine digitale Prozesskette von den Änderungen der Konstruktion bis hin zur Informationsbereitstellung für die Werker in der Montage. Die Prozesskette kann in einer industriellen Implementierung, mit entsprechenden Schnittstellen zum ERP- und CAD-System, ohne Medienbrüche verlaufen. Ein von der Arbeitsvorbereitung freigegebenes Datenprojekt kann vom Digitalen Assistenzsystem der Montage geöffnet und bearbeitet werden. Zusätzlich kann die Arbeitsvorbereitung laufende Datenprojekte durch die Monitoringfunktionen betrachten und auch im Betrieb Änderungen an das Montageassistenzsystem weitergeben.

5.3.3 Digitales Assistenzsystem für die Montage

Das Digitale Assistenzsystem für die Montage nutzt die erzeugten Datenprojekte und dient den Werkern als zentrale Arbeitsunterlage und Benutzerschnittstelle zu den Smarten Handwerkzeugen. Ziel des Assistenzsystems ist es, die notwendigen Informationen einfach und kontextgerecht für die Werker bereitzustellen (vgl. Anforderung P2). Der Fokus liegt auf der Darstellung der nächsten durchzuführenden Werkzeugoperationen und ihrer Soll-Prozessparameter am Produkt. Das Assistenzsystem nutzt die aktuell ausgewählte Arbeitsaufgabe und die Sensordaten des Smarten Handwerkzeugs, um die Werkzeugoperationen kontextgerecht zu filtern. Außerdem nutzt es die Daten der Smarten Handwerkzeuge, um Informationen zu Werkzeugpositionen, eingestellten Prozessparametern oder potenziellen Fehlern darzustellen (vgl. Anforderung N3).

Abbildung 5.20 zeigt die Hauptansicht der Web-Applikation für das Digitale Assistenzsystem der Montage, nachdem ein Datenprojekt ausgewählt wurde. Neben dem Hauptfenster, das das *CAD-Modell* und die aktuell zu bearbeitenden *Werkzeugoperationen* darstellt, ist auf der rechten Seite ein *Arbeitsplan* und eine Karte mit Informationen zum *Werkzeugzustand* zu sehen. Außerdem zeigt die Sicht den Inhalt des aktuellen *Arbeitsschritts* an und visualisiert den *Baufortschritt* mit einer Fortschrittsleiste am oberen Rand.

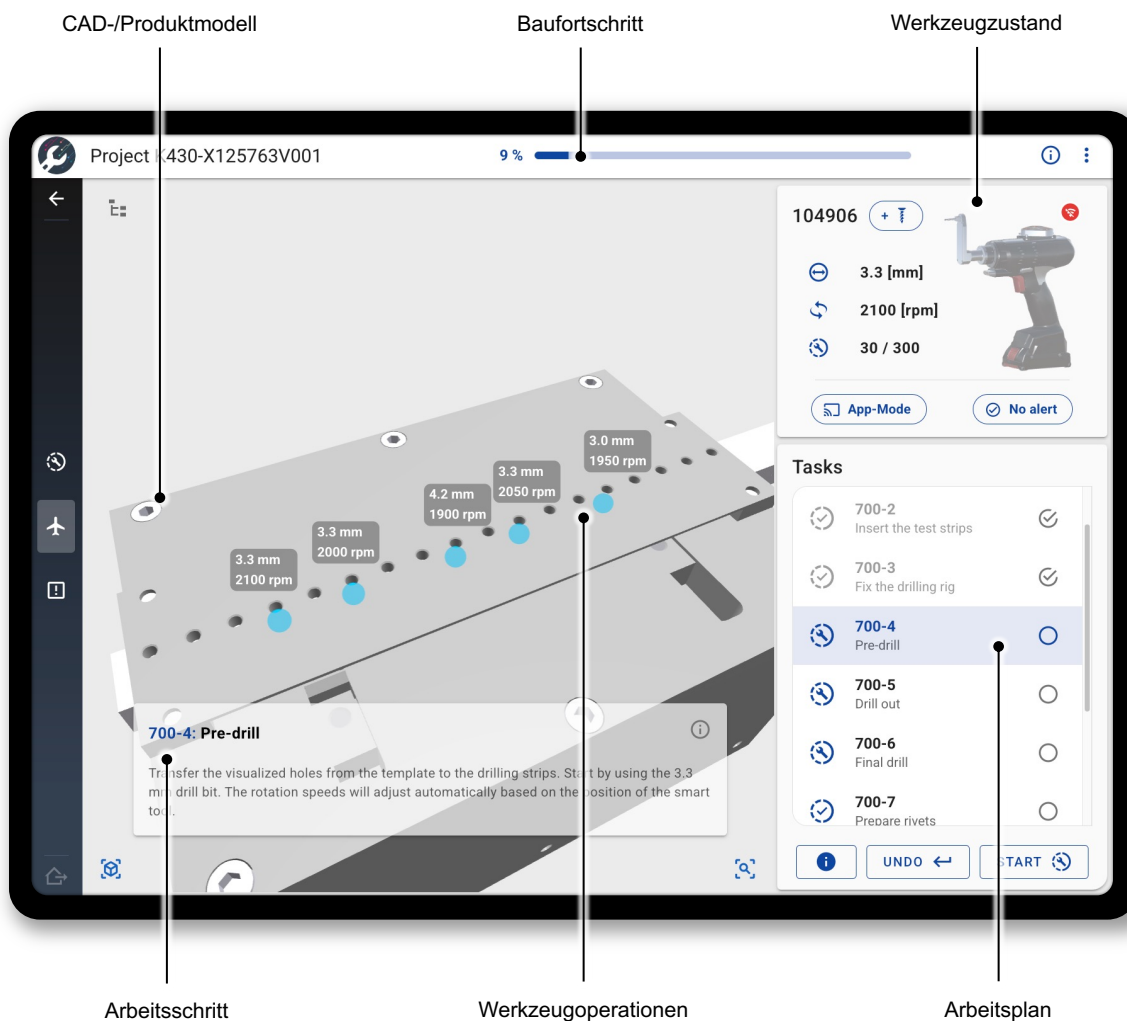


Abbildung 5.20: Digitales Assistenzsystem für die Montage i.A.a. [Pion24, S. 432]

Bereitstellung von Arbeitsschritt- und Produktinformationen

Als Grundlage der Informationsbereitstellung müssen die für die Werker notwendigen Informationen betrachtet werden. Dazu beantworten Informationen nach Halata vier zentrale Fragestellungen für die Montage [Hala18, S. 60f.]:

- *Wann?* In welchem Arbeitsschritt ist etwas zu bearbeiten oder zu montieren?
- *Was?* Welches Bauteil ist zu bearbeiten oder zu montieren? Was ist die Aufgabe?
- *Wo?* An welcher Position, in welcher Ausrichtung und mit welchen Maßen ist das Bauteil zu bearbeiten oder zu montieren?
- *Wie?* Mit welchen Prozessparametern, Werkzeugen und Randbedingungen ist der Arbeitsschritt durchzuführen?

Zwischen den Arbeitsschritten klären die Werker die Fragen *Wann* und *Was* und während eines Arbeitsschritts klären die Werker die Fragen *Wo* und *Wie*, weshalb Halata eine digitale Arbeitsunterlage in einen Ablaufbereich und einen Visualisierungsbereich aufteilt.

Ablaufbereich Der Ablaufbereich des Digitalen Assistenzsystems beinhaltet den Arbeitsplan, der alle Arbeitsschritte mit ihrer Vorgangsnummer und einer Kurzbeschreibung auflistet. Abbildung 5.21 zeigt den Ablaufbereich. Die Darstellung unterscheidet zwischen *allgemeinen* Arbeitsschritten (Häkchen-Symbol) und *werkzeugabhängigen* Arbeitsschritten (Schraubenschlüssel-Symbol). Außerdem verdeutlicht die Farbe und der Kreis auf der rechten Seite der Arbeitsschritte, ob diese *erledigt* (grau hinterlegt und abgehakt), *aktiv* (blau hinterlegt) oder *zu erledigender* (nicht abgehakt) sind.

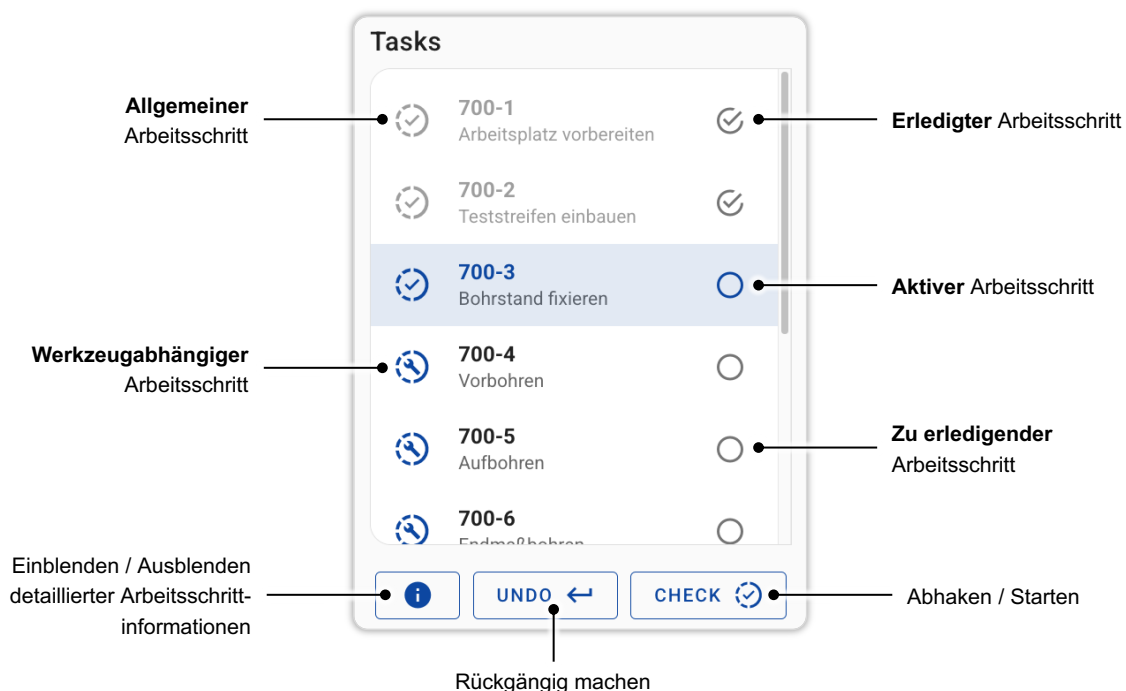


Abbildung 5.21: Arbeitsplan im Digitalen Assistenzsystem der Montage

Mit den Schaltflächen können die Werker die Arbeitsschritte abhaken oder rückgängig machen, um die Informationen im Visualisierungsbereich anzupassen. Ist der aktive Arbeitsschritt werkzeugabhängig, ändert sich die Schaltfläche unten rechts und kann genutzt werden, um die Bearbeitung mit dem Smarten Handwerkzeug zu starten. Die Schaltfläche unten links ermöglicht es, die detaillierten Informationen der Arbeitsschritte im Visualisierungsbereich ein- oder auszublenden.

Visualisierungsbereich Der Visualisierungsbereich des Digitalen Assistenzsystems stellt das CAD-Modell des Produktes und die Informationen bereit, die abhängig vom aktiven Arbeitsschritt und vom Werkzeugzustand kontextgerecht gefiltert werden. Dazu zählt der Inhalt der Arbeitsaufgabe und die Darstellung der Werkzeugoperationen am Produkt. Der Informationsbedarf der Werker ist abhängig vom Erfahrungswissen und Serienanteil der Gesamtaufgabe [Hala18, S. 64]. Für das Assistenzsystem bedeutet das, dass vor allem die Inhalte dargestellt werden müssen, die vom Erfahrungswissen und Serienanteil abweichen.

Die aus dem ERP-System exportierten Arbeitsschritte sind bereits für erfahrene Mitarbeiter ausgelegt und werden in der transparenten Informationsbox dargestellt. Die Box kann ausgeblendet werden, um das Produktmodell besser betrachten zu können. Das Modell wird als zentrales Element dargestellt und kann mit Hilfe verschiedener Schaltflächen navigiert und näher betrachtet werden. Die Würfel-Schaltfläche unten links bewirkt ein Zurücksetzen der Sicht auf das CAD-Modell zum ursprünglichen Zustand während die Lupe-Schaltfläche unten rechts die Sicht automatisch auf die aktuell visualisierten Werkzeugoperationen setzt. Die Ordnerstruktur-Schaltfläche oben links kann genutzt werden, um die Produktstruktur zu öffnen. Durch das Anklicken der Produktelemente wird das Sichtfenster zum entsprechenden Bauteil navigiert. Außerdem können einzelne Bauteile ein- und ausgeblendet werden. Die Bauteilnummer der erzeugten Arbeitsschritte ermöglicht es theoretisch automatisch auf die relevanten Bauteile zu navigieren. Diese Funktion ist allerdings nicht umgesetzt, weil die Werker die Bauteile in der Flugzeugstruktur eindeutig über Fertigungshilfsmittel positionieren und dahingehend viel Erfahrungswissen besitzen.

Interaktive Ansicht von Werkzeugoperationen am CAD-Modell

Die Werkzeugoperationen unterscheiden sich in ihren Positionen und Soll-Prozessparametern. Jede Werkzeugoperation hat damit einen lokalen Zusammenhang (W_o) und einen modalen Zusammenhang (W_e) (vgl. [Hala18, S. 60]). Dementsprechend visualisiert das Digitale Assistenzsystem die Werkzeugoperationen einerseits als farbige Kugeln direkt am CAD-Modell, um den Ort der Operationen zu verdeutlichen. Andererseits visualisiert es die Soll-Prozessparameter in einem Textfenster direkt über den durchzuführenden Werkzeugoperationen, um die Bedingungen der Operationen zu verdeutlichen. Das vereinfacht die kognitive Wahrnehmung und Verarbeitung der Informationen und entspricht damit den Anforderungen der Nutzeranalyse (vgl. Anforderung N3). Eine Listendarstellung der Werkzeugoperationen im Ablaufbereich würde die kognitive Belastung hingegen erhöhen. Außerdem entscheiden die Werker in der Regel selbst, in welcher Reihenfolge sie die Werkzeugoperationen durchführen, was dem linearen Aufbau des Ablaufbereiches widerspricht.

Das Assistenzsystem stellt nur die Werkzeugoperationen dar, die mit dem aktiven, werkzeughängigen Arbeitsschritt verknüpft sind. Sobald der Arbeitsschritt aktiv ist, werden die Kugeln und Textfenster im Visualisierungsbereich eingeblendet und das Sichtfenster wird so navigiert, dass alle Operationen sichtbar sind. Das Sichtfenster wird fließend versetzt, was die Suche nach dem Ort der Werkzeugoperationen vereinfacht und die Nutzerzufriedenheit erhöht (vgl. Flugmodus [Hala18, S. 142]). Die Kugeln scheinen transparent durch die Elemente des Produktmodells durch und können so auch bei Verdeckung schnell gefunden werden (vgl. Abbildung 5.20).

Rost führt zusätzlich die Frage *Ob* ein, die Werker beantworten müssen, um herauszufinden, ob die Anforderungen durch zu montierende Bauteile erfüllt werden [Rost23, S. 71]. Im Flugzeugbau müssen die Informationen im Visualisierungsbereich analog die Frage beantworten, *ob* die Anforderungen der Arbeitsaufgabe im aktuellen Kontext durch das Werkzeug gedeckt werden. Die Integration des Smarten Handwerks mit dem Digitalen Assistenzsystem ermöglicht es, die Darstellung der Werkzeugoperationen entsprechend interaktiv zu gestalten, um Werkern Rückmeldungen zur Anforderungsdeckung zu ermöglichen (vgl. Unterabschnitt 2.3.2). Abbildung 5.22 verdeutlicht dazu die verschiedenen Darstellungsoptionen der Werkzeugoperationen, die die Kugeln in Abhängigkeit der Sensordaten des Smarten Handwerks einnehmen.

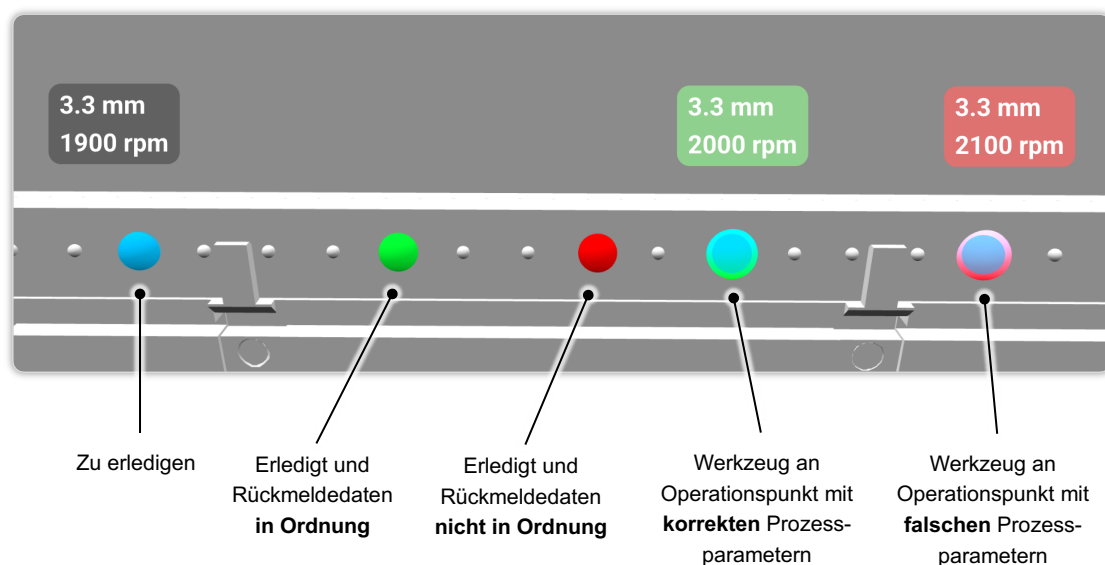


Abbildung 5.22: Darstellungsoptionen der Werkzeugoperationen im Assistenzsystem

Eine *blaue* Kugel mit grau hinterlegtem Parameterfenster bedeutet, dass die Werkzeugoperation noch zu erledigen ist. Eine *grüne* Kugel ohne Parameterfenster bedeutet, dass die Werkzeugoperation durchgeführt wurde und die Rückmeldedaten des Smarten Handwerks in Ordnung waren. Analog bedeutet eine *rote* Kugel ohne Parameterfenster, dass die Werkzeugoperation zwar erledigt wurde, die Rückmeldedaten aber als nicht in Ordnung bewertet wurden. Eine blaue Kugel mit *grüner Umrandung* und grün hinterlegtem Parameterfenster bedeutet, dass die Werkzeugschleife an dieser Werkzeugoperation angesetzt ist und die Prozessparameter mit den Soll-Werten übereinstimmen. Eine blaue Kugel mit *roter Umrandung* und rot hinterlegtem Parameterfenster bedeutet entsprechend, dass das Werkzeug an dieser Stelle angesetzt ist, die Prozessparameter aber nicht mit den Soll-Werten übereinstimmen.

Überblick zum aktuellen Werkzeugzustand

Das Digitale Assistenzsystem muss den aktuellen Werkzeugzustand übersichtlich darstellen, damit neben den interaktiven Werkzeugoperationen auch die Gründe für eine unzureichende Erfüllung der Anforderungen nachvollzogen werden können. Zusätzlich zum Visualisierungs- und Ablaufbereich erfordert die Integration mit einem Smarten Handwerkzeug also einen *Werkzeugbereich*. Der Ablaufbereich wird häufig genutzt und ist entsprechend der Bedienbereiche eines Tablets an der unteren rechten Seite angeordnet [Hala18, S. 74]. Der Werkzeugbereich dient als Informationsschnittstelle zum Smarten Handwerkzeug und benötigt keine Nutzereingaben. Deshalb ordnet das Assistenzsystem ihn in der oberen rechten Ecke an (vgl. Abbildung 5.20).

Der Werkzeugbereich muss einerseits die aktuell relevanten Prozessparameter des ausgerüsteten Werkzeugaufsatzes anzeigen und andererseits den Verschleiß- und Fehlerzustand des Werkzeugs darstellen. Abbildung 5.23 zeigt die grundlegende Struktur und die resultierende Umsetzung des Werkzeugbereichs im Assistenzsystem. Die Größe und Ausgestaltung der Elemente hängt davon ab, wie relevant die Informationen im Arbeitsablauf sind.

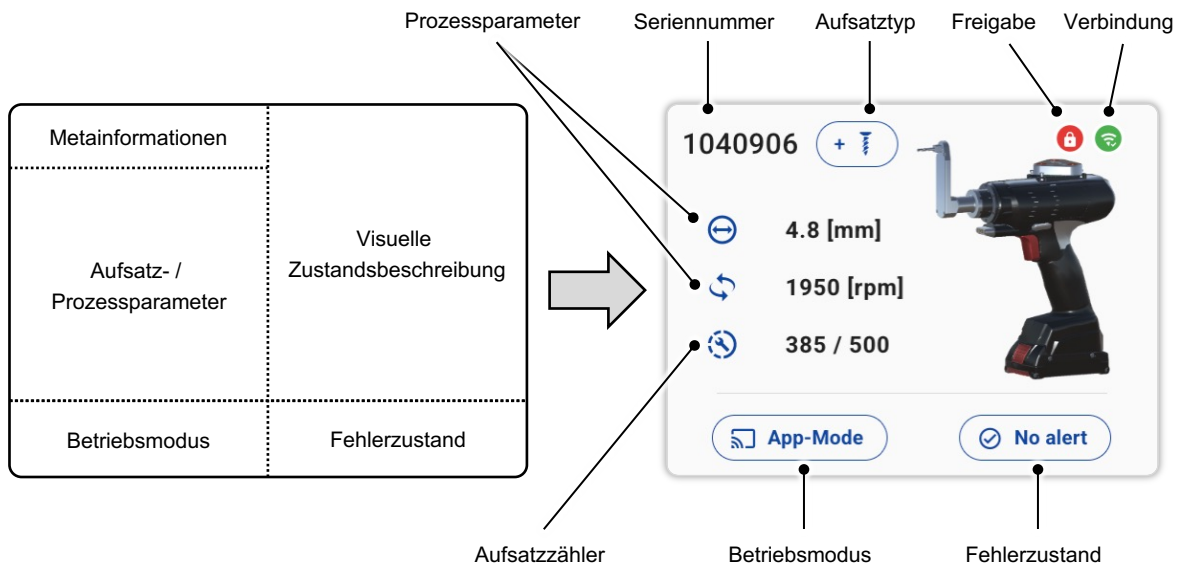


Abbildung 5.23: Struktur und Umsetzung des Werkzeugbereichs im Assistenzsystem

Die *Aufsatz- / Prozessparameter* müssen häufig überprüft werden und werden deshalb gut sichtbar dargestellt. Bei Bohraufsätzen zeigt der Werkzeugbereich den Durchmesser und die Drehgeschwindigkeit und bei Schraubenaufsätzen die Bitlänge und das Drehmoment an (*Prozessparameter*). Zusätzlich verdeutlicht der *Aufsatzzähler* den Verschleißzustand des Werkzeugaufsatzes. Zur *visuellen Zustandsbeschreibung* nutzt der Werkzeugbereich ein Bild des Smarten Handwerkzeugs, das sich je nach Werkzeugzustand anpasst. Er verwendet außerdem zwei Symbole, die anzeigen, ob eine *Freigabe* des Werkzeugs oder eine *Verbindung* zur Softwareplattform besteht. Die *Metainformationen* beinhalten die *Seriennummer* und ein Symbol zum Anzeigen des *Aufsatztyps*. Unten rechts ist zu sehen, ob aktuell ein Fehler auf dem Werkzeug besteht (*Fehlerzustand*) und unten links ist zu sehen, in welchem Betriebsmodus sich das Werkzeug befindet (applikationsgesteuert oder positionsgesteuert - siehe Unterabschnitt 5.4.3). Abbildung 5.24 zeigt verschiedene Zustände des Werkzeugbereiches an, die sich an einem beispielhaften Teilprozess orientieren.

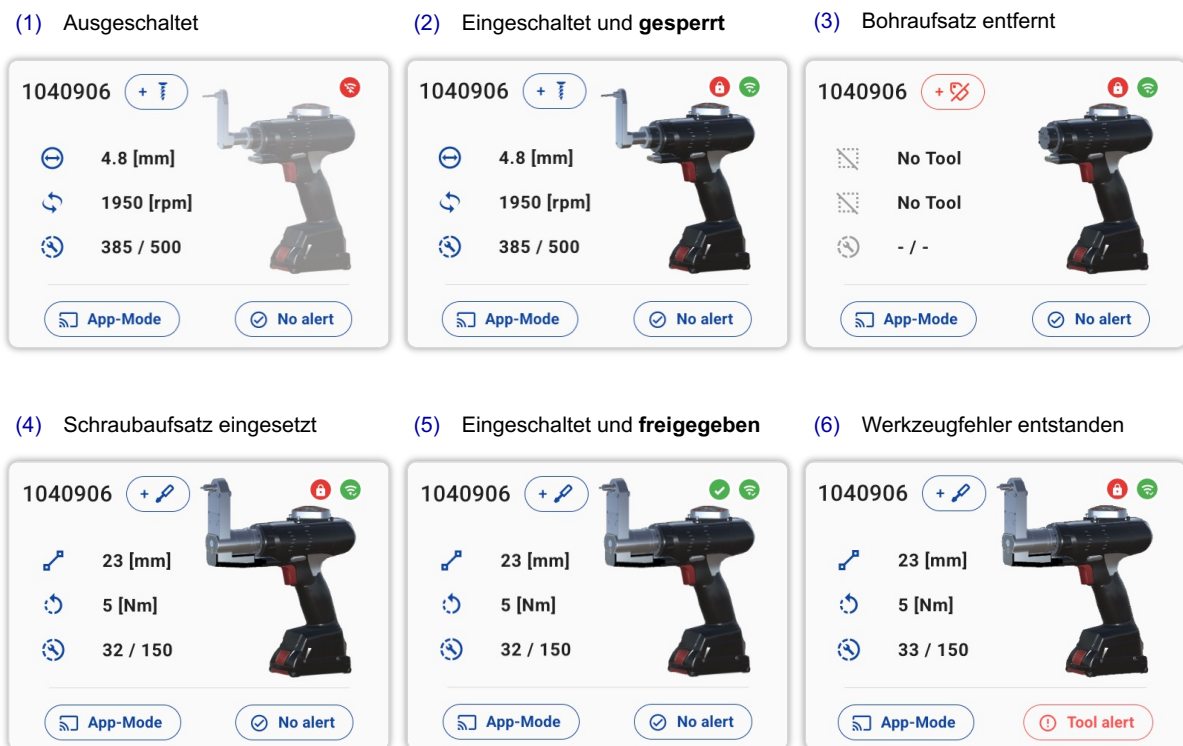


Abbildung 5.24: Werkzeugzustände im Montageassistenzsystem i.A.a. [Pion24, S. 432]

Ist das Werkzeug ausgeschaltet (1), zeigt der Werkzeugbereich ein graues Werkzeugbild und die zuletzt eingestellten Prozessparameter an. Wird das Werkzeug eingeschaltet (2), aktualisiert sich das Bild des Smarten Handwerkszeugs und zeigt die Symbole der erfolgreichen Verbindung zur Softwareplattform und der Blockade des Werkzeugs an. Entfernt ein Werker den Werkzeugaufsatz (3), werden die Prozessparameter ausgeblendet, der Aufsatztyp zeigt ein rotes Symbol an und das Werkzeugbild stellt ein Werkzeug ohne Aufsatz dar. Das Einsetzen eines neuen Aufsatzes (4) aktualisiert wiederum das Werkzeugbild, den Aufsatztyp und die Prozessparameter. Im Beispiel wird ein Schraubaufsatz eingesetzt, weshalb die Bitlänge und das Drehmoment, ein Schraubendrehersymbol für den Aufsatztyp und ein Bild eines Werkzeugs mit ausgerüstetem Schraubaufsatz angezeigt werden. Wird das Werkzeug freigegeben (5), zeigt der Werkzeugbereich ein grünes Häkchen-Symbol an. Wenn die Werkzeugoperation durchgeführt ist, steigt der Aufsatzzähler um eins an und das Werkzeug wird wieder als gesperrt angezeigt. Bei der Entstehung eines Werkzeugfehlers (6) zeigt der Fehlerzustand ein rotes Schriftfeld an.

Behebung von Werkzeugfehlern

Der Werkzeugbereich visualisiert den Zustand des Smarten Handwerkszeugs und zeigt so an, wenn ein Fehler auf dem Werkzeug entsteht und dieses gesperrt wird. Um das Werkzeug wieder nutzen zu können, muss der aktive Fehler behoben und das Werkzeug entsperrt werden. Dazu stellt das Digitale Assistenzsystem einen zusätzlichen Bereich bereit, den Werker über das Berühren der roten Fehlerzustand-Schaltfläche öffnen können. Dadurch öffnet das Assistenzsystem ein Fenster, das den aktuellen Werkzeugfehler mit einem Fehlercode und einer Fehlermeldung beschreibt und anzeigt, welche Aufgabe zu erfüllen ist, um den Fehler zu beheben (vgl. Abbildung 5.25).

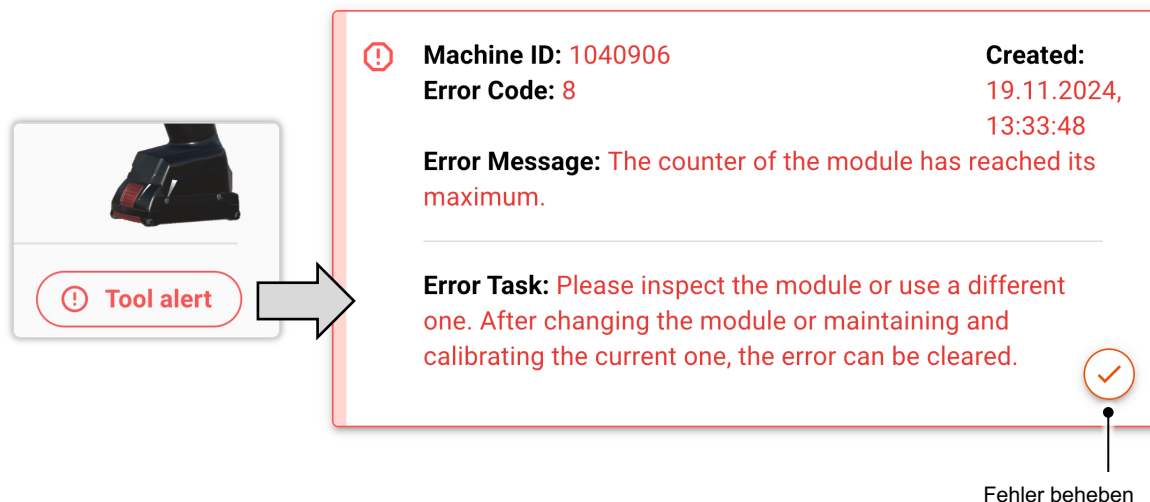


Abbildung 5.25: Fehlerbehebung im Montageassistenzsystem

Die Werker müssen die Aufgabe zur Fehlerbehebung durchführen und können dann die Schaltfläche unten rechts nutzen, um den Fehler im Assistenzsystem und auf dem Smarten Handwerkzeug zu beheben. Um zusätzliche Informationen zu erhalten, können die Werker außerdem ein weiteres Fenster öffnen, das detaillierte Informationen zu den Daten auf den Aufsätzen und den Werkzeugen des zugeordneten Arbeitsplatzes bereitstellt.

5.4 Integration der Teilsysteme in der Softwareplattform

Um die Funktionen der Digitalen Assistenzsysteme in Verbindung mit den Smarten Handwerkzeugen zu ermöglichen, müssen die Teilsysteme funktionsgerecht in der Softwareplattform integriert werden. Dazu wird dazu das in Unterabschnitt 5.2.1 definierte Integrationsvorgehen genutzt. Unterabschnitt 5.4.1 definiert die Schnittstellen, Brücken und Eventverteilung (*datenorientierte Integration*). Unterabschnitt 5.4.2 definiert zentrale Datenmodelle, die für die Funktionen benötigt werden (*modellorientierte Integration*). Unterabschnitt 5.4.3 entwickelt die notwendigen Services, um die qualitätssteigernden Zielfunktionen zu ermöglichen (*funktionsorientierte Integration*). Unterabschnitt 5.4.4 beschreibt abschließend *analyseorientierte Integration*.

5.4.1 Datenorientierte Integration

Ziel der datenorientierten Integration ist es, einen Protokoll-Stack aus Netzwerkprotokollen zu definieren und implementieren, der es ermöglicht, die für die Zielfunktionen notwendigen Datenpakete anforderungsgerecht zu übertragen. Die Netzwerkprotokolle der physikalischen Schicht und der Sicherungsschicht geben die Übertragungstechnologie im Anwendungsszenario vor. Die Smarten Handwerkzeuge nutzen Bluetooth, um mit einem lokalen Mikrocomputer zu kommunizieren, der wiederum über WLAN mit der Softwareplattform kommunizieren kann. Das Positionserkennungssystem nutzt neben den Ultraschall-Signalen eine LAN-Verbindung zwischen Empfänger und Mikrocomputer und überträgt die Datenpakete anschließend ebenfalls über LAN

an die Softwareplattform. Die Digitalen Assistenzsysteme können als Web-Applikationen entweder am stationären Computer oder über ein Tablet aufgerufen werden und nutzen dazu eine LAN- oder WLAN-Verbindung.

Grundsätzlich ist der Fokus auf die WLAN-Übertragung für Smarte Handwerkzeuge und Tablets sinnvoll, weil die Technologie mit einem flächendeckenden Netzwerkausbau hohe Übertragungsgeschwindigkeiten erreicht und in den meisten Fertigungen bereits vorhanden ist. Als Alternative bietet sich der Mobilfunkstandard 5G an, der ähnliche Übertragungsgeschwindigkeiten erreicht, aber eine bessere Durchdringungsfähigkeit aufweist, die für die Arbeit in Flugzeugsektionen sinnvoll sein könnte [Rost23, S. 112f.].

Schnittstellen

Um den Protokoll-Stack zu vervollständigen, müssen die Netzwerkprotokolle der Anwendungsschicht definiert und als Schnittstellen auf der Softwareplattform implementiert werden. Dafür ist es sinnvoll, die Datenströme zwischen den Smarten Handwerkzeugen und den Digitalen Assistenzsystemen systematisch zu betrachten und in Gruppen mit ähnlichen Anforderungen an die Übertragung aufzuteilen. Anschließend kann der Nutzen der Netzwerkprotokolle für die Gruppen bewertet werden, um eine sinnvolle Auswahl zu treffen.

Für die beschriebenen Funktionen der Smarten Handwerkzeuge und die interaktive Informationsbereitstellung der Digitalen Assistenzsysteme ergeben sich zwei Gruppen von Datenströmen:

- **Kontrolle der Prozessparameter und Werkzeugposition zur Freigabe des Werkzeugs:** Die Übertragung der *Positionsdaten*, der *Prozessparameter* und der *Werkzeugfreigabe* muss mit hinreichend niedriger Latenz erfolgen, um einen reibungslosen Montageablauf zu ermöglichen und die Nutzerakzeptanz zu erhöhen (vgl. Anforderung N2). Die Sicherheit der Datenübertragung ist zweitrangig, weil die Inhalte der Datenpakete nicht dokumentationsrelevant sind.
- **Kontrolle des Werkzeugzustands und Analyse der Rückmeldedaten:** Die Übertragung der *Maschinendaten*, der *Fehlerdaten* und der *Rückmeldedaten* muss sicher erfolgen. Die Latenz der Datenübertragung ist zweitrangig, weil die Werker nicht unmittelbar vor einer Werkzeugoperation auf die Datenübertragung warten müssen.

Die Netzwerkprotokolle der Anwendungsschicht können nach der Größe der Datenpakete, dem Mechanismus der Datenübertragung (gekoppelt über direkte Verbindung oder entkoppelt über einen Nachrichtenvermittler) und möglichen Sicherheitsmechanismen unterschieden werden [Firo20, S. 144ff.]. Die Netzwerkprotokolle wurden in der Regel für einen bestimmten Anwendungsfall entwickelt und optimiert, da ihre Eigenschaften verschiedenen Zielkonflikten unterliegen. Bspw. führen die Mechanismen zur Sicherung der Datenübertragung in der Regel zu größeren Datenpaketen mit Zusatzinformationen, die wiederum die Latenz der Übertragung erhöhen. Je nach Anforderungen der Datenstromgruppen kann ein geeignetes Netzwerkprotokoll implementiert werden.

Latenzkritische Datenströme Um die Kontrolle der Prozessparameter und Werkzeugposition und die Freigabe des Werkzeugs möglichst latenzarm zu gestalten, nutzt die Softwareplattform das MQTT-Protokoll (Message Queuing Telemetry Transport). MQTT nutzt das Publish-Subscribe-Verfahren, bei dem die Sender (Publisher) und die Empfänger (Subscriber) entkoppelt sind und über einen Nachrichtenvermittler (Broker) miteinander kommunizieren. Dadurch werden die Datenpakete unabhängig von Sender und Empfänger übermittelt und verarbeitet. In Verbindung mit einer sehr geringen Größe der Datenpakete (2 Bytes plus die Größe des Nachrichteninhalts) ermöglicht das Protokoll je nach Anwendungsszenario und Netzwerk minimale Latenzen bis zu 20 Millisekunden [Firo20, S. 150ff.], [Bend21, S. 4]. MQTT kann weiterhin je nach Datenstrom gewährleisten, dass die Nachrichten beim Empfänger mindestens einmal oder genau einmal angekommen sind [Firo20, S. 151]. Das ermöglicht es, wichtige Datenpakete, wie die Freigabe des Smarten Handwerkszeugs, zuverlässig zu übertragen.

Mögliche Alternativen sind das AMQP-Protokoll (Advanced Message Queuing Protocol) oder das CoAP-Protokoll (Constrained Application Protocol). AMQP wurde für traditionelle Computer entwickelt, während MQTT für Endgeräte mit limitierten Ressourcen, wie Sensoren oder Mikrocomputer, entwickelt wurde [Firo20, S. 153]. MQTT ist dementsprechend besser für Umgebungen mit verteilten Sensoren und Aktoren geeignet [Luzu15, S. 7]. CoAP wurde hingegen ebenfalls für Endgeräte mit limitierten Ressourcen entwickelt, ist aber insbesondere bei hochfrequentem Datenaustausch unzuverlässiger als MQTT [Firo20, S. 153], [Caro13, S. 7].

Sicherheitskritische Datenströme Für die Kontrolle des Werkzeugzustands und die Analyse der Rückmeldedaten wird das OPC-UA-Protokoll (Open Platform Communications Unified Architecture) genutzt. OPC-UA wurde für die Kommunikation zwischen Maschinen in industriellen Umgebungen entwickelt und standardisiert dazu Datenmodelle, um neue Maschinen aufwandsarm in bestehende Netzwerke hinzuzufügen [Firo20, S. 158ff.]. Weiterhin definiert OPC-UA ein Sicherheitsmodell, das die Authentifizierung, Autorisierung, Verschlüsselung und Zuverlässigkeit von Datenverbindungen zwischen Client und Server standardisiert. Erst nach der Erfüllung dieser Anforderungen für eine Verbindung zwischen Client und Server werden Daten ausgetauscht. Das Protokoll ist in der Industrie entsprechend der ausgeprägten Sicherheitsmechanismen und der standardisierten Datenmodelle weit verbreitet [Müh20, S. 262ff.].

Umsetzung auf der Softwareplattform Sowohl für MQTT als auch für OPC-UA ist jeweils ein Softwaremodul auf der Softwareplattform angelegt, das eine gesicherte Schnittstelle für die Teilsysteme bereitstellt. Die Smarten Handwerkszeuge und das Positionserkennungssystem können mit der korrekten Adresse und dem entsprechenden Zertifikat eine Verbindung zum MQTT-Broker aufbauen. Sobald die Verbindung besteht, baut die OPC-UA-Schnittstelle eine Verbindung zum OPC-UA-Server der über MQTT verbundenen Werkzeuge auf. Um die Datenpakete bis zu den Digitalen Assistenzsystemen weiterzuleiten, nutzt die Schnittstelle zwischen der Web-Applikation und dem Server der Assistenzsysteme zusätzlich eine WebSocket-Verbindung, die Daten mit ähnlich niedrigen Latenzen wie MQTT weiterleiten kann [Silv18, S. 1237].

Eventverteilung

Als zentrale Eventverteilung nutzt die Softwareplattform Apache Kafka, ein System, das spezifisch für die Übertragung großer Datenmengen zwischen Softwaremodulen in stabilen Plattformumgebungen entwickelt wurde [Firo20, S. 184]. Im Vergleich zu MQTT erreicht Apache Kafka sogar noch geringere Latenzen, ist aber nicht für die Verbindung von einer Vielzahl von Geräten in Umgebungen mit limitiertem Empfang gemacht [Ho24, S. 322ff.]. Stattdessen kann es gut für die Skalierung von Datenmengen für bestehende Services genutzt werden [Lian23, S. 10]. Die Softwareplattform nutzt Apache Kafka daher als Schnittstelle zu den Services, zum Server der Web-Applikationen und zur Zeitreihen-Datenbank (vgl. Abbildung 5.7).

Brücken

Damit die Datenpakete über die zentrale Eventverteilung empfangen und verarbeitet werden können, müssen sie von den Netzwerkprotokollen der Anwendungsschicht zu Apache Kafka übertragen werden. Als Brücken dienen Softwaremodule, die jeweils eine Verbindung zur Schnittstelle der Netzwerkprotokolle und zur Schnittstelle der Eventverteilung aufbauen. Sie empfangen die Datenpakete der Smarten Handwerkzeuge und formatieren sie in ein Format, das von Apache Kafka verstanden wird. Genauso können die Datenpakete der Services von den Brücken empfangen und in das Format der Schnittstellenprotokolle überführt werden.

Skalierbarkeit

Die datenorientierte Integration ermöglicht es, die Datenströme entsprechend ihrer Anforderungen in die Softwareplattform zu integrieren. Sie ermöglicht außerdem die Skalierung des Gesamtsystems (vgl. Anforderung N4). Wenn neue Technologien in der Softwareplattform integriert werden müssen, kann auf bestehende Schnittstellen zurückgegriffen werden, oder eine neue Schnittstelle mit Brücke zur Eventverteilung hinzugefügt werden. Einerseits kann so die Anzahl an Verbindungen und die Menge an Datenpaketen skaliert werden und andererseits können neue Services hinzugefügt werden, um neue Funktionen und Synergien zu ermöglichen.

5.4.2 Modellorientierte Integration

Ziel der modellorientierten Integration ist es, strukturierte Datenmodelle zu definieren und zu speichern, die für die Funktionen der Integration von Smarten Handwerkzeugen und Digitalen Assistenzsystemen benötigt werden. Die zentrale Definition ermöglicht es, die Daten sinnvoll durch Services und Werkzeuge zu verarbeiten und in den Assistenzsystemen zu visualisieren. Für die grundlegenden Funktionen der Web-Applikationen ist bereits eine dokumentenbasierte Datenbank auf der Softwareplattform integriert. Die Datenmodelle können also auf dem Server der Web-Applikationen hinterlegt und verwaltet werden. Für die Funktionen des Gesamtsystems sind sowohl Datenmodelle für die *Smarten Handwerkzeuge* und die *Smarten Werkzeugaufsätze* als auch für die *Werkzeugprogramme und -operationen* und die *Rückmeldedaten* zu definieren.

Datenmodelle: Smartes Handwerkzeug und Smarter Werkzeugaufsatz

Die Datenmodelle *Smartes Handwerkzeug* und *Smarter Werkzeugaufsatz* werden getrennt konzipiert. Sie entstehen zum Großteil aus den auf den Werkzeugen gespeicherten und kommunizierbaren Daten und werden um Elemente erweitert, die für Funktionen des Gesamtsystems oder für die Konsolidierung der Daten benötigt werden. Abbildung 5.26 stellt die beiden Datenmodelle und ihre Verknüpfung vereinfacht dar (Darstellung angelehnt an [Rost23, S. 106]).

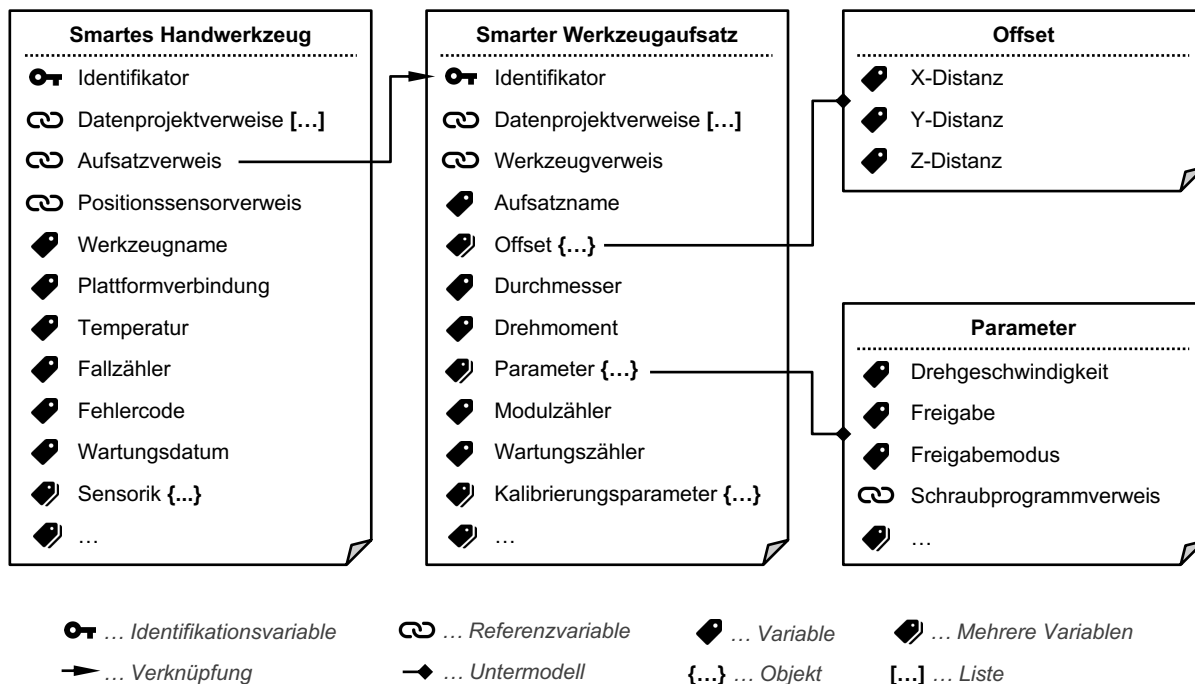


Abbildung 5.26: Datenmodelle Smartes Handwerkzeug und Smarter Werkzeugaufsatz

Sowohl ein Smartes Handwerkzeug als auch ein Smarter Werkzeugaufsatz können mehreren Aufträgen und somit mehreren Datenprojekten zugeordnet werden, weshalb sie eine Liste von *Datenprojektverweisen* erhalten. Ebenso können die Datenmodelle einander zugewiesen werden. In der Regel nutzt das Smarte Handwerkzeug einen *Aufsatzverweis*, der den *Identifikator* des Smarten Werkzeugaufsatzes beinhaltet. Der Smarte Werkzeugaufsatz erhält analog den Identifikator des Handwerkszeugs als *Werkzeugverweis*.

Die Verknüpfung der Datenmodelle ermöglicht es, den aktuellen Zustand des gerüsteten Werkzeugs darzustellen und automatische Anpassungen für die Softwareservices vorzunehmen. So kann der *Positionssensorverweis* in Kombination mit den *X-, Y- und Z-Distanzen* des *Offsets* genutzt werden, um die Positionserkennung automatisch anzupassen. Weiterhin können der *Modulzähler* und *Wartungszähler* genutzt werden, um einen *Fehlercode* auf dem Werkzeug zu erzeugen. Die Variablen *Temperatur*, *Fallzähler* und *Wartungsdatum* werden ebenfalls genutzt, um Fehlercodes zu erzeugen.

Besonders wichtig ist, dass das Handwerkzeug die *Freigabe* (frei oder gesperrt), die *Drehgeschwindigkeit* und das *Drehmoment* der Werkzeugaufsätze ausliest und einstellt. Der *Durchmesser* und das *Drehmoment* sind vom *Parameter*-Objekt separat gelistet, weil sie in der Regel im Voraus beschrieben und kalibriert werden (*Kalibrierungsparameter*). Die weiteren Parameter

können hingegen von der Softwareplattform empfangen und überschrieben werden. Der *Freigabemodus* ermöglicht es, das Smarte Handwerkzeug für eine feste Anzahl von Werkzeugoperationen freizugeben und der *Schraubprogrammverweis* ermöglicht die smarte Drehmomentsteuerung mit im Voraus angelegten Schraubprogrammen.

Die weiteren Variablen, wie der *Werkzeugname*, der *Aufsatzname*, die *Plattformverbindung*, eingebaute *Sensorik* und weitere der ausgeblendeten Variablen, sind seitens des Herstellers auf die Datenträgern der Werkzeuge und Aufsätze geschrieben und können genutzt werden, um Informationen in den Digitalen Assistenzsystemen darzustellen.

Datenmodell: Werkzeugprogramm und -operation

Das Datenmodell für die *Werkzeugprogramme* und *-operationen* ist so aufgebaut, dass ein *Werkzeugprogramm* eine Vielzahl von *Werkzeugoperationen* umfassen kann. Abbildung 5.27 zeigt das Datenmodell und die Untermodelle und verdeutlicht die Zuordnung zu den Arbeitsschritten.

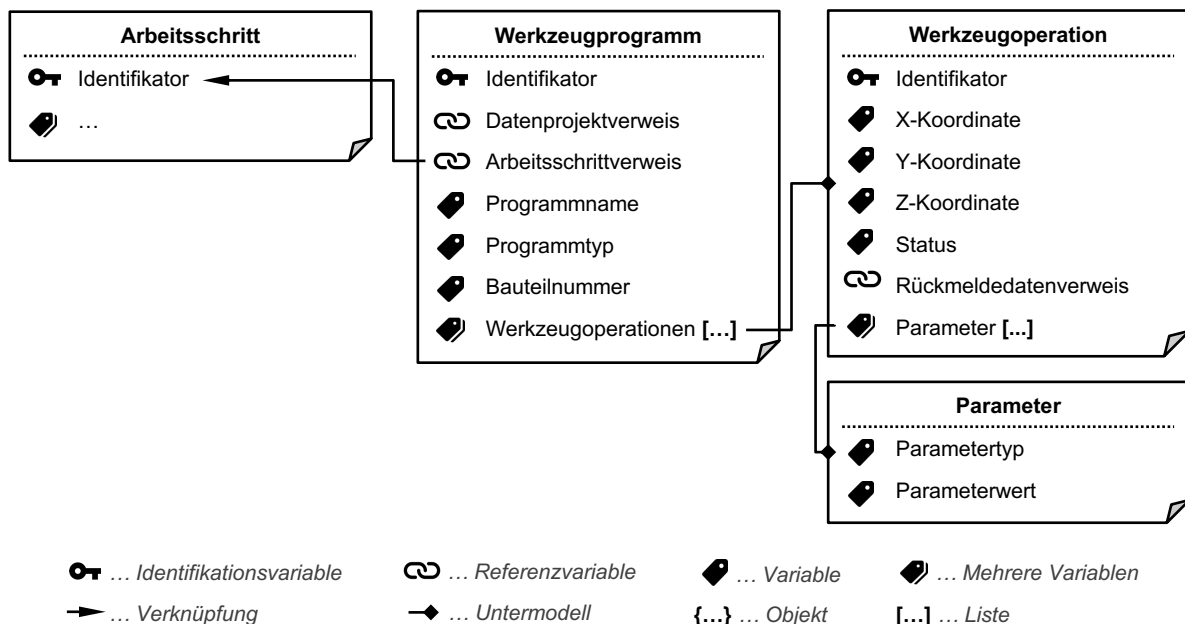


Abbildung 5.27: Datenmodell Werkzeugprogramm und -operation

Das Werkzeugprogramm verweist mit einem *Arbeitsschrittverweis* auf den werkzeugabhängigen Arbeitsschritt, dem es zugeordnet ist, und mit dem *Datenprojektverweis* auf das Datenprojekt, in dem es erzeugt wurde. Weiterhin beinhaltet es einen *Programmnamen*, einen *Programmtyp* und eine *Bauteilnummer*, die für die teilautomatisierte Zuordnung zu den Arbeitsschritten verwendet werden kann (vgl. Unterabschnitt 5.3.2).

Das Werkzeugprogramm gibt damit einen Rahmen für die Liste von Werkzeugoperationen, die jeweils durch eine *X-, Y- und Z-Koordinate*, einen *Status* und eine Liste von *Parametern* beschrieben werden. Der Status spiegelt den Bearbeitungszustand und die Qualität der Werkzeugoperation wider und kann dazu die Zustände „zu erledigen“, „nicht in Ordnung“ oder „in Ordnung“ einnehmen. Der Status ist abhängig von den zugeordneten Rückmeldedaten, weshalb diese über einen *Rückmeldedatenverweis* im Datenmodell integriert sind.

Eine Werkzeugoperation kann verschiedene *Parameter* erfordern, weshalb diese als Liste von *Parametertypen* und *Parameterwerten* angelegt sind. Die generischen Schlüssel-Wert-Paare ermöglichen eine beliebige Erweiterung des Datenmodells um weitere Parameter, wie bspw. dem Bohrwinkel oder relevanten smarten Schraubprogrammen. Über den Programmtyp kann die Parameterliste dazu aufwandsarm vorgefiltert werden.

Datenmodell: Rückmeldedaten

Das Datenmodell der *Rückmeldedaten* beinhaltet neben den aufgenommenen und übertragenen Strom- und Drehmoment-Zeit-Verläufen ebenfalls einige Referenzvariablen und Variablen, die für die Auswertung und Dokumentation der Datenpakete im Digitalen Assistenzsystem benötigt werden. Abbildung 5.28 verdeutlicht das Datenmodell.

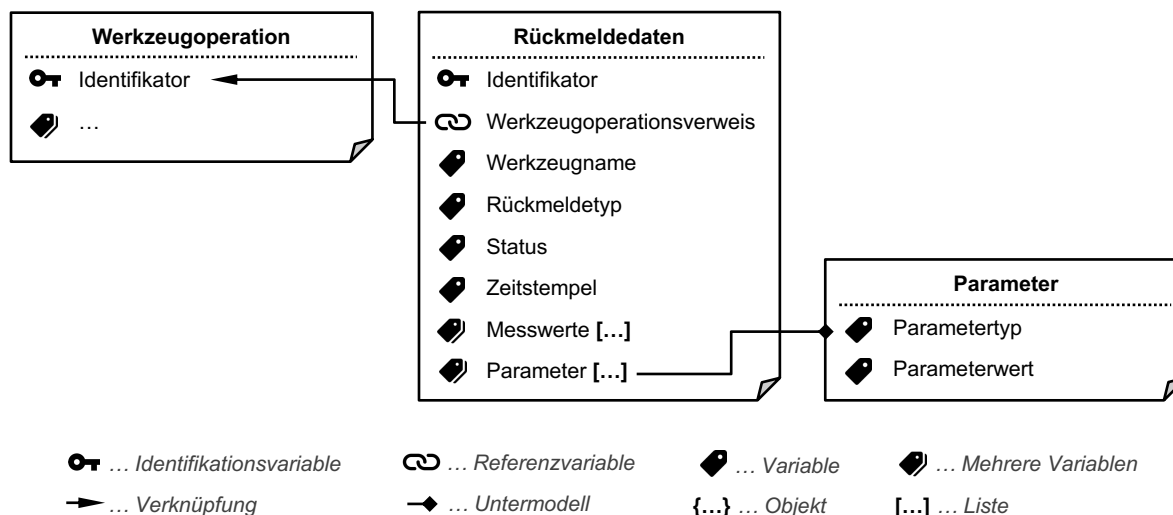


Abbildung 5.28: Datenmodell Rückmeldedaten

Jedes Rückmeldedatenpaket erhält einen *Identifikator* und referenziert über den *Werkzeugoperationsverweis* die zugeordnete Werkzeugoperation. Die Seriennummer des genutzten Werkzeugs wird als *Werkzeugname* gespeichert und der *Rückmeldetyp* gibt an, ob die Rückmeldedaten eine Bohr- oder Schrauboperation betreffen. Je nach Rückmeldetyp werden die *Messwerte*, die als Liste numerischer Werte mit variabler Länge übermittelt werden, von den Digitalen Assistenzsystemen interpretiert und mit Einheiten und Messfrequenzen erweitert, um die Daten sinnvoll darzustellen.

Analog zur generischen Liste von *Parametern* im Datenmodell der Werkzeugoperationen beinhaltet jedes Datenpaket der Rückmeldedaten eine Liste der tatsächlich verwendeten Parameter. Diese können mit den Parametern der referenzierten Werkzeugoperation verglichen werden, um die Plausibilität der Qualitätsbewertung zu überprüfen. Dementsprechend kann der *Status* entweder „nicht in Ordnung“ oder „in Ordnung“ sein. Abschließend beinhaltet jedes bewertete Rückmeldedatenpaket auch einen *Zeitstempel*, der angibt, wann die Daten erzeugt wurden. In Kombination mit dem Datenmodell der Werkzeugoperationen können alle durchgeführten Eingriffe der Werkzeuge entsprechend der Anforderungen im Flugzeugbau dokumentiert werden.

5.4.3 Funktionsorientierte Integration

Ziel der funktionsorientierten Integration ist es, Services zu entwickeln, die auf die zuvor integrierten Datenströme und definierten Datenmodelle reagieren, um die Zielfunktionen der Smarten Handwerkzeuge und Digitalen Assistenzsysteme zu ermöglichen. Um den Anforderungen der Prozessanalyse zu genügen (vgl. Abschnitt 3.3) und die Prozessqualität der manuellen Montage zu steigern (vgl. Anforderung **P4**), müssen die Services falsche *Prozessparameter*, fehlerhafte *Durchführungen* der Werkzeugoperationen und mangelhafte *Werkzeugzustände* als Fehlerursachen kontrollieren. Dazu stellt die Softwareplattform jeweils einen Service bereit, der mit der zentralen Eventverteilung verknüpft ist und somit mit allen Teilsystemen interagieren kann.

Service: Parametereinstellung und Werkzeugfreigabe

Der Service *Parametereinstellung und Werkzeugfreigabe* ermöglicht es, die fest beschriebenen Prozessparameter, wie den Durchmesser oder das Drehmoment des ausgerüsteten Aufsatzes, in Abhängigkeit des aktuellen Arbeitsfortschritts und der aktuellen Werkzeugposition zu überprüfen. Der Service gibt das Werkzeug nur frei, wenn die Parametereinstellung korrekt ist. Zusätzlich stellt er Soll-Prozessparameter wie die Drehgeschwindigkeit automatisch auf dem Werkzeug ein.

Der Service muss den aktuellen Produktionskontext verarbeiten, um die notwendigen Prozessparameter zu ermitteln und die Werkzeugfreigabe und weitere Parameter übertragen zu können. Über den ausgewählten Arbeitsschritt im Digitalen Assistenzsystem der Montage werden die aktuell zu bearbeitenden Werkzeugoperationen ermittelt und im Visualisierungsbereich dargestellt.

Um die Parametereinstellung und Werkzeugfreigabe zu ermöglichen, muss das System zusätzlich ermitteln, welche der Operationen der Werker aktuell bearbeiten möchte. Dazu kann der Service die Datenpakete des Positionssensors verarbeiten, um die aktuelle Position der Werkzeugspitze mit den Koordinaten der visualisierten Werkzeugoperationen zu vergleichen (**positionsgesteuerter Modus**). Alternativ kann der Service ein Datenpaket vom Digitalen Montageassistenzsystem empfangen, das die aktuell zu bearbeitende Werkzeugoperation beinhaltet (**applikationsgesteuerter Modus**), die das Assistenzsystem den Werkern vorgibt. Beide Betriebsmodi stoßen den weiteren Prozess an, sobald eine Werkzeugoperation identifiziert wurde. Der positionsgesteuerte Modus stellt im Wesentlichen die geplante technische Lösung für das Teilproblem der Positionsbestimmung in Bezug auf das CAD-Modell dar, wohingegen der applikationsgesteuerte Modus eine technologisch unabhängige Herangehensweise bietet.

Positionsgesteuerter Modus Im *positionsgesteuerten Modus* empfängt der Service die Koordinaten der Werkzeugspitze vom Smarten Handwerkzeug mit einer Frequenz von 8 Hz und muss diese mit den Koordinaten der zu erledigenden Werkzeugoperationen im Werkzeugprogramm abgleichen. Der Service beachtet die Messunsicherheit der Ultraschall-Positionserkennung und die minimalen Nietabstände eines Flugzeugs, um einen Toleranzbereich für die Koordinaten der Werkzeugoperationen zu bilden. Die Koordinaten der Werkzeugspitze müssen sich im Toleranzbereich befinden, damit der Service die aktuell durchzuführende Werkzeugoperation identifizieren

kann. Zusätzlich nutzt der positionsgesteuerte Modus verschiedene Mechanismen, um die Genauigkeit und Stabilität der Zuordnung zu verbessern.

Abbildung 5.29 verdeutlicht die Verarbeitung der Positionsdaten im positionsgesteuerten Modus.

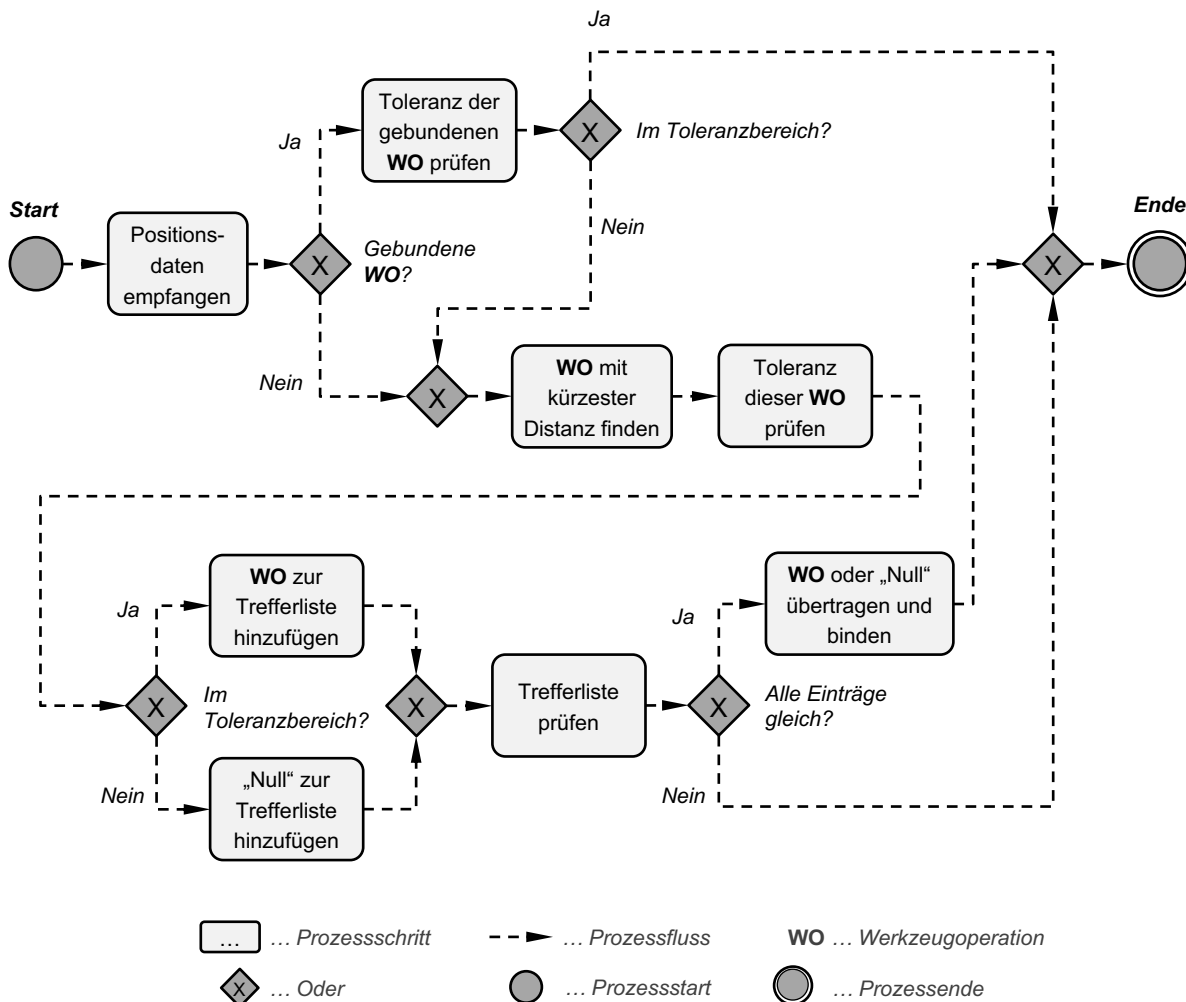


Abbildung 5.29: Verarbeitung der Positionsdaten im positionsgesteuerten Modus

Wenn der Service eine Werkzeugoperation identifiziert, *bindet* er diese solange, bis eine neue Werkzeugoperation identifiziert wird oder sich die Positionsdaten außerhalb der Werkzeugoperationen befinden. Der Service überprüft für jedes Positionsdatenpaket zuerst, ob es bereits eine *gebundene Werkzeugoperation* gibt, die vom Service weiter verarbeitet wird, um zu vermeiden, dass diese wiederholt übertragen wird. Wenn es eine gebundene Werkzeugoperation gibt und sich die Positionsdaten in ihrem Toleranzbereich befinden, wird die Verarbeitung abgebrochen.

Gibt es keine gebundene Werkzeugoperation oder befinden sich die Positionsdaten außerhalb ihres Toleranzbereichs, werden die Daten weiter verarbeitet. Der Service überprüft zuerst, welche Werkzeugoperation die kürzeste Distanz zu den Positionsdaten hat und anschließend, ob sich die Positionsdaten im Toleranzbereich dieser Werkzeugoperation befinden. Dieses Vorgehen ermöglicht es, die Toleranzbereiche der Werkzeugoperationen zu vergrößern, ohne dass doppelte Zuordnungen entstehen weil sich diese Bereiche überlappen.

Befinden sich die Positionsdaten im Toleranzbereich der Werkzeugoperation mit der kürzesten Distanz, fügt der Service diese als Eintrag in die *Trefferliste* hinzu. Andernfalls fügt der Service den Eintrag „Null“ hinzu.

Die Trefferliste beinhaltet die letzten sechs Ergebnisse des Positionsabgleichs. Eine Werkzeugoperation wird erst gebunden und ihre Prozessparameter übertragen, wenn alle sechs Einträge gleich sind. Diese Logik vermeidet es, einzelne Ausreißer zu bewerten und stabilisiert dadurch das Identifizieren der Werkzeugoperationen. Die notwendige Länge der Trefferliste kann variiert werden. In internen Tests stellten sich vier Einträge als zu instabil und acht Einträge als zu langsam heraus. Vor dem Hintergrund der latenzkritischen Datenströme, sollte die Länge so kurz wie möglich gehalten werden.

Applikationsgesteuerter Modus Im *applikationsgesteuerten Modus* bestimmt das Digitale Assistenzsystem der Montage die Reihenfolge, in der das aktuelle Werkzeugprogramm bearbeitet wird, und identifiziert damit die nächste zu bearbeitende Werkzeugoperation. Die Reihenfolge kann über Reihenfolgebildungsverfahren beeinflusst werden, um bestimmte Zielgrößen zu verbessern. Bspw. kann eine Reihenfolgeregel die Anzahl der Werkzeugwechsel reduzieren, um zuerst alle Werkzeugoperationen zu bearbeiten, die mit dem aktuell gerüsteten Werkzeugaufsatzes möglich sind. Alternativ können die Werkzeugoperationen der Reihe nach bearbeitet werden, was der natürlichen Arbeitsweise der Werker entspricht, wenn sie bspw. eine Längsnaht im Flugzeug fügen. Abbildung 5.30 verdeutlicht, wie der applikationsgesteuerte Modus die Reihenfolge bildet und die nächste Werkzeugoperation identifiziert.

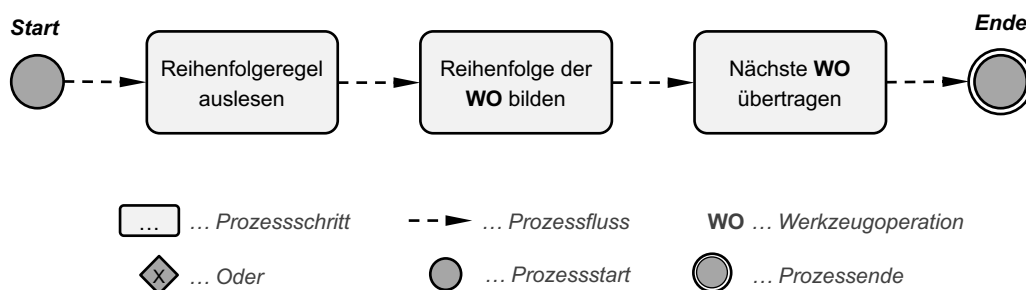


Abbildung 5.30: Wahl der Werkzeugoperation im applikationsgesteuerten Modus

Die Reihenfolgeregeln müssen im Voraus angelegt sein und können bspw. für bestimmte Anwendungsfälle vorbestimmt werden oder über das Digitale Assistenzsystem der Montage ausgewählt werden. Wenn das Digitale Assistenzsystem die Reihenfolgeregel *ausliest*, *bildet* es die entsprechende *Reihenfolge* aus den Werkzeugoperationen des aktuellen Werkzeugprogramms und *überträgt* anschließend die nächste zu erledigende Werkzeugoperation an den Service.

Abbildung 5.31 verdeutlicht die Logik des Gesamtservices *Parametereinstellung und Werkzeugfreigabe* und die Interaktionen mit den Teilsystemen. Der Prozess startet mit der Betätigung der Check- bzw. Starten-Schaltfläche im Digitalen Assistenzsystem (vgl. Abbildung 5.21). Je nach festgelegtem Betriebsmodus startet der Service im applikationsgesteuerten Modus oder positionsgesteuerten Modus, um eine Werkzeugoperation für den Vergleich der Parameter zu identifizieren. Das Digitale Assistenzsystem ermöglicht es, den Modus im Betrieb anzupassen.

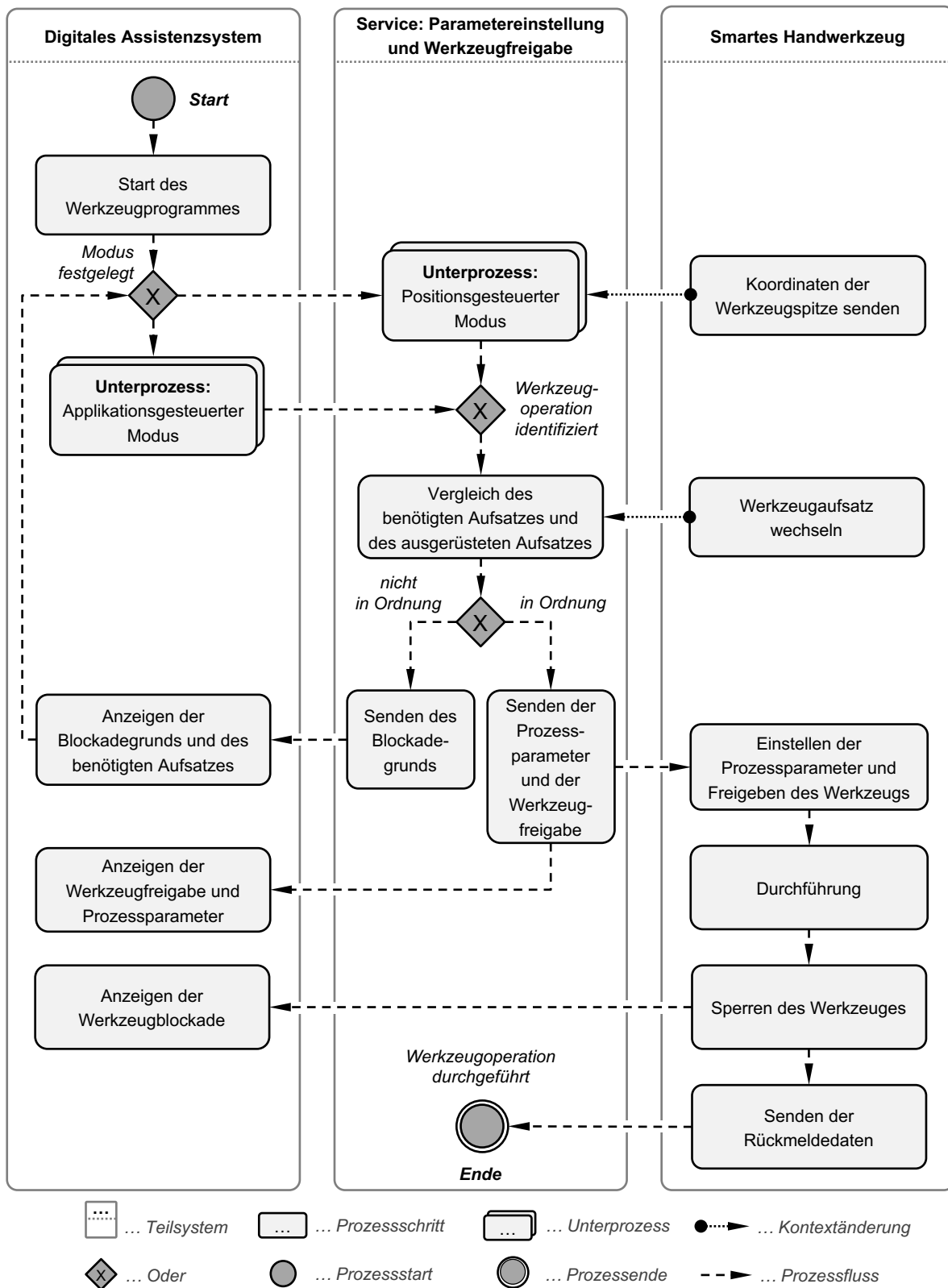


Abbildung 5.31: Service: Parametereinstellung und Werkzeugfreigabe

Ist die Werkzeugoperation identifiziert, vergleicht der Service den benötigten Aufsatz der Werkzeugoperation mit dem ausgerüsteten Aufsatz. Im Detail bedeutet das, dass er entweder den in der Werkzeugoperation hinterlegten Durchmesser einer Bohrung oder das hinterlegte Drehmoment einer Verschraubung mit der Einstellung des Werkzeugaufsatzes vergleicht. Diese Parameter werden im Voraus auf den Werkzeugaufsätzen gespeichert und können nicht im Betrieb angepasst

werden (*harte Kriterien*). Wenn der Werkzeugaufsatz also für die aktuelle Werkzeugoperation *nicht in Ordnung* ist, sendet der Service den Grund für die Blockade an das Digitale Assistenzsystem der Montage, welches den Werkern den benötigten Werkzeugaufsatz anzeigt.

Dementsprechend kann der Vergleich nur über eine *Kontextänderung* beeinflusst werden. Dazu kann das Werkzeug die *Koordinaten der Werkzeugspitze senden*, wodurch das Smarte Handwerkzeug im positionsgesteuerten Modus an eine andere Werkzeugoperation angesetzt werden kann, um einen erneuten Vergleich mit dem gerüsteten Werkzeugaufsatz zu starten. Alternativ kann ein Werker den *Werkzeugaufsatz wechseln*, um einen neuen Vergleich zu starten.

Ist der Vergleich der harten Kriterien *in Ordnung*, sendet der Service die weiteren Prozessparameter (*weiche Kriterien*) inklusive der Werkzeugfreigabe an das Smarte Handwerkzeug und das Digitale Assistenzsystem. Das Werkzeug stellt die Prozessparameter, wie bspw. die Drehgeschwindigkeit, ein und wird freigegeben. Sowohl das Assistenzsystem als auch der Bildschirm des Smarten Handwerkzeugs zeigen die Werkzeugfreigabe und die eingestellten Prozessparameter an. Sobald das Werkzeug den Eingriff durchgeführt hat, wird dieses wieder gesperrt und das Digitale Assistenzsystem zeigt die Werkzeugblockade an. Abschließend sendet das Werkzeug die Rückmeldedaten des Eingriffs an die Softwareplattform. Damit endet der dargestellte Zyklus des Services und der Service *Rückmeldedatenanalyse und -dokumentation* verarbeitet die Rückmeldedaten. Nachdem diese verarbeitet und dokumentiert sind, startet das Digitale Assistenzsystem automatisch einen neuen Zyklus der *Parametereinstellung und Werkzeugfreigabe* mit dem aktualisierten Werkzeugprogramm.

Service: Rückmeldedatenanalyse und -dokumentation

Auch wenn die korrekten Prozessparameter eingehalten werden und der einwandfreie Zustand des Smarten Handwerkzeugs und des ausgerüsteten Werkzeugaufsatzes gewährleistet ist, können noch Fehler in der Durchführung der Werkzeugoperationen entstehen. Diese können in manuellen Prozessen mit den sensorischen und aktorischen Komponenten der entwickelten Smarten Handwerkzeuge nicht kontrolliert werden. Allerdings können die Rückmeldedaten der Werkzeuge untersucht werden, um Fehler schnell aufzudecken und somit hohe Fehlerkosten zu vermeiden, die bspw. beim Erkennen der Fehler in der Endprüfung entstehen. Weiterhin können direkte Rückmeldungen die Kompetenz der verantwortlichen Werker langfristig steigern und resultierende Fehler können anforderungsgerecht dokumentiert werden. Der Service *Rückmeldedatenanalyse und -dokumentation* untersucht dazu die Rückmeldedaten der Werkzeugoperationen, bewertet sie und stellt das Ergebnis über die Digitalen Assistenzsysteme bereit.

Sobald eine Werkzeugoperation vom Smarten Handwerkzeug durchgeführt wurde, sendet es ein Datenpaket mit den Rückmeldedaten an die Softwareplattform, wo es vom Service analysiert und bewertet wird. Der Service bewertet die durchgeführte Werkzeugoperation, dokumentiert die Ergebnisse und die Rohdaten in der Datenbank (vgl. Abbildung 5.28) und aktualisiert die angezeigten Informationen in den Digitalen Assistenzsystemen. Abbildung 5.32 verdeutlicht den Prozess des Services *Rückmeldedatenanalyse und -dokumentation* und dessen Interaktionen mit den Teilsystemen.

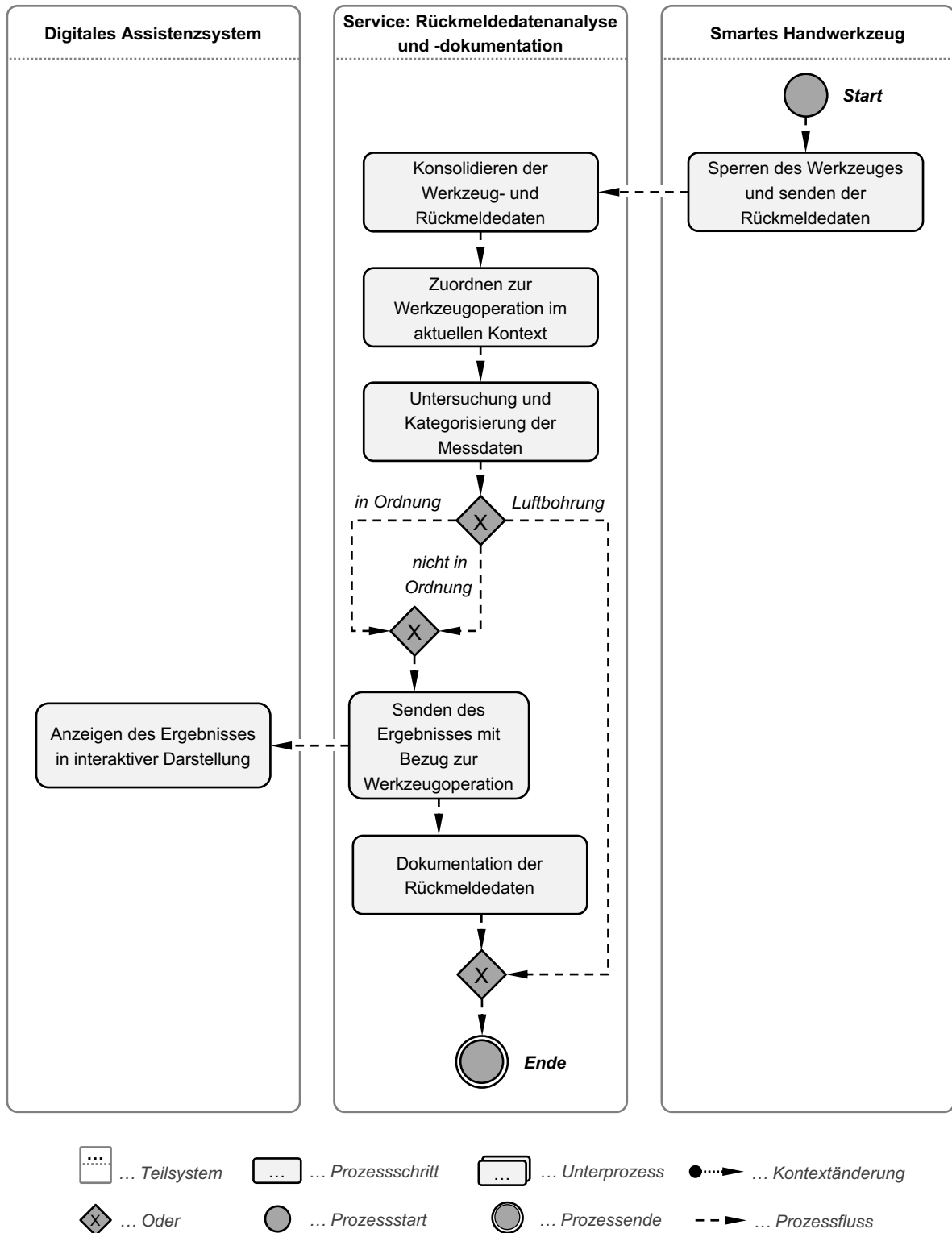


Abbildung 5.32: Service: Rückmeldedatenanalyse und -dokumentation

Der Service konsolidiert die Rückmeldedaten mit den auf dem Smarten Handwerkzeug eingestellten Prozessparametern und ordnet sie der Werkzeugoperation zu, die im aktuellen Kontext identifiziert wurde. Um die Messdaten zu bewerten und zu kategorisieren, bedarf es einer Datengrundlage, die eine Vielzahl von durchgeführten Werkzeugoperationen mit ihren bewerteten Rückmeldedaten enthält. Die Datengrundlage umfasst 384 durchgeführten Bohrungen mit unterschiedlichen Durchmessern, Drehgeschwindigkeiten und Kategorien. Über ein auf der Datengrundlage und

mittels künstlicher Intelligenz trainiertes Modell kategorisiert der Service die Rückmeldedaten von Bohrungen nach internen Tests mit einer durchschnittlichen Genauigkeit von 93,5 % als „in Ordnung“, „nicht in Ordnung“ oder „Luftbohrung“. Die Rückmeldedaten von Schraubeingriffen untersucht das Smarte Handwerkzeug bereits auf dem verbundenen Mikrocomputer.

Nach der Kategorisierung der Messdaten sendet der Service das Ergebnis mit Bezug zur Werkzeugoperation an das Digitale Assistenzsystem, welches die Werkzeugoperationen in Echtzeit interaktiv anpasst, und dokumentiert die Rückmeldedaten in der Datenbank. Im Fall einer *Luftbohrung* endet der Prozess schon nach der Kategorisierung.

Service: Fehlererzeugung und Werkzeugblockade

Auch bei korrekten Prozessparametern muss das Gesamtsystem sicherstellen, dass das Smarte Handwerkzeug und der gerüstete Werkzeugaufsatz keine Mängel aufweisen. Der Service *Fehlererzeugung und Werkzeugblockade* vergleicht die Daten der Aufsätze und Werkzeuge bei jeder Übertragung eines Datenpakets mit bestimmten Grenzwerten, um das Werkzeug rechtzeitig für weitere Werkzeugoperationen zu blockieren. Das Digitale Assistenzsystem der Montage zeigt die Fehler an und erläutert Behebungsmaßnahmen entsprechend eines im Service hinterlegten Fehlerkatalogs. Abbildung 5.33 zeigt den Prozess des Service *Fehlererzeugung und Werkzeugblockade* und dessen Interaktionen mit den Teilsystemen.

Der Service startet, sobald die Softwareplattform ein Datenpaket des Smarten Handwerkzeugs empfängt. Das Smarte Handwerkzeug schickt die Datenpakete in Abhängigkeit verschiedener Werkzeugaktionen. Bspw. bewirkt der Wechsel eines Werkzeugaufsatzes nur die Übertragung der Aufsatzdaten, während eine Werkzeugoperation die Übertragung der Rückmeldedaten und ausgewählter Werkzeugdaten bewirkt. Beim Anschalten des Werkzeugs überträgt dieses alle Datenpakete. Der Service vergleicht die Datenpakete mit Grenzwerten eines Fehlerkatalogs, um die Fehler im System zu erzeugen. Bspw. vergleicht der Service den aktuellen Modulzähler mit dem Wartungszähler oder analog das aktuelle Datum mit dem Wartungsdatum des Werkzeugaufsatzes. Weiterhin können auffällige Rückmeldedaten, zu hohe Temperaturen oder der Fallzähler zu einem Fehler führen.

Wenn der Service einen Fehler erkennt, versendet er diesen zum Smarten Handwerkzeug, um dieses zu sperren und den Fehlercode auf diesem einzustellen. Das Werkzeug kann erst wieder genutzt werden, wenn der Fehler behoben und das Werkzeug von der Softwareplattform freigegeben wird. Eine genaue Beschreibung des Fehlers und die durchzuführende Behebungsmaßnahme sendet der Service an das Digitale Assistenzsystem der Montage. Abschließend dokumentiert der Service den Fehler in der Datenbank. Um das Werkzeug zu entsperren, müssen die Werker den Fehler beheben und dies im Digitalen Assistenzsystem abschließend bestätigen. Die Softwareplattform aktualisiert den Fehlerstatus in der Datenbank und schickt ein Datenpaket an das Werkzeug, das den Fehlercode zurücksetzt.

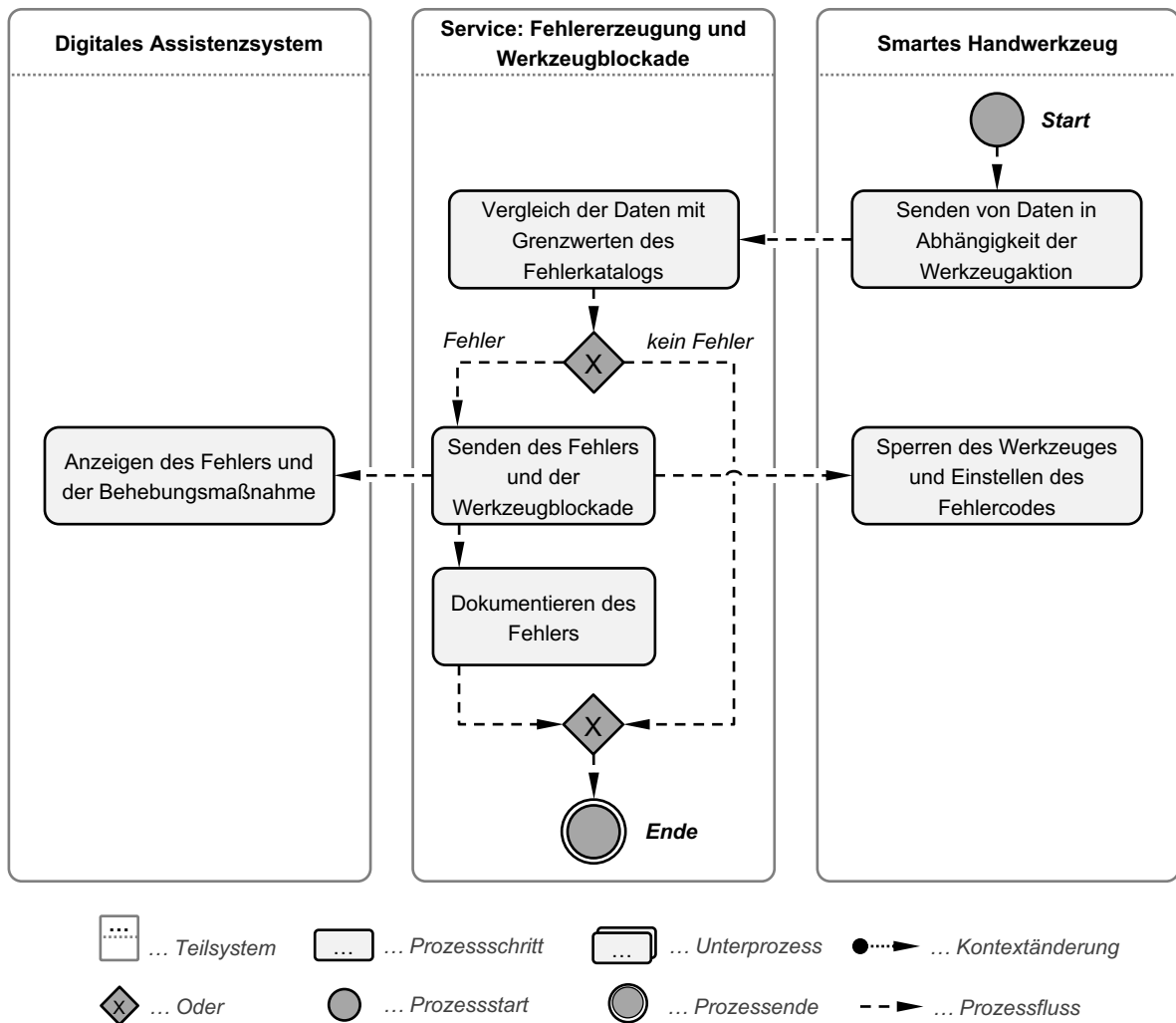


Abbildung 5.33: Service: Fehlererzeugung und Werkzeugblockade

5.4.4 Analyseorientierte Integration

Die *analyseorientierte Integration* wertet die Rückmeldedaten von Nutzern und Prozessen aus und kann langfristige Verbesserungen erzielen. Die technische Voraussetzung ist die Integration einer Zeitreihen-Datenbank, die ausgewählte Datenpakete über die zentrale Eventverteilung empfängt und aufbereitet. Für das integrierte System aus Smarten Handwerkzeugen und Digitalen Assistenzsystemen im Flugzeugbau sind in Abhängigkeit der Datenpakete verschiedene Verbesserungen denkbar. Der hohe Wiederholungsgrad im Flugzeugbau ermöglicht prinzipiell nachhaltige Anpassungen der Prozesse, was das Potenzial der Rückmeldedatenanalyse unterstreicht.

Für das integrierte Gesamtsystem sind insbesondere die folgenden Daten sinnvoll:

- die *Positionsdaten* der Smarten Handwerkzeuge,
- die *Bearbeitungszeiten* der Arbeitsschritte,
- die *Freigabezeitpunkte* der Smarten Handwerkzeuge,
- die *Bearbeitungsreihenfolge* der Werkzeugoperationen und
- der *Bearbeitungsstatus* der Werkzeugoperationen.

Die *Positionsdaten* verdeutlichen Verbesserungsmöglichkeiten für die Prozessgestaltung. In Verbindung mit der Werkzeugnummer stellen die Daten zurückgelegte Wege der Smarten Handwerkzeuge dar, um bspw. vermehrte Aufwände für die Beschaffung von Materialien oder Informationen zu verdeutlichen, die durch Unsicherheiten mit Arbeitsschritten in Verbindung stehen. Dafür können die *Bearbeitungszeiten* der Arbeitsschritte über die Betätigung der Schaltflächen im Digitalen Assistenzsystem der Montage ermittelt werden. Jede Aktion des Assistenzsystems wird dazu in der Zeitreihendatenbank mit einem Zeitstempel versehen.

Die *Bearbeitungsreihenfolge* der Werkzeugoperationen ist direkt aus den Aktualisierungen der Datenmodelle durch den Service *Rückmeldedatenanalyse und -dokumentation* ersichtlich. In Verbindung mit den *Freigabezeitpunkten* des Services *Parametereinstellung und Werkzeugfreigabe* kann die tatsächliche Durchführungszeit und damit die Produktivität ermittelt werden. Dieser Zusammenhang ermöglicht es, die Bearbeitungsreihenfolge so anzupassen, dass die Produktivität verbessert wird.

Der *Bearbeitungsstatus* der Werkzeugoperationen ermöglicht es in Verbindung mit der Bearbeitungsreihenfolge und den Zeitpunkten der Aktualisierung außerdem, die Qualität der Prozesse zu bewerten. Das ermöglicht es, die *Bearbeitungsreihenfolge* so anzupassen, dass die Prozessfehler reduziert werden. Die physiologische Leistungsbereitschaft in Abhängigkeit der Tages- oder Schichtzeit kann außerdem in Verbindung mit den häufig fehlerhaften und somit anspruchsvolleren Werkzeugoperationen beachtet werden. Diese können bspw. auf die leistungsfähigeren Zeitpunkte der Schicht gelegt werden.

Die *Bearbeitungsreihenfolge* und Koordinaten der Werkzeugoperationen können untersucht werden, um Rückschlüsse auf die Körperhaltungen der Werker zu ziehen und somit die Ergonomie am Arbeitsplatz zu bewerten. Die Ergonomie kann verbessert werden, wenn die Bearbeitungsreihenfolgen der Werkzeugoperationen so angepasst werden, dass die Körperhaltungen öfter variieren.

Die ermittelten Potenziale können über die Gestaltung der Arbeitsplätze und Prozesse realisiert werden. So kann der Arbeitsplan angepasst werden, um Werkzeugoperationen mit neuen Arbeitsschritten zu verknüpfen oder um eine optimale Bearbeitungsreihenfolge für die Verbesserung der verschiedenen Zielgrößen vorzugeben. Für die Reihenfolge ist ein Gesamtoptimum aus Produktivität, Qualität und Ergonomie denkbar, wenn die Datengrundlage über Simulationen ausgewertet wird.

Mittels künstlicher Intelligenz können außerdem Modelle über die Datengrundlage trainiert werden, die die Datenströme anschließend in Echtzeit auswerten, um Verbesserungspotenziale zu finden. Dadurch könnte ein zusätzlicher Service die Bearbeitungsreihenfolgen dynamisch anpassen und als Arbeitsschritte und Werkzeugoperationen direkt in den Digitalen Assistenzsystemen bereitstellen. Die Vernetzung mehrerer Digitaler Assistenzsysteme und Smarter Handwerkzeuge könnte so auch arbeitsplatzübergreifende Potenziale realisieren.

5.5 Digitalisierter Montageprozess

Dieser Abschnitt verdeutlicht den digitalisierten Montageprozess, der sich aus dem Smarten Handwerkzeug, dem Digitalen Assistenzsystem der Montage und den Services der Softwareplattform ergibt. Dazu geht Unterabschnitt 5.5.1 auf den Montageprozess im positionsgesteuerten Modus ein und Unterabschnitt 5.5.2 beschreibt den Montageprozess im applikationsgesteuerten Modus. Die Beschreibung beschränkt sich auf die Bearbeitung werkzeugabhängiger Arbeitsschritte, um die Funktionsweise des Gesamtsystems zu verdeutlichen.

5.5.1 Positionsgesteuerter Modus

Im positionsgesteuerten Modus ermöglicht es die Integration von Smarten Handwerkzeugen und Digitalen Assistenzsystemen, die *Entscheidung* im Informationsverarbeitungsprozess (vgl. Abbildung 2.6) zu automatisieren und das *Fehlerpotenzial* auf das Durchführen der Werkzeugoperation zu reduzieren. Abbildung 5.34 verdeutlicht den vereinfachten, digitalisierten Montageprozess im positionsgesteuerten Modus.

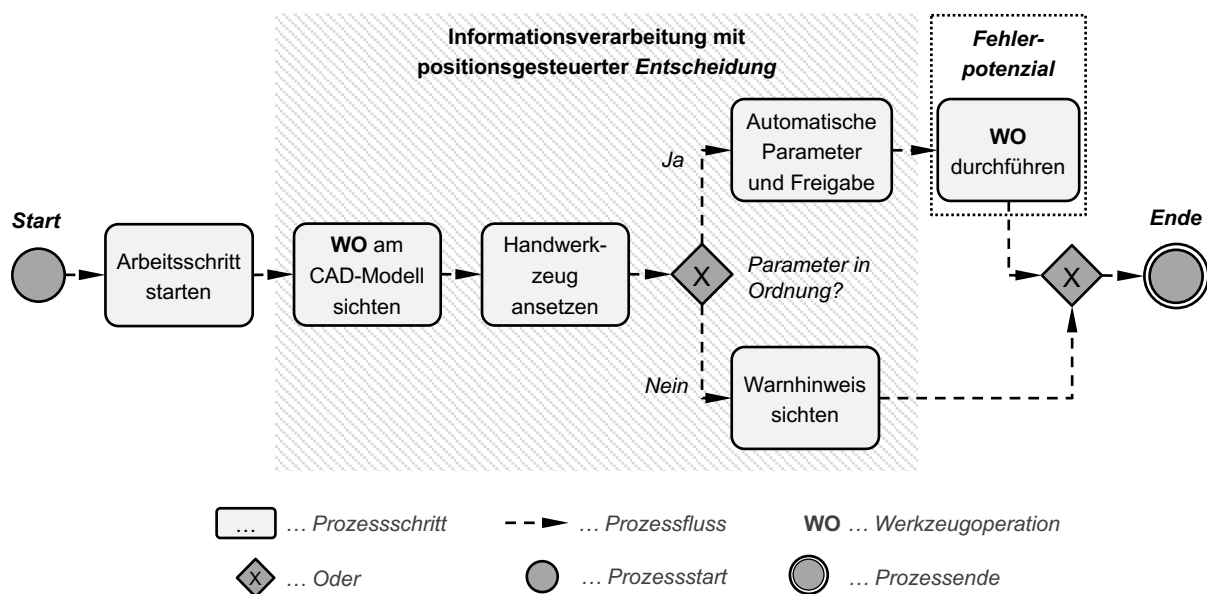


Abbildung 5.34: Digitalisierter Montageprozess im positionsgesteuerten Modus

Nachdem ein Werker den werkzeugabhängigen Arbeitsschritt im Digitalen Assistenzsystem gestartet hat, kann er die zugehörigen Werkzeugoperationen am CAD-Modell mit den jeweils notwendigen Prozessparametern sichten. Über das Ansetzen des Handwerkzeugs entscheidet das System automatisch, ob dieses freigegeben wird und die übermittelten Prozessparameter einstellt, oder ob das Assistenzsystem einen Warnhinweis darstellt. Das *Fehlerpotenzial* beschränkt sich dadurch auf das Durchführen der Werkzeugoperation.

Abbildung 5.35 zeigt Ausschnitte des Visualisierungsbereichs und des Werkzeugbereichs im Digitalen Assistenzsystem und verdeutlicht die positionsgesteuerte Parametereinstellung und Werkzeugfreigabe nach dem Ansetzen des Smarten Handwerkzeugs an einer Werkzeugoperation.

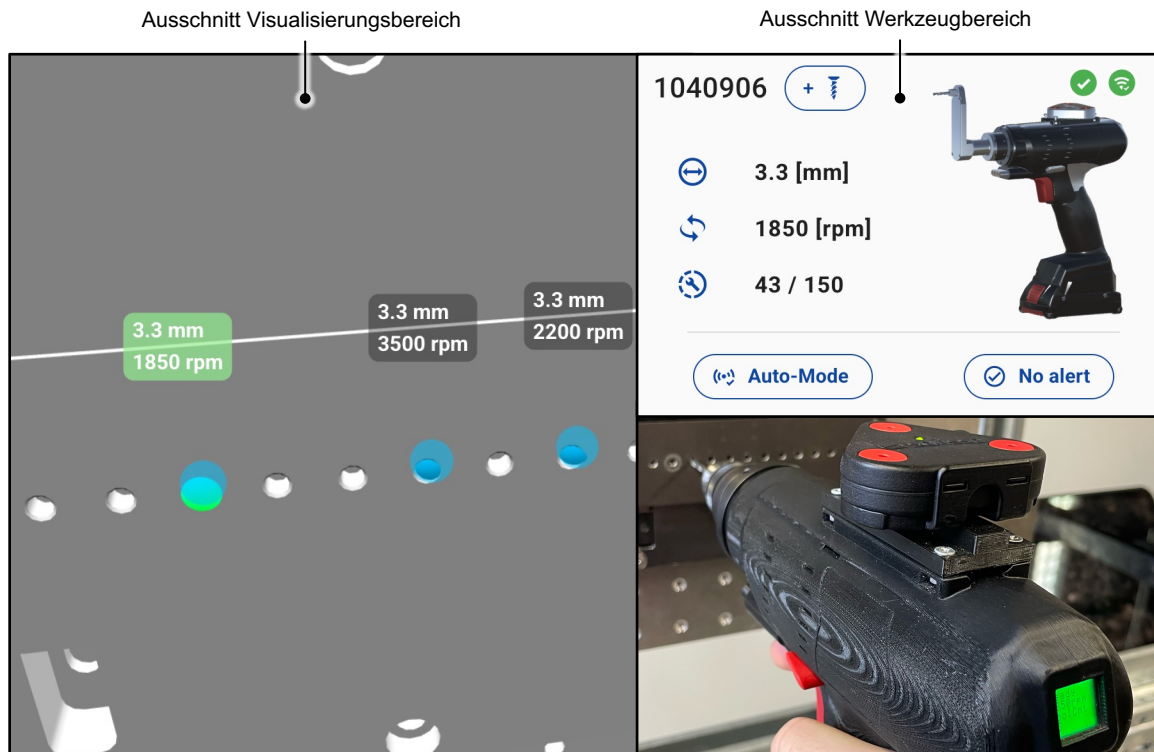


Abbildung 5.35: Freigegebenes Werkzeug im positionsgesteuerten Modus

5.5.2 Applikationsgesteuerter Modus

Im applikationsgesteuerten Modus unterstützt die Integration von Smarten Handwerkzeugen und Digitalen Assistenzsystemen ebenfalls die *Entscheidung* im Informationsverarbeitungsprozess, erweitert das *Fehlerpotenzial* allerdings sowohl auf das Ansetzen des Handwerkzeugs als auch auf das Durchführen der Werkzeugoperation. Abbildung 5.36 zeigt den vereinfachten, digitalisierten Montageprozess im applikationsgesteuerten Modus.

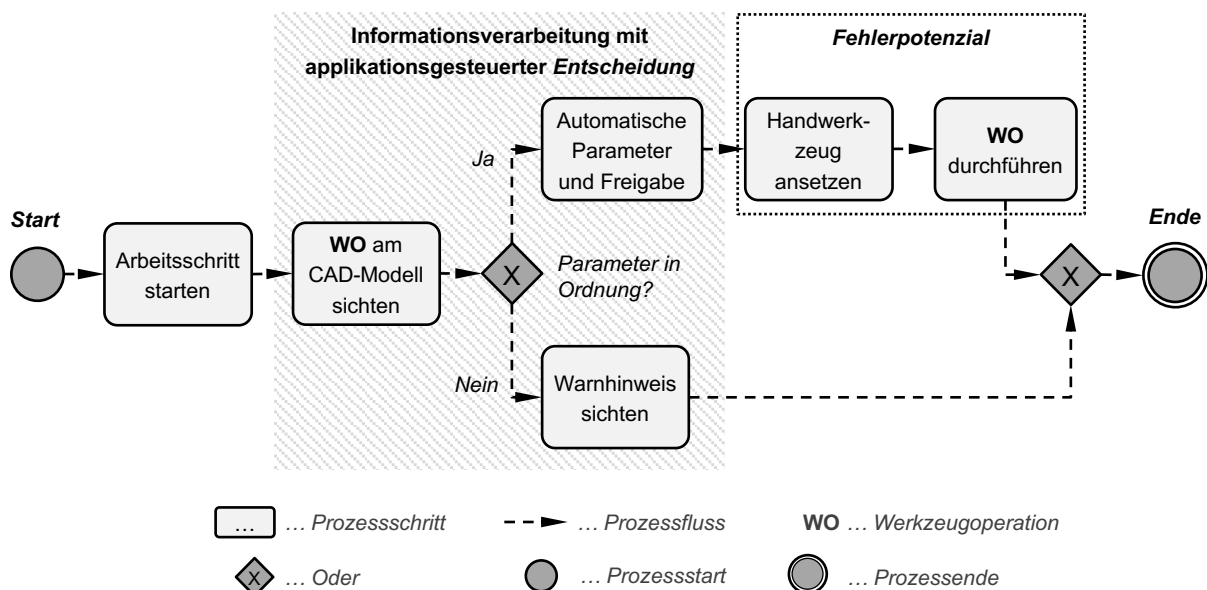


Abbildung 5.36: Digitalisierter Montageprozess im applikationsgesteuerten Modus

Nachdem ein Werker den werkzeugabhängigen Arbeitsschritt im Digitalen Assistenzsystem gestartet hat, kann er die vorgegebene Werkzeugoperation am CAD-Modell mit den notwendigen Prozessparametern sichten. Wenn die Prozessparameter des Handwerkzeugs die Anforderungen erfüllen, wird es vom Service freigegeben. Die *Entscheidung* der Prozessparameter wird somit automatisch vom System gefällt. Im applikationsgesteuerten Modus muss der Werker allerdings das korrekt eingestellte Handwerkzeug an die vorgegebene Position der Werkzeugoperation ansetzen, bevor er diese durchführt. Im Vergleich zum positionsgesteuerten Modus besteht dadurch ein höheres *Fehlerpotenzial*. Erfüllen die Prozessparameter des Handwerkzeugs die Anforderungen der vorgegebenen Werkzeugoperation nicht, wird stattdessen ein Warnhinweis im Digitalen Assistenzsystem visualisiert.

Abbildung 5.37 zeigt das freigegebene Werkzeug im applikationsgesteuerten Modus und verdeutlicht, wie der Visualisierungsbereich die durchzuführende Werkzeugoperation und der Werkzeugbereich die Erfüllung der Anforderungen anzeigt. Das Smarte Handwerkzeug zeigt – unabhängig der aktuellen Position – zudem die Freigabe, die Drehgeschwindigkeit und den Werkzeugzähler an.



Abbildung 5.37: Freigegebenes Werkzeug im applikationsgesteuerten Modus

6 Evaluation

Dieses Kapitel beschreibt die Evaluation des integrierten Systems für die Werker, das aus dem Smarten Handwerkzeug und dem Digitalen Assistenzsystem der Montage besteht. Abschnitt 6.1 erläutert die Versuchsplanung, die Durchführung und die Ergebnisse der Laboruntersuchung, um die Effekte des Systems auf die Zielgrößen Produktivität und Qualität, die Gebrauchstauglichkeit und die wahrgenommene kognitive Belastung der Werker zu bewerten. Das Digitale Assistenzsystem der Arbeitsvorbereitung wird nicht gesondert evaluiert, weil es als notwendige Voraussetzung für die ökonomische Nutzung des integrierten Werkerassistenzsystems entwickelt wurde. Die Potenziale des Systems werden darüber hinaus durch die Analyse in Unterabschnitt 3.1.1 verdeutlicht. Ebenso werden die Effekte der analyseorientierten Integration nicht gesondert evaluiert, da hierfür eine langfristige Implementierung in der Praxis notwendig wäre. Abschnitt 6.2 erörtert den Nutzen und die Akzeptanz des integrierten Systems mit den Endnutzern und Experten im Flugzeugbau und mit potenziellen Nutzern anderer Branchen. Abschnitt 6.3 diskutiert und bewertet die Zielerfüllung des Systems mit Blick auf die analysierten Defizite und Anforderungen.

6.1 Laboruntersuchung

Vermerk: Teile der Evaluationsergebnisse dieses Abschnitts sind im Rahmen einer betreuten Masterarbeit [Schm24] entstanden.

Dieser Abschnitt beschreibt die durchgeführten Laborversuche. Unterabschnitt 6.1.1 leitet die Hypothesen für die Untersuchung aus dem Konzept und den zu erwartenden Wirkungen auf die Defizite im Status Quo ab, um die Zielsetzung der Versuche zu erläutern. Unterabschnitt 6.1.2 beschreibt das notwendige Versuchskonzept, um die Hypothesen zu überprüfen und Unterabschnitt 6.1.3 stellt die Ergebnisse dar, um die Hypothesen abzulehnen oder zu bestätigen.

6.1.1 Hypothesen und Zielsetzung

Ziel der Integration von Smarten Handwerkzeugen und Digitalen Assistenzsystemen ist insbesondere, die Produktivität und Qualität der manuellen Montageprozesse zu verbessern. Demnach muss die Wirkung des Gesamtsystems auf diese Zielgrößen untersucht werden. Ziel des menschenzentrierten Entwicklungsansatzes ist es, die Gebrauchstauglichkeit und die kognitive Belastung bei der Nutzung der Systeme zu verbessern, damit die Werker diese langfristig akzeptieren und nutzen. Für alle Untersuchungen ist es wichtig, zwischen dem applikations- und dem positionsgesteuerten Modus zu unterscheiden, um die Effekte der Integration mit und ohne die Positionserkennung zu ermitteln.

Produktivitätswirkung

Die Produktivitätswirkung des integrierten Systems entsteht einerseits durch die verbesserte Informationsbereitstellung über das CAD-Modell und die interaktive Darstellung der Werkzeugoperationen im Digitalen Assistenzsystem. Andererseits reduziert das Smarte Handwerkzeug Zeiten für das Einstellen von Prozessparametern und für den Wechsel und die Beschaffung der Werkzeuge.

Mit Blick auf den hohen Wiederholungsgrad und die Mitarbeiterzustände in der manuellen Flugzeugmontage (vgl. Abbildung 3.4), reduziert das integrierte System vermutlich die Zeiten für die *Vorbereitung* und die *Durchführung* nur um einen geringen Anteil. Die Stärke des Effektes ist zusätzlich abhängig vom Erfahrungsgrad der Probanden, da unerfahrene Nutzer mehr Informationen benötigen und diese beschaffen müssen. Außerdem ist zu vermuten, dass die Nutzer im applikationsgesteuerten Modus länger für die Bearbeitung von Montageaufgaben benötigen als im positionsgesteuerten Modus, weil sie das Werkzeug noch an die vom Assistenzsystem vorgegebene Werkzeugoperation ansetzen müssen. Das erhöhte Fehlerpotenzial resultiert voraussichtlich in einer höheren Zeitdauer für die Informationsbeschaffung.

Für die **Produktivitätswirkung** ergeben sich die Hypothesen **H1** und **H2**:

H1: Die Nutzung des integrierten Digitalen Assistenzsystems mit Smarten Handwerkzeugen steigert die Produktivität bei manuellen Montageprozessen im Vergleich zu papierbasierten Unterlagen und konventionellen Handwerkzeugen signifikant.

H2: Die Nutzung des positionsgesteuerten Modus steigert die Produktivität bei manuellen Montageprozessen im Vergleich zum applikationsgesteuerten Modus signifikant.

Qualitätswirkung

Die Qualitätswirkung des integrierten Systems resultiert insbesondere aus den Services, welche die Kontrolle von Werkzeugfehlern und Prozessparameterfehlern und die Prüfung von Durchführungsfehlern ermöglichen. Die Kontrolle der Werkzeugfehler und die Prüfung der Durchführungsfehler haben eher langfristige Effekte, während die Kontrolle der Prozessparameterfehler direkte Auswirkungen auf Prozessqualität der manuellen Montage hat.

Die hohen Anteile an *Bohrungsfehlern*, *Nietfehlern* und *Faserausrisen*, die direkt mit falschen Prozessparametern zusammenhängen, erlauben den Rückschluss, dass das integrierte System die Prozessqualität deutlich steigert (vgl. Abbildung 3.6). Die Wirkung dieses Effektes ist wiederum abhängig von der Erfahrung der Probanden. Analog ist zu vermuten, dass die Nutzer mit dem applikationsgesteuerten Modus mehr Prozessfehler erzeugen als mit dem positionsgesteuerten Modus, da das Fehlerpotenzial im digitalisierten Montageprozess durch die Unsicherheit beim Ansetzen des Werkzeugs größer ist.

Für die **Qualitätswirkung** ergeben sich die Hypothesen **H3** und **H4**.

H3: Die Nutzung des integrierten Digitalen Assistenzsystems mit Smarten Handwerkzeugen reduziert die Anzahl an Prozessparameterfehlern bei manuellen Montageprozessen im Vergleich zu papierbasierten Unterlagen und konventionellen Handwerkzeugen signifikant.

H4: Die Nutzung des positionsgesteuerten Modus reduziert die Anzahl an Prozessparameterfehlern bei manuellen Montageprozessen im Vergleich zum applikationsgesteuerten Modus signifikant.

Gebrauchstauglichkeit und kognitive Belastung

Die kontextgerechte Informationsbereitstellung im Digitalen Assistenzsystem sollte den Informationsverarbeitungsprozess der Werker entlasten und in Verbindung mit dem Smarten Handwerkzeug leicht nutzbar sein. Im Vergleich zum aktuellen Prozess mit Papierunterlagen und konventionellen Handwerkzeugen ist also eine Verbesserung der Gebrauchstauglichkeit und der kognitiven Belastung bei der Verwendung des Digitalen Assistenzsystems und des Smarten Handwerkzeugs zu erwarten.

Es ist zu vermuten, dass die Wirkung beim positionsgesteuerten Modus größer ist als beim applikationsgesteuerten Modus, weil im digitalisierten Montageprozess alle Prozessschritte bis auf die tatsächliche Durchführung der Werkzeugoperation unterstützt werden. Außerdem ist die Interaktion der Nutzer mit dem Tablet beim applikationsgesteuerten Modus bei jeder Werkzeugoperation notwendig, während im positionsgesteuerten Modus auch mithilfe des Bildschirms am Smarten Handwerkzeug weitergearbeitet werden kann, bis ein Warnhinweis generiert wird.

Für die **Gebrauchstauglichkeit** und die **kognitive Belastung** ergeben sich die Hypothesen **H5** und **H6**.

H5: Die Nutzung des integrierten Digitalen Assistenzsystems mit Smarten Handwerkzeugen verbessert die wahrgenommene kognitive Belastung und Gebrauchstauglichkeit bei manuellen Montageprozessen im Vergleich zu papierbasierten Unterlagen und konventionellen Handwerkzeugen signifikant.

H6: Die Nutzung des positionsgesteuerten Modus verbessert die wahrgenommene kognitive Belastung und Gebrauchstauglichkeit bei manuellen Montageprozessen im Vergleich zum applikationsgesteuerten Modus signifikant.

Zielsetzung der Laboruntersuchung

Die Laboruntersuchung soll die Wirkung auf die Zielgrößen erfassen und die statistische Auswertung der Hypothesen ermöglichen. Die Versuche müssen so aufgebaut werden, dass Störgrößen, wie bspw. die Vorerfahrung der Probanden, herausgefiltert werden. Für die Produktivitätswirkung ist die Gesamtzeit der durchzuführenden Versuche entscheidend, für die Qualitätswirkung sol-

len die Prozessparameterfehler aufgenommen werden. Für die Gebrauchstauglichkeit und die kognitive Belastung werden standardisierte Fragebögen genutzt. Um die Hypothesen sinnvoll auszuwerten, müssen drei Unterversuche durchgeführt werden, die den aktuellen Montageprozess, den digitalisierten Montageprozess im applikationsgesteuerten Modus und den digitalisierten Montageprozess im positionsgesteuerten Modus beinhalten.

6.1.2 Versuchskonzept

Um den Einfluss der verschiedenen Unterlagen-Werkzeug-Kombinationen auf die Zielgrößen zu untersuchen, müssen weitere Einflussfaktoren möglichst stabil gehalten und Störfaktoren möglichst reduziert werden. Die Unterlagen-Werkzeug-Kombinationen sind nach der o.g. Zielsetzung:

- papierbasierte Unterlagen, wie technische Zeichnungen, Arbeitspläne und Stücklisten, mit einem konventionellen Handwerkzeug,
- ein Digitales Assistenzsystem mit einem Smarten Handwerkzeug im applikationsgesteuerten Modus oder
- ein Digitales Assistenzsystem mit einem Smarten Handwerkzeug im positionsgesteuerten Modus.

Abbildung 6.1 gibt einen Überblick über die Einflussfaktoren, Störfaktoren und Zielgrößen im Versuchssystem für die Laboruntersuchung.

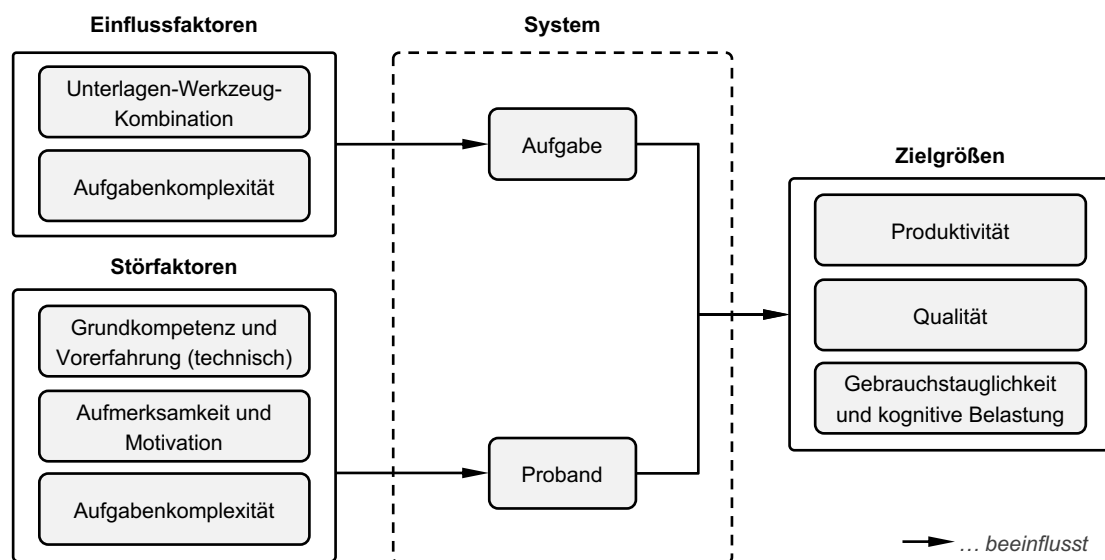


Abbildung 6.1: Versuchssystem für die Laboruntersuchung

In den Versuchen erhält ein *Proband* eine *Aufgabe* und muss diese mit den drei unterschiedlichen *Unterlagen-Werkzeug-Kombinationen* bearbeiten. Die Zielgrößen *Produktivität*, *Qualität* und *Gebrauchstauglichkeit und kognitive Belastung* werden gemessen. Um Störfaktoren wie die *technische Grundkompetenz und Vorerfahrung* oder die *Aufmerksamkeit und Motivation* herauszufiltern, ist ein systematischer **Versuchsplan** notwendig. Die *Aufgabenkomplexität* kann als Einflussfaktor die Zielgrößen beeinflussen und sollte deshalb für die Unterversuche möglichst

gleich hoch sein. Außerdem ist sie eine wichtige Eigenschaft der Aufgabe und sollte deshalb möglichst realistisch gewählt werden. Als Störfaktor kann sie zudem die *Probanden* beeinflussen und sollte dementsprechend den durchschnittlichen Kompetenzen dieser entsprechen. Für beides ist die **Aufgabenplanung** zuständig. Um die Zielgrößen abschließend sinnvoll aufzunehmen und vergleichen zu können, ist eine geeignete **Messmethodik** nötig.

Versuchsplan

Ein Versuchsplan beinhaltet alle geplanten Einzelversuche in definierter Reihenfolge und sollte so aufgebaut sein, dass die gewünschte Genauigkeit der Ergebnisse, die Anzahl zu variierender Einfluss- und Systemfaktoren und die Anzahl der Faktorstufen beachtet wird, um das Untersuchungsziel zu erreichen [Klep20, S. 29]. Zur Evaluation des integrierten Assistenzsystems werden drei Faktorstufen für die *Unterlagen-Werkzeug-Kombination* betrachtet und drei verschiedene *Aufgaben* gewählt, die eine ähnliche Aufgabenkomplexität aufweisen. Eine Variation der Aufgabenkomplexität wird nicht durchgeführt, es ist aber naheliegend, dass eine höhere Komplexität die Effekte auf die Zielgrößen verstärkt (vgl. [Hala18, S. 137]).

Für den Versuchsplan ist es sinnvoll, ein balanciertes und systematisches Versuchsdesign zu wählen, das den Einfluss von Lerneffekten und anderen Störgrößen reduziert. Dazu wird die Reihenfolge der Unterlagen-Werkzeug-Kombinationen und der Aufgaben systematisch variiert und gleichmäßig so über die Probanden verteilt, dass jede Kombination aus Faktorstufe und Aufgabe möglichst gleich häufig auftritt. Tabelle 6.1 zeigt den resultierenden Versuchsplan für die Laboruntersuchung.

Die Stichprobengröße ist einerseits so zu wählen, dass ein vorhandener Effekt mit einer ausreichend hohen Wahrscheinlichkeit erkannt werden kann (statistische Signifikanz). Aufgrund des relativ hohen vermuteten Effekts führt die Berechnung der Stichprobengröße nach Bortz und Schuster [Bort10, S. 106] zu einer Anzahl von 12 Probanden (siehe Anhang F). Andererseits sollen auch Probleme mit der Gebrauchstauglichkeit mit ausreichender Sicherheit identifiziert werden. Hierzu empfehlen Jacobsen und Meyer [Jaco19, S. 214f.] eine Stichprobe von 20 Probanden, um Probleme der Gebrauchstauglichkeit mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 95 % zu erkennen. Folglich wird für die Versuche eine Stichprobengröße von 20 Probanden gewählt.

Aufgabenplanung

Die Aufgaben für die Versuche sind so aufgebaut, dass sie einen typischen Montageablauf abbilden und sowohl Bohr- als auch Schrauboperationen umfassen. Dazu müssen die Probanden einen Bohrstand inklusive der darin eingespannten Aluminiumstreifen an einer Vorrichtung ausrichten und montieren. Anschließend müssen sie elf Bohroperationen mit spezifischen Positionen, Drehgeschwindigkeiten und Durchmessern an den Körnungen des Aluminiumstreifen ansetzen und durchführen. Dazu können sie vier verschiedene Bohraufsätze verwenden. Nach den Bohroperationen müssen die Probanden zu einer bereits montierten Schraubplatte mit diversen Gewindebohrungen gehen, um dort sieben Schrauboperationen mit spezifischen Positionen, Drehmomenten und Schraubdurchmessern durchzuführen. Dazu können sie einen Schraubaufsatz verwenden,

Tabelle 6.1: Versuchsplan für die Laboruntersuchung

Proband Nr.	Versuch 1		Versuch 2		Versuch 3	
	UWK	Aufgabe	UWK	Aufgabe	UWK	Aufgabe
1	PK	Aufgabe 2	DS _{app}	Aufgabe 1	DS _{pos}	Aufgabe 3
2	PK	Aufgabe 2	DS _{app}	Aufgabe 3	DS _{pos}	Aufgabe 1
3	PK	Aufgabe 1	DS _{app}	Aufgabe 3	DS _{pos}	Aufgabe 2
4	PK	Aufgabe 2	DS _{app}	Aufgabe 1	DS _{pos}	Aufgabe 3
5	DS _{pos}	Aufgabe 1	DS _{app}	Aufgabe 2	PK	Aufgabe 3
6	DS _{pos}	Aufgabe 1	DS _{app}	Aufgabe 3	PK	Aufgabe 2
7	DS _{pos}	Aufgabe 2	DS _{app}	Aufgabe 1	PK	Aufgabe 3
8	DS _{pos}	Aufgabe 1	DS _{app}	Aufgabe 2	PK	Aufgabe 3
9	DS _{app}	Aufgabe 3	DS _{pos}	Aufgabe 2	PK	Aufgabe 1
10	DS _{app}	Aufgabe 2	DS _{pos}	Aufgabe 3	PK	Aufgabe 1
11	DS _{app}	Aufgabe 1	DS _{pos}	Aufgabe 2	PK	Aufgabe 3
12	DS _{app}	Aufgabe 3	DS _{pos}	Aufgabe 2	PK	Aufgabe 1
13	DS _{app}	Aufgabe 1	PK	Aufgabe 2	DS _{pos}	Aufgabe 3
14	DS _{app}	Aufgabe 3	PK	Aufgabe 1	DS _{pos}	Aufgabe 2
15	DS _{app}	Aufgabe 2	PK	Aufgabe 1	DS _{pos}	Aufgabe 3
16	DS _{app}	Aufgabe 1	PK	Aufgabe 2	DS _{pos}	Aufgabe 3
17	PK	Aufgabe 3	DS _{pos}	Aufgabe 2	DS _{app}	Aufgabe 1
18	PK	Aufgabe 2	DS _{pos}	Aufgabe 1	DS _{app}	Aufgabe 3
19	PK	Aufgabe 1	DS _{pos}	Aufgabe 2	DS _{app}	Aufgabe 3
20	PK	Aufgabe 3	DS _{pos}	Aufgabe 2	DS _{app}	Aufgabe 1

Legende:

UWK = Unterlagen-Werkzeug-Kombination

PK = Papierunterlagen und konventionelle Handwerkzeuge

DS_{app} = Digitales Assistenzsystem und Smartes Handwerkzeug im applikationsgesteuerten ModusDS_{pos} = Digitales Assistenzsystem und Smartes Handwerkzeug im positionsgesteuerten Modus

der mit verschiedenen Drehmomenten beschrieben werden kann, um einen Werkzeugwechsel zu simulieren. Abbildung 6.2 zeigt einen montierten Bohrstand an der Bohrvorrichtung und die Schraubplatte mit den Gewindebohrungen im CAD-Modell des Versuchaufbaus.

Die drei Aufgaben unterscheiden sich lediglich in der Ausrichtung und Position des zu montierenden Bohrstands, den Positionen und Parametern der Bohroperationen und den Positionen und Parametern der Schrauboperationen. Um die Aufgabenkomplexität gleich zu halten, bleiben die sonstigen Aufgaben, die Anzahl der durchzuführenden Werkzeugoperationen, Bauteile und Werkzeuge unverändert. Die Aufgabenkomplexität ist zudem eher gering gehalten, da die Probanden zum Großteil aus Studenten und wissenschaftlichen Mitarbeitern technischer Fachbereiche bestehen und somit wenig Erfahrung mit der Bearbeitung manueller Montageprozesse besitzen. Sie entspricht aber dennoch einem praxisnahen Prozess, wie bspw. der Anfertigung einer Längnaht im Flugzeugbau. Anhang G zeigt die drei Aufgaben anhand der Unterlagen des papierbasierten Versuches.

Zur Bearbeitung der Aufgaben stehen den Probanden eine Arbeitsstation und ein Lagerregal mit beschrifteten Kisten für die Werkzeugaufsätze und Schrauben bereit. Bei allen Versuchen

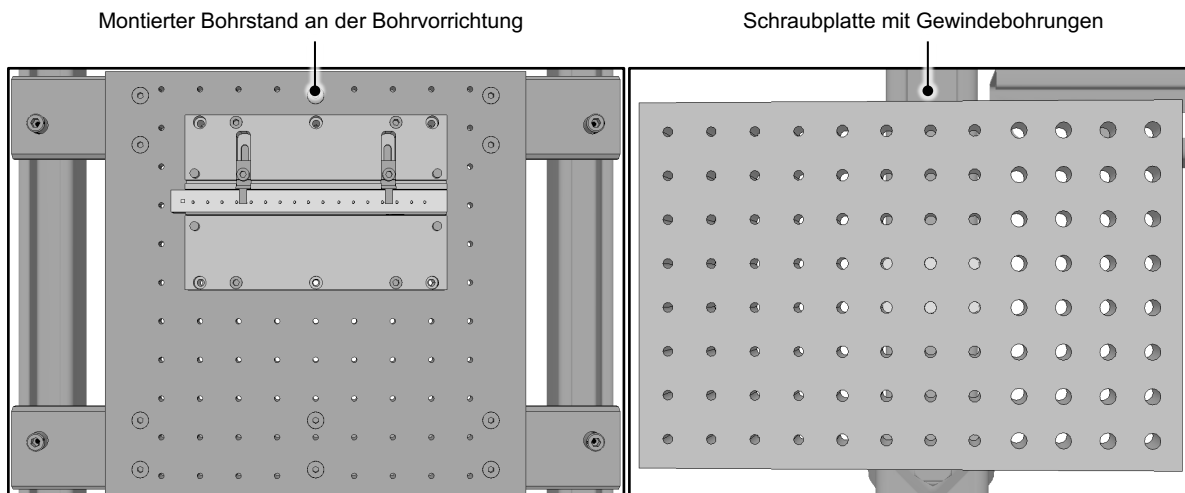


Abbildung 6.2: Bohr- und Schraubvorrichtung

wird das Smarte Handwerkzeug genutzt, wobei dieses beim papierbasierten Versuch immer freigegeben ist, so dass es wie ein konventionelles Werkzeug funktioniert. Für die papierbasierten Versuche erhalten die Probanden zusätzlich eine Bauunterlage mit technischen Zeichnungen des Versuchsaufbaus, Detailansichten und Positionsnummern. Die Positionsnummern verweisen auf eine Stückliste, in der sie die notwendigen Prozessparameter über einen weiteren Verweis aus einer Tabelle heraussuchen können. Außerdem erhalten die Probanden einen Auftrag, der die zu erledigenden Arbeitsschritte in Textform darstellt. Damit entspricht der papierbasierte Versuch weitestgehend der analysierten Ist-Situation im Flugzeugbau. In den Versuchen im applikations- und positionsgesteuerten Modus erhalten die Probanden alle Informationen über das Digitale Assistenzsystem.

Messmethodik

Ziel der Messmethodik ist es, die Zielgrößen möglichst störungsfrei und exakt zu erfassen. Die Probanden werden dazu mit einer Kamera gefilmt, die den gesamten Laborbereich aufnimmt und damit Rückschlüsse auf den Verlauf der Versuche erlaubt. Zudem ermöglicht sie eine Zeitmessung, um die Tätigkeiten der Probanden zu erfassen und so die *Produktivität* zu berechnen.

Zur Erfassung der *Qualität* der Prozesse wird eine zusätzliche Kamera auf den Arbeitsbereich der Bohr- und Schraubvorrichtung gerichtet, um die Positionen der durchgeführten Werkzeugoperationen zu erkennen. Um die Prozessparameter zu erkennen, führen die Probanden im papierbasierten Versuch eine Liste, in der sie die gewählten Prozessparameter für jede Werkzeugoperation eintragen. Im applikations- und positionsgesteuerten Versuch dokumentiert das Smarte Handwerkzeug die Prozessparameter automatisch über die Rückmeldedatenanalyse. Die Prozessparameter werden im Versuch des papierbasierten und des applikationsgesteuerten Prozesses über die Kameraaufnahme mit der Position der Werkzeugoperationen verknüpft. Im Versuch zum positionsgesteuerten Prozess erfolgt die Verknüpfung über das Positionserkennungssystem automatisch.

Für die Bewertung der *Gebrauchstauglichkeit* wird die System Usability Scale (SUS) verwendet. Die SUS-Methode nutzt eine Skala mit zehn Aussagen, die die Gebrauchstauglichkeit des betreffenden Systems im Kontext der Anwendung beurteilen. Die Probanden geben jeweils ihre Zustimmung zur Aussage auf einer Likert-Skala von eins bis fünf an. Die Aussagen sind dabei abwechselnd positiv oder negativ formuliert. Die Einzelbewertungen werden abschließend in eine Gesamtbewertung der Gebrauchstauglichkeit zusammengefasst [Broo95, S. 3ff.]. Die Probanden füllen nach jedem Unterversuch einen SUS-Fragebogen aus.

Die *kognitive Belastung* der Probanden wird über den sog. National Aeronautics and Space Administration Task Load Index (NASA-TLX) erfasst, der sechs verschiedene Anforderungskategorien (bspw. mentale Anforderung oder zeitliche Anforderung) vereint, um eine Gesamtbewertung herzustellen. Die Probanden geben zu jeder Anforderungskategorie eine Belastungseinschätzung auf einer Skala von null bis hundert an. Abschließend gewichten sie die Belastungskategorien, indem sie fünfzehn paarweise Vergleiche der Kategorien durchführen. Über die Gewichtung und die Belastungseinschätzungen ergibt sich abschließend der NASA-TLX-Wert [Hart88, S. 31ff.]. Die Probanden schätzen nach jedem Unterversuch die einzelnen Belastungskategorien ein und führen als Abschluss einmal die paarweisen Vergleiche durch.

6.1.3 Ergebnisauswertung

Die Ergebnisse der Versuche werden im Folgenden nach den Zielgrößen aufgeteilt, dargestellt und ausgewertet. Dazu beschreibt der Abschnitt jeweils die Ergebnisse der Unterversuche und wertet diese aus, um die Hypothesen aus Unterabschnitt 6.1.1 zu beantworten. Um die Hypothesen **H1**, **H3** und **H5** zu beantworten, wird jeweils der Unterschied zwischen dem papierbasierten und dem applikationsgesteuerten Prozess sowie der Unterschied zwischen dem papierbasierten und dem positionsgesteuerten Prozess untersucht. Um anschließend die Hypothesen **H2**, **H4** und **H6** zu beantworten, wird der Unterschied zwischen dem applikationsgesteuerten und dem positionsgesteuerten Prozess untersucht. Alle Ergebnisse werden zu einem Signifikanzniveau von 5 % statistisch ausgewertet.

Ergebnisse: Produktivität

Abbildung 6.3 stellt die Ergebnisse der Produktivitätsuntersuchung dar und zeigt dazu jeweils den Mittelwert und die Standardabweichung der verwendeten Unterlagen-Werkzeug-Kombination an. Um die Produktivität zu bewerten, betrachtet die Auswertung einerseits die Gesamtzeit für die Unterversuche (links) und andererseits die Informationshandhabungszeit (mitte). Die Zeit für die Werkzeughandhabung betrachtet sie nicht gesondert, da die Probanden auch im papierbasierten Versuch mit dem Smarten Handwerkzeug arbeiten und somit die Vorteile der Wechselaufsätze im Vergleich zur Handhabung mehrerer Werkzeuge nicht sichtbar sind. Als Produktivitätskennzahl betrachtet die Auswertung außerdem die durchschnittliche Anzahl durchgeführter Werkzeugeingriffe pro Minute (rechts).

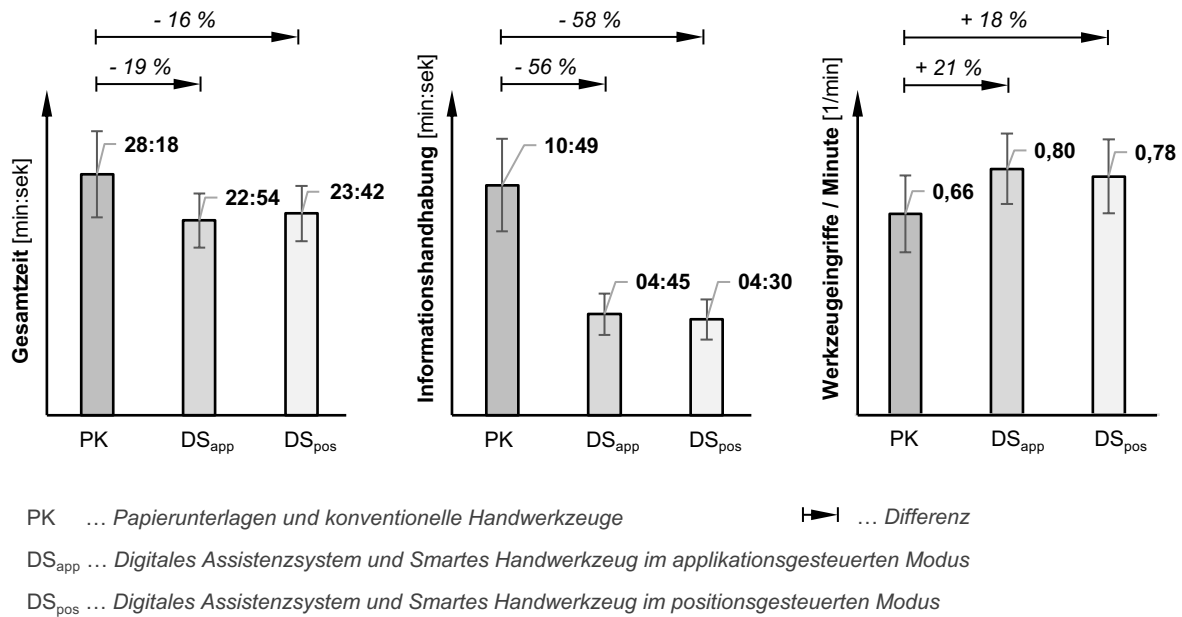


Abbildung 6.3: Ergebnisse der Produktivitätsuntersuchung (n = 20)

Anhand der Ergebnisse lassen sich die folgenden Aussagen treffen:

- Die Gesamtzeit der Bearbeitung lässt sich durch die Verwendung Smarter Handwerkzeuge und Digitaler Assistenzsysteme in beiden Betriebsmodi statistisch signifikant reduzieren. Im applikationsgesteuerten Modus reduziert sich die Gesamtzeit von 28 Minuten und 18 Sekunden um 19 % auf 22 Minuten und 54 Sekunden und im positionsgesteuerten Modus um 16 % auf 23 Minuten und 42 Sekunden. Entgegen der Annahme ist die Zeit im positionsgesteuerten Modus damit um 48 Sekunden höher als im applikationsgesteuerten Modus. Der Unterschied zwischen den Betriebsmodi ist aber nicht statistisch signifikant.
- Die Zeit für die Informationshandhabung lässt sich durch die Verwendung Smarter Handwerkzeuge und Digitaler Assistenzsysteme in beiden Betriebsmodi ebenfalls signifikant reduzieren. Im applikationsgesteuerten Modus reduziert sich die Zeit für die Informationshandhabung von 10 Minuten und 49 Sekunden um 56 % auf 4 Minuten und 45 Sekunden und im positionsgesteuerten Modus um 58 % auf 4 Minuten und 30 Sekunden. Damit ist die Zeit im positionsgesteuerten Modus etwas geringer als im applikationsgesteuerten Modus, dieser Unterschied ist aber nicht statistisch signifikant.
- Die Werkzeugeingriffe pro Minute lassen sich durch die Verwendung Smarter Handwerkzeuge und Digitaler Assistenzsysteme in beiden Betriebsmodi signifikant erhöhen. Im applikationsgesteuerten Modus erhöht sich die Produktivität somit von 0,66 Eingriffen pro Minute um 21 % auf 0,80 Eingriffe pro Minute und im positionsgesteuerten Modus um 18 % auf 0,78 Eingriffe pro Minute. Der Unterschied zwischen den beiden Modi ist nicht statistisch signifikant.

Die Integration Smarter Handwerkzeuge mit Digitalen Assistenzsystemen erhöht somit die Produktivität bei der Bearbeitung manueller Montageprozesse – die Hypothese **H1** wird angenommen. In den Versuchen entsteht diese Steigerung zum Großteil durch die Reduzierung der Informationshandhabungszeit.

Zu bemerken ist, dass die Probanden beim Durchführen der Montageaufgabe auf keine Erfahrungswerte zurückgreifen konnten. Der Anteil der Informationshandhabung an der Gesamtzeit ist entsprechend deutlich höher als in einer Serienfertigung. Die Produktivitätssteigerung im Flugzeugbau fällt vermutlich geringer aus. Für Branchen mit geringeren Wiederholungsgraden oder für die Einarbeitung neuer Werker könnte die Verbesserung hingegen höher ausfallen.

Die Nutzung des positionsgesteuerten Modus bewirkt im Vergleich zum applikationsgesteuerten Modus keine Verbesserung der Produktivität – die Hypothese **H2** wird abgelehnt. Die Reduzierung der Informationshandhabungszeit wirkt in beiden Betriebsmodi gleich.

Bei der Ursachenanalyse fiel auf, dass die meisten Probanden im positionsgesteuerten Modus trotz der Bildschirmanzeige am Smarten Handwerkzeug bei jeder Werkzeugoperation zusätzlich die Anzeige im Digitalen Assistenzsystem überprüft haben. Es ist daher denkbar, dass die Werker mit steigender Erfahrung mit dem System weniger mit dem Digitalen Assistenzsystem interagieren werden, so dass im positionsgesteuerten Modus eine zusätzliche Produktivitätsverbesserung entsteht.

Ergebnisse: Qualität

Abbildung 6.4 stellt die Mittelwerte der relativen und absoluten Häufigkeiten der aufgetretenen Prozessfehler für die Unterlagen-Werkzeug-Kombinationen und die Standardabweichungen für die absoluten Häufigkeiten dar. Als Prozessfehler betrachtet die Auswertung die fehlerhaft gewählten *harten Kriterien*, also die Positionen, Durchmesser oder Drehmomente der Werkzeugoperationen. Bei diesen Kriterien wird angenommen, dass sie direkt zu Nacharbeit oder Ausschuss führen. Sie sind außerdem die Kriterien, die der Service *Parameterkontrolle und Werkzeugfreigabe* kontrolliert, bevor er eine Freigabe an das Smarte Handwerkzeug sendet.

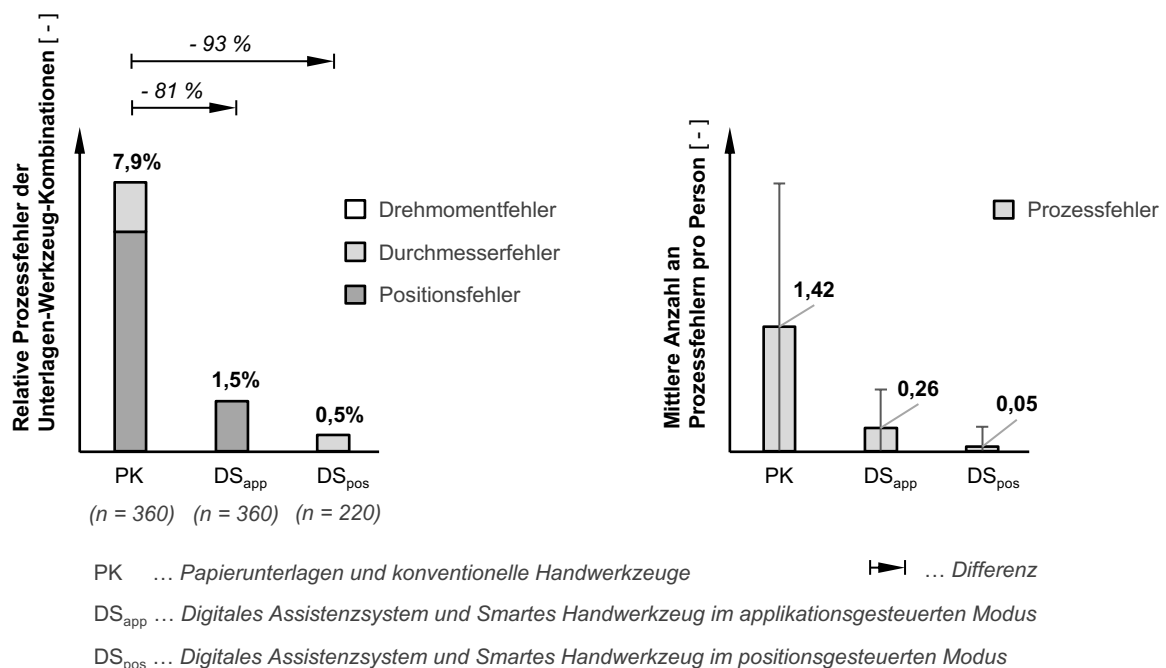


Abbildung 6.4: Ergebnisse der Qualitätsuntersuchung (n = 19; 940 Operationen)

Die Auswertung der Ergebnisse betrachtet nur 19 der 20 Probanden, da das Smarte Handwerkzeug im letzten Versuch aufgrund von Netzwerkproblemen wiederholt keine Werte dokumentiert hat. Außerdem betrachtet sie für den positionsgesteuerten Modus nur die Bohroperationen. Bei den Schrauboperationen nutzen die Probanden einen einzelnen Schraubaufsatz, der über eine Schaltfläche im Digitalen Assistenzsystem mit dem notwendigen Drehmoment beschrieben wird. Dieser Prozess hat zu Fehlern auf dem Smarten Handwerkzeug geführt, findet aber nur statt, weil noch kein zweiter Schraubaufsatz vorhanden ist. In der Praxis sind die Aufsätze mit einem festen Drehmoment beschrieben, weshalb dieser Fehler nicht auftreten würde. Die Auswertung kann auf insgesamt 940 durchgeführte Werkzeugoperationen zurückgreifen.

Anhand der Ergebnisse lassen sich die folgenden Aussagen treffen:

- Die Prozessfehler lassen sich durch die Verwendung Smarter Handwerkzeuge und Digitaler Assistenzsysteme in beiden Betriebsmodi statistisch signifikant reduzieren. Im applikationsgesteuerten Modus reduziert sich die relativen Prozessfehler von 7,9 % auf 1,5 % (Reduktion um 81 %) und im positionsgesteuerten Modus auf 0,5 % (Reduktion um 93 %). Beide Betriebsmodi reduzieren die Standardabweichung der Prozessfehler deutlich.
- Der Integration Smarter Handwerkzeuge mit Digitalen Assistenzsystemen reduziert die Prozessfehler auch ohne das Positionserkennungssystem deutlich. Durch die zusätzliche Integration des Positionserkennungssystems treten keine Positionsfehler mehr auf.
- Die mittlere Anzahl an Prozessfehlern pro Person beträgt im papierbasierten Versuch 1,42. Sie reduziert sich im applikationsgesteuerten Modus auf 0,26 Prozessfehler pro Person und beträgt im positionsgesteuerten Modus 0,05.

Auffällig ist, dass keine Drehmomentfehler in den Versuchen auftraten. Das kann daran liegen, dass in der Schraubaufgabe nur zwischen zwei verschiedenen Drehmomenten entschieden werden musste, während in der Bohraufgabe vier verschiedene Durchmesser wählbar waren. Dafür traten zwei Drittel der Positionsfehler bei der Schraubaufgabe auf. Die Schraubplatte beinhaltet 96 Gewindebohrungen als Optionen, während die Aluminiumstreifen im Bohrstand mit 17 Körnungen versehen sind (vgl. Abbildung 6.2). Dies deutet darauf hin, dass die Kontrolle der Positionsfehler mit steigender Montagekomplexität an Relevanz gewinnt, was mit den Ergebnissen von Halata [Hala18, S. 137] übereinstimmt.

Im positionsgesteuerten Modus fiel zudem auf, dass das Smarte Handwerkzeug die Drehgeschwindigkeit als *weiches Kriterium* nicht schnell genug einstellt. Die Drehgeschwindigkeit wird von der Softwareplattform gemeinsam mit der Freigabe als ein Datenpaket versendet. Die Einstellung der Drehgeschwindigkeit erfolgt auf dem Smarten Handwerkzeug schrittweise und dauert dadurch in der Regel etwas länger als das Einstellen der Freigabe. Einige Bohroperationen wurden deshalb im positionsgesteuerten Modus mit Drehgeschwindigkeiten durchgeführt, die nicht dem Zielwert entsprachen. Dieser Fehler kann über eine Plausibilitätsprüfung der weichen Kriterien vor dem Einstellen der Freigabe behoben werden. Im applikationsgesteuerten Modus empfängt das Werkzeug die Daten bereits, bevor es angesetzt wird, weshalb der Fehler hier nicht auftritt.

Es ist zu beachten, dass die zusätzliche Verbesserung des positionsgesteuerten Modus im Vergleich zum applikationsgesteuerten Modus nicht statistisch signifikant ist. Bei den absoluten Fehlerzahlen tritt allerdings ein mittlerer bis großer Effekt mit einer Stärke von 0,66 und einer Prüfgröße von 0,051 auf. Das bedeutet, dass das Ergebnis beinahe statistisch signifikant ist, aber mit einer größeren Stichprobe nachgeprüft werden sollte. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass der einzige Prozessfehler im positionsgesteuerten Modus aufgetreten ist, weil die Freigabe für eine benachbarte Werkzeugoperation versendet wurde und nicht schnell genug wieder entzogen wurde. Ein industriereifes System könnte einen solchen Fehler voraussichtlich verhindern. Ohne diesen Prozessfehler wäre der Unterschied statistisch signifikant.

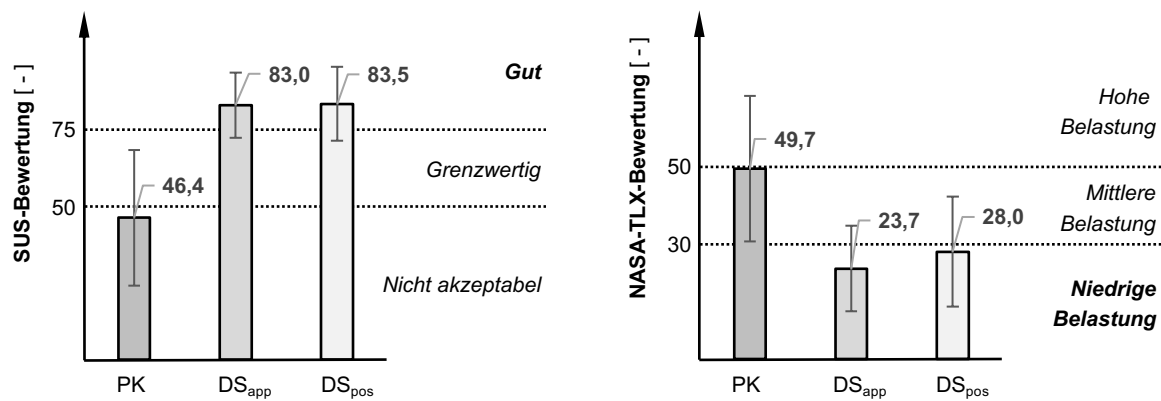
Zusammenfassend ist zu sagen: Die Integration Smarterer Handwerkzeuge mit Digitalen Assistenzsystemen reduziert die Prozessfehler bei der Bearbeitung manueller Montageprozesse statistisch signifikant – die Hypothese **H3** wird angenommen. Die Nutzung des positionsgesteuerten Modus reduziert die Anzahl an Prozessparameterfehlern im Vergleich zum applikationsgesteuerten Modus in den Versuchen, aber nicht statistisch signifikant – die Hypothese **H4** wird daher abgelehnt. Aufgrund der mittleren bis großen Effektstärke sollte der Versuch mit einer höheren Anzahl an Probanden wiederholt werden. Der applikationsgesteuerte Modus kann den Großteil der Prozessfehler mit einem technologisch weniger anspruchsvollen Ansatz vermeiden. Der positionsgesteuerte Modus weist zwar prototypische Mängel auf, diese können aber bei einer industriellen Implementierung vermutlich behoben werden, um eine vollumfängliche Vermeidung von Prozessfehlern zu ermöglichen.

Ergebnisse: Gebrauchstauglichkeit und kognitive Belastung

Abbildung 6.5 stellt die Ergebnisse der Untersuchung von Gebrauchstauglichkeit und kognitiver Belastung dar und zeigt dazu jeweils den Mittelwert und die Standardabweichung der bewerteten Unterlagen-Werkzeug-Kombination an.

Es lassen sich die folgenden Aussagen treffen:

- Die Gebrauchstauglichkeit der Integration von Smarten Handwerkzeugen und Digitalen Assistenzsystemen ist sowohl im applikationsgesteuerten mit einer SUS-Bewertung von 83,0 als auch im positionsgesteuerten Modus mit einer SUS-Bewertung von 83,5 gut. Die Gebrauchstauglichkeit des konventionellen, papierbasierten Prozesses ist mit einer SUS-Bewertung von 46,4 hingegen nicht akzeptabel. Der Unterschied ist statistisch signifikant.
- Die Bewertungsunterschied von der Gebrauchstauglichkeit der Betriebsmodi bei der Verwendung Smarter Handwerkzeuge und Digitaler Assistenzsysteme beträgt 0,5 und unterscheidet sich nicht statistisch signifikant.
- Die kognitive Belastung bei der Verwendung Smarter Handwerkzeuge und Digitaler Assistenzsysteme ist sowohl im applikationsgesteuerten mit einer NASA-TLX-Bewertung von 23,7 als auch im positionsgesteuerten Modus mit einer NASA-TLX-Bewertung von 28,0 niedrig. Die kognitive Belastung beim konventionellen, papierbasierten Prozess ist mit einer NASA-TLX-



PK ... Papierunterlagen und konventionelle Handwerkzeuge

DS_{app} ... Digitales Assistenzsystem und Smartes Handwerkzeug im applikationsgesteuerten Modus

DS_{pos} ... Digitales Assistenzsystem und Smartes Handwerkzeug im positionsgesteuerten Modus

SUS ... System Usability Score (Gebrauchstauglichkeit)

NASA-TLX ... National Aeronautics and Space Administration Task Load Index (kognitive Belastung)

Abbildung 6.5: Ergebnisse zu Gebrauchstauglichkeit und kognitiver Belastung (n = 20)

Bewertung von 49,7 an der Grenze zu einer hohen Belastung. Der Unterschied ist statistisch signifikant.

- Die kognitive Belastung der Betriebsmodi bei der Verwendung Smarter Handwerkzeuge und Digitaler Assistenzsysteme unterscheidet sich um 4,3 Punkte und ist nicht statistisch signifikant.

Auffällig ist, dass die Standardabweichung der Belastungsbewertung im positionsgesteuerten Modus im Vergleich zum applikationsgesteuerten Modus deutlich größer ist. Das könnte daran liegen, dass das Positionserkennungssystem nur funktioniert, wenn sich keine physischen Hindernisse zwischen Sensor und Empfänger befinden. Im Großteil der Versuche funktionierte das System zwar einwandfrei, allerdings kam es vereinzelt dazu, dass Probanden den Sensor bei der Schraubaufgabe verdeckten. Dadurch mussten sie die Positionserkennung wiederholt im Digitalen Assistenzsystem überprüfen, was die erhöhte Belastung erklären könnte.

Die Integration Smarter Handwerkzeuge mit Digitalen Assistenzsystemen verbessert somit sowohl die wahrgenommene, kognitive Belastung als auch die Gebrauchstauglichkeit im Vergleich zu papierbasierten Unterlagen und konventionellen Handwerkzeugen – die Hypothese **H5** wird angenommen. Die Nutzung des positionsgesteuerten Modus verbessert die wahrgenommene, kognitive Belastung und Gebrauchstauglichkeit im Vergleich zum applikationsgesteuerten Modus nicht zusätzlich – die Hypothese **H6** wird abgelehnt.

Ergebnisse des applikationsgesteuerten Modus

Der applikationsgesteuerte Modus erzielt in allen Zielgrößen ähnlich große Effekte wie der positionsgesteuerte Modus. Das ist besonders hervorzuheben, da die vergleichbare Leistungsfähigkeit mit einem deutlich geringeren Vorbereitungsaufwand einhergeht. Während im positionsgesteuerten Modus ein technologischer Aufbau und eine Kalibrierung des Positionserkennungssystems

nötig ist, benötigt das Assistenzsystem im applikationsgesteuerten Modus keine zusätzlichen technischen Aufbauten. Der Integrations- und Rechenaufwand der Softwareservices ist zusätzlich deutlich niedriger und die Stabilität des Gesamtsystems ist aufgrund geringerer technologischer Abhängigkeiten höher. Die praktische Relevanz des Betriebsmodus wird deutlich und ist auch insbesondere für Branchen hervorzuheben, die nicht von den hohen Sicherheitsanforderungen des Flugzeugbaus geprägt sind oder auf eine höhere örtliche Flexibilität angewiesen sind.

6.2 Industrieuntersuchung

Dieser Abschnitt beschreibt die durchgeführte Industrieuntersuchung. Unterabschnitt 6.2.1 untersucht die Akzeptanz des integrierten Gesamtsystems mit den Endnutzern und Experten im Flugzeugbau und Unterabschnitt 6.2.2 untersucht die Akzeptanz mit Nutzern und Experten im Handwerk sowie in der Medizintechnik, um die Transfermöglichkeiten zu diskutieren.

6.2.1 Akzeptanz und Nutzen im Flugzeugbau

Um die Relevanz und Akzeptanz der Lösung für die manuellen Montageprozesse im Flugzeugbau zu untersuchen, wurde das Gesamtsystem mit der Positionserkennung, dem Smarten Handwerkzeug und dem Digitalen Assistenzsystem der Montage in der Fertigung eines Flugzeugherstellers aufgebaut und kalibriert. Anschließend wurde das Gesamtsystem drei Strukturmechanikern und drei Experten demonstriert, die durchschnittlich 15 Jahre Erfahrung im Flugzeugbau aufwiesen. Zur Demonstration wurde die Montage eines Fachwerkelements an einer realen Flugzeugsektion erläutert. Die Teilnehmer konnten sowohl das Werkzeug als auch das Assistenzsystem ausprobieren und die grundlegenden Funktionen beider Betriebsmodi testen.

Zur Bewertung der Technologieakzeptanz füllten die Teilnehmer einen TAM-Fragebogen aus, der den wahrgenommenen Nutzen, die wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit, die Einstellung zur Nutzung und das vermutete Nutzungsverhalten untersucht. Zusätzlich konnten sie die Nützlichkeit der einzelnen Funktionen des integrierten Systems bewerten und mögliche Erweiterungsfunktionen angeben. Anhang H zeigt den verwendeten Fragebogen.

Abbildung 6.6 stellt die Ergebnisse der TAM-Untersuchung mit den Endnutzern und Experten im Flugzeugbau dar. Dazu zeigt sie jeweils die Mittelwerte der TAM-Kategorien und im Detail die Nutzenbewertung der einzelnen Funktionen an. Außerdem hebt sie separat die Bewertung der Betriebsmodi hervor. Insgesamt erzielen die Integration Smarter Handwerkzeuge und Digitale Assistenzsysteme im Flugzeugbau einen durchschnittlichen TAM-Wert von 5,5 über alle Fragen und Teilnehmer und eine durchschnittliche Nutzenbewertung von 5,8 über die separate Betrachtung der Funktionen und Betriebsmodi.

Obwohl alle Funktionen eine gute Nutzenbewertung erhalten, wird insbesondere die *interaktive Visualisierung der Werkzeugoperationen* als besonders nützlich wahrgenommen. Interessant ist außerdem, dass der *applikationsgesteuerte Modus* eine höhere Nutzenbewertung erhält als

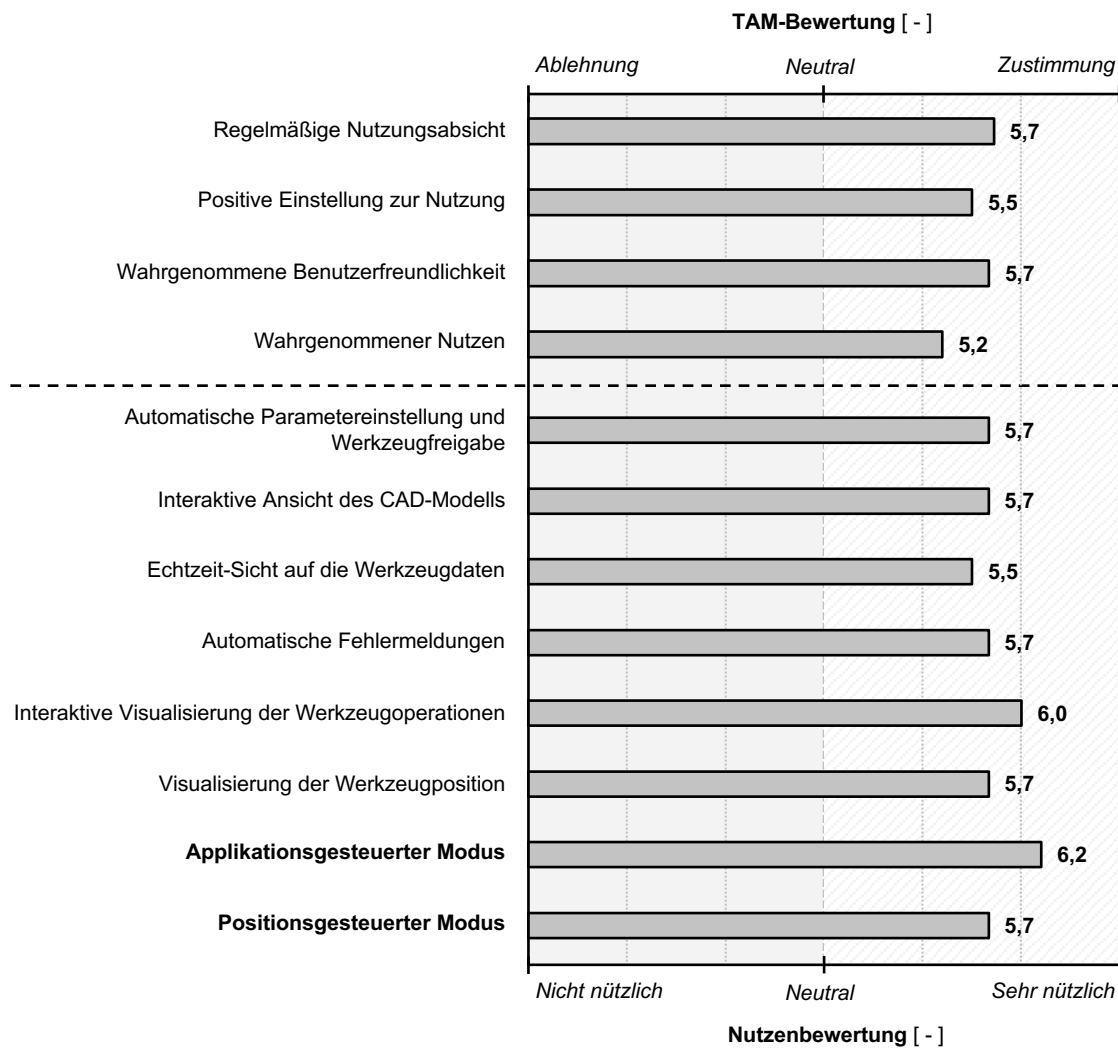


Abbildung 6.6: Akzeptanz und Nutzen im Flugzeugbau (n = 6)

der *positionsgesteuerte Modus*, obwohl er stärker von der aktuellen Arbeitsweise der Strukturmechaniker abweicht. Aufgrund der kleinen Stichproben lassen sich allerdings keine statistisch signifikanten Aussagen dazu treffen. Das integrierte System scheint dennoch, auch ohne Positionserkennungssystem und trotz der häufiger notwendigen Interaktionen mit dem Assistenzsystem, sinnvoll für den Flugzeugbau zu sein.

Die Teilnehmer äußerten in den offenen Fragen keine Wünsche nach zusätzlichen Funktionen. Allerdings interessierten sie sich schon vor Ort dafür, ob zusätzliche Werkzeuge mit in das Digitale Assistenzsystem integriert werden können, um das System in weiteren Anwendungsfällen nutzen zu können. Ein Teilnehmer gab an, dass das Smarte Handwerkzeug eine besser an die Hand angepasste Form benötigt. Der Prototyp besitzt einen Griff aus gedrucktem Filament.

6.2.2 Akzeptanz und Nutzen in anderen Branchen

Um die Relevanz und Akzeptanz der Lösung auch für andere Branchen und Nutzergruppen zu untersuchen, wurde das Gesamtsystem für potenzielle Nutzer im Handwerk und in der Medizintechnik demonstriert und analog mit dem TAM-Fragebogen und der Nutzenbewertung untersucht.

Im Gegensatz zum Flugzeugbau konnte das System nicht vor Ort mit dem Positionserkennungssystem aufgebaut und kalibriert werden. Allerdings kann der applikationsgesteuerte Modus und damit der Großteil der Funktionen auch ohne das System demonstriert werden. Für die Visualisierung der Werkzeugspitze und die positionsabhängige Freigabe des Smarten Handwerkzeugs wurden zusätzlich Videos aus dem Labor gezeigt.

Akzeptanz und Nutzen im Handwerk

Zur Untersuchung des entwickelten Systems im Handwerk wurde es sieben Tischlern und sieben Metallbauern demonstriert. Abbildung 6.7 zeigt die Ergebnisse der durchgeführten Befragung.

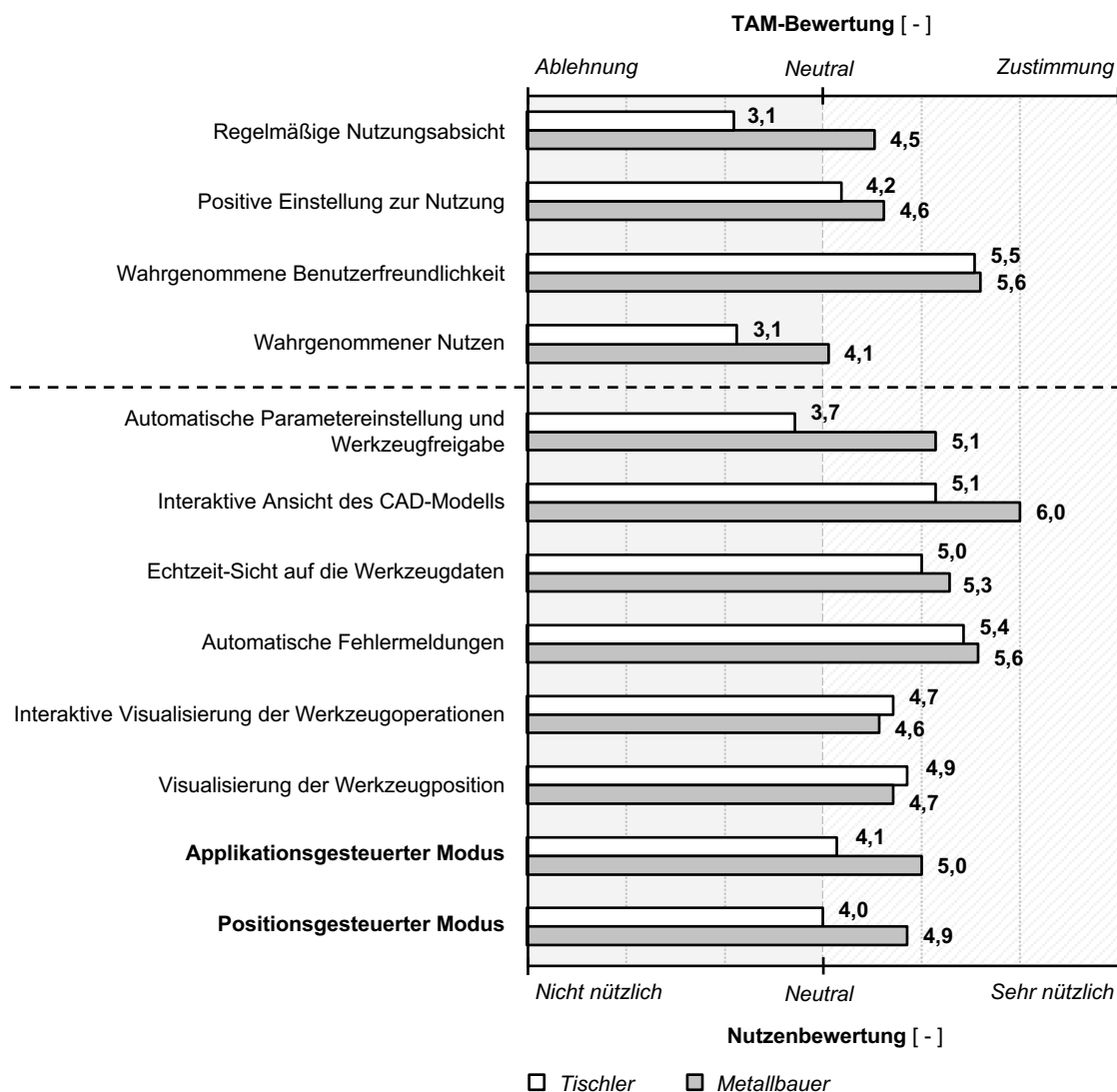


Abbildung 6.7: Akzeptanz und Nutzen im Handwerk (n = 14)

Im Gegensatz zum Flugzeugbau ist das Handwerk in der Regel durch einen niedrigen Wiederholungsgrad und weniger umfangreiche Qualitätsanforderungen gekennzeichnet. Dennoch führen Handwerker grundlegend ähnliche Montageprozesse aus, weshalb ein Transfer der Entwicklung in diese Branche interessant erscheint. Die Ergebnisse zeigen, dass die Integration Smarter Hand-

werkzeuge und Digitaler Assistenzsysteme für das Handwerk sinnvoll sein könnte, im aktuellen und demonstrierten Zustand jedoch Anpassungen erfordert.

Auffällig ist die Diskrepanz zwischen der hoch bewerteten, *wahrgenommenen Benutzerfreundlichkeit* und dem niedrig bewerteten *wahrgenommenen Nutzen* des Systems. Gleichzeitig haben die Handwerker eine leicht *positive Einstellung zur Nutzung* während zumindest die Tischler eine *regelmäßige Nutzungsabsicht* eher ablehnen. Generell scheint das System im aktuellen Zustand für die Metallbauer sinnvoller zu sein als für die Tischler.

Die Nutzenbewertung der Funktionen zeigt hingegen, dass die Handwerker diese großteils als nützlich empfinden. Insbesondere die *interaktive Ansicht des CAD-Modells*, die *automatischen Fehlermeldungen* und die *Echtzeit-Sicht auf die Werkzeugdaten* erzielen höhere Bewertungen. Grundlegend scheint eine Integration von Werkzeugen und Assistenzsystemen also interessant zu sein. Der *applikationsgesteuerte Modus* und der *positionsgesteuerte Modus* werden als ähnlich nützlich empfunden. Die Teilnehmer gaben jedoch an, dass die häufig wechselnden Arbeitsorte und der Aufwand, das Positionserkennungssystem aufzubauen und zu kalibrieren, den Nutzen schnell übersteigen würde. Außerdem müsste häufig flexibel von den Vorgaben im CAD-Modell abgewichen werden, was die Positionserkennung erschweren würde. Das unterstreicht die Relevanz des applikationsgesteuerten Modus.

Zusammenfassend scheint die Integration Smarterer Werkzeuge und Digitaler Assistenzsysteme mit bestimmten Anpassungen grundlegend sinnvoll für das Handwerk zu sein. Die Teilnehmer gaben dazu ausführliche Antworten zu den Erweiterungsmöglichkeiten an. Insbesondere wünschen sich die Handwerker die Integration weiterer Werkzeuge wie bspw. Schlagschrauber, Sägen, Gewindeschneider, Schweißpistolen oder auch von Sensorik zur Abstandsmessung. Außerdem wünschen sie sich die zusätzliche Kontrolle der Bohrtiefe, des Bohrwinkels, der Schweißtemperatur oder auch des Schneidwinkels beim Sägen. Durch den modularen und skalierbaren Aufbau der Softwareplattform können diese Anpassungen aufwandsarm umgesetzt werden.

Akzeptanz und Nutzen in der Montage von Medizintechnik

Die manuelle Montage von Medizintechnik ist, ähnlich zum Flugzeugbau, durch sicherheitsrelevante Qualitäts- und Dokumentationspflichten bei gleichzeitiger Variantenvielfalt gekennzeichnet. Im Gegensatz zum Flugzeugbau sind die Produkte jedoch deutlich kleiner und die Montage findet in der Regel in Fertigungslinien oder Montageinseln mit festen Arbeitsplätzen statt. Die Nutzung und der Transfer der Integration Smarterer Werkzeuge und Digitaler Assistenzsysteme scheint für die Branche grundlegend interessant zu sein.

Zur Untersuchung der Akzeptanz und des Nutzens in der Herstellung von Medizintechnik wurde die Entwicklung drei Ingenieuren mit durchschnittlich zehn Jahren Erfahrung in der Prozessgestaltung zur Herstellung von Medizintechnik demonstriert. Abbildung 6.8 zeigt die Ergebnisse der durchgeführten Befragung.

Die Bewertung der TAM-Kategorien beziehen sich auf die Einschätzung der Experten im Hinblick auf die Mitarbeiter ihrer Abteilungen. Die Einschätzung zeigt, dass die Entwicklungslösung ver-

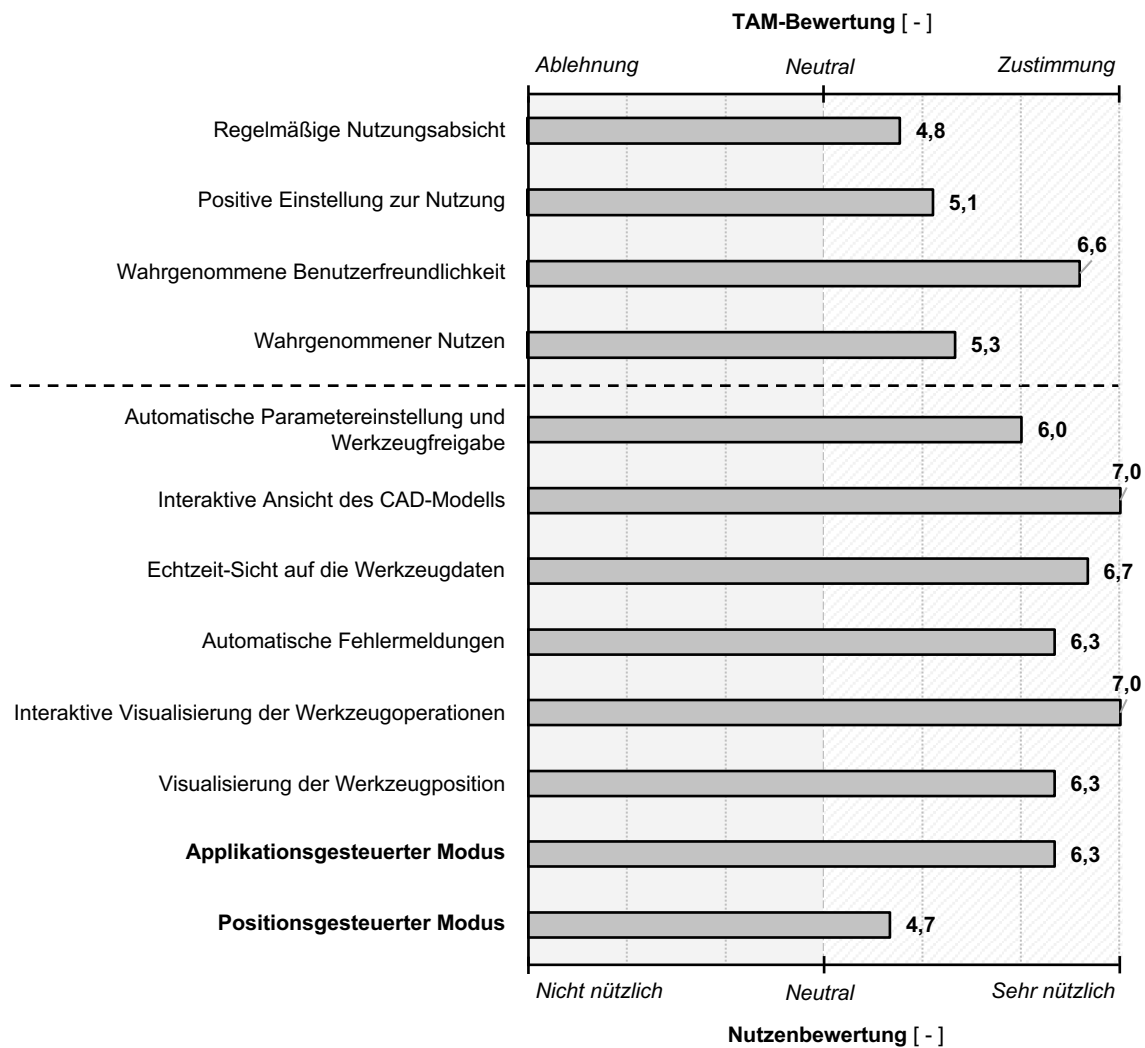


Abbildung 6.8: Akzeptanz und Nutzen in der Medizintechnikmontage (n = 3)

mutlich gut akzeptiert wird und insbesondere eine hohe *wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit* aufweist. Der Nutzen der Einzelfunktionen scheint für die Montageprozesse in der Medizintechnik besonders hoch zu sein. Die *interaktive Visualisierung der Werkzeugoperationen*, die *interaktive Ansicht des CAD-Modells* und die *Echtzeit-Sicht auf die Werkzeugdaten* erhalten besonders hohe Nutzenbewertungen.

Interessant ist, dass der *positionsgesteuerte Modus* eine schlechtere Bewertung erhält als der *applikationsgesteuerte Modus*, obwohl ein Positionserkennungssystem einfach an den Montagearbeitsplätzen angebracht werden könnte und gleichzeitig die Genauigkeit der Dokumentation erhöhen würde. Ein möglicher Grund ist, dass in den Prozessen besonders die Vollständigkeit und Korrektheit der angezogenen Schrauben und nicht zwingend der tatsächliche Ort der Werkzeugoperation dokumentiert werden muss.

Die Integration Smarter Handwerkzeuge und Digitaler Assistenzsysteme scheint großes Potenzial in der Herstellung von Medizintechnik zu haben. Die Nutzenbewertung ist mit einem Mittelwert von 6,3 besonders hoch. Als Erweiterung merken die Teilnehmer an, dass das CAD-Modell sich je nach Arbeitsschritt ebenfalls dynamisch anpassen sollte, da es viele manuelle Prozesse gibt, die das Produkt in der Montagelinie verändern. Außerdem merken sie an, dass auch weitere Werkzeu-

ge ins Digitale Assistenzsystem integriert werden sollten. Beides ist mit der Entwicklungslösung aufwandsarm möglich.

6.3 Bewertung der Zielerfüllung

Dieser Abschnitt bewertet die Zielerfüllung der übergeordneten Ziele zur Verbesserung der Ausgangslage (vgl. Abschnitt 1.1) und des Stands der Technik (vgl. Abschnitt 2.6) und diskutiert dazu die Erfüllung der Anforderungen, die aus der Prozess- und Nutzeranalyse resultieren. Abschließend zieht der Abschnitt ein Fazit, das die Ergebnisse der Labor- und Industrieevaluations beachtet.

Als übergeordnetes Ziel dieser Arbeit sollte die Produktivität und Qualität manueller Montageprozesse im Flugzeugbau verbessert werden. Dazu sollte ein Digitales Assistenzsystem für die Montage entwickelt werden, das einerseits Informationen kontextgerecht und gefiltert bereitstellt und andererseits Schnittstellen zu dem Smarten Handwerkzeug umfasst. Außerdem sollte ein Smartes Handwerkzeug mit einem Industriepartner entwickelt werden, das Daten über Sensoren auslesen und über Aktoren einstellen kann. Über eine Softwareplattform sollten die Teilsysteme integriert werden, um ein digitales Poka-Yoke-System zu ermöglichen, das Prozessfehler vermeidet und die Dokumentationspflichten des Flugzeugbaus erfüllt. Um eine flexible Nutzung des integrierten Systems zu gewährleisten, ohne zusätzliche Aufwände für die Inhaltserstellung zu erzeugen, sollte ein Digitales Assistenzsystem für die Arbeitsvorbereitung entwickelt werden, das alle notwendigen Daten erzeugt, konsolidiert und verteilt.

Um das System praxisnah zu entwickeln sollten die Anforderungen der Prozesse im Flugzeugbau untersucht werden. Außerdem sollten die Anforderungen der Nutzer über einen menschenzentrierten Entwicklungsansatz beachtet werden, um die Akzeptanz und die tatsächliche Nutzung der Entwicklung zu erhöhen.

Digitales Assistenzsystem für die Arbeitsvorbereitung

Das Digitale Assistenzsystem für die Arbeitsvorbereitung soll die Inhalte für das Montageassistenzsystem und das Smarte Handwerkzeug einfach und digital erstellen können, ohne zusätzliche Aufwände für die indirekten Bereiche zu erzeugen (vgl. Anforderung **P1**). Außerdem soll es ermöglichen, wichtige Inhalte mit dem CAD-Modell zu verknüpfen (vgl. Anforderung **N3**). Das entwickelte Assistenzsystem ermöglicht es, Arbeitsschritte teilautomatisiert aus bestehenden Daten eines ERP-Systems zu erzeugen oder diese generisch und manuell anzulegen. Außerdem kann es die Werkzeugoperationen aus der Kombination des CAD-Modells und einer Nietliste teilautomatisiert erzeugen und mit den Arbeitsschritten verknüpfen. Zusätzlich bietet es Funktionen zur Konsolidierung der Inhalte und zum Überprüfen der korrekten Verknüpfung am CAD-Modell.

Die Anforderungen werden mit diesen Funktionen grundlegend erfüllt und wurden anhand praktischer Daten im Flugzeugbau und anhand generischer Daten in den Laborversuchen und Demonstrationen validiert. Eine Evaluation des Assistenzsystems wurde nicht durchgeführt, jedoch ver-

deutlichen die Erkenntnisse der PERT-Analyse (vgl. Tabelle 3.1) das Potenzial deutlich. Für eine vollautomatisierte digitale Prozesskette muss die Lösung an die Schnittstellen und Datengrundlagen des jeweiligen Unternehmens angepasst und auf weitere Produktionsnormen ausgeweitet werden.

Digitales Assistenzsystem für die Montage

Das Digitale Assistenzsystem für die Montage soll eine einfache und kontextgerechte Informationsbereitstellung für die Werker ermöglichen (vgl. Anforderung **P2**) und dazu das CAD-Modell anzeigen und wichtige Informationen direkt an diesem verorten (vgl. Anforderung **N3**). Diese Anforderungen werden vollständig vom entwickelten Assistenzsystem erfüllt. Der Arbeitsplan, die interaktive Darstellung der Werkzeugoperationen und ihrer Prozessparameter, die Echtzeit-Darstellung der Werkzeugdaten und die Navigationsmöglichkeiten des CAD-Modells zeigen die notwendigen Informationen der aktuellen Arbeitsaufgabe kontextgerecht und übersichtlich an. Die Funktionen des Assistenzsystems erzielen hohe Nutzenbewertungen im Flugzeugbau, im Handwerk und in der Medizintechnik.

Smartes Handwerkzeug

Das Smarte Handwerkzeug soll mit Werkzeugaufsätzen sowohl bohren als auch nieten können, um möglichst flexibel nutzbar zu sein und Handhabungsaufwände zu reduzieren (vgl. Anforderung **P3**). Es soll außerdem mit der notwendigen Sensorik und Aktorik ausgestattet sein, um die wichtigsten in der Nutzeranalyse identifizierten Einflussfaktoren der Werkzeuge-Domäne zu unterstützen (vgl. Anforderung **N1**). Das Smarte Handwerkzeug wurde vom Unternehmen **Lübbering** entwickelt, aber kollaborativ gestaltet. Der Prototyp kann verschiedene Werkzeugaufsätze nutzen und deren Daten dynamisch an die Softwareplattform weiterleiten. Außerdem kann er den Durchmesser, die Drehgeschwindigkeit und die Position der Werkzeugspitze übermitteln und über Datenpakete von der Softwareplattform freigegeben oder gesperrt werden. Noch nicht erfasst und kontrolliert wird der Bohrwinkel, die Bohrtiefe und die Vorschubkraft während der Werkzeugoperationen.

Zusätzliche Sensoren und Aktoren würden die Kontrolle dieser Einflussfaktoren grundsätzlich ermöglichen, müssen aber zuerst im Werkzeug sinnvoll und platz- sowie gewichtsparend verbaut werden. Zur Verarbeitung der Daten müsste dann der Service *Parameterkontrolle und Werkzeugfreigabe* erweitert werden. Als Datengrundlage können sowohl der Bohrwinkel als auch die jeweilige Bohrtiefe aus dem CAD-Modell und der Nietliste hergeleitet werden. Für eine In-Prozess-Steuerung müsste der Vorschub und die Bohrtiefe auch während der Werkzeugoperation überprüft und beim Erreichen definierter Grenzwerte gesteuert werden. Die gesetzten Anforderungen werden vom entwickelten, Smarten Handwerkzeug also grundlegend erfüllt, müssen aber noch erweitert werden, um die Einflussfaktoren vollständig kontrollieren zu können.

Softwareplattform

Die Softwareplattform soll die Digitalen Assistenzsysteme und das Smarte Handwerkzeug integrieren und Services bereitstellen, um die Fehlerursachen manueller Montageprozesse im Flugzeugbau zu kontrollieren (vgl. Anforderung **P4**). Die Softwareplattform soll außerdem funktional skalierbar sein, um bspw. zusätzliche Werkzeuge oder Messmittel und dazugehörige Services zu integrieren (vgl. Anforderung **N4**). Abschließend soll sie eine möglichst niedriglatente Kommunikation der Datenpakete zwischen Werkzeug und Services ermöglichen, um die Akzeptanz der Lösung zu steigern (vgl. Anforderung **N2**).

Die entwickelte Softwareplattform erfüllt die gestellten Anforderungen vollständig. Über drei zentrale Services können die Fehlerursachen der manuellen Montageprozesse im Flugzeugbau kontrolliert werden. Dazu können Werkzeugfehler frühzeitig erkannt, Prozessparameter kontrolliert und mit einer Werkzeugfreigabe übermittelt werden. Zudem können Rückmeldedaten zu den Werkzeugoperationen analysiert und dokumentiert werden. Die Softwareplattform nutzt modulare Schnittstellen für die Netzwerkprotokolle und ermöglicht somit die Anpassung der Protokoll-Stacks an die individuellen Anforderungen der Datenströme. Außerdem ist sie funktional skalierbar und kann aufwandsarm neue Schnittstellen, Services, Datenbanken oder Applikationen integrieren.

Fazit

Die Teilsysteme erfüllen die Anforderungen der Prozess- und Nutzeranalyse weitestgehend und sind so gestaltet, dass zusätzliche Funktionen hinzugefügt werden können. Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen zeigen, dass die Produktivität und Qualität manueller Montageprozesse signifikant durch die Integration Smarter Handwerkzeuge und Digitaler Assistenzsysteme gesteigert werden kann. Außerdem machen sie deutlich, dass die Gebrauchstauglichkeit und die kognitive Belastung bei der Nutzung der entwickelten Systeme signifikant verbessert werden kann.

Die Ergebnisse der Industrieuntersuchung zeigen, dass die Werker im Flugzeugbau die Lösung akzeptieren und gerne regelmäßig mit dieser arbeiten würden. Außerdem zeigen sie, dass der Nutzen der entwickelten Teilfunktionen als hoch angesehen wird. Der Transfer der Ergebnisse scheint insbesondere für die Herstellung von Medizintechnik einfach möglich zu sein, aber auch für das Handwerk mit bestimmten Anpassungen und der Integration weiterer Werkzeuge sinnvoll zu sein. Das entwickelte Gesamtsystem leistet damit einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung manueller Arbeitsprozesse – die Arbeit erfüllt die übergeordneten Ziele.

7 Schlussbetrachtung

Dieses Kapitel fasst die Inhalte und Ergebnisse dieser Arbeit zusammen und gibt abschließend einen Ausblick für Industrie und Forschung, um einerseits die Weiterentwicklung des Forschungsthemas und andererseits die industrielle Implementierung der Technologien zu fördern.

7.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit entwickelt ein Konzept zur Integration von Smarten Handwerkzeugen und Digitalen Assistenzsystemen und setzt dieses anhand einer Technologieentwicklung um. Ziel der Entwicklung ist es, die Produktivität und Qualität bei der manuellen Montage komplexer und variantenreicher Produkte zu verbessern. Insbesondere im Flugzeugbau resultieren durch die Nutzung papierbasierter Unterlagen und konventioneller Handwerkzeuge entweder hohe Aufwände für die Informationsbeschaffung oder hohe Fehlerpotenziale bei der Durchführung technologisch anspruchsvoller Werkzeugoperationen.

Eine Analyse der Praxis zeigt die bestehenden Probleme der aufwändigen Arbeitsvorbereitung, der Bereitstellung komplexer Unterlagen und der manuellen Montage im Flugzeugbau auf und leitet gezielte Anforderungen an die Entwicklung ab. Eine Analyse der Nutzeranforderungen verdeutlicht die Einflussfaktoren in den manuellen Montageprozessen und bewertet das Unterstützungspotenzial und die Akzeptanz digitaler Assistenztechnologien zur Beherrschung dieser Einflussfaktoren, um die Technologieentscheidung zu fundieren und weitere Anforderungen an die Entwicklung abzuleiten.

Die Integration von Smarten Handwerkzeugen und Digitalen Assistenzsystemen ermöglicht es, Synergien der Teilsysteme zu nutzen, um produktivitäts- und qualitätssteigernde Funktionen zu ermöglichen. Die Arbeit konzipiert dazu ein vierstufiges Integrationsvorgehen, das Smarte Handwerkzeuge mit Digitalen Assistenzsystemen in einer Softwareplattform integriert, um diese Funktionen gezielt umzusetzen. Sie validiert das Vorgehen anhand der Entwicklung und Integration der im Folgenden beschriebenen Teilsysteme.

Ein *Digitales Assistenzsystem für die Montage* unterstützt die Werker mit der kontextgerechten Filterung und Darstellung von Informationen zum Produkt, zum Arbeitsschritt und insbesondere zu den durchzuführenden Werkzeugoperationen. Diese sind am CAD-Modell des Produktes visualisiert und aktualisieren ihren Zustand interaktiv zum aktuellen Produktionskontext. Das Assistenzsystem visualisiert außerdem die aktuellen Prozessparameter und Daten des Werkzeugs.

Das entwickelte *Smarte Handwerkzeug* kann verschiedene Werkzeugaufsätze ausrüsten, um Prozessparameter wie den Durchmesser beim Bohren oder das Drehmoment beim Schrauben anzupassen. Abhängig von diesen Parametern und der Werkzeugposition, oder der durch das As-

sistenzsystem vorgegebenen Werkzeugoperation, wird das Smarte Handwerkzeug gesperrt oder freigegeben. Zusätzlich kann es Prozessparameter wie die Drehgeschwindigkeit dynamisch anpassen und die durchgeführten Werkzeugoperationen dokumentieren. Das Werkzeug unterstützt die Werker so bei der Vermeidung von Prozessfehlern und bei der luftfahrtgerechten Dokumentation.

Für die integrierte und kontextgerechte Nutzung des Digitalen Assistenzsystems für die Montage und des Smarten Handwerkzeugs können zwei Betriebsmodi verwendet werden. Der *applikationsgesteuerte Modus* gibt den Nutzern die nächste durchzuführende Werkzeugoperation anhand des CAD-Modells vor und stellt die Prozessparameter und Werkzeugfreigabe somit entsprechend der Bearbeitungsreihenfolge ein. Der *positionsgesteuerte Modus* identifiziert die vom Nutzer beabsichtigte Werkzeugoperation anhand der übermittelten Koordinaten der Werkzeugspitze und stellt die Prozessparameter und Werkzeugfreigabe somit entsprechend der Werkzeugposition ein.

Um diese Funktionen und Synergien zu ermöglichen, integriert eine *Softwareplattform* die Teilsysteme über Schnittstellen, Datenbanken und Services. Sie empfängt und verarbeitet die Datenpakete des Digitalen Assistenzsystems und des Smarten Handwerkzeugs und ermöglicht es, Werkzeugfehler frühzeitig zu erkennen, Prozessfehler über den Abgleich der Ist-Parameter des Werkzeugs mit den Soll-Parametern des aktuellen Kontexts zu vermeiden und Rückmeldedaten des Werkzeugs zu analysieren und zu dokumentieren. Die Softwareplattform bildet somit die zentrale Schnittstelle, um die Daten des Kontextes sensorisch zu erfassen und zu nutzen und die Inhalte dynamisch für die Smarten Handwerkzeuge zu nutzen.

Um die Inhalte zu erstellen, ermöglicht es ein *Digitales Assistenzsystem für die Arbeitsvorbereitung* die Arbeitsschritte und Werkzeugoperationen auf der Grundlage von exportierten ERP- und CAD-Daten teilautomatisiert zu erstellen. Außerdem stellt das Assistenzsystem Funktionen bereit, um die Inhalte zu konsolidieren und zu verteilen.

Die Evaluation der prototypischen Gesamtentwicklung weist mit einer Laborstudie nach, dass die Produktivität und die Qualität im Vergleich zu papierbasierten Unterlagen und konventionellen Handwerkzeugen gesteigert wird. Sie zeigt weiterhin, dass die kognitive Belastung sinkt und weist die Gebrauchstauglichkeit der Entwicklung nach. Beide Betriebsmodi erzielen ähnlich hohe Effekte auf die Zielgrößen. Besonders hervorzuheben ist der applikationsgesteuerte Modus, da er mit deutlich geringerem Vorbereitungsaufwand und somit größerer Flexibilität den Großteil der Prozessfehler in manuellen Montageprozessen verhindern kann.

Über mehrere industrielle Demonstrationen und Befragungen zeigt die Evaluation außerdem, dass die Nutzer im Flugzeugbau die Lösung akzeptieren und als nützlich empfinden und dass die Lösung neben dem Flugzeugbau auch in anderen Branchen sinnvoll erscheint.

7.2 Ausblick für Industrie und Forschung

Die vorliegende Arbeit verdeutlicht die Potenziale der Integration von Smarten Handwerkzeugen und Digitalen Assistenzsystemen. Das resultierende Konzept ist vielversprechend und sollte weiter wissenschaftlich erforscht und in der Industrie implementiert werden.

Die prototypische Entwicklungslösung sollte in einer industriellen Einsatzumgebung getestet werden, um die im Labor gefundenen Effekte zu bestätigen und zusätzliche Anforderungen zu erheben, die für eine industrielle und vertriebsfähige Lösung notwendig sind. Neben der Ausweitung der Entwicklungslösung auf weitere Anwendungsszenarien sollten verschiedene Elemente der Teilsysteme weiter erforscht werden.

Das Smarte Handwerkzeug sollte mit zusätzlicher Sensorik ausgestattet werden, um den Bohrwinkel zu erfassen und zu übertragen. Außerdem sollten Möglichkeiten erforscht werden, um die Durchführung der Werkzeugoperationen zu kontrollieren, also insbesondere die Vorschubkraft und die Bohrtiefe zu steuern. Dazu ist eine sensorische und aktorische Aufrüstung des Werkzeugs naheliegend, allerdings muss dabei das Gewicht und die Größe des Werkzeugs beachtet werden.

Die Softwareplattform bietet die Möglichkeit, weitere Systeme zu integrieren, um zusätzliche Potenziale zu erzeugen. Diese Potenziale sollten weiter erforscht werden, weil die Industrieuntersuchung zeigt, dass der Bedarf nach weiteren Werkzeugen hoch ist. Zusätzlich zeigt die Nutzeranalyse, dass weitere Assistenztechnologien wie die Projektionstechnologie oder smarte Messmittel einen hohen Nutzen und eine hohe Akzeptanz erzielen.

Der positionsgesteuerte Modus bietet Potenzial zur Weiterentwicklung. Die Evaluation zeigt, dass die Kontrolle der Werkzeugposition die Anzahl der Prozessfehler potenziell stärker reduziert als im applikationsgesteuerten Modus. Dazu sollte Möglichkeiten erforscht werden, die stetig erforderliche direkte Sichtverbindung zwischen Sendern und Empfängern zu umgehen. Für manuelle Montageprozesse mit hohem Wiederholungsgrad ist außerdem denkbar, dass sich die Produktivität im Vergleich zum applikationsgesteuerten Modus weiter erhöht.

Der applikationsgesteuerte Modus zum Betrieb des integrierten Systems bietet ebenfalls Potenzial zur Weiterentwicklung. Die Evaluation verdeutlicht, dass die Produktivitätsverbesserungen ähnlich stark wie im positionsgesteuerten Modus sind. Sie zeigt weiterhin, dass der Großteil der Qualitätsverbesserungen auch ohne das Positionserkennungssystem erzielt wird und dass die Werker im Flugzeugbau, im Handwerk und in der Medizintechnik den Modus als nützlicher empfinden. Der applikationsgesteuerte Modus bietet zudem die Möglichkeit, die Bearbeitungsreihenfolge vorzugeben und diese somit bezüglich verschiedener Zielgrößen zu optimieren.

Über die Analyse der kommunizierten Datenpakete zwischen den Teilsystemen ist es denkbar, dass die Produktivität, Qualität und Ergonomie auch prozessübergreifend verbessert wird. Dazu müsste eine Vielzahl von Digitalen Assistenzsystemen und Smarten Handwerkzeugen miteinander vernetzt werden, um die Zielgrößen über die dynamische und individuelle Zuweisung von Arbeitsschritten oder Werkzeugoperationen zu optimieren.

Zuerst muss eine Softwareplattform und die dazugehörige Infrastruktur in den Unternehmen aufgebaut werden. Die vorliegende Arbeit bietet dazu ein Vorgehen zur Integration der Teilsysteme und beschreibt detailliert, wie eine solche Plattform aussehen kann. Weiterhin muss das Digitale Assistenzsystem für die Arbeitsvorbereitung so weiterentwickelt werden, dass es anstelle der Import-Funktionen direkte Schnittstellen zu den ERP- und CAD-Systemen umfasst, um auch die Konsolidierung der Daten zu vereinfachen. Abschließend müssen die Algorithmen auf alle notwendigen Produktionsnormen ausgeweitet werden, um eine durchgängige, digitale Prozess-

kette von der Arbeitsvorbereitung bis zur individuellen Dokumentation der Werkzeugeingriffe zu ermöglichen.

Zusammenfassend zeigt das entwickelte Konzept wesentliche Potenziale und Chancen auf, die sowohl für die weitere wissenschaftliche Erforschung als auch für die Implementierung in der Industrie strategisch relevant sind.

Literaturverzeichnis

- [AG15] Airbus-Gruppe: Qualität - Besser Bohren. *ONE - Airbus News for Airbus People*, 2015.
- [Apt18] Apt, W.: Einsatz von digitalen Assistenzsystemen im Betrieb - Forschungsbericht 502 im Auftrag des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales. Technischer Bericht 502, 2018.
- [Baue14] Bauernhansl, T.; Ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B., Hrsg.: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung · Technologien · Migration*. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2014.
- [Bell24] Bellagente, P.; Iacono, S.D.; Depari, A.; Ferrari, P.; Flammini, A.; Pasetti, M.; Rinaldi, S.; Sisinni, E.: On the use of LPWAN for enabling connected power tools: the LoRaWAN case. In *2024 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, S. 1–6. 2024.
- [Bend21] Bender, M.; Kirdan, E.; Pahl, M.O.; Carle, G.: Open-Source MQTT Evaluation. In *2021 IEEE 18th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, S. 1–4. 2021.
- [Bert21] Bertram, P.: *Entwicklung eines kontextsensitiven, modularen Assistenzsystems für manuelle Tätigkeiten*. VDI Verlag, 2021.
- [Bjer55] Bjerner, B.; Holm, A.; Swensson, A.: Diurnal Variation in Mental Performance: A Study of Three-shift Workers. *Occupational and Environmental Medicine*, 12(2):103–110, 1955.
- [Bokr06] Bokranz, R.; Landau, K.: *Produktivitätsmanagement von Arbeitssystemen: MTM-Handbuch*. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 2006.
- [Bokr12] Bokranz, R.; Landau, K.: *Handbuch Industrial Engineering: Produktivitätsmanagement mit MTM. Bd. 1: Konzept*, Band 1. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 2., überarb. und erw. Aufl., 2012.
- [Born20] Bornwasser, M.; Hinrichsen, S.: *Informatrische Assistenzsysteme in der variantenreichen Montage*, 2020.
- [Bort10] Bortz, J.; Schuster, C.: *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*. Springer-Lehrbuch. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [Broo95] Brooke, J.: SUS: A quick and dirty usability scale. *Usability Eval. Ind.*, 189, 1995.
- [Bros19] Brosche, J.: *Stellgrößen der Qualität - Internes Forschungspapier*, Technische Universität Hamburg, 2019.
- [Brun16] Brunner, F.J.; Wagner, K.W.: *Qualitätsmanagement: Leitfaden für Studium und Praxis*. Praxisreihe Qualitätswissen. Hanser, München, 6., überarbeitete Auflage, 2016.
- [Caro13] Caro, N.; Colitti, W.; Mangino, G.; Reali, G.: Comparison of two lightweight protocols for smartphone-based sensing. *Communications and Vehicular Technology in the Benelux (SCVT)*, S. 1–6, 2013.

- [Chen21] Chen, T.Y.; Chiu, Y.C.; Bi, N.; Tsai, R.T.H.: Multi-Modal Chatbot in Intelligent Manufacturing. *IEEE Access*, 9:82118–82129, 2021.
- [Coll24] Collier, C.; Lassiter, T.; Fleischmann, K.R.; Greenberg, S.R.; Longoria, R.; Chinchali, S.: AI as an Emancipatory Technology: Smart Hand Tools for Skilled Trade Workers. 2024.
- [Dari03] Dario, P.; Hannaford, B.; Menciassi, A.: Smart surgical tools and augmenting devices. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 19(5):782–792, 2003.
- [Davi85] Davis, F.: A Technology Acceptance Model for Empirically Testing New End-User Information Systems. 1985.
- [Dey00] Dey, A.; Abowd, G.: *Towards a Better Understanding of Context and Context-Awareness*. 2000. Journal Abbreviation: Technical report git-gvu-99-22.
- [DIN15a] DIN: Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen (ISO 9001:2015); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 9001:2015, 2015.
- [DIN15b] DIN: Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2015); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 9000:2015, 2015.
- [DIN18] DIN: Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen an Organisationen der Luftfahrt, Raumfahrt und Verteidigung; Deutsche und Englische Fassung EN 9100:2018, 2018.
- [DIN20] DIN: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 110: Interaktionsprinzipien (ISO 9241-110:2020); Deutsche Fassung EN ISO 9241-110:2020, 2020.
- [Domb88] Dombrowski, U.: *Qualitätssicherung im Terminwesen der Werkstattfertigung*, Band 159 von *Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 2, Fertigungstechnik*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1988.
- [Dör19] Dörr, M.; Ries, M.; Gwosch, T.; Matthiesen, S.: Recognizing Product Application based on Integrated Consumer Grade Sensors: A Case Study with Handheld Power Tools. *Procedia CIRP*, 84:798–803, 2019.
- [Elza24] Elzalabany, A.: *A Digital Assistance System for Maritime Commissioning Processes*. Dissertation, Technische Universität Hamburg, 2024.
- [Engm18] Engmann, K.: *Technologie des Flugzeuges*. Vogel Buchverlag, Würzburg, GERMANY, 2018.
- [Firo20] Firouzi, F.; Chakrabarty, K.; Nassif, S., Hrsg.: *Intelligent Internet of Things: From Device to Fog and Cloud*. Springer International Publishing, Cham, 2020.
- [Funk15] Funk, M.; Mayer, S.; Schmidt, A.: Using In-Situ Projection to Support Cognitively Impaired Workers at the Workplace. In *Proceedings of the 17th International ACM SIGACCESS Conference on Computers & Accessibility*, ASSETS '15, S. 185–192. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2015.
- [Glö20] Glöckner, R.: *Entwicklung eines Gesamtmodells der Arbeitsproduktivität und der logistischen Zielgrößen*. Dissertation, Technische Universität Hamburg, 2020.
- [Grab20] Grabner, C.: *Methodengestütztes Produktivitätsmanagement - Entwicklung eines datenbasierten Vorgehens*. Dissertation, Technische Universität Hamburg, 2020.
- [Gros18] Grosch, T.; Metternich, J.; Abele, E.; Schaupp, E.; Landfried, K.C.; Großkurth, D.; Hofmann, K.; Wieschollek, M.; Ebben, A.; Schloen, J.; Ziegltrum, F.; Gutmacher, M.; Schwennig, B.: *Intelligente Werkzeuge für die vernetzte Produktion von morgen - SmartTool (Abschlussbericht)*. 2018.

- [Hala18] Halata, P.S.: *Augmented-Reality-gestützte Informationsbereitstellung für die Unikaterzeugung*. Dissertation, Technische Universität Hamburg, 2018.
- [Hart88] Hart, S.G.; Staveland, L.E.: Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In *Advances in Psychology*, Band 52, S. 139–183. Elsevier, 1988.
- [Hein21] Heinz, M.; Büttner, S.; Jenderny, S.; Röcker, C.: Dynamic Task Allocation based on Individual Abilities - Experiences from Developing and Operating an Inclusive Assembly Line for Workers With and Without Disabilities. *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.*, 5(EICS), 2021.
- [Hevn10] Hevner, A.; Chatterjee, S.: Design Science Research in Information Systems. In A. Hevner; S. Chatterjee, Hrsg., *Design Research in Information Systems: Theory and Practice*, S. 9–22. Springer US, Boston, MA, 2010.
- [Hintr16] Hinrichsen, S.; Riediger, D.; Unrau, A.: Assistance Systems in Manual Assembly. *Production Engineering and Management*, (01), 2016.
- [Hintr17] Hinrichsen, S.; Riediger, D.; Unrau, A.: Development of a projection-based assistance system for maintaining injection molding tools. In *2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, S. 1571–1575. 2017.
- [Hins12] Hinsch, M.: *Industrielles Luftfahrtmanagement*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012.
- [Hins13] Hinsch, M.; Olthoff, J., Hrsg.: *Impulsgeber Luftfahrt: Industrial Leadership durch luftfahrtspezifische Aufbau- und Ablaufkonzepte*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [Hins14] Hinsch, M.: *Qualitätsmanagement in der Luftfahrtindustrie: Ein Praxisleitfaden für die Luftfahrtnorm EN 9100*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [Hins23] Hinsch, M.: *Der EASA Part 21/G (Herstellung): Die Herstellung im europäischen Luftrecht für behördlich genehmigte Betriebe und deren Zulieferer*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2023.
- [Hint19] Hintze, W.; Lödding, H.; Friedewald, A.; Mehnen, J.P.; Romanenko, D.; Möller, C.; Brillinger, C.; Sikorra, J.N.: Digital assistance systems for smart drilling units in aircraft structural assembly. S. 255–266. Shaker Verlag, 2019.
- [Ho24] Ho, C.L.D.; Lung, C.; Mao, Z.: Comparative Analysis of Real-Time Data Processing Architectures: Kafka versus MQTT Broker in IoT. In *2024 IEEE 4th International Conference on Electronic Communications, Internet of Things and Big Data (ICEIB)*, S. 321–326. 2024.
- [Hold17] Hold, P.; Erol, S.; Reisinger, G.; Sihm, W.: Planning and Evaluation of Digital Assistance Systems. *Procedia Manufacturing*, 9:143–150, 2017.
- [Horn24] Hornstein, F.: *Digitale Arbeitsvorbereitung für manuelle Arbeitsprozesse im Flugzeugbau*, 2024. Masterarbeit (Betreuer: S. Piontek; Prüfer: H. Lödding).
- [ISO18] ISO: 30141:2018 Internet of Things (IoT) — Reference Architecture, 2018.
- [Ivan24] Ivanišević, A.; Boban, Z.; Jurić, J.; Vukojević, K.: Smart Drill for a Streamlined Estimation of the Drilling Angle and Channel Length in Orthopedic Surgical Procedures. *Bioengineering*, 11(6):630, 2024.

- [Jaco19] Jacobsen, J.; Meyer, L.: *Praxisbuch Usability & UX*. Rheinwerk Computing. Rheinwerk Verlag, Bonn, 2., aktualisierte und erweiterte auflage Aufl., 2019.
- [Jain21] Jain, S.; Murugesan, S., Hrsg.: *Smart Connected World: Technologies and Applications Shaping the Future*. Springer International Publishing, Cham, 2021.
- [Jesk21] Jeske, T.; Lennings, F., Hrsg.: *Produktivitätsmanagement 4.0: Praxiserprobte Vorgehensweisen zur Nutzung der Digitalisierung in der Industrie*. ifaa-Edition. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2021.
- [Kell19] Keller, T.; Bayer, C.; Bausch, P.; Metternich, J.: Benefit evaluation of digital assistance systems for assembly workstations. *Procedia CIRP*, 81:441–446, 2019.
- [Kell22] Kellner, F.; Lienland, B.; Lukesch, M.: *Produktionswirtschaft: Planung, Steuerung und Industrie 4.0*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2022.
- [Klep20] Kleppmann, W.: *Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren*. Praxisreihe Qualität. Hanser, München, 10., überarbeitete auflage Aufl., 2020.
- [Koch23] Koch, J.; Büchse, C.; Schüppstuhl, T.: Development and integration of a workpiece-based calibration method for an optical assistance system. *Applied Sciences (Basel)*, 13(13), 2023.
- [Lian23] Liang, W.Y.; Yuan, Y.; Lin, H.J.: A Performance Study on the Throughput and Latency of Zenoh, MQTT, Kafka, and DDS, 2023.
- [Lott12] Lotter, B.; Wiendahl, H.P., Hrsg.: *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012.
- [Luzu15] Luzuriaga, J.; Boronat, P.; Perez, M.; Calafate, C.; Cano, J.C.; Manzoni, P.: *A comparative evaluation of AMQP and MQTT protocols over unstable and mobile networks*. 2015.
- [Löd14] Lödding, H.: Gedanken zu einem abgestimmten Management von Kosten, Zeit und Qualität. In G. Schuh; V. Stich, Hrsg., *Enterprise -Integration: Auf dem Weg zum kollaborativen Unternehmen*, EBL-Schweitzer, S. 23–35. Springer, Dordrecht, online-ausg Aufl., 2014.
- [Mahm15] Mahmoud, R.; Yousuf, T.; Aloul, F.; Zualkernan, I.: Internet of things (IoT) security: Current status, challenges and prospective measures. In *2015 10th International Conference for Internet Technology and Secured Transactions (ICITST)*, S. 336–341. IEEE, London, United Kingdom, 2015.
- [Malc59] Malcolm, D.G.; Roseboom, J.H.; Clark, C.E.; Fazar, W.: Application of a Technique for Research and Development Program Evaluation. *Operations Research*, 7(5):646–669, 1959.
- [Mark21] Mark, B.G.; Rauch, E.; Matt, D.T.: Worker assistance systems in manufacturing: A review of the state of the art and future directions. *Journal of Manufacturing Systems*, 59:228–250, 2021.
- [Maty13] Matyas, K.: *Instandhaltungslogistik: Qualität und Produktivität steigern*. Hanser, München, 5., überarb. aufl Aufl., 2013. Publication Title: Instandhaltungslogistik.
- [Melu22] Meluzov, N.: *Informationsmanagement für ein digitales Instandhaltungsassistenzsystem*. Dissertation, Technische Universität Hamburg, 2022.
- [Müh20] Mühlbauer, N.; Kirdan, E.; Pahl, M.O.; Carle, G.: Open-Source OPC UA Security and Scalability. In *2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Band 1, S. 262–269. 2020.

- [Mül18] Müller, R.; Vette-Steinkamp, M.; Hörauf, L.; Speicher, C.; Bashir, A.: Worker centered cognitive assistance for dynamically created repairing jobs in rework area. *Procedia CIRP*, 72:141–146, 2018.
- [Naka88] Nakajima, S.: *Introduction to TPM: Total productive maintenance*. Productivity Press, Cambridge, Mass., 1988.
- [Nebl11] Nebl, T.: *Produktionswirtschaft*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2011.
- [Pan24] Pan, L.; Wu, D.; Huang, B.: Comprehensive High-Reliability Intelligent Tightening Control System. *International Journal of Frontiers in Engineering Technology*, 6(2), 2024.
- [Parm18] Parmar, C.M.; Gupta, P.; Bharadwaj, K.S.; Belur, S.S.: Smart work-assisting gear. In *2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, S. 724–728. 2018.
- [Pion22] Piontek, S.; Lödding, H.: User-Centric Digital Assistance with Smart Tools for Manual Assembly Processes. In D.Y. Kim; G. von Cieminski; D. Romero, Hrsg., *Advances in Production Management Systems. Smart Manufacturing and Logistics Systems: Turning Ideas into Action*, S. 101–109. Springer Nature Switzerland, Cham, 2022.
- [Pion23] Piontek, S.; Schütze, M.; Lödding, H.: Digital assistance for aircraft manufacturing – process requirements and technologies. *Procedia CIRP*, 120:105–110, 2023.
- [Pion24] Piontek, S.; Gäbler, M.; Lödding, H.: Integration of smart hand tools and digital assistance systems. *Procedia CIRP*, 130:427–435, 2024.
- [Rome22] Romero, D.; Gaiardelli, P.; Powell, D.J.; Zanchi, M.: Intelligent Poka-Yokes: Error-Proofing and Continuous Improvement in the Digital Lean Manufacturing World. In D.Y. Kim; G. Von Cieminski; D. Romero, Hrsg., *Advances in Production Management Systems. Smart Manufacturing and Logistics Systems: Turning Ideas into Action*, Band 664, S. 595–603. Springer Nature Switzerland, Cham, 2022.
- [Rose15] Rosen, R.; Von Wichert, G.; Lo, G.; Bettenhausen, K.D.: About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3):567–572, 2015.
- [Rost23] Rost, J.R.: *Digitale Assistenzsysteme für kollaboratives Arbeiten in der Unikatproduktion*. Dissertation, Technische Universität Hamburg, 2023.
- [Rupp18] Ruppert, T.; Jaskó, S.; Holczinger, T.; Abonyi, J.: Enabling Technologies for Operator 4.0: A Survey. *Applied Sciences*, 8(9):1650, 2018.
- [Röc23] Röcker, C.: *Human-Technology Interaction: Shaping the Future of Industrial User Interfaces*. Springer International Publishing, Cham, 2023.
- [Schm20] Schmidt, S.; Bayer, C.; Saki, M.; Anlauff, W.; Hartwich, H.D.: *Digitale Assistenz für die Produktion: ein Leitfaden für die Bedarfsermittlung, Gestaltung und Einführung*. VDMA Verlag GmbH, Frankfurt am Main, 2020.
- [Schm24] Schmiel, S.: Evaluation smarterer Handwerkzeuge und digitaler Assistenzsysteme für manuelle Arbeitsprozesse, 2024. Masterarbeit (Betreuer: S. Piontek; Prüfer: H. Lödding).

- [Schr09] Schröder, A.K.; Nebl, T.: Qualität – Einflussfaktor auf die Produktivität. In D. Specht, Hrsg., *Weiterentwicklung der Produktion: Tagungsband der Herbsttagung 2008 der Wissenschaftlichen Kommission Produktionswirtschaft im VHB*, Gabler Research : Beiträge zur Produktionswirtschaft. Gabler, Wiesbaden, 2009.
- [Schr16] Schreiner, R.: *Computernetzwerke: von den Grundlagen zur Funktion und Anwendung*. Hanser, München, 6., erweiterte auflage Aufl., 2016.
- [Schu22] Schuetze, M.: Qualität und Produktivität manueller Arbeitsprozesse im Flugzeugbau - Anforderungen an einen Digitalen Zwilling, 2022. Projektarbeit (Betreuer: S. Piontek; Prüfer: H. Lödding).
- [Segh07] Seghezzi, H.D.; Fahrni, F.; Herrmann, F.: *Integriertes Qualitätsmanagement: Der St. Galler Ansatz*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 3 Aufl., 2007.
- [Sett22] Settimi, A.; Gambero, J.; Weinand, Y.: Augmented-reality-assisted timber drilling with smart retrofitted tools. *Automation in Construction*, 139, 2022.
- [Shin86] Shingō, S.: *Zero quality control: source inspection and the poka-yoke system*. Productivity Press, Stamford, Conn, 1986.
- [Silv18] Silva, D.R.C.; Oliveira, G.M.B.; Silva, I.; Ferrari, P.; Sisinni, E.: Latency evaluation for MQTT and WebSocket Protocols: an Industry 4.0 perspective. In *2018 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, S. 01233–01238. IEEE, Natal, 2018.
- [Stuh19] Stuhmann, J.: Airbus Group - Herausforderungen und Entwicklungen bei der zerspanenden Bearbeitung von Verbundwerkstoffen in der Luftfahrtindustrie, 2019.
- [Tala21] Talacio, M.; Funchal, G.; Melo, V.; Piardi, L.; Vallim, M.; Leitao, P.: Machine Vision to Empower an Intelligent Personal Assistant for Assembly Tasks. In A.I. Pereira; F.P. Fernandes; J.P. Coelho; J.P. Teixeira; M.F. Pacheco; P. Alves; R.P. Lopes, Hrsg., *Optimization, Learning Algorithms and Applications*, S. 447–462. Springer International Publishing, Cham, 2021.
- [Tiet17] Tietze, F.: *Analyse und Verbesserung der Arbeitsproduktivität in der Unikatproduktion*. Dissertation, Technische Universität Hamburg, 2017.
- [Umer18] Umer, M.; Mahesh, B.; Hanson, L.; Khabbazi, M.R.; Onori, M.: Smart Power Tools: An Industrial Event-Driven Architecture Implementation. *Procedia CIRP*, 72:1357–1361, 2018.
- [Weid15] Weidner, R.; Redlich, T.; Wulfsberg, J.P., Hrsg.: *Technische Unterstützungssysteme*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [Weid16] Weidner, R.; Helmut-Schmidt-Universität, Hrsg.: *Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen: Zweite Transdisziplinäre Konferenz: Hamburg 2016*. Laboratorium Fertigungstechnik, smartASSIST, Helmut Schmidt Universität, Hamburg, 2016.
- [West06] Westkämper, E.: *Einführung in die Organisation der Produktion*. Springer, Berlin, 1 Aufl., 2006.
- [Wick98] Wickens, C.D.: *Engineering psychology and human performance*. Harper-Collins Publ, New York, NY, 2. ed., [nachdr.] Aufl., 1998.

- [Wien14] Wiendahl, H.P.; Reichardt, J.; Nyhuis, P.: Handbuch Fabrikplanung. In *Handbuch Fabrikplanung*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014.
- [Wolf19] Wolfartsberger, J.; Hallewell Haslwanter, J.D.; Lindorfer, R.: Perspectives on Assistive Systems for Manual Assembly Tasks in Industry. *Technologies*, 7(1):12, 2019.
- [Zhen24] Zheng, T.; Grosse, E.H.; Morana, S.; Glock, C.H.: A review of digital assistants in production and logistics: applications, benefits, and challenges. *International Journal of Production Research*, S. 1–27, 2024.
- [Zäp21] Zäpfel, G.: *Produktionswirtschaft*. De Gruyter, 2021.

Anhang

Anhang A - Fragebogen zur Analyse der manuellen Montageprozesse im Flugzeugbau

TUHH

Technische Universität Hamburg-Harburg

TUHH • Produktionsmanagement und -technik
21071 Hamburg



Institut für Produktionsmanagement und -technik
Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Hintze

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX: Analyse der Prozesse und Potenziale

Leitfaden zum Experteninterview mit [REDACTED]

Datum: _____

1. Generelle Informationen

Fragebogen-Nr.: _____

Position: _____

Beschäftigungsdauer im aktuellen Themenbereich (Jahre): _____

2. Definierte Fragen

Welche Datenformate und Informationsgrundlage wird in den direkten und indirekten Bereichen der Sektionsmontage hinsichtlich des Projektzenarios verwendet?

(Wie ist dazu die Informationskette? Wo können die Informationen bezogen werden, in welchem Format sind sie im System? Können sie gefiltert werden, oder ist es nur eine digitale Version des Ausdrucks, z.B. PDF?)

<input type="checkbox"/>	CAD-Modelle	Format:	Anmerk.:
<input type="checkbox"/>	2D-Zeichnungen	Format:	Anmerk.:
<input type="checkbox"/>	Montagepläne/-dokumente	Format:	Anmerk.:
<input type="checkbox"/>	Richtlinien	Format:	Anmerk.:
<input type="checkbox"/>	Herstellerangaben	Format:	Anmerk.:
<input type="checkbox"/>	Sonstige: _____ _____ _____	Formate:	Anmerk.:

**Was ist Ihrer Meinung nach der größte Engpass/Verbesserungspunkt im aktuellen Prozess?**

<input type="checkbox"/>	Dokumentation der Bohrungen/Verschraubung	Anmerkung:
<input type="checkbox"/>	Undurchsichtiger Werkzeugverschleiß	Anmerkung:
<input type="checkbox"/>	Montagereihenfolge / -koordination	Anmerkung:
<input type="checkbox"/>	Qualitätssicherung	Anmerkung:
<input type="checkbox"/>	Informationsbereitstellung / Erfahrungsbasiertes Handeln	Anmerkung:
<input type="checkbox"/>	Sonstiges: _____ _____ _____	Anmerkungen:

3. Offene Fragen

Wie würden Sie die Schwierigkeiten des aktuellen Arbeitsvorgehens beschreiben und welche Rolle spielt dabei die Informationsbereitstellung?



Was sind Ihre Erwartungen an die Lösung und was sehen Sie diesbezüglich als Hindernisse bei der Implementierung an?

Wie entscheidet der Werker genau, welche Bohrung/Verschraubung als nächstes durchgeführt wird? Was wird bzgl. der Reihenfolge vorgegeben und was tatsächlich umgesetzt?

Was ist Ihrer Meinung nach wichtig, um die Akzeptanz der Digitalisierungslösung durch den Werker zu erhöhen?



Welche zusätzlichen Informationen würden Sie am Arbeitsplatz als hilfreich ansehen?

Wie werden Probleme bei der Montage (z.B. falsche/fehlerhafte/fehlende Bauteile) zurück gemeldet?

Findet eine kontinuierliche Verbesserung des Prozesses durch Rückmeldungen auf der Montage statt? Wenn ja, wie sieht diese aus?



Gibt es weitere Anmerkungen, Erwartungen, Fragen Ihrerseits?

Fragebogenerstellung: **Simon Piontek**

Telefon: XXXXXXXXXX

E-Mail: XXXXXXXXXX

Anhang B - Fragebogen zum wahrgenommenen Unterstützungsbedarf



Projektarbeit:

Qualität und Produktivität manueller Arbeitsprozesse im Flugzeugbau - Anforderungen an einen Digitalen Zwilling

Fragebogen zum Unterstützungsbedarf bei dem Umgang mit den Einflussfaktoren in manuellen Montageprozessen

(21.09.2022)

1. Generelle Informationen

Fragebogen-Nr.: _____

Position: _____

Beschäftigungsdauer im aktuellen Themenbereich (Jahre): _____

2. Bewertung

Bewerten Sie den Unterstützungsbedarf bei dem Umgang mit den Einflussfaktoren in manuellen Montageprozessen. Hierbei steht ein hoher Wert für einen hohen Unterstützungsbedarf und ein niedriger Wert für einen geringen Unterstützungsbedarf.



Werkzeug / Fertigungsmittel	Messwerte				
	<input type="checkbox"/> Geringer Unterstützungsbedarf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Hoher Unterstützungsbedarf
	Drehmoment / Kraft				
	<input type="checkbox"/> Geringer Unterstützungsbedarf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Hoher Unterstützungsbedarf
	Durchmesser				
	<input type="checkbox"/> Geringer Unterstützungsbedarf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Hoher Unterstützungsbedarf
Bohrwinkel					
<input type="checkbox"/> Geringer Unterstützungsbedarf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Hoher Unterstützungsbedarf	
Verschleiß					
<input type="checkbox"/> Geringer Unterstützungsbedarf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Hoher Unterstützungsbedarf	
Position					
<input type="checkbox"/> Geringer Unterstützungsbedarf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Hoher Unterstützungsbedarf	
Produkt	Varianz möglich				
	<input type="checkbox"/> Geringer Unterstützungsbedarf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Hoher Unterstützungsbedarf
	Betriebsstoff				
	<input type="checkbox"/> Geringer Unterstützungsbedarf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Hoher Unterstützungsbedarf
	Geometrie				
	<input type="checkbox"/> Geringer Unterstützungsbedarf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Hoher Unterstützungsbedarf
Hilfsstoff					
<input type="checkbox"/> Geringer Unterstützungsbedarf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Hoher Unterstützungsbedarf	
Material					
<input type="checkbox"/> Geringer Unterstützungsbedarf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Hoher Unterstützungsbedarf	
Position					
<input type="checkbox"/> Geringer Unterstützungsbedarf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Hoher Unterstützungsbedarf	
Umgebung	Luftfeuchtigkeit				
	<input type="checkbox"/> Geringer Unterstützungsbedarf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Hoher Unterstützungsbedarf
	Zugänglichkeit				
	<input type="checkbox"/> Geringer Unterstützungsbedarf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Hoher Unterstützungsbedarf
Beleuchtung					
<input type="checkbox"/> Geringer Unterstützungsbedarf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Hoher Unterstützungsbedarf	
Temperatur					
<input type="checkbox"/> Geringer Unterstützungsbedarf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Hoher Unterstützungsbedarf	





Vorgehen	Reihenfolge					
	<input type="checkbox"/> Geringer Unterstützungsbedarf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Hoher Unterstützungsbedarf
Informationen / Unterlagen	Zeit					
	<input type="checkbox"/> Geringer Unterstützungsbedarf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Hoher Unterstützungsbedarf
	Übersichtlichkeit					
	<input type="checkbox"/> Geringer Unterstützungsbedarf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Hoher Unterstützungsbedarf
	Kommunikation					
	<input type="checkbox"/> Geringer Unterstützungsbedarf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Hoher Unterstützungsbedarf
	Dokumentation					
	<input type="checkbox"/> Geringer Unterstützungsbedarf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Hoher Unterstützungsbedarf
	Vollständigkeit					
	<input type="checkbox"/> Geringer Unterstützungsbedarf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Hoher Unterstützungsbedarf
Verfügbarkeit						
<input type="checkbox"/> Geringer Unterstützungsbedarf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Hoher Unterstützungsbedarf	
Richtigkeit						
<input type="checkbox"/> Geringer Unterstützungsbedarf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Hoher Unterstützungsbedarf	
Aktualität						
<input type="checkbox"/> Geringer Unterstützungsbedarf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Hoher Unterstützungsbedarf	



Anhang D - Wirkungsbewertungen der Assistenztechnologien

Domäne	Einflussfaktor	Tablet / Handy	Smarte Brille	Smarte Uhr	Projektion	Smarte Handwerkz.	Smarte Messmittel	Exoskelett	Umgebungs-sensorik	Industrielle Bildverarb.	Bewegungs- erfassung	Blick- erfassung
Werkzeuge	A Durchmesser					1						
	A Bohrwinkel					1		1				
	B Werkzeugposition					1						
	B Drehmoment					1						
	B Drehgeschwindigkeit					1						
	B Bohrtief					1						
	B Vorschub					1		1				
	A Werkzeugverschleiß					1						
	A Werkzeuggewicht					1		1				
	B Messungen					1	1	1				
B Auswahl d. Fert.	1	1	1	1								
Informationen	B Dokumentenklarheit	1	1	1	1							1
	B Dokumentenvollständigk.	1	1	1	1							1
	B Dokumentenkorrektheit	1	1	1	1							1
	B Dokumentenaktualität	1	1	1	1							1
	B Dokumentenverfügbarh.	1	1	1	1							1
	C Dokumentation	1	1	1	1	1	1	1		1	1	
	B Kommunikation	1	1	1	1							
	A Produktposition	1	1	1	1					1	1	
Produkt	A Produktgeometrie	1	1	1	1					1		
	B Produkttoleranzen	1	1	1	1	1	1			1		
	B Betriebsmittel											
	B Hilfsmittel											
	B Varianz	1	1	1	1	1	1	1		1		
	B Material											
	C Prozessabfolge	1					1					1
	A Planzeiten											
Umgebung	B Zugänglichkeit					1					1	
	B Erzwingene							1			1	
	B Arbeitsplatzlayout										1	
	B Temperatur								1			
	B Lautstärke								1			
	C Luftfeuchtigkeit								1			
	B Beleuchtung								1			
	C Tageszeit								1			
A _{total}	7:	2	2	0	2	3	2	2	0	2	0	0
B _{total}	24:	9	9	7	7	9	3	4	3	2	3	4
C _{total}	4:	2	0	0	0	2	1	1	3	1	0	1
F _{ges}	35:	13	11	7	9	14	6	7	6	5	3	5
F _{Einfluss}	73:	26	24	14	20	29	13	15	9	11	6	9

Anhang E - Fragebogen zur Technologieakzeptanz digitaler Assistenztechnologien

Umfrage:

Technologien zur Unterstützung von Mitarbeitern im Flugzeugbau

Allgemeine Informationen

Hallo und herzlich willkommen zur Umfrage! 😊

Mit dieser Umfrage möchten wir ein Meinungsbild dazu einholen, welche Technologien von Mitarbeitern im Flugzeugbau zukünftig gerne eingesetzt werden. Nach einigen allgemeinen Informationen (Frage 1 & 2) stellen wir Ihnen die unterschiedlichen Technologien kurz vor.

Dann ist jeweils Ihre Meinung gefragt: Würden Sie gerne mit der Technologie arbeiten? Wie schätzen Sie den Nutzen dieser Technologie ein? Gibt es Bedenken bei der Nutzung?

Selbstverständlich ist die Umfrage vollständig **anonymisiert** und konform zur DSGVO.

Vielen Dank und viel Spaß beim Beantworten der Fragen!

Seit wie vielen Jahren sind Sie im Unternehmen tätig?

- 0-5 Jahre 6-10 Jahre mehr als 10 Jahre

In welchem Bereich arbeiten Sie?

- Schalenmontage
 Sektionsmontage
 Sektionsausrüstung / End-Montage

Umfrage: Technologien zur Unterstützung von Mitarbeitern im Flugzeugbau

Tablets & Handys



Kurzbeschreibung:

Tablets und Handys sind aus der alltäglichen Nutzung bekannt. In der Produktion können sie als Anzeigemittel dienen, um klassische Arbeitsunterlagen und Zeichnungen zu ersetzen.

Anwendungsbeispiel / Nutzen:

Informationen zu Aufträgen und Arbeitsvorgängen können so dargestellt werden, dass alle notwendigen Daten auf einen Blick ersichtlich sind und das Durchsuchen verschiedener Unterlagen entfällt. Tagesaktuelle Informationen werden am 3D-Modell des Produktes visualisiert, sodass die Interpretation von 2D-Unterlagen entfällt. Alternativ können Informationen auf Tablet und Handy mit Augmented Reality dem Kamerabild überlagert werden.

Wie sehr stimmen Sie den folgenden Aussagen zu?

Bewerten Sie von **1 = "Stimme überhaupt nicht zu"** bis **7 = "Stimme vollständig zu"**

	1	2	3	4	5	6	7
Ich würde gerne mit Tablets und Handys als digitale Arbeitsunterlage arbeiten.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich denke, dass die Nutzung von Tablets und Handys meinen Arbeitsalltag erleichtern würde.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich denke, dass die Qualität meiner Arbeit sich über die Nutzung von Tablets und Handys verbessern würde.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Es würde mir leicht fallen, mich an die Benutzung von digitalen Arbeitsunterlagen zu gewöhnen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich stelle mir die Nutzung von digitalen Arbeitsunterlagen klar und verständlich vor.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Möchten Sie uns Bedenken bei der Nutzung von Tablets und Handys mitteilen?

Falls ja:

Diese Fragen wiederholen sich für jede Assistenztechnologie. Die Wiederholungen werden im Anhang nicht aufgeführt.

Umfrage:

Technologien zur Unterstützung von Mitarbeitern im Flugzeugbau

Smart Watch

Die Abbildung wurde aus urheberrechtlichen Gründen entfernt.

Kurzbeschreibung:

Smart Watches können wichtige Informationen intuitiv über kurze Benachrichtigungen bereitstellen, ohne dabei eine manuelle Handhabung zu benötigen.

Anwendungsbeispiel / Nutzen:

Live-Informationen zum aktuellen Prozess können in Echtzeit auf der Watch angezeigt werden. Dazu gehört bspw. die Absicherung, dass im momentanen Prozess alles qualitativ in Ordnung ist, oder gegenseitlich eine Benachrichtigung mit vermuteten Prozessfehlern oder Hinweisen zur aktuellen Ausführung von bspw. Bohrungen / Nietungen. Der Nutzen der Smart Watch kommt aus der Kopplung mit anderen Technologien wie Smarten Handwerkzeugen.

Umfrage:

Technologien zur Unterstützung von Mitarbeitern im Flugzeugbau

Smart Glasses

Die Abbildung wurde aus urheberrechtlichen Gründen entfernt.

Kurzbeschreibung:

Ähnlich wie Smart Watches und Tablets/Handys können Smart Glasses aktuell benötigte Informationen darstellen und in das Blickfeld der Mitarbeiter projizieren.

Anwendungsbeispiel / Nutzen:

Informationen zu Aufträgen können so dargestellt werden, dass alle notwendigen Daten auf einen Blick ersichtlich sind. Das Durchsuchen verschiedener Unterlagen wird erübrigt. Je nach Brille können Informationen über Augmented Reality am echten Produkt dargestellt werden oder als einfache Textinformation im Blickfeld erscheinen. Der Gestaltungsraum der Informationen ist ungefähr zwischen Tablet und Smart Watch zu bewerten.

Umfrage:

Technologien zur Unterstützung von Mitarbeitern im Flugzeugbau

Projektion



Die Abbildung wurde aus urheberrechtlichen Gründen entfernt.

Kurzbeschreibung:

Projektoren können Informationen direkt auf Bauteile bzw. den Arbeitsplatz darstellen. Dazu wird der Projektor in der Regel stationär an einem Arbeitsplatz installiert.

Anwendungsbeispiel / Nutzen:

Die Projektion kann zu nutzende Werkzeuge und Hilfsmittel visualisieren, aber auch Text-, Bild- und Videoinhalte ähnlich einem Beamer auf den Arbeitsplatz werfen. Ein spezieller Nutzen ist zudem die Markierung und Darstellung von zu montierenden Positionen und Bauteilen (siehe Fotos).

Umfrage: Technologien zur Unterstützung von Mitarbeitern im Flugzeugbau

Smarte Handwerkzeuge

Die Abbildung wurde aus urheberrechtlichen Gründen entfernt.

Kurzbeschreibung:

Smarte Handwerkzeuge sind digital vernetzt. Unternehmen können so zum einen die Soll-Parameter vorgeben, z.B. Durchmesser für Bohrlöcher, um Fehleinstellungen zu vermeiden. Zum anderen können sie die realisierten Ist-Parameter erfassen und bspw. die Qualität einer Bohrung dokumentieren. Die Werkzeuge wissen also, welche Parameter eingestellt sind und welche benötigt werden und können somit die Prozesse vereinfachen.

Anwendungsbeispiel / Nutzen:

Durch den Abgleich der aktuellen Werkzeugposition mit den durchzuführenden Bohr- & Nietprogrammen kann sichergestellt werden, dass die Werkzeuge bei falschen Einstellungen sperren. So wird bspw. bei einem falsch ausgerüsteten Bohrdurchmesser das Werkzeug blockiert, bevor eine Fehlbohrung passieren kann. Die Werkzeuge können zudem Parameter wie z.B. das Drehmoment automatisch nach ihrer aktuellen Position einstellen, so dass Werkzeugwechsel erübrigt werden.

Umfrage: Technologien zur Unterstützung von Mitarbeitern im Flugzeugbau

Smarte Messmittel



Die Abbildung wurde aus urheberrechtlichen Gründen entfernt.

Kurzbeschreibung:

Smarte Messmittel sind digital vernetzt und können Messwerte direkt in eine Datenbank schreiben. Besonders dem Abgleich ihrer Position zum Bauteil verschiedene Vorteile bringen. Der Hauptvorteil besteht dabei in der automatischen Dokumentation gemessener Werte.

Anwendungsbeispiel / Nutzen:

Durch die Information über die Position des Smarten Messmittels können aufgenommene Werte automatisch in Bezug auf das Bauteil dokumentiert werden. Auf PC-Dashboards können die Informationen Live angezeigt werden und notwendige QS-Schritte und -Dokumentationen automatisch abgeleitet werden.

Umfrage: Technologien zur Unterstützung von Mitarbeitern im Flugzeugbau

Exoskelette

Die Abbildung wurde aus urheberrechtlichen Gründen entfernt.

Kurzbeschreibung:

Unter Exoskeletten versteht man eine Art "Roboteranzüge", die von Mitarbeitern getragen werden können. Die Apparate unterstützen oder verstärken die menschlichen Bewegungen und erleichtern somit das körperliche Arbeiten.

Anwendungsbeispiel / Nutzen:

Durch die Unterstützung mit einem Exoskelett erleichtert sich vor allem das Tragen von schweren Gegenständen und das Einnehmen von Zwangshaltungen. So können Bauteile, Fertigungsmittel und Werkzeuge leichter geführt werden. Insbesondere beim Werkzeug kann außerdem Unterstützung beim Aufbringen der Bohrkraft oder beim Überkopfarbeiten geleistet werden. Moderne Exoskelette sind internetfähig und können so Daten zu aufgebrauchten Kräften und Bewegungen übertragen.

Umfrage: Technologien zur Unterstützung von Mitarbeitern im Flugzeugbau

Umgebungssensorik



Die Abbildung wurde aus urheberrechtlichen Gründen entfernt.

Kurzbeschreibung:

Unter Umgebungssensorik versteht man kleine Sensoren, die bspw. Temperatur, Lautstärke oder Luftfeuchtigkeit am Arbeitsplatz aufnehmen. Dabei gewonnene Erkenntnisse können bspw. zu ergonomischeren Bauplätzen führen.

Anwendungsbeispiel / Nutzen:

Neben der langfristigen Gestaltung der Arbeitsplätze über gewonnene Erkenntnisse der Umgebungssensorik können auch aktuelle Daten genutzt werden, um Warnhinweise bei zu hohen Werten auszugeben und die Gesundheit der Mitarbeiter zu schützen. So können z.B. bei längerer Lärmbelastung auch abwechselnde Tätigkeiten vorgeschlagen werden.

Umfrage: Technologien zur Unterstützung von Mitarbeitern im Flugzeugbau

Industrielle Bildverarbeitung



Die Abbildung wurde aus urheberrechtlichen Gründen entfernt.

Kurzbeschreibung:

Über industrielle Bildverarbeitung werden heute bereits viele Prozesse in der Industrie unterstützt. Ein Kamerasystem nimmt Bilder auf, die im Anschluss meist automatisch verarbeitet werden. Diese können dann mit einer Datenbasis abgeglichen werden und ermöglichen Rückschlüsse über das aufgenommene Bauteil. Die Einsatzmöglichkeiten sind dabei vielseitig.

Anwendungsbeispiel / Nutzen:

Ein beispielhafter Nutzen ist die Aufnahme von Bauteilen und Einbausituationen zur Qualitätssicherung oder Endabnahme. Es können Fehler oder Verunreinigungen in komplexen Strukturen in Echtzeit erkannt werden. Ein weiteres Beispiel ist die Überprüfung von Anbauteilen und Fügeverbindungen in Flugzeugrümpfen.

Anhang F - Berechnung der Stichprobengröße

Berechnung der Stichprobengröße durch den Vergleich von PK und DS_{app}:

Qualitätsmerkmal	Zeit [min]	Fehler [Anzahl] pro Person	Nutzerzufriedenheit [SUS-Score]
Geschätzter Mittelwert PK	45	6	50
Geschätzter Mittelwert DS _{app}	30	3	90
Geschätzte Standardabweichung der Daten	15	4	20
Effektstärke	1	0.75	2
Stichprobenumfang (n)	6,25	11,11	1,56

PK = Papierunterlagen und konventionelle Handwerkzeuge

DS_{app} = Digitales Assistenzsystem und Smartes Handwerkzeug im applikationsgesteuerten Modus

Berechnung der Stichprobengröße durch den Vergleich von PK und DS_{pos}:

Qualitätsmerkmal	Zeit [min]	Fehler [Anzahl] pro Person	Nutzerzufriedenheit [SUS-Score]
Geschätzter Mittelwert PK	45	6	50
Geschätzter Mittelwert DS _{app}	25	1	95
Geschätzte Standardabweichung der Daten	15	4	20
Effektstärke	1,33	1,25	2,25
Stichprobenumfang (n)	3,51	4	1,23

PK = Papierunterlagen und konventionelle Handwerkzeuge

DS_{pos} = Digitales Assistenzsystem und Smartes Handwerkzeug im positionsgesteuerten Modus

Anhang G - Aufgaben der Laborversuche

Arbeitsplan

1. Bohren

1.1. Vorbereitung

- Beschaffen Sie alle erforderlichen Materialien und Werkzeuge (Bohrmaschine, Bohrer, Bohrstreifen, usw.).
- Richten Sie den Arbeitsbereich mit geeigneten Vorrichtungen zum Festklemmen der Werkstücke ein.
- Tragen Sie Ihre persönliche Schutzausrüstung, einschließlich Schutzbrille und Gehörschutz.
- Überprüfen Sie alle Materialien, um die benötigten Bohrungen und Maße zu identifizieren.

1.2. Anbringen des Bohrstands an der Montageplatte

- Bringen Sie den vollständig vormontierten Bohrstand gemäß der Zeichnung mit einem Inbusschlüssel an der Montageplatte an.

1.3. Vorbohren

- Überprüfen Sie die technische Zeichnung für das Vorbohren, um die Positionen für das Vorbohren festzulegen.
- Vor jeder Bohrung soll in der Tabelle (ausgedruckte Tabelle) die zugehörige Bohrgeschwindigkeit eingetragen werden.
- Führen Sie die Bohrungen durch.

1.4. Aufbohren

- Überprüfen Sie die technische Zeichnung für das Aufbohren, um die Positionen für das Aufbohren festzulegen.
- Vor jeder Bohrung soll in der Tabelle (ausgedruckte Tabelle) die zugehörige Bohrgeschwindigkeit eingetragen werden.
- Führen Sie die Bohrungen durch.

1.5. Endmaßbohren

- Überprüfen Sie die technische Zeichnung für das Endmaßbohren, um die Positionen für das Endmaßbohren festzulegen.
- Vor jeder Bohrung soll in der Tabelle (ausgedruckte Tabelle) die zugehörige Bohrgeschwindigkeit eingetragen werden.
- Führen Sie die Bohrungen durch.

2. Schrauben

2.1. Vorbereitung

- Ziehen Sie sich das Lager in die Nähe der Schraubplatte.
- Sammeln Sie alle erforderlichen Materialien und Werkzeuge (Schrauben, Unterlegscheiben, Schraubaufsatz, Werkzeug)
- Überprüfen Sie die Zeichnung oder Anweisungen, um sicherzustellen, dass Sie die richtigen Schrauben und Unterlegscheiben verwenden und diese gemäß den Spezifikationen anbringen.

2.2. Identifizierung der Gewinde und Auswahl der Schrauben

- Untersuchen Sie die Lochplatte, um die Position und Größe der Gewinde zu identifizieren.
- Wählen Sie die entsprechenden Schrauben und Unterlegscheiben gemäß den Anforderungen der Zeichnung aus. Stellen Sie sicher, dass die Schrauben die richtige Länge und Gewindegröße haben, um in die vorbereiteten Gewinde der Lochplatte zu passen.

2.3. Anbringen der Schrauben und Unterlegscheiben

- Platzieren Sie die ausgewählten Schrauben und Unterlegscheiben gemäß der Zeichnung an den markierten Positionen auf der Lochplatte.
- Schrauben Sie alle Schrauben zuerst mit der Hand in die Lochplatte, so dass diese halten.
- Bevor Sie die Schrauben final einschrauben, sollen die benötigten Drehmomente für jede Schraube in der Tabelle (ausgedruckte Tabelle) eingetragen werden.
- Verwenden Sie danach den Schraubaufsatz, um die Schrauben vorsichtig in die Gewinde einzudrehen. Achten Sie darauf, die Schrauben nicht zu überdrehen oder zu beschädigen.

2.4. Abschluss

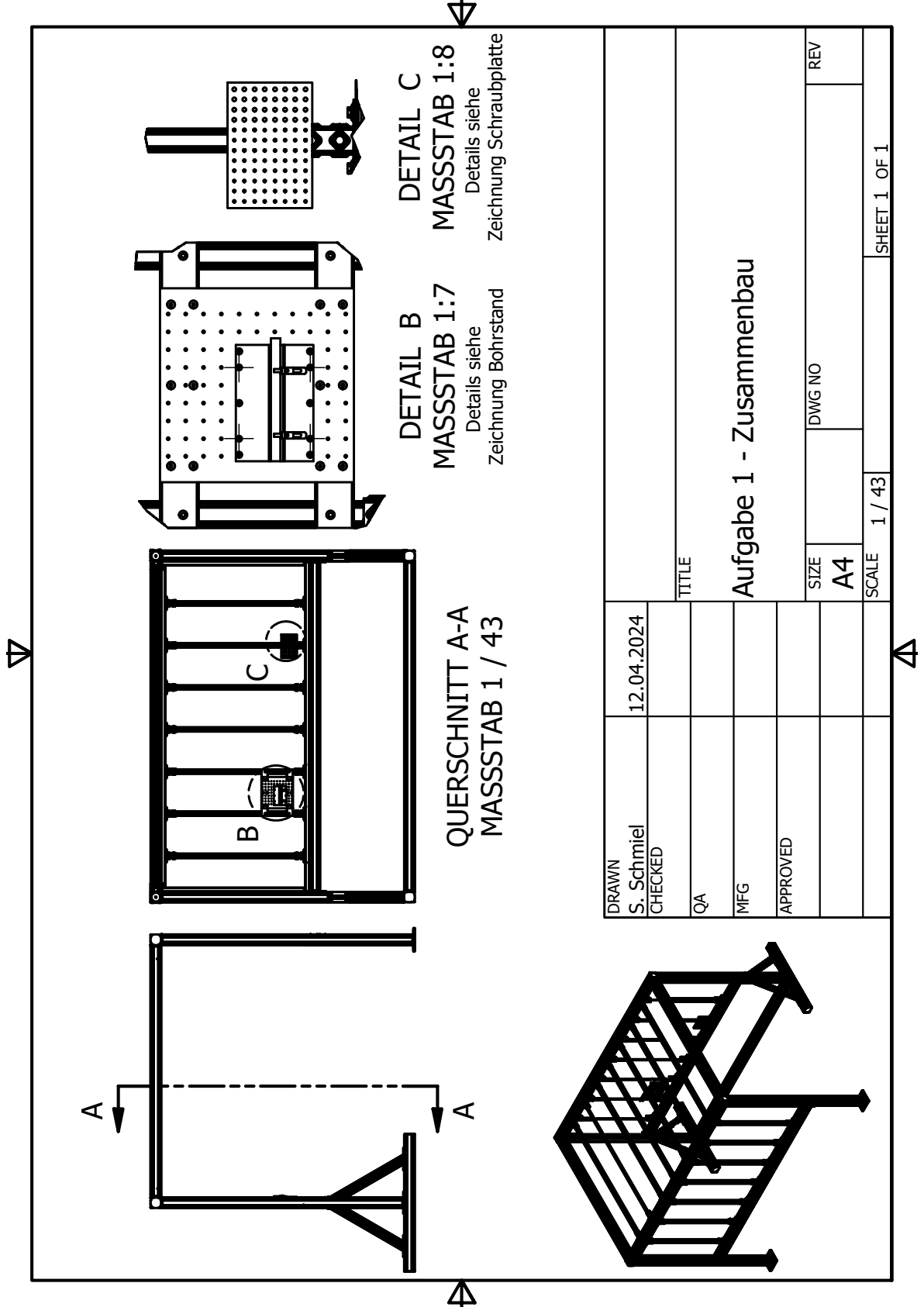
- Schließen Sie den Vorgang ab, indem Sie alle Werkzeuge und Materialien ordnungsgemäß zurücklegen.

Aufgabe 1

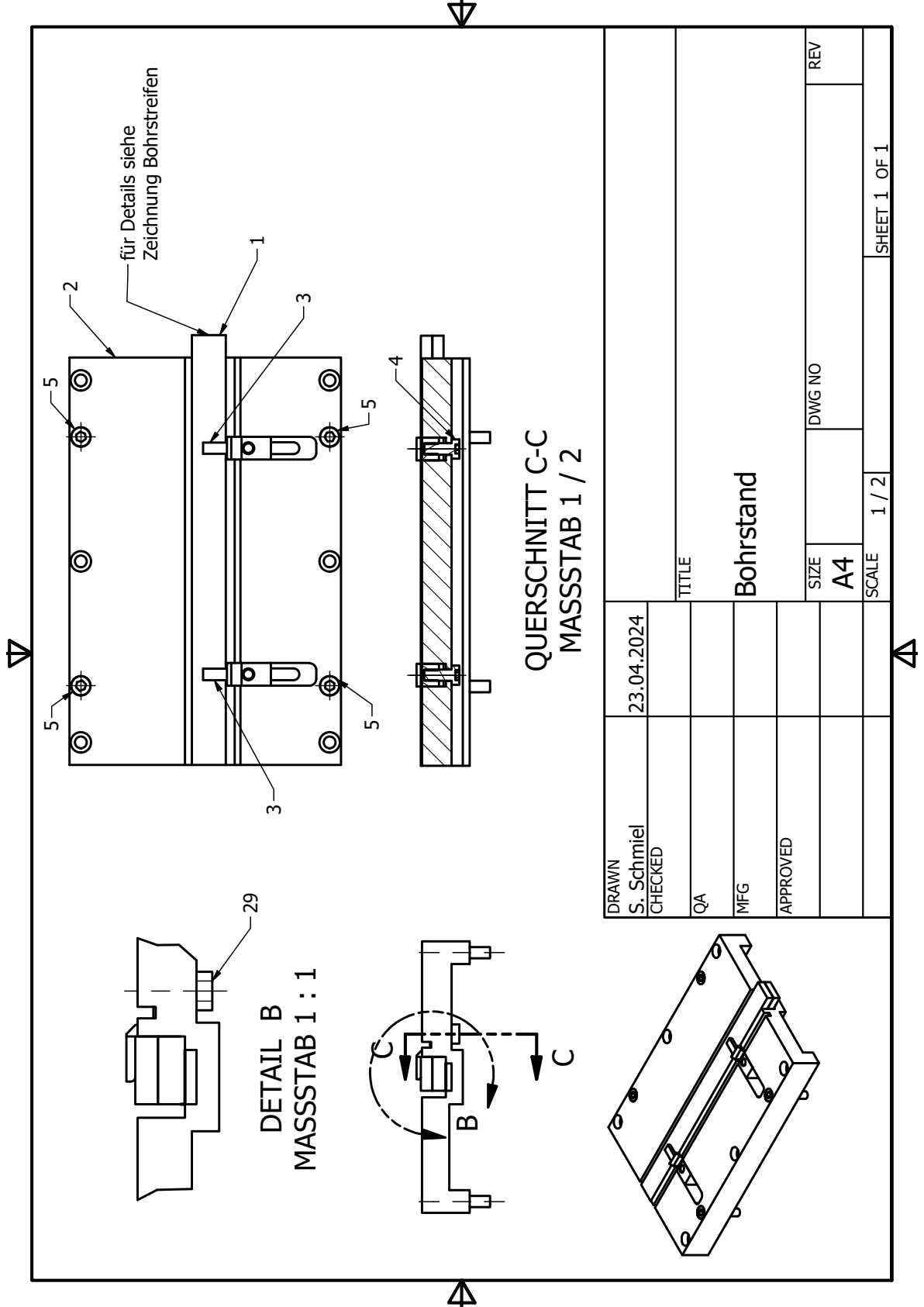
PART NUMBER	ITEM	AMOUNT
75129194	Bohrstreifen	2
75132581	obere Platte	1
75132583	Klemmstück	2
75132584	zweite Bohrschablone	1
DIN7984-M5x12	Klemmschraube	2
DIN912-M5x25	Montageschraube	4
75132585	erste Bohrschablone	1
Magnet-6x4.5(NdFeB)	Magnet	4
123020	Durchmesser 3,3mm	5
123035	Durchmesser 4,5mm	2
123023	Durchmesser 4,8mm	1
123021	Durchmesser 5mm	2
7514678	Schraubplatte	1
20311	Schraube M8x1.5	2
20321	Schraube M6x1	3
20331	Schraube M5x0.8	2
2298674	Klemmschraube	2

Aufgabe 1

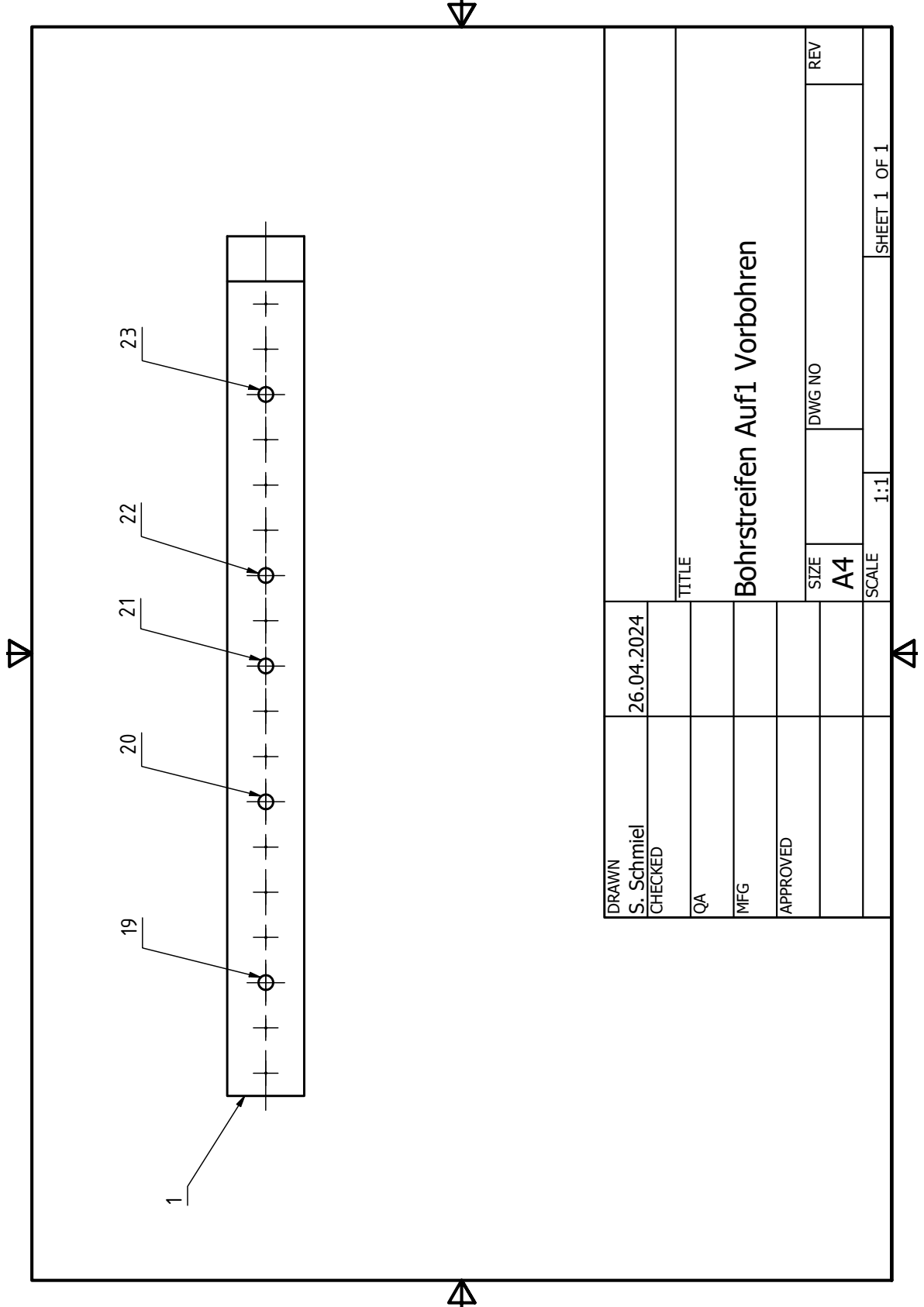
POS-NR	PART NUMBER	INFO
16	20331	5Nm
17	20331	5Nm
20	123020	2050 rpm
6	123021	1500 rpm
27	123021	1300 rpm
28	123020	
24	123035	3700 rpm
14	20321	7Nm
3	75132583	
5	DIN912-M5x25	
12	20311	7Nm
23	123020	2100 rpm
11	20311	5Nm
13	20321	7Nm
7	123023	1800 rpm
21	123020	1800 rpm
4	DIN7984-M5x12	
26	123020	
15	20321	7Nm
8	123020	1800 rpm
10	123021	1400 rpm
22	123020	2000 rpm
2	75132581	
19	123020	1900 rpm
18	7514678	
9	123021	1300 rpm
1	75129194	
29	2298674	
25	123035	2600 rpm



DRAWN	12.04.2024	TITLE		SHEET 1 OF 1	
S. Schmiel		Aufgabe 1 - Zusammenbau			
CHECKED		SIZE	DWG NO	REV	
QA		A4			
MFG		SCALE	1 / 43		
APPROVED					



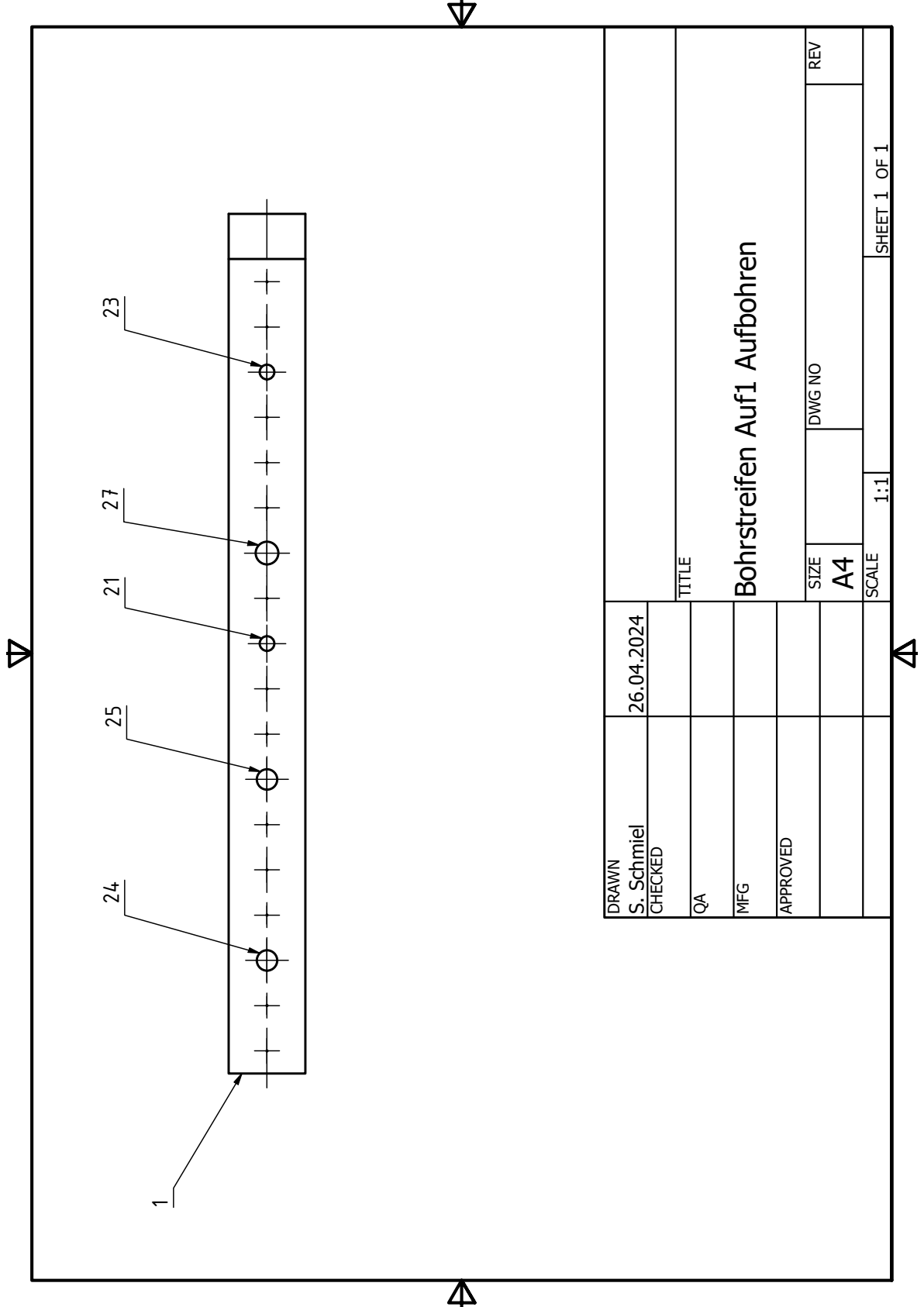
DRAWN	23.04.2024	TITLE	Bohrstand	SIZE	DWG NO	REV
S. Schmiel				A4		
CHECKED				SCALE	1 / 2	SHEET 1 OF 1
QA						
MFG						
APPROVED						



DRAWN	26.04.2024			SHEET 1 OF 1	
S. Schmiel					
CHECKED					
QA					
MFG					
APPROVED					
		SIZE	DWG NO	REV	
		A4			
		SCALE	1:1		

TITLE

Bohrstreifen Auf1 Vorborehen



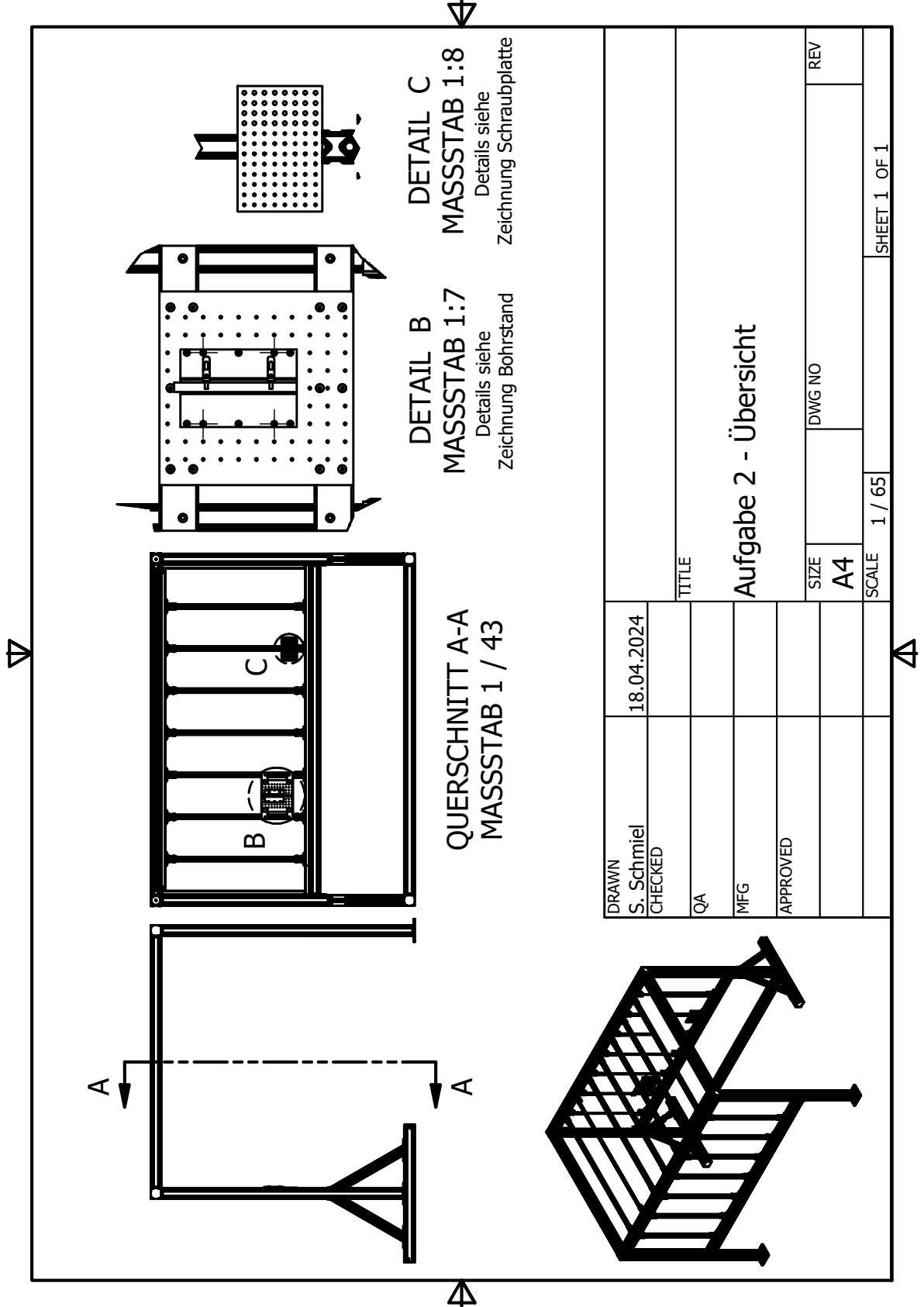
DRAWN	26.04.2024			SHEET 1 OF 1	
S. Schmiel		TITLE		REV	
CHECKED		Bohrstreifen Auf1 Aufbohren			
QA		SIZE	DWG NO		
MFG		A4			
APPROVED		SCALE	1:1		

Aufgabe 2

POS-NR	PART NUMBER	INFO
22	123324	1900 rpm
13	20321	5Nm
24	123450	3400 rpm
28	123450	3200 rpm
4	DIN7984-M5x12	
8	123405	1350 rpm
11	20311	7Nm
5	DIN912-M5x25	
21	123324	2050 rpm
20	123324	1800 rpm
6	123405	1250 rpm
9	123405	1250 rpm
3	75132583	
1	75129194	
29	2298674	
15	20321	7Nm
19	123324	2100 rpm
18	7514678	
16	20331	5Nm
2	75132581	
17	20331	5Nm
12	20311	7Nm
23	123324	2100 rpm
7	123221	1400 rpm
25	123405	1250 rpm
10	123221	1400 rpm
26	123450	3400 rpm
27	123324	
14	20321	5Nm

Aufgabe 2

PART NUMBER	ITEM	AMOUNT
75129194	Bohrstreifen	2
75132581	obere Platte	1
75132583	Klemmstück	2
75132584	zweite Bohrschablone	1
DIN7984-M5x12	Klemmschraube	2
DIN912-M5x25	Montageschraube	4
75132585	erste Bohrschablone	1
Magnet-6x4.5(NdFeB)	Magnet	4
123324	Durchmesser 3,3mm	5
123450	Durchmesser 4,5mm	5
123221	Durchmesser 4,8mm	2
123405	Durchmesser 5mm	3
7514678	Schraubplatte	1
20311	Schraube M8x1.5	6
20321	Schraube M6x1	3
20331	Schraube M5x0.8	2
2298674	Klemmschraube	2

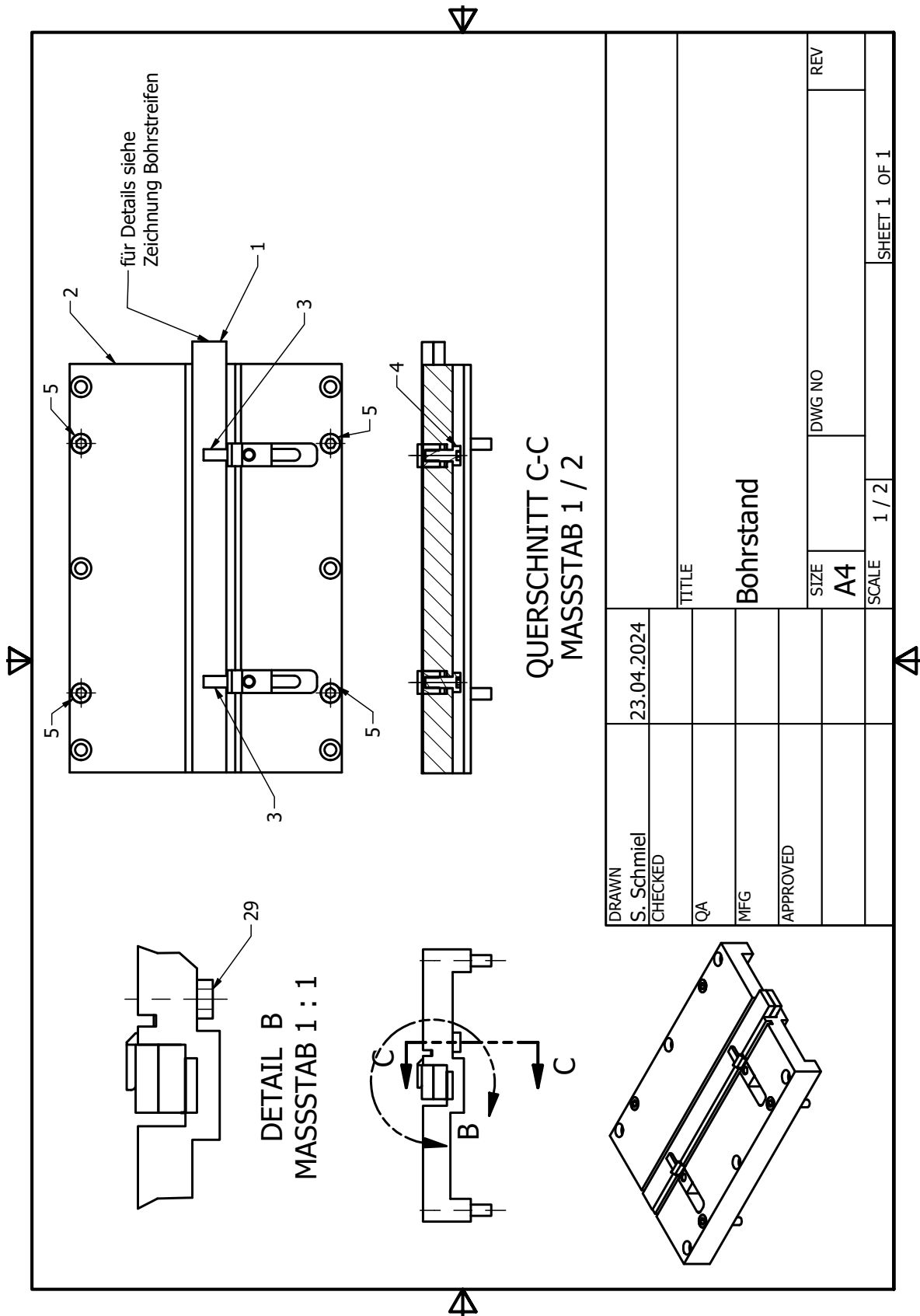


DETAIL B
MASSSTAB 1:7
 Details siehe
 Zeichnung Bohrstand

DETAIL C
MASSSTAB 1:8
 Details siehe
 Zeichnung Schraubplatte

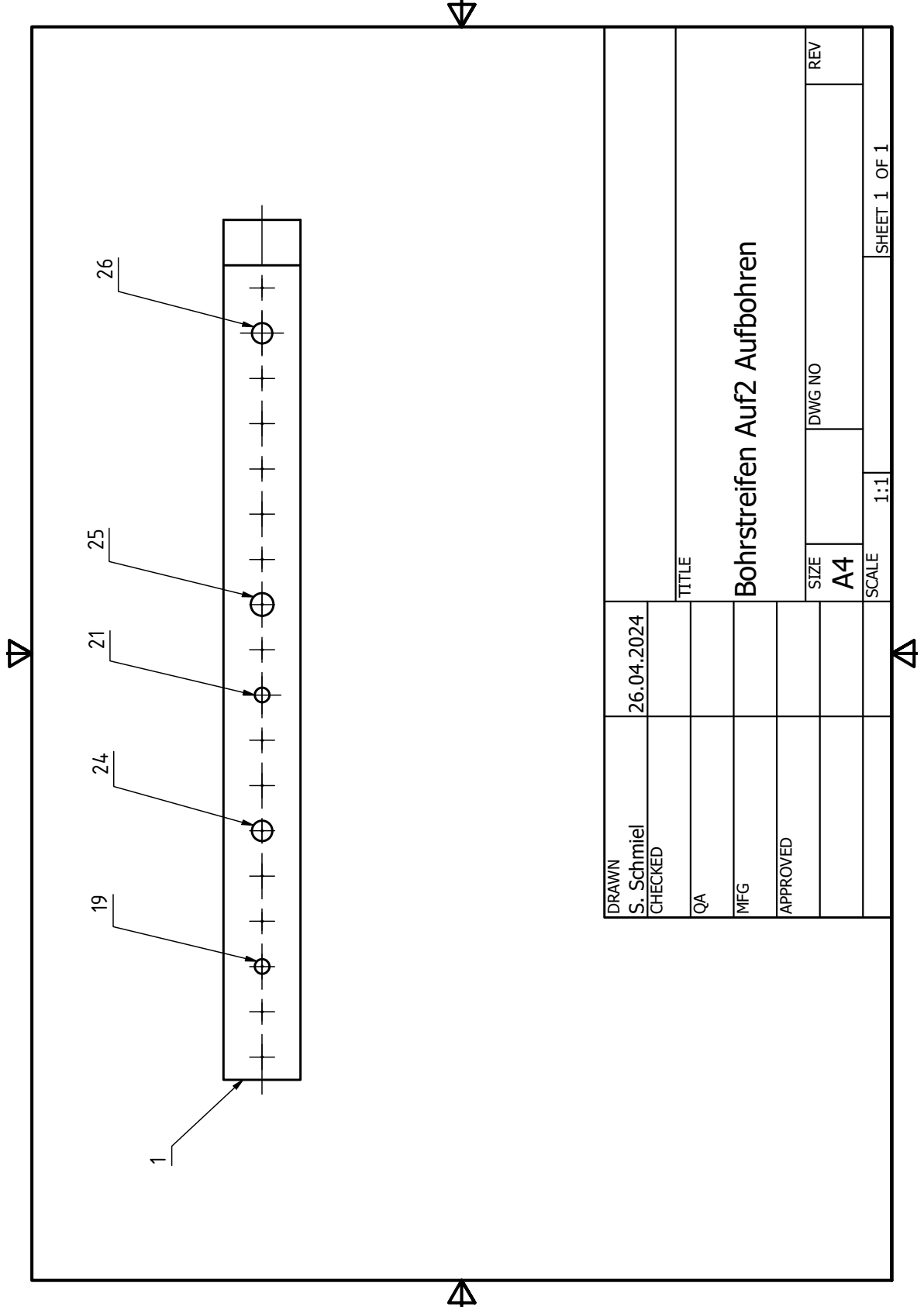
QUERSCHNITT A-A
MASSSTAB 1 / 43

DRAWN	18.04.2024	TITLE		SCALE	SHEET 1 OF 1
S. Schmiel		Aufgabe 2 - Übersicht		1 / 65	
CHECKED		SIZE	DWG NO	REV	
QA		A4			
MFG					
APPROVED					



QUERSCHNITT C-C
 MASSSTAB 1 / 2

DRAWN	23.04.2024	TITLE	Bohrstand	SIZE	DWG NO	REV
S. Schmiel				A4		
CHECKED				SCALE	1 / 2	SHEET 1 OF 1
QA						
MFG						
APPROVED						



DRAWN	26.04.2024				
S. Schmiel					
CHECKED					
QA					
MFG					
APPROVED					
		SIZE	DWG NO		REV
		A4			
		SCALE	1:1		SHEET 1 OF 1

TITLE

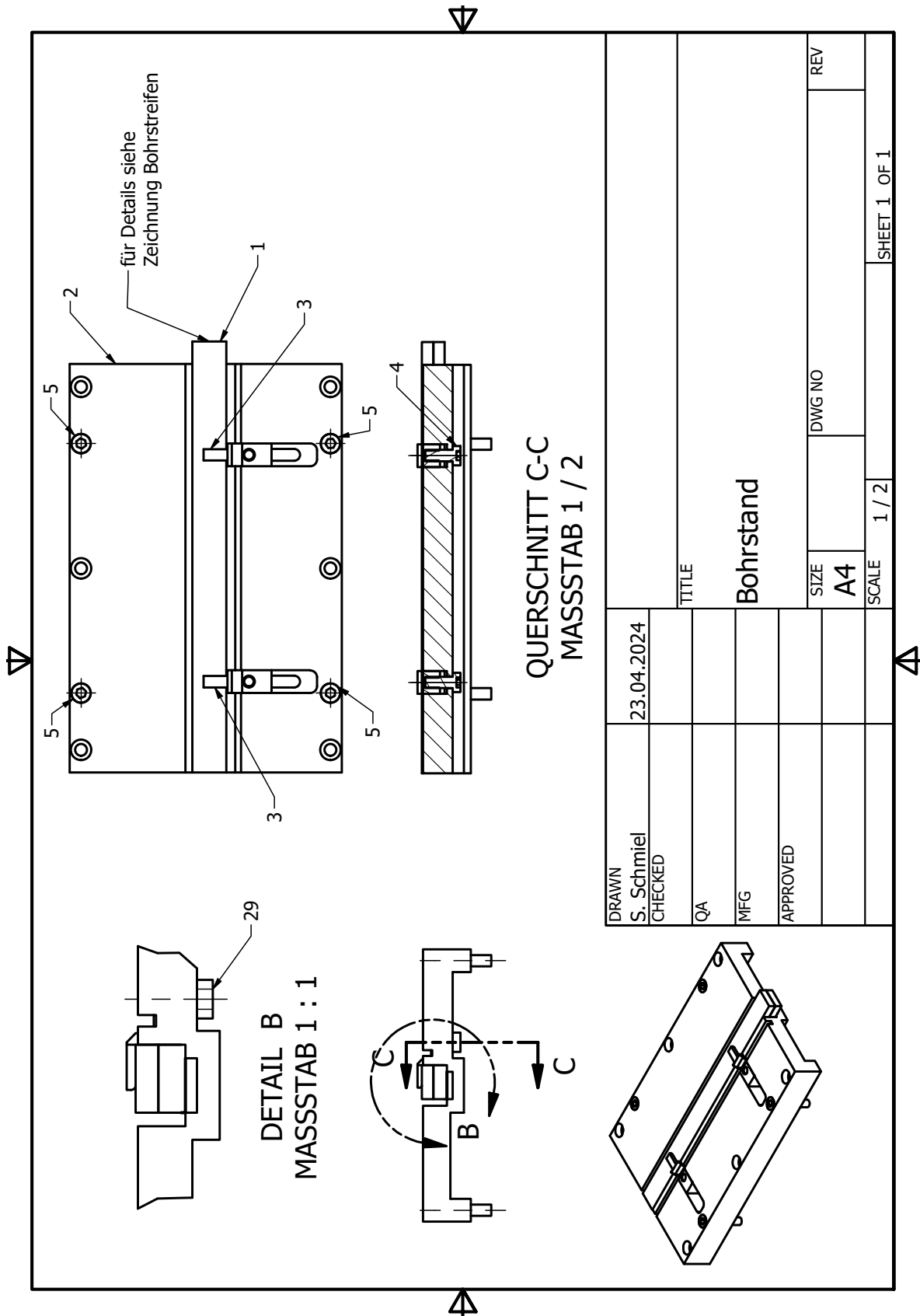
Bohrstreifen Auf2 Aufbohren

Aufgabe 3

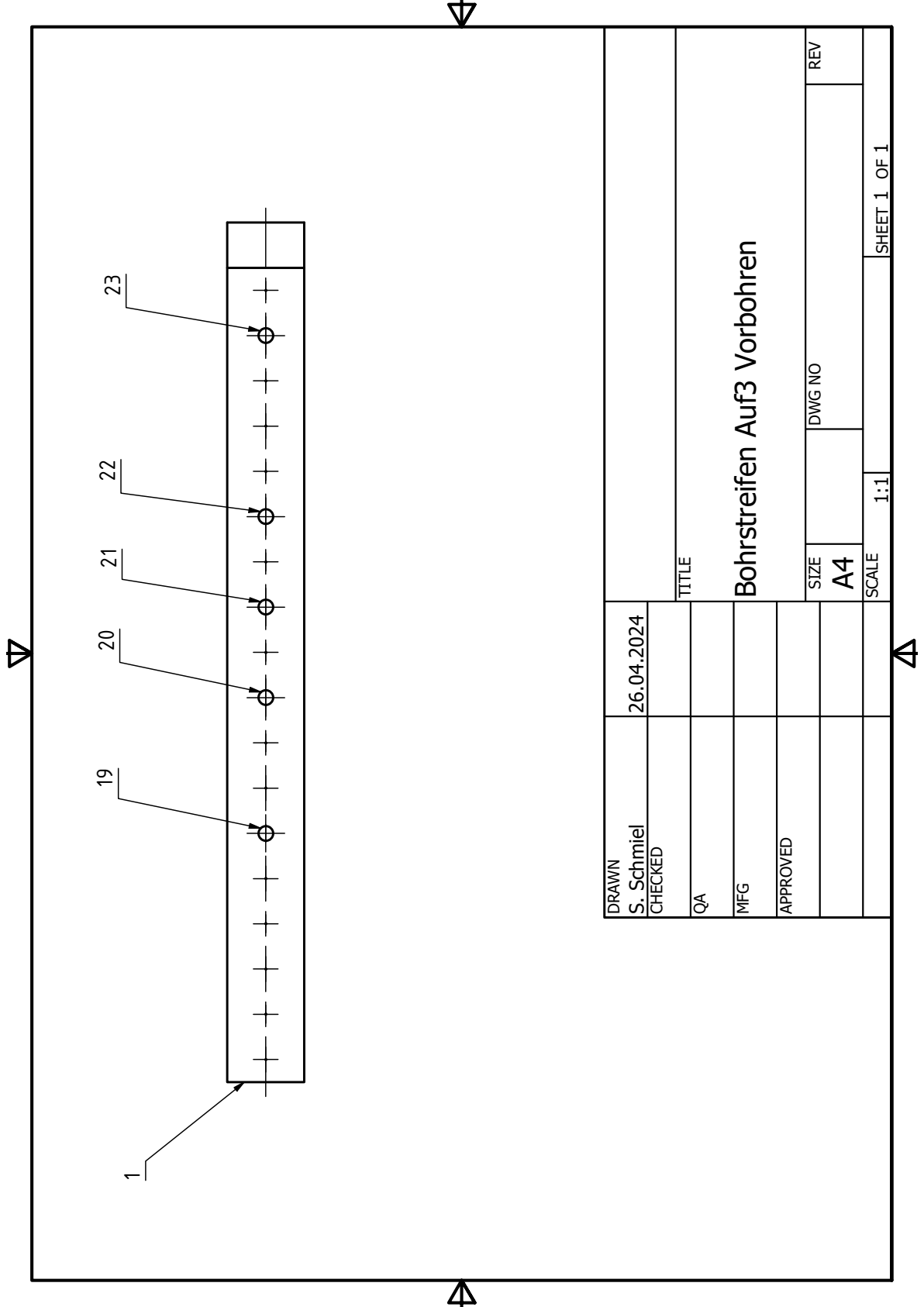
PART NUMBER	ITEM	AMOUNT
75129194	Bohrstreifen	2
75132581	obere Platte	1
75132583	Klemmstück	2
75132584	zweite Bohrschablone	1
DIN7984-M5x12	Klemmschraube	2
DIN912-M5x25	Montageschraube	6
75132585	erste Bohrschablone	1
Magnet-6x4.5(NdFeB)	Magnet	4
123040	Durchmesser 3,3mm	7
123002	Durchmesser 4,5mm	2
123231	Durchmesser 4,8mm	1
123021	Durchmesser 5mm	3
7514678	Schraubplatte	1
20311	Schraube M8x1.5	2
20321	Schraube M6x1	3
20331	Schraube M5x0.8	2
2298674	Klemmschraube	2

Aufgabe 3

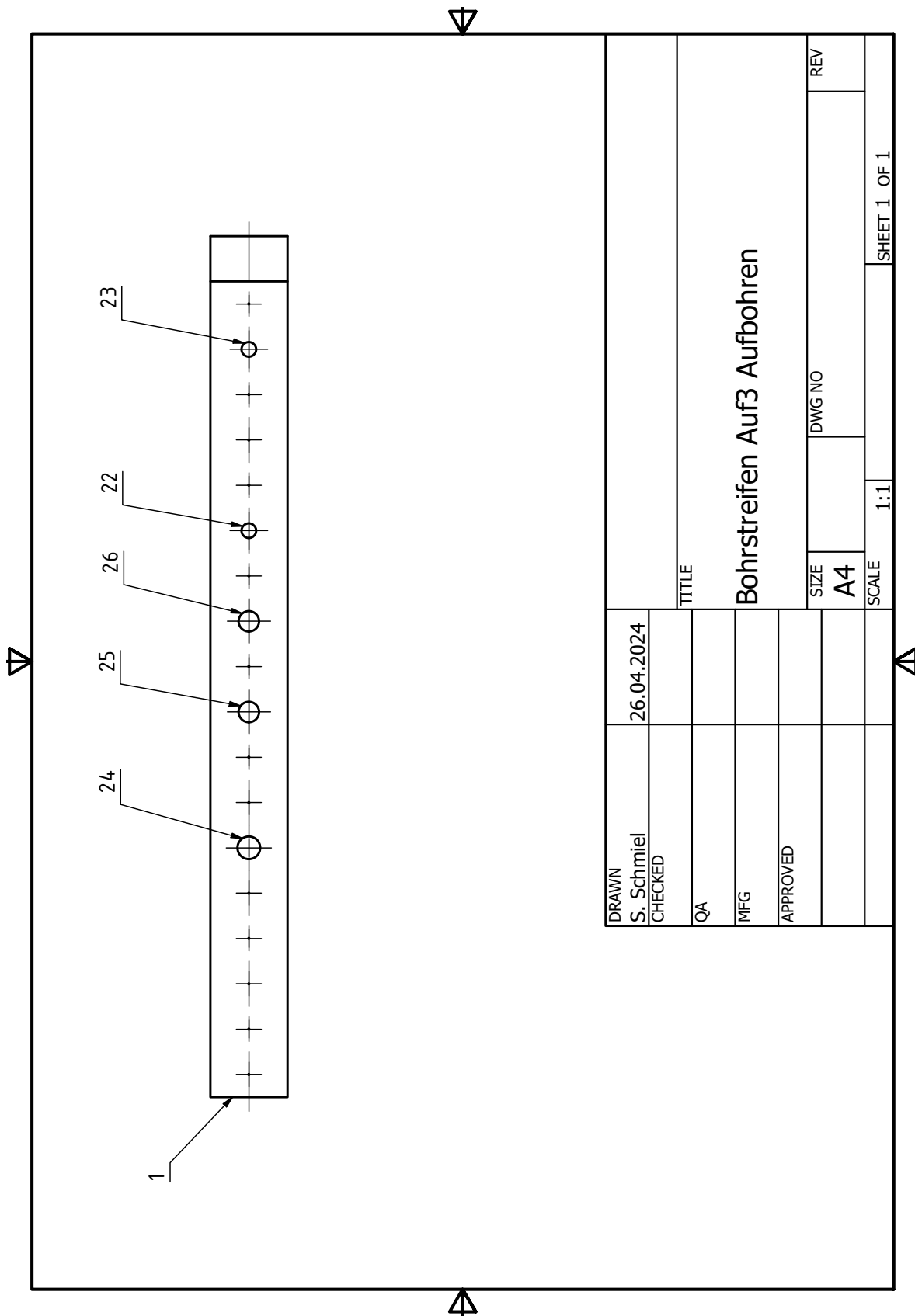
POS-NR	PART NUMBER	INFO
28	123040	
24	123021	1450 rpm
15	20321	7Nm
21	123040	2050 rpm
11	20311	5Nm
6	123021	
27	123040	
5	DIN912-M5x25	
13	20321	5Nm
16	20331	5Nm
3	75132583	
26	123002	3350 rpm
7	123002	
19	123040	2100 rpm
25	123002	3600 rpm
17	20331	5Nm
8	123231	1200 rpm
20	123040	1800 rpm
10	123021	1300 rpm
2	75132581	
29	2298674	
9	123021	1300 rpm
23	123040	2000 rpm
18	7514678	
22	123040	1650 rpm
12	20311	5Nm
4	DIN7984-M5x12	
14	20321	7Nm
1	75129194	



DRAWN	23.04.2024	TITLE	Bohrstab		REV
S. Schmiel			SIZE	DWG NO	
CHECKED			A4		
QA			SCALE	1 / 2	SHEET 1 OF 1
MFG					
APPROVED					



DRAWN	26.04.2024			SHEET 1 OF 1	
S. Schmiel					
CHECKED					
QA		TITLE			
MFG		Bohrstreifen Auf3 Vorbohren			
APPROVED		SIZE	DWG NO	REV	
		A4			
		SCALE	1:1		



DRAWN	26.04.2024			SHEET 1 OF 1	
S. Schmiel					
CHECKED					
QA					
MFG					
APPROVED					
		SIZE	DWG NO	REV	
		A4			
		SCALE	1:1		
		TITLE			
		Bohrstreifen Auf3 Aufbohren			

Technical drawing of a screw plate (Schraubplatte) with a grid of holes. The drawing includes callouts 11 through 18. The table below the drawing contains the following data:

Name		Datum		Gezeich		Kontroll		Norm		Status		Änderungen		Datum		Name			
S. Schmiel		06.03.2024																	
Schraubplatte Aufgabe 3																		1	
																		A4	

Anhang H - Fragebogen für die Industrieuntersuchung



In dieser Umfrage sind 36 Fragen enthalten.

Persönliche Informationen

Bitte geben Sie die Informationen zu Ihrem Alter und Geschlecht sowie zur Berufsbezeichnung und Ihrer Berufserfahrung in Jahren an.

Bitte geben Sie Ihr Alter an.

In dieses Feld dürfen nur Zahlen eingegeben werden.

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

Bitte geben Sie ihr Geschlecht an

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- weiblich
 männlich

Bitte geben Sie ihre Berufsbezeichnung an.

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

Bitte geben Sie ihre Berufserfahrung in Jahren an.

In dieses Feld dürfen nur Zahlen eingegeben werden.

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

Wahrgenommener Nutzen

Bitte bewerten Sie den wahrgenommenen Nutzen der folgenden Funktionen des digitalen Assistenzsystems für Ihre tägliche Arbeit.

Geben Sie dazu jeweils Ihre Zustimmung zu den gemachten Aussagen an.

Die Nutzung des digitalen Assistenzsystems würde meine Arbeitsleistung verbessern. *

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- 1 (Stimme überhaupt nicht zu)
 2 (Stimme wenig zu)
 3 (Stimme eher nicht zu)
 4 (Neutral / Weder noch)
 5 (Stimme eher zu)
 6 (Stimme zu)
 7 (Stimme voll und ganz zu)

Durch das digitale Assistenzsystem könnte ich meine Arbeitsaufgaben schneller erledigen. *

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- 1 (Stimme überhaupt nicht zu)
- 2 (Stimme wenig zu)
- 3 (Stimme eher nicht zu)
- 4 (Neutral / Weder noch)
- 5 (Stimme eher zu)
- 6 (Stimme zu)
- 7 (Stimme voll und ganz zu)

Die Integration der smarten Werkzeuge in das System würde meine Effizienz bei der Arbeit erhöhen. *

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- 1 (Stimme überhaupt nicht zu)
- 2 (Stimme wenig zu)
- 3 (Stimme eher nicht zu)
- 4 (Neutral / Weder noch)
- 5 (Stimme eher zu)
- 6 (Stimme zu)
- 7 (Stimme voll und ganz zu)

Die Kommunikation zwischen der Tablet-Applikation und den Werkzeugen würde mir die Arbeit erleichtern. *

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- 1 (Stimme überhaupt nicht zu)
- 2 (Stimme wenig zu)
- 3 (Stimme eher nicht zu)
- 4 (Neutral / Weder noch)
- 5 (Stimme eher zu)
- 6 (Stimme zu)
- 7 (Stimme voll und ganz zu)

Insgesamt ist das Assistenzsystem für meine tägliche Arbeit nützlich. *

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- 1 (Stimme überhaupt nicht zu)
- 2 (Stimme wenig zu)
- 3 (Stimme eher nicht zu)
- 4 (Neutral / Weder noch)
- 5 (Stimme eher zu)
- 6 (Stimme zu)
- 7 (Stimme voll und ganz zu)

Wie sicher sind Sie sich mit den gemachten Aussagen? *

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- 1 (Sehr unsicher)
- 2 (Unsicher)
- 3 (Eher unsicher)
- 4 (Neutral)
- 5 (Eher sicher)
- 6 (Sicher)
- 7 (Sehr sicher)

Wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit

Bitte bewerten Sie die Benutzerfreundlichkeit des digitalen Assistenzsystems für Ihre tägliche Arbeit.

Geben Sie dazu jeweils Ihre Zustimmung zu den gemachten Aussagen an.

Die Nutzung der Tablet-Applikation des Assistenzsystems scheint einfach und intuitiv.

*

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- 1 (Stimme überhaupt nicht zu)
- 2 (Stimme wenig zu)
- 3 (Stimme eher nicht zu)
- 4 (Neutral / Weder noch)
- 5 (Stimme eher zu)
- 6 (Stimme zu)
- 7 (Stimme voll und ganz zu)

Ich finde die Interaktion mit den smarten Werkzeugen durch das Assistenzsystem unkompliziert. *

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- 1 (Stimme überhaupt nicht zu)
- 2 (Stimme wenig zu)
- 3 (Stimme eher nicht zu)
- 4 (Neutral / Weder noch)
- 5 (Stimme eher zu)
- 6 (Stimme zu)
- 7 (Stimme voll und ganz zu)

Es ist einfach, die Arbeitspläne über die Tablet-Applikation zu verstehen und zu befolgen. *

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- 1 (Stimme überhaupt nicht zu)
- 2 (Stimme wenig zu)
- 3 (Stimme eher nicht zu)
- 4 (Neutral / Weder noch)
- 5 (Stimme eher zu)
- 6 (Stimme zu)
- 7 (Stimme voll und ganz zu)

Es wäre für mich einfach den Umgang mit dem Assistenzsystem und den smarten Handwerkzeugen zu lernen. *

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- 1 (Stimme überhaupt nicht zu)
- 2 (Stimme wenig zu)
- 3 (Stimme eher nicht zu)
- 4 (Neutral / Weder noch)
- 5 (Stimme eher zu)
- 6 (Stimme zu)
- 7 (Stimme voll und ganz zu)

Insgesamt finde ich das digitale Assistenzsystem einfach zu bedienen. *

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- 1 (Stimme überhaupt nicht zu)
- 2 (Stimme wenig zu)
- 3 (Stimme eher nicht zu)
- 4 (Neutral / Weder noch)
- 5 (Stimme eher zu)
- 6 (Stimme zu)
- 7 (Stimme voll und ganz zu)

Wie sicher sind Sie sich mit den gemachten Aussagen? *

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- 1 (Sehr unsicher)
- 2 (Unsicher)
- 3 (Eher unsicher)
- 4 (Neutral)
- 5 (Eher sicher)
- 6 (Sicher)
- 7 (Sehr sicher)

Einstellung zur Nutzung

Bitte bewerten Sie, wie angenehm und positiv Sie die Nutzung des digitalen Assistenzsystems in Ihrem Arbeitsalltag empfinden.

Geben Sie dazu jeweils Ihre Zustimmung zu den gemachten Aussagen an.

Die Nutzung des digitalen Assistenzsystems würde mir Spaß machen. *

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- 1 (Stimme überhaupt nicht zu)
- 2 (Stimme wenig zu)
- 3 (Stimme eher nicht zu)
- 4 (Neutral / Weder noch)
- 5 (Stimme eher zu)
- 6 (Stimme zu)
- 7 (Stimme voll und ganz zu)

Ich habe eine positive Einstellung gegenüber der Verwendung dieses Assistenzsystems in meiner Arbeit. *

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- 1 (Stimme überhaupt nicht zu)
- 2 (Stimme wenig zu)
- 3 (Stimme eher nicht zu)
- 4 (Neutral / Weder noch)
- 5 (Stimme eher zu)
- 6 (Stimme zu)
- 7 (Stimme voll und ganz zu)

Die Kombination aus Tablet-Applikation und smarten Werkzeugen ist eine gute Ergänzung zu meiner täglichen Arbeitsweise. *

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- 1 (Stimme überhaupt nicht zu)
- 2 (Stimme wenig zu)
- 3 (Stimme eher nicht zu)
- 4 (Neutral / Weder noch)
- 5 (Stimme eher zu)
- 6 (Stimme zu)
- 7 (Stimme voll und ganz zu)

Wie sicher sind Sie sich mit den gemachten Aussagen? *

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- 1 (Sehr unsicher)
- 2 (Unsicher)
- 3 (Eher unsicher)
- 4 (Neutral)
- 5 (Eher sicher)
- 6 (Sicher)
- 7 (Sehr sicher)

Nutzungsverhalten

Bitte bewerten Sie, inwieweit Sie beabsichtigen, das digitale Assistenzsystem regelmäßig in Ihrer Arbeit zu nutzen.

Geben Sie dazu jeweils Ihre Zustimmung zu den gemachten Aussagen an.

Wenn möglich, beabsichtige ich, das Assistenzsystem regelmäßig in meiner Arbeit zu nutzen. *

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- 1 (Stimme überhaupt nicht zu)
- 2 (Stimme wenig zu)
- 3 (Stimme eher nicht zu)
- 4 (Neutral / Weder noch)
- 5 (Stimme eher zu)
- 6 (Stimme zu)
- 7 (Stimme voll und ganz zu)

Ich würde das Assistenzsystem gerne für möglichst viele Aufgaben einsetzen. *

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- 1 (Stimme überhaupt nicht zu)
- 2 (Stimme wenig zu)
- 3 (Stimme eher nicht zu)
- 4 (Neutral / Weder noch)
- 5 (Stimme eher zu)
- 6 (Stimme zu)
- 7 (Stimme voll und ganz zu)

Wenn es von meinem Unternehmen angeboten wird, werde ich das digitale Assistenzsystem gerne täglich bei meinen Aufgaben verwenden. *

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- 1 (Stimme überhaupt nicht zu)
- 2 (Stimme wenig zu)
- 3 (Stimme eher nicht zu)
- 4 (Neutral / Weder noch)
- 5 (Stimme eher zu)
- 6 (Stimme zu)
- 7 (Stimme voll und ganz zu)

Wie sicher sind Sie sich mit den gemachten Aussagen? *

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- 1 (Sehr unsicher)
- 2 (Unsicher)
- 3 (Eher unsicher)
- 4 (Neutral)
- 5 (Eher sicher)
- 6 (Sicher)
- 7 (Sehr sicher)

Nützlichkeit der Funktionen

Bitte bewerten Sie die Nützlichkeit der aufgeführten Funktionen des digitalen Assistenzsystems für Ihre Arbeit.

Geben Sie dazu jeweils Ihre Zustimmung zu den gemachten Aussagen an.

Die Funktion der automatischen Parametereinstellung und Freigabe ist sinnvoll für meine Arbeit. *

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- 1 (Stimme überhaupt nicht zu)
- 2 (Stimme wenig zu)
- 3 (Stimme eher nicht zu)
- 4 (Neutral / Weder noch)
- 5 (Stimme eher zu)
- 6 (Stimme zu)
- 7 (Stimme voll und ganz zu)

Der CAD-Modell-Viewer mit automatischem Zoom zu den entsprechenden Bauteilen ist eine nützliche Funktion. *

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- 1 (Stimme überhaupt nicht zu)
- 2 (Stimme wenig zu)
- 3 (Stimme eher nicht zu)
- 4 (Neutral / Weder noch)
- 5 (Stimme eher zu)
- 6 (Stimme zu)
- 7 (Stimme voll und ganz zu)

Die Live-Sicht auf die Werkzeugdaten ist eine hilfreiche Funktion für die Durchführung meiner Aufgaben. *

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- 1 (Stimme überhaupt nicht zu)
- 2 (Stimme wenig zu)
- 3 (Stimme eher nicht zu)
- 4 (Neutral / Weder noch)
- 5 (Stimme eher zu)
- 6 (Stimme zu)
- 7 (Stimme voll und ganz zu)

Die Fehlermeldungen des Systems sind hilfreich und sinnvoll, um Probleme schnell zu identifizieren. *

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- 1 (Stimme überhaupt nicht zu)
- 2 (Stimme wenig zu)
- 3 (Stimme eher nicht zu)
- 4 (Neutral / Weder noch)
- 5 (Stimme eher zu)
- 6 (Stimme zu)
- 7 (Stimme voll und ganz zu)

Die Visualisierung der Bohr- und Schraubpunkte ist eine nützliche Funktion, die meine Arbeit erleichtert. *

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- 1 (Stimme überhaupt nicht zu)
- 2 (Stimme wenig zu)
- 3 (Stimme eher nicht zu)
- 4 (Neutral / Weder noch)
- 5 (Stimme eher zu)
- 6 (Stimme zu)
- 7 (Stimme voll und ganz zu)

Die Visualisierung der Werkzeugposition trägt dazu bei, meine Arbeit präziser auszuführen. *

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- 1 (Stimme überhaupt nicht zu)
- 2 (Stimme wenig zu)
- 3 (Stimme eher nicht zu)
- 4 (Neutral / Weder noch)
- 5 (Stimme eher zu)
- 6 (Stimme zu)
- 7 (Stimme voll und ganz zu)

Der applikationsgesteuerte Modus des Systems ist eine sinnvolle Funktion für meine Arbeit. *

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- 1 (Stimme überhaupt nicht zu)
- 2 (Stimme wenig zu)
- 3 (Stimme eher nicht zu)
- 4 (Neutral / Weder noch)
- 5 (Stimme eher zu)
- 6 (Stimme zu)
- 7 (Stimme voll und ganz zu)

Der positionsgesteuerte Modus ist eine sinnvolle Funktion für meine Arbeit. *

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- 1 (Stimme überhaupt nicht zu)
- 2 (Stimme wenig zu)
- 3 (Stimme eher nicht zu)
- 4 (Neutral / Weder noch)
- 5 (Stimme eher zu)
- 6 (Stimme zu)
- 7 (Stimme voll und ganz zu)

Wie sicher sind Sie sich mit den gemachten Aussagen? *

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- 1 (Sehr unsicher)
- 2 (Unsicher)
- 3 (Eher unsicher)
- 4 (Neutral)
- 5 (Eher sicher)
- 6 (Sicher)
- 7 (Sehr sicher)

Allgemeine Fragen**Was müsste an der Lösung angepasst werden? Welche spezifischen Funktionen wären zusätzlich sinnvoll?**

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

Welche Funktionen scheinen für Ihre Tätigkeit überflüssig zu sein?

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

Haben Sie Anmerkungen?

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

Senden Sie Ihre Umfrage ein.
Vielen Dank für die Beantwortung des Fragebogens.

Schriftenreihe

Band 1

Koch, Jens Bodo: Unterstützung der schifbaulichen Projektierung durch Repräsentation von Erfahrungswissen, 2004.

Band 2

Meyer, Sven: Flexible Gruppenarbeit in der Auftragsfertigung, 2004.

Band 3

Joswig, Dirk: Untersuchungen zum Zerspanverhalten weicher Elastomerwerkstoffe, 2005.

Band 4

Kerse, Nils: Unterstützung der schifbaulichen Produktentstehung durch Einsatz von Virtual Reality (VR)-Technologien, 2007.

Band 5

Kurzewitz, Mathias: Kompetenzentwicklung als Element erfolgreicher Strategieumsetzung – dargestellt am Beispiel des Schiffbaus, 2007.

Band 6

Dauids, Niko: Workflow-Management in Produktentwicklungsprojekten der Investitionsgüterindustrie, 2008.

Band 7

Möller, Carsten: Untersuchungen zum Drehen von gesinterten WC-Co-Hartmetallwalzringen, 2009.

Band 8

Gotsch, Falko: Untersuchungen zum Zerspanverhalten von Elastomerschäumen mit dem Ziel einer wirtschaftlichen Fertigung von Feder-Dämpfer-Bauteilen, 2009.

Band 9

Neumann, Lutz: Risikomanagement bei der Gestaltung von Unternehmenskooperationen – untersucht am Beispiel der Investitionsgüterindustrie, 2009.

Band 10

Sellmer, Dirk: Untersuchungen zur Verbesserung des Arbeitsergebnisses beim Vollbohren unter besonderer Berücksichtigung der Prozesskräfte und der Spanbildung, 2009.

Band 11

Eggers, Daniel: Entwicklung von Dienstleistungsportfolios bei Investitionsgüterherstellern – dargestellt am Beispiel der maritimen Industrie, 2009.

Band 12

Kindler, Jörg: Werkstückqualität und Standzeitorientierung von Zerspanwerkzeugen bei der Umrissbearbeitung von kohlenstoffaserverstärkten Kunststoffen, 2010.

Band 13

Frömming, Hanno: Zerspanung von WC-Co-Hartmetall im unterbrochenen Schnitt, 2011.

Band 14

Schweitzer, Thomas: Nutzungsgradsteigerung verketteter Produktionslinien, 2011.

Band 15

Wagner, Lars Arne: Szenariobasierte Planung und Steuerung mit Simulation im Schiffbau, 2011.

Band 16

Schäfer, Christoph: Einsatzmodell zur systematischen Nutzung von Virtueller Realität, 2012.

Band 17

Hartmann, Dirk: Delamination an Bauteilkanten beim Umrissfräsen kohlenstoffaserverstärkter Kunststoffe, 2012.

Band 18

Kuyumcu, Arif: Modellierung der Termintreue in der Produktion, 2013.

Band 19

Czumanski, Thomas: Handlungsorientierte Analyse der Arbeitsproduktivität in der Serienproduktion, 2013.

Band 20

Schütte, Christoph: Bohren und Hobeln von kohlenstoffaserverstärkten Kunststoffen unter besonderer Berücksichtigung der Schneide-Faser-Lage, 2014.

Band 21

Wandt, Robert: Modellgestützte Fertigungssteuerung in der Unikatfertigung am Beispiel des Schiffbaus, 2014.

Band 22

Eichenseer, Christiane: Beschichtung, thermomechanische Charakterisierung und Spannungsanalyse von Schneidkeramik, 2014.

Band 23

Heinig, Martin: Nutzung von Virtuellen Technologien für die Montageplanung von Unikaten, 2015.

Band 24

Körkel, Gregor K.: Zerspanbarkeitsbewertung von Faserverbundkunststoffen bei der Fräsbearbeitung dünnwandiger Bauteile in der Großserie, 2015.

Band 25

Ramirez Martinez, Juan A.: Flexible Automated Assembly Systems for Large CFRP-Structures using Geometrical and Force Information, 2015.

Band 26

Dose, Frank: Methode zur wissensbasierten Prozessentwicklung - Ein Ansatz für die Berücksichtigung sich wandelnder Teilsysteme beim Bohren von Schichtverbunden, 2015.

Band 27

Trzyna, Daniel: Modellierung und Steuerung von Eilaufträgen in der Produktion, 2015.

Band 28

Griefahn, Dominik: Geometrieprüfung innerer Strukturen von Faserverbund-Sandwichbauteilen, 2015.

Band 29

Borrmann, Christof: Adaptive Montageprozesse für CFK-Großstrukturen mittels Ofine-Programmierung von Industrierobotern, 2016.

Band 30

Klingelhöller, Christian: Trennschleifen von CFK-Schalenbauteilen mit räumlich gekrümmten Konturen, 2016.

Band 31

Titov, Fedor: Technologiegestützte Angebotserstellung für den Umbau komplexer Investitionsgüter, 2016.

Band 32

Tietze, Florian: Analyse und Verbesserung der Arbeitsproduktivität in der Unikatproduktion, 2017.

Band 33

Geis, Tobias: Bearbeitungsstrategien zur Zerspanung von Faser-Verbund-Honeycomb-Sandwich, 2017.

Band 34

Koppold, Nico: Kapazitätsplanung und -steuerung in der Instandhaltungsproduktion von Investitionsgütern, 2017.

Band 35

Halata, Philipp S.: Augmented-Reality-gestützte Informationsbereitstellung für die Unikatproduktion, 2018.

Band 36

Brüggemann, Felix: Bauteilqualität und Werkzeugverschleiß beim Fräsen von CFK-Gelege unter räumlichen Eingriffsbedingungen, 2018.

Band 37

Benter, Martin: Analyse von Bewegungsabläufen mit 3D-Kameras, 2018.

Band 38

Koch, Christoph: Wertstromanalyse und -design für Auftragsfertiger, 2018.

Band 39

Cordes, Marcel: Modellierung von Bahngenaugigkeit und dynamischer Stabilität beim robotergeführten Fräsen, 2019.

Band 40

Piontek, Andreas: Modellierung der Termintreue im Auftragsdurchlauf, 2020.

Band 41

Grabner, Constantin: Methodengestütztes Produktivitätsmanagement. Entwicklung eines datenbasierten Vorgehens, 2020.

Band 42

Glöckner, Robert: Entwicklung eines Gesamtmodells der Arbeitsproduktivität und der logistischen Zielgrößen, 2020.

Band 43

Schröder, Henrik: Kompetenzentwicklung in der Montage mit Hilfe virtueller Technologien, 2020.

Band 44

Engehausen, Friederike: Modellierung und Auslegung der Reihenfolgebildung mit Rüstfamilien, 2021.

Band 45

Sikorra, Jan Niklas: Frühzeitige Aufwands- und Termineinschätzung der schifbaulichen Unikatproduktion, 2021.

Band 46

Haux, Moritz A.: Modellierung von Unsicherheiten in der Planung der Unikatproduktion, 2021.

Band 47

von Wenserski, Robert: Helixfräsen und Bohren von laseradditiv gefertigten Bauteilen aus Titan für Luftfahrtanwendungen, 2021.

Band 48

Meluzov, Nikolaj: Informationsmanagement für ein digitales Instandhaltungsassistenzsystem, 2022.

Band 49

Rost, Jan Robert: Digitale Assistenzsysteme für kollaboratives Arbeiten in der Unikatproduktion, 2023.

Band 50

Steenwerth, Philipp: Analyse und Optimierung von Suchvorgängen in der industriellen Produktion, 2023.

Band 51

Brosche, Justus: Nutzung von Motion-Capture-Technologien zur individuellen Ergonomieanalyse in der Produktion, 2023.

Band 52

Mehnen, Jan: Modellgestützte Berechnung der thermischen Belastung bei der Zerspanung von unidirektionalem CFK, 2023.

Band 53

Mundt, Christopher: Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung, 2024.

Band 54

Winter, Michael: Logistische Modellierung von Chargenarbeitssystemen, 2024.

Band 55

Elzalabany, Ahmed: A Digital Assistance System for Maritime Commissioning Processes, 2024.

Band 56

Breitzke, André: Modellbasierte Identifikation und Korrektur umgebungstemperaturabhängiger thermoelastischer Verlagerungen dreiachsiger Portalfräsmaschinen, 2024.

Band 57

Köttner, Lars Stephan: Zerspankraftmodellierung und Prozessgrenzen der Umrissbearbeitung von FKV-Bauteilen mit scheibenförmigen Werkzeugen, 2025.

Band 58

Rana, Pulkit: Efficient optimization of turning processes for powertrain components using multi model-based simulation, 2025.

Band 59

Romanenko, Denys: Maschinelles Lernen zur Überwachung semi-automatischer Bohrprozesse im Flugzeugbau, 2025.

Band 60

Piontek, Simon: Integration von smarten Handwerkzeugen und digitalen Assistenzsystemen, 2026.