

Entwicklung digitaler Assistenzsysteme für den technischen Service

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

Eric Mewes M.Sc.

geb. am 11. Oktober 1988 in Pritzwalk

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

Vorsitzender: apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E. h. Rüdiger Bähr

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Karl-Heinrich Grote

Zweitgutachterin: apl. Prof. Dr. med. Irina Böckelmann

Promotionskolloquium am 29. April 2021

Ehrenerklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die Hilfe eines kommerziellen Promotionsberaters habe ich nicht in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen. Verwendete fremde und eigene Quellen sind als solche kenntlich gemacht. Ich habe insbesondere nicht wissentlich:

- Ergebnisse erfunden oder widersprüchliche Ergebnisse verschwiegen,
- statistische Verfahren absichtlich missbraucht, um Daten in ungerechtfertigter Weise zu interpretieren,
- fremde Ergebnisse oder Veröffentlichungen plagiiert,
- fremde Forschungsergebnisse verzerrt wiedergegeben.

Mir ist bekannt, dass Verstöße gegen das Urheberrecht Unterlassungs- und Schadensersatzansprüche des Urhebers sowie eine strafrechtliche Ahndung durch die Strafverfolgungsbehörden begründen kann.

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass die Dissertation ggf. mit Mitteln der elektronischen Datenverarbeitung auf Plagiate überprüft werden kann.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form als Dissertation eingereicht und ist als Ganzes auch noch nicht veröffentlicht.

(Magdeburg, 02.06.2021)

Eric Mewes

Declaration of Honor

I hereby declare that I produced this thesis without prohibited external assistance and that none other than the listed references and tools have been used. I did not make use of any commercial consultant concerning graduation. A third party did not receive any nonmonetary perquisites neither directly nor indirectly for activities which are connected with the contents of the presented thesis.

All sources of information are clearly marked, including my own publications. In particular I have not consciously:

- Fabricated data or rejected undesired results
- Misused statistical methods with the aim of drawing other conclusions than those warranted by the available data
- Plagiarized data or publications
- Presented the results of other researchers in a distorted way.

I do know that violations of copyright may lead to injunction and damage claims of the author and also to prosecution by the law enforcement authorities. I hereby agree that the thesis may need to be reviewed with an electronic data processing for plagiarism.

This work has not yet been submitted as a doctoral thesis in the same or a similar form in Germany or in any other country. It has not yet been published as a whole.

(Magdeburg, 02.06.2021)

Eric Mewes

Kurzfassung

Im technischen Service müssen zahlreiche produkt- und prozessrelevante Informationen direkt während der Arbeit an der Anlage verfügbar sein. Hier bieten sich Potenziale für den Einsatz mobiler digitaler Assistenzsysteme. Im Verbundprojekt „Gesundes mobiles Arbeiten mit digitalen Assistenzsystemen im technischen Service“ (ArdiAS) wurde das Assistenzsystem „Pocket-Assist“ entwickelt, an dessen Beispiel die gesundheitsförderliche und menschengerechte Gestaltung und Nutzung von Assistenzsystemen partizipativ erforscht wurden. In der vorliegenden Dissertation erfolgte die Erarbeitung eines Modells zur Beschreibung der Güte von Assistenzsystemen für mobile Servicetätigkeiten, welches die arbeitswissenschaftlichen Grundwerte Menschgerechtheit und Produktivität gleichwertig berücksichtigt. Anschließend wurde „Pocket-Assist“ mit Hilfe dieses Modells am Beispielarbeitsystem „Inspektion von Windenergieanlagen“ evaluiert. Dazu erfolgten neben Untersuchungen im Feld mit den betreffenden Mitarbeitern auch Laborversuche mit Versuchspersonen verschiedener Altersgruppen.

Die Ergebnisse zeigen verschiedene Vor- und Nachteile des digitalen Assistenzsystems gegenüber der zuvor verwendeten händischen Papier-Prüfliste mit zugehöriger Kamera. Im Labor benötigten die Versuchspersonen mit dem Assistenzsystem beispielsweise mehr Zeit als mit der Prüfliste, ihnen unterliefen damit jedoch auch weniger Fehler. Weiterhin nutzten die jüngeren Versuchspersonen das Assistenzsystem effizienter und wurden durch die Verwendung, insbesondere geistig, weniger stark beansprucht. Die Feldstudien wiederum zeigten im Vergleich zum Laborexperiment zum Teil ähnliche aber teilweise auch abweichende Ergebnisse. So ähnelte sich dort die Bewertung der Usability. Unterschiede in der Durchführungszeit konnten jedoch nicht festgestellt werden.

Schlussendlich wirkt sich das digitale Assistenzsystem aufgrund einer fehlenden Zeiteinsparung zwar nicht effizienzsteigernd aus, jedoch konnte insbesondere bei jüngeren Arbeitspersonen eine höhere Usability nachgewiesen werden, welche eine erhöhte Menschgerechtheit des Systems vermuten lässt. Weiterhin können auf Grundlage der Laborergebnisse Inspektionsfehler vermieden werden. Damit eignet sich „Pocket-Assist“ besser zur Erfüllung der Arbeitsaufgabe als die Prüfliste mit zugehöriger Kamera, weist in der aktuellen Version jedoch noch zahlreiche Verbesserungspotenziale auf. Das Modell zur Beschreibung der Güte von Assistenzsystemen wurde für diesen Untersuchungsgegenstand erfolgreich angewendet.

Abstract

In maintenance, numerous information related to products and processes must be available directly while working on the system. This is where potentials for the use of mobile digital assistance systems arise. Using this example, the project „Gesundes mobiles Arbeiten mit digitalen Assistenzsystemen im technischen Service“ (ArdiAS) carried out participatory research into the health-promoting and humane design and utilization of assistance systems. For this purpose, the assistance system "Pocket-Assist" was developed and tested in this project. In this dissertation, a model was developed to describe the quality of assistance systems for mobile service activities, which equally considers the basic values of ergonomics and productivity. Subsequently, "Pocket-Assist" was evaluated with the help of this model on the example work system "Inspection of wind energy plants". To achieve this, in addition to field tests with the employees concerned, laboratory tests were also carried out with test persons of different age groups.

The results demonstrate various advantages and disadvantages associated with the digital assistance system in comparison to the previously used checklist with associated camera. In the laboratory, for example, the test persons needed more time with the assistance system than with the checklist, but they also made fewer mistakes. Furthermore, the younger test subjects used the assistance system more efficiently and suffered less mental stress due to its use. The field studies, in turn, showed partly similar but partly different results compared to the laboratory experiment. The evaluation of usability was similar there. However, differences in the implementation time could not be determined.

In the end, the digital assistance system does not increase efficiency due to a lack of time savings, but a higher usability could be proven, especially among younger employees, which suggests that the system is more user-friendly. Furthermore, based on the laboratory results, it might be possible to avoid inspection errors by using the assistance system. Thus, "Pocket-Assist" is better suited for fulfilling the work task than the checklist with associated camera, but in the current version it still shows numerous potentials for improvement. The developed model describing the quality of assistance systems was applied successfully to this research area.

Gender Erklärung

In der vorliegenden Dissertation wird die Verwendung einer geschlechtsneutralen Ausdrucksweise angestrebt. An Stellen, an denen dies nicht möglich war, wurde nur die männliche Form verwendet, z. B. „Nutzerfreundlichkeit“ statt "Nutzerinnenfreundlichkeit". Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Verwendung der männlichen Form geschlechtsunabhängig verstanden werden soll.

Inhaltsverzeichnis

Ehrenerklärung	I
Declaration of Honor	II
Kurzfassung	III
Abstract.....	IV
Gender Erklärung	V
Inhaltsverzeichnis	VI
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XIII
Abkürzungsverzeichnis	XIV
1 Einleitung und Zielstellung	1
2 Wissenschaftliche Grundlagen	6
2.1 Arbeitswissenschaftliche Grundlagen	6
2.1.1 Arbeitssysteme.....	6
2.1.2 Belastung und Beanspruchung.....	8
2.1.3 Ziele der Arbeitswissenschaft	10
2.2 Digitale Assistenzsysteme	12
2.2.1 Einordnung digitaler Assistenzsysteme	12
2.2.2 Arbeit mit digitalen Assistenzsystemen.....	15
2.2.3 Ausgewählte Endgeräte für digitale Assistenzsysteme	17
2.3 Softwareergonomie und Usability	20
2.4 Usability Tests	24
2.5 Mobilität in der Arbeit.....	26
2.6 Arbeit im technischen Service.....	31
3 Analyse- und Bewertungsmodell für digitale Assistenzsysteme.....	37

4	Das Arbeitssystem „Inspektion von Windenergieanlagen“	41
4.1	Aufbau von Windenergieanlagen	41
4.2	Planung der Servicetätigkeit	43
4.3	Vorbereitung der Servicetätigkeit	43
4.4	Durchführung der Servicetätigkeit	44
4.5	Nachbereitung der Servicetätigkeit	47
4.6	Bewertung des Arbeitssystems nach ErgoInstrument REBA 9.0.....	48
5	Das digitale Assistenzsystem „Pocket-Assist“	50
5.1	Arbeitsansichten von „Pocket-Assist“	51
6	Forschungsfragen und Versuchsplanung.....	53
6.1	Forschungsfragen	53
6.2	Versuchsplanung	55
7	Ausgewählte Erhebungsmethoden	58
7.1	Analyse der Arbeitsbeanspruchung mit dem NASA Task Load Index.....	58
7.2	Körperhaltungsanalyse mit Rapid Entire Body Assessment (REBA).....	59
7.3	Usability-Analyse nach ISONORM 9241/100.....	62
8	Versuche unter Laborbedingungen.....	65
8.1	Aufbau des Laborexperiments.....	65
8.2	Verwendete Geräte	71
8.3	Versuchsablauf des Laborexperiments.....	72
8.4	Zusammensetzung der Versuchspersonen.....	75
8.5	Vergleich psychischer und physischer Beanspruchung.....	76
8.6	Vergleich der Usability nach ISO-NORM 9241/110-S.....	77
8.7	Vergleich des Zeitbedarfs.....	82
8.8	Fehlerhäufigkeit im Versuchsablauf.....	84
8.9	Ergebnisse Kurzinterviews	86

8.10	Bewertung und Diskussion Ergebnisse des Laborversuchs	87
9	Evaluation unter Feldbedingungen	89
9.1	Vergleich psychischer und physischer Beanspruchung.....	89
9.2	Vergleich physischer Belastung durch Körperhaltung.....	90
9.3	Vergleich der Usability nach ISO-NORM 9241/110-S.....	93
9.4	Vergleich des Zeitbedarfs.....	97
9.5	Leitfadengestützte Interviews.....	99
9.6	Bewertung und Diskussion der Evaluation unter Feldbedingungen	101
10	Analyse und Reflexion der Ergebnisse.....	104
10.1	Reflexion der Evaluationsmethoden.....	104
10.2	Beantwortung der Forschungsfragen.....	106
11	Zusammenfassung und Ausblick.....	112
	Literaturverzeichnis	XII
	Anhang	XXIV
	A – Struktureller Aufbau von „Pocket-Assist“	XXIV
	B – Ergebnisse Kurzinterviews	XXVI
	C – Ergebnisse der EKG-Untersuchungen im Feld.....	XXVII
	D – Ergebnisse nach ErgoInstrument REBA 9.0	XXIX

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Das REFA-Arbeitssystem, eigene Darstellung nach (REFA, 1984, S. 94)	7
Abbildung 2: Mechanisches Ersatzmodell des Belastungs- und Beanspruchungs-Konzeptes (Rohmert W. , 1984 zit. n. Schlick, Bruder & Luczak, 2018, S. 24)	8
Abbildung 3: Ebenen-Schema nach Hacker (1986, S. 511).....	10
Abbildung 4: Arbeitswissenschaftliche Gestaltungsziele nach Quaas (1999, S. 122)	12
Abbildung 5: Charakterisierung digitaler Assistenzsysteme (Apt et al., 2018, S. 19).....	13
Abbildung 6: Übersicht über Arten der Arbeit und ihre Zusammensetzung aus Grundtypen (Rohmert W. , 1983 zit. n. Apt et al., 2018, S.23).....	14
Abbildung 7: Charakterisierung digitaler Assistenzsysteme, erweiterte Darstellung nach Mewes et al. (2020, S. 10) in Anlehnung an Apt et al. (2018, S. 19).....	15
Abbildung 8: Gebrauchstauglichkeit eines Systems, Produkts oder einer Dienstleistung (DIN-EN-ISO-9241-11, 2017, S. 14).....	21
Abbildung 9: Übersicht der Formen von Mobilität (eigene Darstellung in Anlehnung an Ducki & Nguyen (2016, S. 17))	29
Abbildung 10: Typische Abbaukurve des Instandhaltungsvorrats nach DIN-31051 (2012, S. 8).....	32
Abbildung 11: Aufbau des Modells zur Beschreibung der Güte von Assistenzsystemen in Anlehnung an (Möller T., 2010, S. 57; Hacker, 1986, S. 511; Quaas, 1999, S. 9)	40
Abbildung 12: Getriebelose Horizontalachsen-Windenergieanlage nach Reich & Reppich (2018, S. 180)	42
Abbildung 13: Örtliche Trennung der Inspektionsabschnitte (eigene Darstellung).....	45
Abbildung 14: Beispiele eingeschränkter Positionen bei der Betriebsbegehung einer Windenergieanlage (Mewes et al., 2018, S. 5).....	47
Abbildung 15: Ergebnisse der Arbeitssystemanalyse „Inspektion von Windenergieanlagen“ mit dem Analyseinstrument REBA 9.0 Pohlandt (2009)	49
Abbildung 16: „Pocket-Assist“ (Einplatinencomputer und Powerbank) auf dem Dach einer Windenergieanlage (eigene Darstellung)	50

Abbildung 17: Beispiel für die Arbeitsansicht des Assistenzsystems „Pocket-Assist“ (Ansicht von links nach rechts heruntergescrollt).....	51
Abbildung 18: Bewertung der Hals-/Nackenposition nach REBA Darstellung, erweitert nach (Hignett & Lynn, 2000, S. 202).....	60
Abbildung 19: Beispielhafte Bewertung der Kraninspektion nach REBA	62
Abbildung 20: Beispielitem aus dem verwendeten ISONORM 9241/110-S, angelehnt an Prümper (2008).....	63
Abbildung 21: Schematischer Aufbau des Versuchsfeldes.....	65
Abbildung 22: Arbeitsstation Schrankboden (links: Frontansicht, rechts oben: korrekter Zustand; rechts unten: fehlerhafter Zustand).....	66
Abbildung 23: Arbeitsstation Betriebsdaten (links) und Schaltschrank mit korrekter Anordnung der Pinnadeln (rechts).....	67
Abbildung 24: Arbeitsstation Generator zur akustischen Prüfung.....	68
Abbildung 25: Arbeitsstation Füllstandskontrolle.....	68
Abbildung 26: Arbeitsstation Generatorwelle (links: Außenansicht, rechts: Prüfansicht im fehlerfreien Zustand)	69
Abbildung 27: Arbeitsstation Erste-Hilfe-Kasten (links: korrekte Platzierung, rechts: geöffnet mit gültiger TÜV-Plakette).....	69
Abbildung 28: Arbeitsstation Kran (links: Skizze, rechts: Fotografie).....	70
Abbildung 29: Ablagerungen in Form von Kronkorken	70
Abbildung 30: Arbeitsstation Elektroleitung geöffnet im fehlerfreien Zustand.....	71
Abbildung 31: Ausrüstung der Versuchspersonen vor dem Versuch (Mewes et al., 2020)	73
Abbildung 32: Schematische Darstellung des Versuchsablaufs	74
Abbildung 33: Selbsteinschätzung der Vertrautheit der Versuchspersonen mit Smartphones und Checklisten auf einer siebenstufigen Skala von -3 bis 3	75
Abbildung 34: Ausprägung des NASA-RTLX für Prüfliste und Assistenzsystem über alle Versuchspersonen.....	76
Abbildung 35: Ausprägung der Aufgabenangemessenheit nach ISONORM 9241/110-S.....	78

Abbildung 36: Ausprägung der Selbstbeschreibungsfähigkeit nach ISONORM 9241/110-S	78
Abbildung 37: Ausprägung der Erwartungskonformität nach ISONORM 9241/110-S	79
Abbildung 38: Ausprägung der Lernförderlichkeit nach ISONORM 9241/110-S	79
Abbildung 39: Ausprägung der Steuerbarkeit nach ISONORM 9241/110-S	80
Abbildung 40: Ausprägung der Fehlertoleranz nach ISONORM 9241/110-S.....	81
Abbildung 41: Ausprägung der Individualisierbarkeit nach ISONORM 9241/110-S	81
Abbildung 42 Ausprägung der einzelnen Parameter der Gebrauchstauglichkeit nach ISONORM 9241/110-S	82
Abbildung 43: Durchschnittliche Gebrauchstauglichkeit nach Altersgruppen	82
Abbildung 44: Mittelwerte der Durchlaufzeiten in min über alle Versuchspersonen.....	83
Abbildung 45: Verteilung der Durchführungszeiten in Minuten über unterschiedliche Altersgruppen	83
Abbildung 46: Durchschnittszeiten nach der 1. und 2. Verwendung des jeweiligen Assistenzsystems	84
Abbildung 47: Gegenüberstellung aufgetretener Fehler der Versuchspersonen je Versuchsbedingung	85
Abbildung 48: Gegenüberstellung aufgetretener Fehler der Versuchspersonen im Versuchsablauf nach Altersklassen	85
Abbildung 49: Bilder der bewerteten Prüfung der Feuerlöscher.....	92
Abbildung 50: Bewertung der Aufgabenangemessenheit nach ISONORM 9241/110-S.....	93
Abbildung 51: Bewertung der Selbstbeschreibungsfähigkeit nach ISONORM 9241/110-S	94
Abbildung 52: Bewertung der Erwartungskonformität nach ISONORM 9241/110-S	94
Abbildung 53: Bewertung der Lernförderlichkeit nach ISONORM 9241/110-S	95
Abbildung 54: Bewertung der Steuerbarkeit nach ISONORM 9241/110-S	95
Abbildung 55: Bewertung der Fehlertoleranz nach ISONORM 9241/110-S.....	96

Abbildung 56: Bewertung der Individualisierbarkeit nach ISONORM 9241/110-S	96
Abbildung 57: Darstellung der Bewertung der Grundsätze der Dialoggestaltung nach ISONORM 9241/110-S	97
Abbildung 58: Durchführungszeit der Anlageninspektion an Anlagen vom Typ Vestas V90 und Enercon E66 in min.	98
Abbildung 59: Mittlere Nachbereitungszeit für Anlagen vom Typ Vestas in min.	98
Abbildung 60: Impression der Nutzung von „Pocket-Assist“ aus der Windenergieanlage	99
Abbildung 61: Auswirkungen des Assistenzsystems „Pocket-Assist“ auf die Arbeitsaufgabe „Inspektion von Windenergieanlagen“	112
Abbildung 62: Struktureller Aufbau aller Hintergrundinformationen zur Auftragserfassung in „Pocket-Assist“	XXIV
Abbildung 63: Schematische Darstellung des Auftragserstellungsprozesses in „Pocket-Assist“	XXV
Abbildung 64: Schematische Darstellung der Auftragsabarbeitung in „Pocket-Assist“	XXV
Abbildung 65: Herzfrequenztrend Inspekteur 1 oben Begehung mit Prüfliste, unten Begehung mit Assistenzsystem	XXVII
Abbildung 66: Herzfrequenztrend Inspekteur 2 oben Begehung mit Prüfliste, unten Begehung mit Assistenzsystem	XXVIII
Abbildung 67: Ergebnisse des REBA 9.0 (Pohlandt, 2009) für das Arbeitssystem „Inspektion von Windenergieanlagen“ vor Einführung des Assistenzsystems	XXIX
Abbildung 68: Ergebnisse des REBA 9.0 (Pohlandt, 2009) für das Arbeitssystem „Inspektion von Windenergieanlagen“ nach Einführung des Assistenzsystems	XXX

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Definition der Bestandteile des REFA-Arbeitssystems nach REFA (1984).....	7
Tabelle 2: Formen mobiler Arbeit, angepasste Darstellung nach Vogl und Nies (2013, S. 15)	27
Tabelle 3: Definition der Bestandteile der Instandhaltung nach DIN-31051 (2012)	32
Tabelle 4: Zusammenfassung der Herausforderungen im mobilen technischen Service der modernen Arbeitswelt (Bergmann & Jens, 1997; Haase, 2017; Maschke et al., 2014; Mecke et al., 2020; Strunz, 2012; Stüber & Lange, 2010).....	36
Tabelle 5: Beschreibung und Anzahl des Auftretens der definierten Prüfkategorien im Arbeitssystem Inspektion einer Windenergieanlage (Mewes, Waßmann, Adler, Minow & Schmicker, 2019, S. 2)	46
Tabelle 6: Gegenüberstellung der Evaluationsparameter und Erhebungsmethoden in Labor und Feld.....	57
Tabelle 7: Parameter des NASA-TLX und NASA-RTLX und deren Beschreibungen nach Hart (2006, S. 908)	58
Tabelle 8: Bewertungstabelle zur Zusammenfassung der Hals-, Rumpf- und Beinbelastung nach REBA (Hignett & Lynn, 2000, S. 204)	61
Tabelle 9: Ampelsystem zur Bewertung des Risikos einzelner Arbeitspositionen (Hignett & Lynn, 2000, S. 205)	61
Tabelle 10: Positive Formulierungen der Items nach ISONORM 9241/110-S, angepasst nach Prümper (2008).....	64
Tabelle 11: Technische Daten des verwendeten Smartphone-Endgeräts (Huawei P20 Lite) ..	71
Tabelle 12: Technische Daten der verwendeten Kamera	72
Tabelle 13: Zustände der einzelnen Stationen in den Versuchsdurchläufen.....	73
Tabelle 14: Ausprägung des NASA-RTLX für Assistenzsystem und Prüfliste über die verschiedenen Altersgruppen	77
Tabelle 15: Ergebnisse der NASA-RTLX, Untersuchung nach den Inspektionen im Feld.....	90

Tabelle 16: Anzahl der identifizierten Prüfschritte unter Verwendung der Prüfliste und des Assistenzsystems	91
Tabelle 17: Mittelwerte der REBA-Untersuchung im Feld	91

Abkürzungsverzeichnis

AS	Assistenzsystem
HMD	Head-Mounted-Display
IT	Informationstechnologie
MA	Mitarbeiter
OVGU	Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
OWAS	Ovako Working posture Analysis System
PLK	Prüfliste mit zugehöriger Kamera
REBA	Rapid Entire Body Assessment
SUS	System Usability Scale
TÜV	Technischer Überwachungsverein
VP	Versuchspersonen
WEA	Windenergieanlage
W-LAN	Wireless Local Area Network

1 Einleitung und Zielstellung

Die Digitalisierung von Arbeitsprozessen ist allgegenwärtig. Unter den Schlagworten Arbeit 4.0 und Arbeitswelt 4.0 werden alle Veränderungen zusammengefasst, welche die vierte industrielle Revolution zwischen Arbeitsprozessebene und gesellschaftlicher Ebene nach sich zieht (Zink & Bosse, 2019). Dabei wird die vierte industrielle Revolution durch den Beginn des großflächigen Einsatzes cyberphysischer Systeme charakterisiert, welche in der Lage sind, sowohl mit den Nutzern als auch mit anderen vernetzten Maschinen und Programmen Informationen auszutauschen (Kagermann & Wahlster, 2013). Maßgebliche Treiber von Industrie 4.0 und Arbeit 4.0 sind hierbei die Digitalisierung und Globalisierung sowie der demografische und kulturelle Wandel (BMAS, 2016).

Der Lehrstuhl für Arbeitswissenschaft und Arbeitsgestaltung der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg setzt für die Arbeitsgestaltung im Kontext der Arbeitswelt 4.0 verschiedene Schwerpunkte. So stellt die arbeitswissenschaftliche Begleitung der digitalen Transformation die produktive und gesundheitsgerechte Gestaltung der neuartigen Arbeits- und Geschäftsprozesse sicher (Offensive Mittelstand, 2018). Hierbei nehmen arbeitsprozessbegleitende Gestaltungsmaßnahmen einschließlich Arbeits- und Datenschutz sowie „Ethical, Legal and Social Implications“ (ELSI) eine wachsende Rolle ein. Dazu bietet sich der Einsatz smarterer Werkzeuge und digitaler Assistenzsysteme an, welche die Arbeitspersonen sowohl physisch als auch kognitiv entlasten können. Um Güte und Akzeptanz der Werkzeugsysteme sicherzustellen, sind diese partizipativ zu entwickeln und in die vorhandenen Arbeits- und Geschäftsprozesse einzubetten (Waßmann, 2019).

Die Konsequenzen digitaler Transformationsprozesse sind jedoch nicht immer positiv. Brynjolfsson (1993) stellt beispielsweise den Nutzen von Informationstechnologie (IT) für die Produktivität von Prozessen bereits seit den 70er Jahren infrage. Dieses „Productivity Paradox“ wurde dadurch begründet, dass der Einsatz von IT laut zahlreicher Statistiken keine messbaren Produktivitätsverbesserungen erzeugte. Als Ursache dafür werden unter anderem unzureichende Nutzung der Potenziale durch das Management und eine hohe zeitliche Verzögerung zwischen Einsatz und Wirkung vermutet. Noch heute sind oft ähnliche Tendenzen erkennbar und bei vielen Firmen bleibt nach Einführung digitaler Prozesse die gewünschte Produktivitätssteigerung aus (van Ark, 2016).

Auch für die Arbeitspersonen ergeben sich aus den Veränderungen, welche die digitale Transformation provoziert, nicht nur Vorteile. Zwar werden Gefährdungen aufgrund körperlich

schwerer Arbeit stetig reduziert, dafür entstehen auf psychischer Ebene jedoch neue Risiken, was sich auch im Krankenstand betreffender Unternehmen widerspiegelt (Brettschneider et al., 2020). So weisen Salanova, Llorens und Cifre (2013) beispielsweise das Auftreten von „Technostress“ durch die übermäßige Nutzung von Technologien, wie z. B. E-Mails, nach. Diese Form digitaler Beanspruchung kann Reaktionen wie Müdigkeit und ständige Unruhe provozieren. Um derartigen Tendenzen entgegenzuwirken, ist eine proaktive Gestaltung der Arbeitssituationen notwendig, welche den Menschen in den Mittelpunkt der Betrachtung stellt (Sträter & Bengler, 2019). Demnach ist es wichtig, die Arbeitsperson mit digitalen Geräten und Prozessen zu unterstützen und die Menschgerechtigkeit dieser Systeme sicherzustellen, was nur durch inter- und transdisziplinäre und auf Beteiligung fokussierte Entwicklung ebenjener Assistenzsysteme erreicht werden kann (Waßmann, 2017).

Unerschlossenes Potenzial für digitale Unterstützung zeigt sich im mobilen technischen Service. Dort müssen zur Wartung und Inspektion prozessrelevante Informationen vor Ort abrufbar oder erfassbar sein. Dazu sind für verschiedene Tätigkeiten verschiedene Informationen in unterschiedlicher Granularität erforderlich, um beispielsweise Fehlerquellen genau lokalisieren und qualitätsgerechte Wartung sicherstellen zu können. Zudem können hohe Mobilitätsanforderungen in wechselnder Arbeitsumgebung die Arbeit erschweren. Aus diesem Grund bietet sich für derartige Anwendungsfälle insbesondere der Einsatz mobiler digitaler Assistenzsysteme an. (Mecke, 2018; Mewes, Schmicker, Waßmann, Mecke & Böckelmann, 2018)

Das Verbundprojekt „Gesundes mobiles Arbeiten mit digitalen Assistenzsystemen im technischen Service“ (ArdiAS) wurde im Rahmen des Programms „Zukunft der Arbeit“ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und dem Europäischen Sozialfonds (ESF) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt, in dessen Rahmen von April 2017 bis März 2020 in partizipativer Form neue Formen des assistierten mobilen Arbeitens entwickelt, erforscht und pilotiert wurden, bildet die Grundlage für die vorliegende Dissertation. Der Fokus des Projekts lag dabei insbesondere auf der Gewährleistung gesundheitsförderlichen und beanspruchungsoptimalen Arbeitens mit den mobilen Technologien. Um dies sicherzustellen, wurde ein Forschungsverbund aus zwei betrieblichen Anwendungspartnern und drei wissenschaftlichen Forschungspartnern gebildet. (Mecke, 2018)

Die betrieblichen Anwendungspartner Dr. Weigel Anlagenbau GmbH und Terrawatt Planungsgesellschaft mbH beschäftigen sich in großen Teilen ihrer Geschäftsprozesse mit der Instand-

haltung von Industrieanlagen. Die Dr. Weigel Anlagenbau GmbH vertreibt und wartet insbesondere Druckluft- und Kühlwasseranlagen. Die Terrawatt Planungsgesellschaft mbH hat sich auf die Planung, Inbetriebnahme und Inspektion regenerativer Energieanlagen spezialisiert, wobei in ArdiAS die Inspektion von Windenergieanlagen als Geschäftsprozess isoliert betrachtet wurde. (Mecke, 2018)

Das Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und Automatisierung (IFF), der Arbeitsmedizinische Bereich der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (OVGU) und die METOP GmbH beschäftigten sich mit den in ArdiAS auftretenden Forschungs- und Entwicklungsfragestellungen. Das IFF ist ein Forschungsinstitut, welches unter anderem innovative Lösungen im Bereich Digital Engineering, Modellierung, Simulation und Optimierung im Produktlebenszyklus realisiert. In ArdiAS war das IFF federführend für die Umsetzung und Entwicklung des Assistenzsystems und die Projektkoordination zuständig. Der Arbeitsmedizinische Bereich der OVGU ist durch die Bearbeitung verschiedener Forschungsprojekte zur Gefährdungsbeurteilung, Gesundheitsförderung und arbeitsphysiologischen Beanspruchungsermittlung geprägt. Im Projekt fokussierte er insbesondere die psychophysiologischen Reaktionen der Arbeitspersonen beim Einsatz der Assistenzsysteme. Die METOP GmbH ist ein An-Institut der OVGU, welches anwendungsorientierte Forschungs- und Entwicklungsdienstleistungen in den Themengebieten Arbeitswissenschaft, Arbeits- und Organisationspsychologie, Logistik, berufliche Weiterbildung und angewandte Informatik anbietet. In ArdiAS war die METOP GmbH für die arbeitswissenschaftliche Anforderungsanalyse, die partizipative Entwicklung sowie die praxisnahe Evaluation der Assistenzsysteme verantwortlich. (Mecke, 2018)

Zum Projektstart war die Entwicklung mobiler Endgeräte bereits sehr weit fortgeschritten. Heute sind neben den etablierten Smartphones und Tablets auch verschiedene Datenbrillen für unterschiedliche Anwendungsfälle einsetzbar (Mack & Schmidt, 2020; Abele & Kluth, 2020; Haase, et al., 2020). Die steigende Leistungsfähigkeit der Geräte und deren flächendeckende Nutzung im Alltagsgebrauch ermöglichen den Einsatz in neuen Anwendungsgebieten und fördern die potenzielle Nutzerakzeptanz. Damit sind diese Geräte als Hardware für zahlreiche Anwendungen digitaler Assistenzsysteme geeignet und machen den Einsatz aufwändiger, kostenintensiver Spezialgeräte immer seltener notwendig (Mewes, Schwarz, Waßmann, Adler & Schmicker, 2019). Diese Entwicklung ermöglicht eine breitere Nutzung mobiler Assistenztechnologien auch in Spezialfällen. Unklar ist aktuell jedoch, wie diese Geräte vor dem Hintergrund einer avisierten menschengerechten und produktiven Nutzung zu gestalten sind.

Neben dieser Entwicklung verlangt das Voranschreiten der Klimakrise einen Ausbau der erneuerbaren Energien (Quaschnig, 2020). 2019 lieferte die Windenergie mit 21 % des Bruttostromanteils den größten Anteil an regenerativer Energieeinspeisung in Deutschland (BDEW, 2019). Beim Bau neuer Anlagen wurde in den Jahren 2018 (7,5 Milliarden Euro) und 2019 (3,6 Milliarden Euro) jedoch deutlich weniger investiert, als noch zuvor (10,3 Milliarden Euro im Durchschnitt der Jahre 2014-2017) (BMW, 2020). Parallel erhielt die Energiewende in den letzten Jahren nicht zuletzt wegen regelmäßiger Demonstrationen im Rahmen der „Fridays for Future“ Bewegung zusätzliche gesellschaftliche Aufmerksamkeit (Zeit-Online, 2019). Zur Erreichung der deutschen Klimaziele kann mittelfristig eine erneute Zunahme der Investitionsmenge im Bereich der Windenergie sowie die zusätzliche Bereitstellung von Flächen zur Errichtung der Anlagen nötig werden (Meier, Bovet, Geiger, Lehmann & Tafarte, 2019).

Die hierzu notwendigen Windenergieanlagen sind hochkomplexe Maschinensysteme, deren Instandhaltung und Betrieb nur ausgewiesenen Experten vorbehalten ist. Der technische Service findet dort unter besonders widrigen Bedingungen statt. So ist der Bewegungsspielraum aufgrund der begrenzten baulichen Gegebenheiten sehr stark eingeschränkt und im Außenbereich der Anlagen können verschiedenste Wetterbedingungen die Arbeit erschweren (Mewes et al., 2018). Weiterhin sind ob der ständigen Sturzgefahr außerordentlich hohe Sicherheitsvorkehrungen zu beachten (DGUV, 2014).

Die variierenden Arbeitsumgebungen im technischen Service, gekoppelt mit den spezifischen ergonomischen Herausforderungen (räumliche/infrastrukturelle Restriktionen) und den hohen geistigen Arbeitsanforderungen der eigentlichen Servicetätigkeit, lassen vermuten, dass durch den Einsatz digitaler Assistenzsysteme besondere Effekte bezogen auf Menschgerechtigkeit und Produktivität zu erwarten sind. Das bisherige methodische Vorgehen der Arbeitssystemplanung mit den vorhandenen Analyse- und Bewertungsmethoden ist aufgrund dieser besonderen Bedingungen zu adaptieren. Deshalb wurde für die vorliegende Dissertation ganz bewusst dieser Anwendungsbezug gewählt.

Ziel des Dissertationsvorhabens ist daher die Entwicklung eines Modells zur Erhebung der Güte von Assistenzsystemen für mobile Serviceanwendungen. Dieses soll durch eine umfassende Berücksichtigung von Kriterien der Produktivität sowie der Menschgerechtigkeit eine ganzheitliche Betrachtung des Arbeitsprozesses ermöglichen. Anschließend wird das aufzustellende Gütemodell anhand des Beispielarbeitssystems „Inspektion von Windenergieanlagen“ evaluiert.

Zu diesem Zweck werden zunächst alle wissenschaftlichen Grundlagen erläutert, welche zum Verständnis der Arbeit notwendig sind. Anschließend wird auf Grundlage der durchgeführten Literaturliteraturanalyse ein Analyse- und Bewertungsmodell für digitale Assistenzsysteme entworfen und diskutiert. Daraufhin folgt eine umfassende Analyse und Beschreibung des Beispielarbeits-systems sowie des im Rahmen des Projekts ArdiAS entwickelten Assistenzsystems „Pocket-Assist“. Auf Grundlage des aufgestellten Modells sowie der Erkenntnisse zu Arbeits- und Assistenzsystem werden verschiedene Forschungsfragen aufgestellt, welche der Evaluation des Modells dienen sollen und ein Evaluationsplan zu deren Umsetzung entworfen. Anschließend werden die für diesen Evaluationsplan notwendigen Erhebungsmethoden erläutert, bevor Aufbau, Durchführung und Ergebnisse der Versuche diskutiert werden. Abschließend erfolgt die Bewertung der Ergebnisse sowie eine kritische Reflexion der Evaluationsmethode und des entwickelten Modells. Zusammenfassend werden Assistenzsystem und Bewertungsmodell final evaluiert.

2 Wissenschaftliche Grundlagen

In den folgenden Abschnitten sollen alle theoretischen Hintergründe erläutert werden, auf denen diese Dissertation aufbaut. Hierzu werden zunächst arbeitswissenschaftliche Grundlagen skizziert, welche für das Verständnis der Arbeit notwendig sind. Anschließend werden digitale Assistenzsysteme definiert, eingeordnet und aktuelle Beispiele für Endgeräte diskutiert. Danach werden die Begriffe Softwareergonomie und Usability definiert und verschiedene Methoden zu deren Erfassung genauer erläutert. Darauffolgend wird die Mobilität in der Arbeit und deren Einordnung erörtert. Abschließend erfolgt eine arbeitswissenschaftliche Einordnung des technischen Service.

2.1 Arbeitswissenschaftliche Grundlagen

In diesem Kapitel wird ein kurzer Überblick über relevante arbeitswissenschaftliche Grundlagen gegeben. Dazu werden zunächst das Arbeitssystem und dessen modellbasierte Darstellung erläutert. Anschließend werden verschiedene Grundlagen zu den Begriffen Belastung und Beanspruchung erklärt. Zum Abschluss werden generelle arbeitswissenschaftliche Ziele und deren Systematisierung dargestellt.

2.1.1 Arbeitssysteme

Arbeitssysteme sind soziotechnische Systeme, welche das Zusammenwirken einzelner oder mehrerer Arbeitspersonen mit den Arbeitsmitteln umfassen und der Erfüllung von Arbeitsaufgaben unter vorgegebenen Bedingungen dienen (DIN-EN-ISO-6385, 2016). Sie agieren selten unabhängig und sind meist in eine betriebliche Umgebung integriert. Die Grenzen des Arbeitssystems werden für modellbasierte Prozesse (z. B. Analyse, Gestaltung) je nach Anwendungsfall pragmatisch festgelegt (Rudow, 2011). Beim Vorgang des Arbeitens wirkt der Mensch bewusst und zielgerichtet auf einen Arbeitsgegenstand ein. Das Spektrum der hierzu verwendeten Arbeitsmittel erschließt sich von einfachen Werkzeugen bis hin zu komplexen, hochtechnologischen Maschinen (Neudörfer, 2016). Abbildung 1 zeigt die sieben Systemkomponenten des Arbeitssystembegriffes nach REFA (1984).

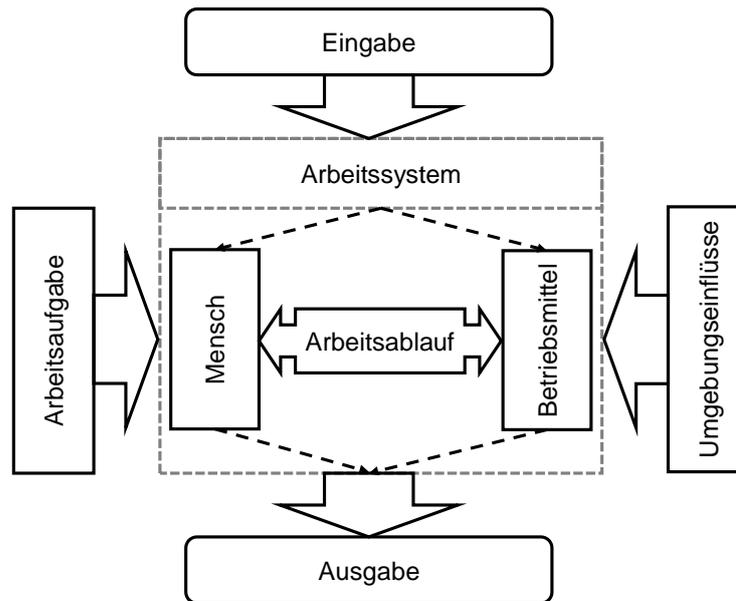


Abbildung 1: Das REFA-Arbeitssystem, eigene Darstellung nach (REFA, 1984, S. 94)

Das REFA-Arbeitssystem beschreibt modellhaft das Zusammenwirken von Mensch und Betriebsmittel - also die Kapazitäten des Arbeitssystems, die gemäß der Arbeitsaufgabe die Eingabezustände in Ausgabezustände verändern. Umgebungseinflüsse können stärkende bzw. schwächende Wirkungen auf den Arbeitsablauf und die eingesetzten Ressourcen haben. Die verschiedenen Bestandteile des REFA-Arbeitssystems werden in Tabelle 1 definiert. (REFA, 1984)

Tabelle 1: Definition der Bestandteile des REFA-Arbeitssystems nach REFA (1984)

Bestandteil	Definition
Arbeitsaufgabe	<ul style="list-style-type: none"> • Aufforderung an Mitarbeiter Tätigkeiten auszuüben, welche der Zielerreichung dienen • Kennzeichnet den Zweck des Arbeitssystems
Arbeitsablauf	<ul style="list-style-type: none"> • Geschieht bei der Erfüllung von Arbeitsaufgaben • Vollzieht sich durch Zusammenwirkung von Mensch, Betriebsmittel und Eingabe
Eingabe	<ul style="list-style-type: none"> • Besteht aus Arbeitsgegenständen, Menschen, Informationen und Energie, welche im Sinne der Arbeitsaufgabe Zustand, Form oder Lage verändern sollen
Ausgabe	<ul style="list-style-type: none"> • Besteht aus Arbeitsgegenständen, Menschen, Informationen und Energie, welche im Sinne der Arbeitsaufgabe verändert oder erzeugt wurden
Mensch/Betriebsmittel	<ul style="list-style-type: none"> • Verändern gemäß der Arbeitsaufgabe die Eingabe in die Ausgabe
Umwelteinflüsse	<ul style="list-style-type: none"> • Äußere Faktoren, die auf das Arbeitssystem einwirken oder durch dieses erzeugt werden • Unterteilbar in physikalische, chemische, biologische, organisatorische sowie soziale Einflüsse

Die funktionellen Bereiche des Arbeitssystems lassen sich weiter in Arbeitsbereich und Wirkbereich unterteilen. Im Wirkbereich des Arbeitssystems, welcher sich zwischen Arbeitsgegenstand und Betriebsmittel befindet, wird das Produkt im Sinne der Arbeitsaufgabe verändert. Im Arbeitsbereich interagieren die Mitarbeiter (MA) über Funktionselemente mit der Maschine. Hierzu gehören je nach Kontext der Nutzung auch Elemente, die z. B. zur Reinigung und Wartung verwendet werden. Die Interaktionen innerhalb des Arbeitssystems können die MA auf verschiedene Arten belasten. (Neudörfer, 2016)

Die Begriffe Belastung und Beanspruchung sowie deren Auswirkungen auf die Arbeitsperson werden im nachfolgenden Kapitel erläutert.

2.1.2 Belastung und Beanspruchung

Arbeitsbelastungen entstanden in der Vergangenheit hauptsächlich durch körperliche Betätigung (z. B. Landwirtschaft und Handwerk des Mittelalters), welche physische Beanspruchungen zur Folge hatte. Durch den wissenschaftlich-technischen Fortschritt im Sinne hoch komplexer Werkzeuge, Maschinen und Automatisierungstechnik arbeiten MA immer häufiger kognitiv. Dadurch werden physische Belastungen zunehmend durch psychische Belastungen abgelöst (ifaa, 2017). Über das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept nach Rohmert (1984) lassen sich Ursache- und Wirkungszusammenhänge von Belastungen und den daraus folgenden individuellen Beanspruchungen beschreiben. Dieses nutzt eine Analogie zur technischen Mechanik, in welcher ein Bauteil durch äußere Kräfte belastet wird. Die hieraus entstehenden Spannungen werden auch als Beanspruchungen bezeichnet und sind neben der äußeren Belastung von verschiedensten Bauteilparametern abhängig (vgl. Abbildung 2).

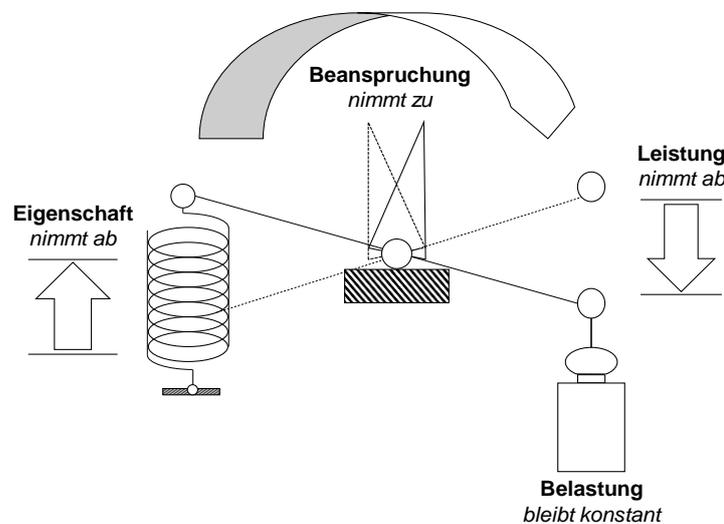


Abbildung 2: Mechanisches Ersatzmodell des Belastungs- und Beanspruchungs-Konzeptes (Rohmert W., 1984 zit. n. Schlick, Bruder & Luczak, 2018, S. 24)

Belastungen sind objektive Kenngrößen, wie z. B. Arbeits- und Tätigkeitsanforderungen, Lärm oder Zeitdruck, welche auf ein Individuum einwirken. Die durch die jeweiligen Belastungen entstehenden Auswirkungen (z. B. auf das innere Befinden der Arbeitsperson oder deren Muskelskelettsystem) werden wiederum als **Beanspruchungen** bezeichnet. Das Ausmaß einer Beanspruchung ist neben der Dauer und Ausprägung der Belastung von den spezifischen Eigenschaften des betrachteten Individuums abhängig, bspw. seinen Ressourcen und Stärken sowie der Art des Umgangs mit der Belastung, also seinen Bewältigungsstrategien. (Schaper, 2014; Schlick et al., 2018)

Gleiche Belastungen können verschiedene Menschen, je nach Ausprägung ihrer individuellen Eigenschaften und Fähigkeiten, unterschiedlich beanspruchen (Kirchner, 1986). Nach Laurig (1992) lässt sich dieses Konzept durch die Betrachtung der Belastungshöhe und -dauer weiter differenzieren. Hier wird aus Höhe und Dauer der verschiedenen Teilbelastungen, welche zeitgleich oder aufeinander folgend auftreten können, eine Gesamtbelastung summiert. Belastungen können im Verlauf der Zeit jedoch kumulativ wirken und so eine verstärkte Beanspruchung zur Folge haben.

Beanspruchungen können kurzfristig auftretende psychische und physische Reaktionen, sogenannte **Beanspruchungsreaktionen**, zur Folge haben. Diese sind direkte, reversible Aktivierungen durch die Arbeitstätigkeit und können sich sowohl positiv als auch negativ auf die MA auswirken (Schlick et al., 2018). Eine positive Auswirkung ist z. B. die kognitive Aktivierung, welche sich besonders im mittleren Aktivitätsniveau (auch Flow genannt) leistungs- und befindensförderlich auswirkt (Csikszentmihalyi, 2014).

Beanspruchungsfolgen hingegen sind zeitlich nachgelagerte psychische oder physische Reaktionen, welche sich je nach Ausmaß reversibel oder irreversibel auf die Leistungsvoraussetzungen des Menschen auswirken. Auch hier sind positive (z. B. Übung und Leistungssteigerung) und negative Auswirkungen (z. B. Ermüdung und Schädigungen) möglich, wobei negative Beanspruchungsfolgen sowohl durch Unterforderung (z. B. Monotonie) als auch durch Überforderung (z. B. Burnout) entstehen können. Verschiedene wiederholte Belastungen können jedoch mit der Zeit durch Gewöhnung kompensiert werden. Wann welcher Fall eintritt, hängt von unterschiedlichen Faktoren, wie der jeweiligen Belastungssituation und individuellen Handlungskompetenzen ab, welche sich im Einzelfall unterscheiden können. (Rudow, 2011)

Digitale Technologien bieten die Chance, verschiedene Überlastungen und Fehlbeanspruchungen zu verhindern, bergen jedoch gleichzeitig die Gefahr neue Belastungs- und Beanspru-

chungssituationen zu erzeugen. So können sie **Technostress** verursachen, welcher zu Ineffizienz und Skepsis führen und sich in Beanspruchungsfolgen wie Müdigkeit und dauerhafter Unruhe äußern kann. Bei Personen, die einen häufigeren Kontakt mit der genutzten Technologie pflegen, treten diese Phänomene jedoch deutlich seltener auf (Salanova, Llorens & Cifre, 2013). Trotzdem die Belastung durch die Technologie also theoretisch für alle identisch ist, werden erfahrenere Nutzende (aufgrund anderer Eigenschaften) in geringerem Maße beansprucht als Neulinge. (Gerdenitsch, 2019)

Grundsätzlich haben die individuellen Bestimmungsgrößen des Menschen, wie z. B. Konstitutions-, Dispositions-, Qualifikations- und Anpassungsmerkmale maßgeblichen Einfluss auf die Art und Höhe der Beanspruchungsfolgen. (Luczak, 1989)

2.1.3 Ziele der Arbeitswissenschaft

Der Zweck der Arbeitswissenschaft ist die sowohl effiziente und effektive als auch menschengerechte Arbeitsgestaltung (Schlick et al., 2018). Ein etabliertes Modell zur Beurteilung von Arbeitsgestaltungsmaßnahmen hinsichtlich ihrer Menschgerechtigkeit ist das Ebenenschema von Hacker (1986), dargestellt in Abbildung 3. Dieses unterscheidet die vier Ebenen Ausführbarkeit, Schädigungslosigkeit, Beeinträchtigungsfreiheit und Persönlichkeitsförderlichkeit, welche hierarchisch aufeinander aufbauen.

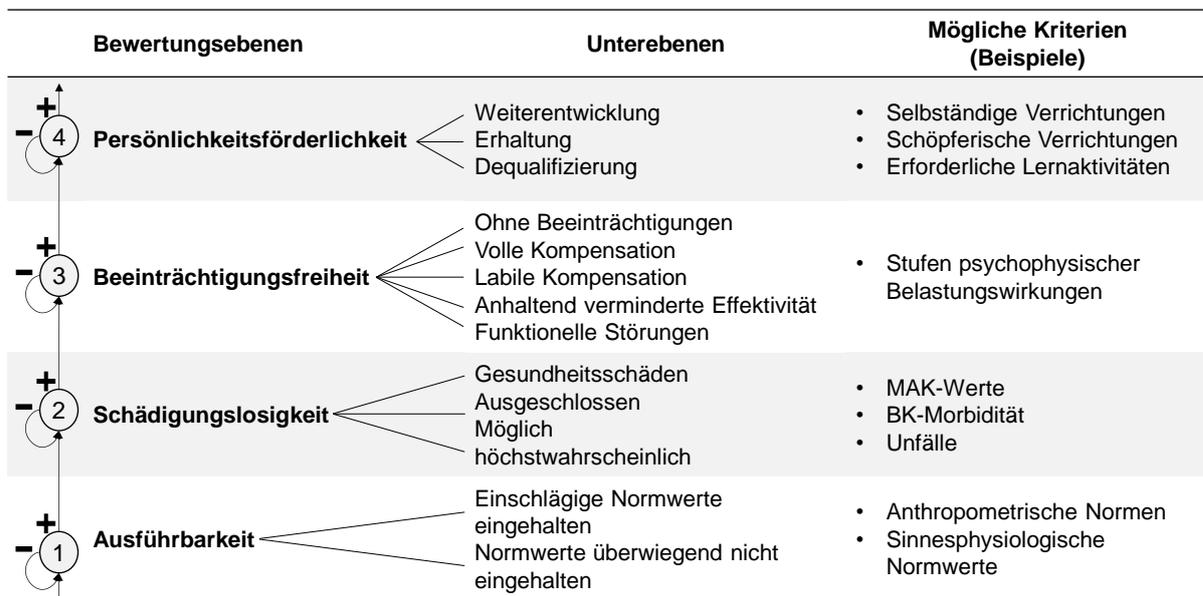


Abbildung 3: Ebenen-Schema nach Hacker (1986, S. 511)

Die unterste Ebene ist die **Ausführbarkeit** der Arbeit. Um diese sicherzustellen, müssen die Ausführungsbedingungen der jeweiligen Arbeitsaufgabe innerhalb der menschlichen Leistungsfähigkeit liegen. Zu berücksichtigen sind hierbei insbesondere die Erreichbarkeit notwendiger Arbeitsmittel, erforderliche Körperkräfte und die Wahrnehmbarkeit wichtiger Signale.

Die **Schädigungslosigkeit** stellt fest ob die Arbeit nicht nur generell, sondern auch über das gesamte Berufsleben und möglichst ohne gesundheitsschädliche Folgen ausgeführt werden kann. Dabei spielen besonders die Vermeidung von Schädigung durch z. B. Schadstoffe, die Einhaltung von Arbeitsplatzgrenzwerten und die Vorsorge gegen Berufskrankheiten eine wichtige Rolle.

Die **Beeinträchtigungsfreiheit** konzentriert sich besonders auf die Vermeidung reversibler kurzfristiger Einschränkungen der Leistungsfähigkeit, die durch Arbeitszeit- und Arbeitsinhaltsgestaltung, technische Arbeitsgestaltung einschließlich Pausengestaltung und auch die Beschränkung der Reizdauer vermeidbar sind (z. B. Monotonie an Fließbändern).

Die **Persönlichkeitsförderlichkeit** ist die oberste Ebene des Modells nach Hacker (1986). Hier wird das Tätigkeitsprofil im Arbeitsprozess betrachtet. Dieses ist umso persönlichkeitsförderlicher, je mehr die MA in der Entwicklung ihrer Fähigkeiten unterstützt werden und je mehr Anerkennung sie für ihre Arbeit erhalten. Ein Negativbeispiel für die Persönlichkeitsförderlichkeit ist die Dequalifizierung, bei der MA bei der Durchführung ihrer Arbeit Kompetenzen abbauen.

Alle diese Kriterien beeinflussen dabei nicht nur das Wohlbefinden der MA, sondern auch deren Produktivität. Es entstehen also nicht zwangsläufig direkte Zielerreichungskonflikte zwischen der Produktivität der MA und der beschriebenen hierarchischen Anordnung der Arbeitsgestaltungsmaßnahmen.

Quaas (1999) erweitert dieses Modell um die Ebene der **Sozialverträglichkeit** (Abbildung 4). Diese berücksichtigt die Vereinbarkeit der Arbeit mit den sozialen Normen und Werten des Individuums, den Implikationen für sozial-gesellschaftliche Prozesse und Strukturen sowie der Familienverträglichkeit.

Optimierung der Arbeit → Einheit von fünf allgemeinen arbeitswissenschaftlichen Gestaltungszielen und Bewertungsaspekten

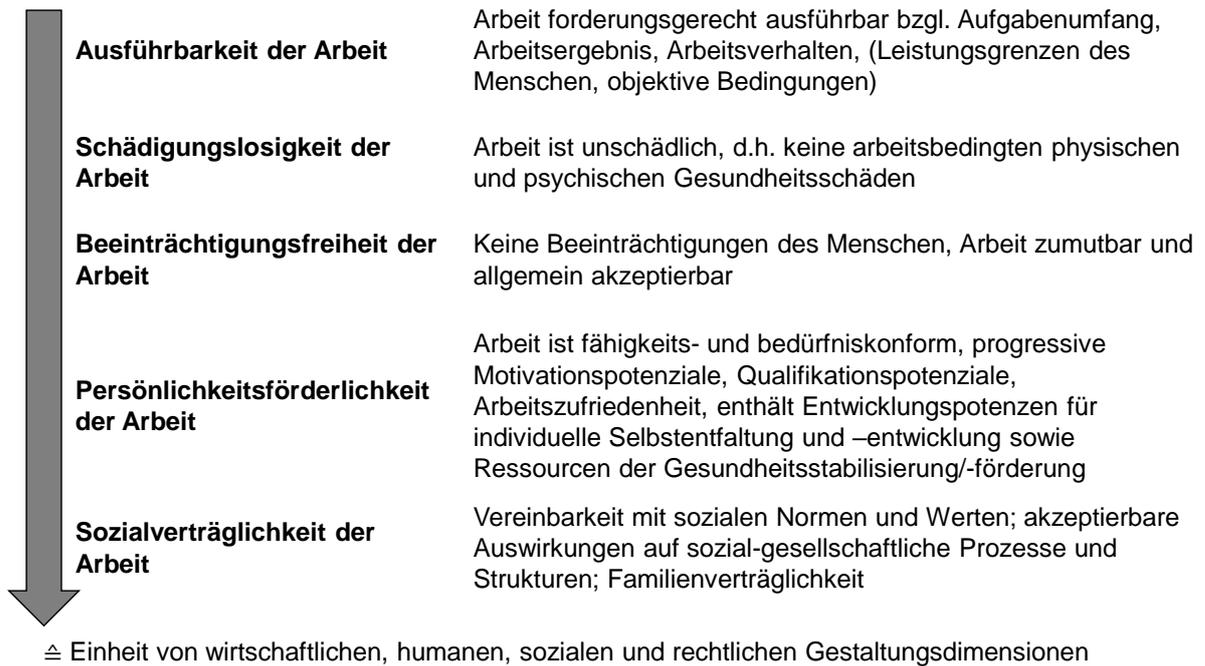


Abbildung 4: Arbeitswissenschaftliche Gestaltungsziele nach Quaas (1999, S. 122)

2.2 Digitale Assistenzsysteme

In diesem Abschnitt wird ein kurzer Überblick zu digitalen Assistenzsystemen (AS) gegeben. Dazu werden zunächst die Einordnung und Systematisierung verschiedener Formen digitaler AS erläutert. Anschließend wird der Stand der Technik zur Arbeit mit AS beschrieben. Abschließend erfolgt eine genauere Erläuterung verschiedener Endgeräte für digitale AS.

2.2.1 Einordnung digitaler Assistenzsysteme

Nach Apt et al. (2018) lässt sich die Motivation des Einsatzes digitaler AS in Unternehmen hinsichtlich Grad, Art sowie Zielsetzung der Unterstützung des jeweiligen Systems unterteilen (Abbildung 5).

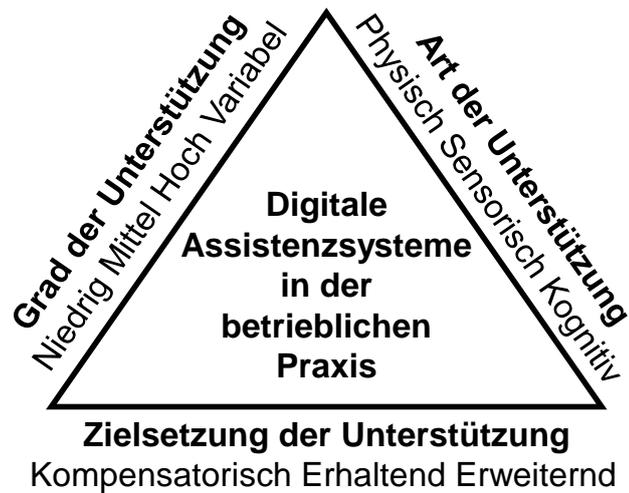


Abbildung 5: Charakterisierung digitaler Assistenzsysteme nach Apt et al. (2018, S. 19)

Die **Zielsetzung der Unterstützung** beschreibt die Art der Fähigkeitsbeeinflussung des Verwenders der Assistenztechnologie und unterteilt sich in kompensatorische, erhaltende und erweiternde AS. (Apt et al., 2018)

Kompensatorische Assistenzsysteme dienen vor allem der Inklusion. Hierbei sollen defizitäre Fähigkeiten besonders entlang der Diversity-Dimensionen Alter, Beeinträchtigung und ethnischer Herkunft ausgeglichen werden (Apt et al., 2018). Dabei zeigen AS besonders bei Personen mit körperlichen Beeinträchtigungen hohes Potenzial (Engels D. , 2016).

Nach statistischem Bundesamt (2017) ist die Erwerbstätigkeit von 65 bis 74-jährigen von 2007 bis 2017 um 6 % auf 11 % angestiegen. Der Großteil der Beschäftigten dieser Art sichert sich so einen Zuverdienst zur Rente. AS können bei diesen MA, neben der Inklusion, auch zum Erhalt der Gesundheit beitragen. Die Zielsetzung **erhaltender Assistenzsysteme** ist (auch bei jüngeren MA) die langfristige Sicherstellung von Gesundheit und Erwerbsfähigkeit sowie der Schutz vor Kompetenzverlusten (Apt et al., 2018).

Durch die Digitalisierung sind die Anforderungen an Arbeitstätigkeiten in vielen Arbeitsbereichen deutlich gestiegen (Seyda, Wallossek & Zibrowius, 2019). Die Einführung eines **erweiternden Assistenzsystems** eignet sich besonders dann, wenn es durch eine Anreicherung der Aufgaben von MA zu einer Steigerung ihrer arbeitsseitigen Anforderungen kommt. AS können hier Ungleichgewichte individueller Ressourcen (Fähigkeiten und Kenntnisse) ausgleichen, deren Entwicklung sehr viel Zeit in Anspruch nehmen würde. Diese Erweiterungen der MA-Fähigkeiten eignen sich insbesondere für den temporären Einsatz in Anlernphasen (Apt et al., 2018).

Bei gleichartigen AS kann sich die Zielsetzung für verschiedene MA und deren Ressourcen sowie den Anwendungskontext unterscheiden. Einige Funktionen wirken bei einem MA kompensatorisch, beim anderen hingegen erhaltend. Auch eine Änderung in den verschiedenen Phasen der Erwerbsbiografie ist möglich. Eine Abgrenzung ist demnach nur bei Betrachtung der Zusammenwirkung von System und Nutzer zu treffen. (Apt et al., 2018)

Der **Grad der Unterstützung** ordnet AS nach dem jeweiligen Umfang der Unterstützungsfunktion ein. Apt et al. (2018) nutzen hierbei die Kategorisierung der Arbeit nach Rohmert (1983) und unterteilen den Unterstützungsgrad in niedrig, mittel, hoch und variabel (siehe Abbildung 6).

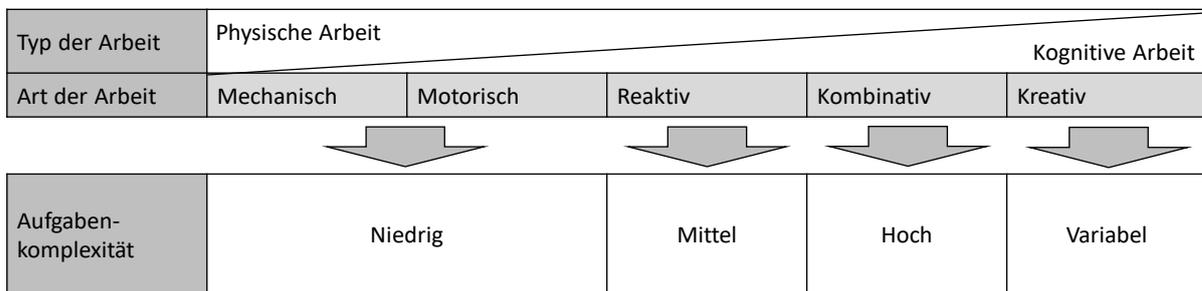


Abbildung 6: Übersicht über Arten der Arbeit und ihre Zusammensetzung aus Grundtypen (Rohmert W. , 1983 zit. n. Apt et al., 2018, S.23)

So kann ein **niedriger** Unterstützungsgrad reine Handlungsanweisungen für einfache Arbeitssituationen geben oder die Ausführung von Bewegungen unterstützen. Bei einem **hohen** Unterstützungsgrad würden bei regelbasierten Entscheidungen mit hoher Komplexität z. B. Entscheidungshilfen und Empfehlungen an die Nutzer kommuniziert. Bei **variabler** Unterstützung kann der Nutzer selbst entscheiden, in welcher Granularität er Informationen vom AS erhalten möchte. (Apt et al., 2018)

Die **Art der Unterstützung** beschreibt die jeweilige Fähigkeit der MA, welche durch das AS beeinflusst wird. Diese Fähigkeiten können physisch, sensorisch oder kognitiv sein. Als **physische** Unterstützung der MA-Fähigkeiten gelten alle Erweiterungen der körperlichen Fähigkeiten des MA (z. B. Erweiterung der Trage-, Hebe- oder Haltekraft). **Sensorische** AS unterstützen verschiedene Sinneswahrnehmungen des MA, messen und quantifizieren Umgebungsgrößen oder dekodieren vorbereitete Informationen (z. B. QR-Codes), um hinterlegte Informationen verfügbar zu machen. **Kognitive** AS hingegen verarbeiten und filtern Informationen, wodurch diese für den Nutzer anwendungsgerecht aufbereitet werden. Damit schaffen sie für den MA geistigen Freiraum für Problemlösungsaufgaben und kreative Prozesse (Apt et al., 2018, S.23).

Zusätzlich zu den Kriterien von Apt et al. (2018) wurde das Modell zur Charakterisierung digitaler AS in Mewes et al. (2020) um eine Einordnung zum Ort der Unterstützung erweitert (Abbildung 7).



Abbildung 7: Charakterisierung digitaler Assistenzsysteme, erweiterte Darstellung nach Mewes et al. (2020, S. 10) in Anlehnung an Apt et al. (2018, S. 19)

Der **Ort der Unterstützung** beschreibt die Ortsflexibilität des jeweiligen digitalen AS und den Aufwand, den ein Wechsel des Ortes zur Folge hätte. Bei **stationären** digitalen AS handelt es sich um ortsfeste Technologien, die sowohl an einem Einzelarbeitsplatz stehen, als auch in umfassendere Arbeitsprozesse integriert sein können. Ein Ortswechsel dieser Arbeitsmittel ist nur unter besonderen Aufwendungen möglich (z. B. kollaborativer Roboter, Strichcode-Leser an der Supermarktkasse). **Mobile** digitale AS hingegen sind mit einem sehr geringen Aufwand transportfähig und können bspw. auch während der Fortbewegung mit einem Fahrzeug (durch Dritte) verwendet werden (z. B. Laptop, Smartphone). Erweitert wird diese Form der Mobilität von den **Wearables** (z. B. Exoskelette und Datenbrillen), welche am Körper getragen werden. Diese können je nach Art und Zielsetzung bspw. speziell auf die Nutzung bei ein- oder beidhändigen Tätigkeiten ausgelegt sein oder die physischen Fähigkeiten der MA erweitern oder entlasten. Im nachfolgenden Kapitel wird die Einführung von und die Arbeit mit digitalen AS erläutert. (Mewes et al., 2020)

2.2.2 Arbeit mit digitalen Assistenzsystemen

Bei der Entwicklung und Einführung digitaler AS sind einige Prämissen zu beachten. So sind zu Beginn die Ziele der Assistenz festzulegen und der existierende Arbeitsprozess ist mit Hilfe

von geeigneten arbeitsanalytischen Methoden, wie bspw. Beobachtung und Befragung, zu analysieren (Merhar, Höllthaler, Georg & Berger, 2019). Dabei sind besonders die Aufgabenausführung, die Arbeitsumgebung, die Benutzer und die mögliche Interaktion mit dem AS zu analysieren (Hinrichsen, Riediger & Unrau, 2016). Besonders interessant sind hierbei auftretende Probleme im Prozess, da AS potenzielle Lösungen für diese darstellen. Aber auch einschränkende Faktoren aus der Arbeitsumgebung und spezielle Anforderungen der Arbeits- und Schutzausrüstung sind zu beachten (Mewes et al., 2020).

Bei der Einführung digitaler AS hat zudem die MA-Akzeptanz einen besonderen Stellenwert. Bereits das Technologieakzeptanzmodell nach Davis, Bagozzi und Warshaw (1989) beschreibt die wahrgenommene Nützlichkeit eines Systems nicht nur in Abhängigkeit von dessen eigenen Eigenschaften, sondern auch vom Nutzer und dessen Fähigkeiten und Einstellungen gegenüber der Technologie (Brauer, Fischer & Grande, 2015). Um die Nutzerakzeptanz zu sichern, sollte das Endprodukt demnach an die Eigenschaften und Kenntnisse der Nutzergruppe angepasst werden. Dazu können sie bspw. bei partizipativen Entwicklungsverfahren immer wieder in Entscheidungs- und Designprozesse einbezogen werden. So ist es möglich, bereits während der Entwicklung des Systems mögliche Widerstände der MA zu identifizieren und entsprechende Anpassungen vorzunehmen (Bosse, Hellge & Schröder, 2019; Müllerleile, 2018). Zudem können hohe Kosten, fehlende technische Voraussetzungen und hoher Arbeits- und Zeitaufwand zur eventuell notwendigen Umstellung der Arbeitsprozesse die Einführung von AS erschweren (Link, Schnalzer & Hamann, 2020).

In der Gestaltung und Erprobung von AS ist zu beachten, dass ihr Einsatz zur Erweiterung (nicht zur Beschränkung) des Handlungsspielraumes der MA führt. Dies ist eine besondere Herausforderung, da die Digitalisierung von Arbeitsprozessen meist mit deren Standardisierung einhergeht, was individuelle Vorgehensweisen in verschiedenen Arbeitssituationen unterbinden kann (Engels B. , 2017). Hier ist genau abzuwägen, ob die MA durch die neuen Werkzeuge eine Erweiterung oder Beschränkung ihres Handlungsspielraums erfahren. Um dies sicherzustellen, können bspw. Lehr- und Trainingssituationen konzipiert werden. Generell sollten MA beim Umgang mit technischer Assistenz die Hoheit über die ausgeführten Tätigkeiten behalten, damit ihre Selbstbestimmung durch die Unterstützung gefördert und nicht eingeschränkt wird. (Apt et al., 2018, S.23)

Durch den Einsatz von AS steigen auch die Anforderungen an die Kompetenzen der MA im Umgang mit Informations- und Kommunikationstechnologien. Jedoch können Kompetenzen,

die im Umgang mit verbreiteten Technologien wie Smartphones und Tablet-Computern erworben wurden, häufig adaptiert werden. (DGFP, 2016)

2.2.3 Ausgewählte Endgeräte für digitale Assistenzsysteme

Abhängig von Grad, Art, Zielsetzung und Nutzungsort lassen sich zahlreiche Hardwaresysteme für die Konzeption digitaler AS unterscheiden. Hierbei sind stationäre physische Assistenzsysteme wie kollaborative Roboter genauso denkbar wie mobile informatorische, sensorische Endgeräte, wie z. B. Unterarmcomputer oder Datenhandschuhe (Kasselmann & Willeke, 2016). Insbesondere für die in dieser Dissertation untersuchten mobilen Anwendungen, fixieren die meisten Entwickler und Anwender jedoch hauptsächlich technisch ausgereifte Systeme wie Tablet-Computer und Smartphones. Ergänzend werden häufig auch Smartwatches und Datenbrillen betrachtet, wobei sich in den letzten Jahren besonders Endgeräte letzterer Art technisch stark weiterentwickelten. All diese Geräte sind neben der digitalen Assistenz auch für andere Anwendungen konzipiert und Spezialgeräten, besonders aufgrund der Anwendung im Konsumentenmarkt und dem damit einhergehenden Entwicklungsstand sowie den hohen Budgets für ihre kontinuierliche Weiterentwicklung, überlegen (Niehaus, 2017).

Im Folgenden werden einige ausgewählte Endgeräte hinsichtlich ihrer besonderen Eigenschaften sowie der Vor- und Nachteile dargestellt.

2.2.3.1 Smartphones

Smartphones sind internetfähige Mobiltelefone, die Computern in Funktionsumfang sehr nahe sind. Sie werden üblicherweise über berührungsempfindliche Bildschirme (Touchscreens) bedient. Funktionen der Kompaktgeräte sind, neben dem Telefonieren, das Abspielen digitaler Medien, die Aufzeichnung von Bild-, Ton- und Videodaten und der GPS-Navigation. Je nach Gerät kann auch weitere Sensorik verbaut sein. Die Internet-Anbindung erfolgt über eine mobile Breitbandverbindung, welche über eine Sim-Karte oder per W-LAN bereitgestellt wird. Smartphones werden über ein Betriebssystem gesteuert, welches je nach Gerät variiert. Hierbei nutzen die meisten Geräte das Betriebssystem Android (73 %), gefolgt vom Apple-exklusiven IOS (26 %) (StatCounter, 2020). Für die jeweiligen Betriebssysteme lassen sich nahezu verschiedenste Anwendungen entwickeln, welche Applikationen (Apps) genannt werden.

Aufgrund ihrer hohen Verbreitung im privaten Bereich sind die Geräte und die Art ihrer Bedienung den meisten Anwendern bereits bekannt. So lag der Anteil der Smartphone-Nutzer im Jahr 2017 in Deutschland in der Altersklasse der zwischen 14- und 50-Jährigen bei über 95 %,

bei 50 – 60-Jährigen bei 88 % der Gesamtbevölkerung (VuMA, 2019). Hierdurch ist, im Vergleich zu anderen Technologien, im Hinblick auf den generellen Umgang mit den Geräten mit verringertem Schulungsaufwand zu rechnen. Generell weisen die Geräte im Vergleich zu anderen Systemen keine starken Nachteile auf. Große Vorteile von Smartphones liegen im Kamerasystem, da diese meist mit sehr hochwertigen Kameras ausgestattet sind. (Mewes et al. 2019)

2.2.3.2 Tablet-Computer

Ein Tablet ist ein tragbarer, flacher Computer in besonders leichter Ausführung mit einem Touchscreen. Anders als Notebooks besitzen sie keine ausklappbare mechanische Tastatur, sondern werden wie Smartphones via Berührungssteuerung bedient. In Leistungsumfang, Bedienung und Design ähneln die Geräte modernen Smartphones und verwenden meist auch die für diese entwickelten Betriebssysteme.

Der größte Unterschied zwischen Tablet-Computern und Smartphones ist die Bildschirmdiagonale, welche bei Tablets deutlich größer ausfällt. Dies führt dazu, dass besonders komplexe Informationen wie Datenblätter und Fließtexte vom Nutzer besser wahrgenommen werden können. Im Umkehrschluss sind Tablets durch ihre größeren Ausmaße jedoch auch deutlich schwieriger zu verstauen. Auch in der Bedienung im Stand sind Tablets Smartphones unterlegen, da eine einhändige Bedienung der virtuellen Tastatur aufgrund der hohen Bildschirmdiagonale nicht mehr möglich ist. (Mewes et al. 2019)

2.2.3.3 Smartwatches

Smartwatches sind digitale Armbanduhren, die ähnlich wie ein modernes Smartphone bedient und mit diesem verbunden werden können. Neben der Ausgabe von Datum und Tageszeit messen sie häufig den Puls der Anwender, zählen deren Schritte und können über Applikationen anderweitige Informationen abrufen und verarbeiten. Smartwatches gehören wie Datenbrillen zu den Wearables. (Bendel, 2019)

Smartwatches sind durch ihren engen Kontakt zum Körper besonders für Hinweise mittels Vibrationsfunktion geeignet. Aufgrund der Platzierung am Handgelenk ermöglichen sie es den Nutzern, binnen kürzester Zeit Informationen abzurufen. Durch die geringen Abmaße der Displays sollte die Dichte der dargestellten Informationen jedoch sehr hoch sein. Je umfangreicher sich die Menge an Informationen darstellt, desto weniger eignet sich eine Smartwatch, diese darzustellen. (Mewes et al. 2019)

2.2.3.4 Datenbrillen

Datenbrillen oder Head-Mounted-Displays sind tragbare Computer, die Informationen in das Sichtfeld des Benutzers einblenden. Hierzu nutzen sie Displays, welche sehr nahe vor den Augen des Nutzers angebracht sind. Zur Bedienung der Geräte gibt es verschiedene Konzepte wie z. B. separate Touchpads, Sprach-/Gestensteuerung, Eye Tracking, oder Kombinationslösungen. Datenbrillen lassen sich grob in Monocular-Smart-Glasses und Binocular-Smart-Glasses aufteilen. (BAuA, 2016)

Datenbrillen sind besonders für beidhändige Tätigkeiten geeignet, in denen die MA während der Tätigkeit Informationen abrufen können, ohne das Werkzeug abzulegen. Binocular-Smart-Glasses bieten zudem eine besonders gute Darstellung von Augmented Reality (Mewes et al. 2019). So kann bspw. die Microsoft-HoloLens virtuelle Objekte an einem festen Ort im Raum mit besonders hoher Ortstreue trotz Bewegung der Nutzenden darstellen. (Microsoft, 2019)

Anwendungsfälle für die Technologien von Datenbrillen befinden sich aktuell zumeist noch in Erprobungsphasen. Auch für eine Assistenz in der Instandhaltung wurden bereits Implementierungsansätze entwickelt. So erproben z. B. die Gebhardt Fördertechnik GmbH und die ARKU Maschinenbau GmbH den Einsatz von Datenbrillen für den Remote-Support (Moessinger & Miriam, 2018). Hierbei arbeitet der Servicetechniker nicht selbst im Außendienst, sondern leitet von einer stationären Support-Zentrale einen Techniker des Kunden an, welcher die Instandhaltungsmaßnahme durchführt. Durch die Kamera der Datenbrille teilen die Servicetechniker dabei ihre Sicht und können über eine Sprachverbindung kommunizieren. Der Techniker in der Support-Zentrale arbeitet in diesem Fall nahezu ausschließlich kognitiv und übernimmt die Rolle eines Remote-Supports, indem er dem kundenseitigen Techniker Informationen sowohl verbal als auch visuell übermittelt.

Monocular-Glasses projizieren vor einem Auge des Nutzers ein Bild. Dieses basiert auf einem Videodisplay, welches vor dem linken oder rechten Auge platziert werden kann und dem Nutzer verschiedene Informationen anzeigt. Mittels einer zusätzlichen, vom Nutzer abgewendeten Kamera wird die Umgebung gefilmt, mit Informationen überlagert und mit diesen wiederum auf dem Display angezeigt. (Peddy, 2017)

Binocular Glasses blenden zusätzliche Informationen in das Sichtfeld vor beiden Augen des Nutzers ein. Die Geräte basieren auf einer optischen Technologie, die es dem Nutzer ermöglicht, die Realität mit digital überlagerten Informationen wahrzunehmen. Dies wird durch die Transparenz der Anzeigetechnik ermöglicht. Für die Überlagerung von Informationen mit der

Realität sind die Geräte mit verschiedenen Sensoren zur Umgebungserkennung ausgestattet. (Barfield, 2015)

2.3 Softwareergonomie und Usability

Immer mehr Menschen greifen während der Arbeit auf die Assistenz von Datenverarbeitungssystemen zurück. Im Jahr 2013 verwendeten bereits 61 % der Deutschen während der Arbeit einen PC (Eurostat, 2015). Gleichzeitig nutzten selbige im Jahr 2012 bereits 45 % mobiles Internet für berufliche Zwecke (von Thenen & Scheerbaum, 2014). Auch Tablet-Computer wurden 2014 bereits von 31 % ihrer Besitzer am Arbeitsplatz genutzt (eResult, 2014). Mit der zunehmenden Nutzung digitaler Datenverarbeitungssysteme steigt auch die Bedeutung der zugehörigen Software und deren Benutzerfreundlichkeit. Folgen unzureichender Softwareergonomie können unter anderem der Verlust produktiver Arbeitszeit und zusätzlicher Schulungsaufwand sein. Auch können unergonomische Produkte Frustration unter den Nutzern erzeugen. Gerade bei neu eingeführter Software ist die Nutzerakzeptanz entscheidend für deren spätere Anwendung und den Erfolg (DGUV, 2016).

Die Nutzungsqualität einer Software lässt sich nach DIN-EN-ISO-9241-11 (2017) primär über deren Gebrauchstauglichkeit beschreiben, welche in der internationalen Fachliteratur als **Usability** bezeichnet wird. Diese lässt sich in die Parameter Effektivität, Effizienz und Nutzerzufriedenheit untergliedern, welche immer im jeweiligen Nutzungskontext zu betrachten sind. Die Usability fokussiert hierbei nur die Verwendung des Produkts, wohingegen die User Experience auch Mechanismen vor und nach deren Verwendung berücksichtigt (DIN-EN-ISO-9241-210, 2019).

Der **Nutzungskontext** umschreibt den Anwender, die jeweilige Arbeitsaufgabe, die Ressourcen (Hardware, Software, Material) sowie die physische und soziale Nutzungsumgebung.

Die **Effektivität** beschreibt die Genauigkeit und Vollständigkeit der Zielerreichung des Nutzers unter Zuhilfenahme der Software. Vorausgesetzt wird, dass die Arbeitsaufgabe mit den gegebenen Mitteln ausführbar und die vorgegebene Arbeitsqualität erreichbar ist.

Die **Effizienz** setzt die Effektivität mit dem zur Zielerreichung notwendigen Arbeitsaufwand ins Verhältnis, welcher sich durch die benötigte Zeit, verbrauchte Ressourcen und aufgewendete Kosten beschreiben lässt.

Die **Zufriedenstellung** bildet die persönliche Einstellung des Nutzers zum Produkt ab. Sie definiert sich durch die Abwesenheit von Frustration, Freiheit von Beeinträchtigungen und eine positive Einstellung gegenüber dem Produkt.

In Abbildung 8 ist die Gebrauchstauglichkeit illustriert. (DIN-EN-ISO-9241-11, 2017)

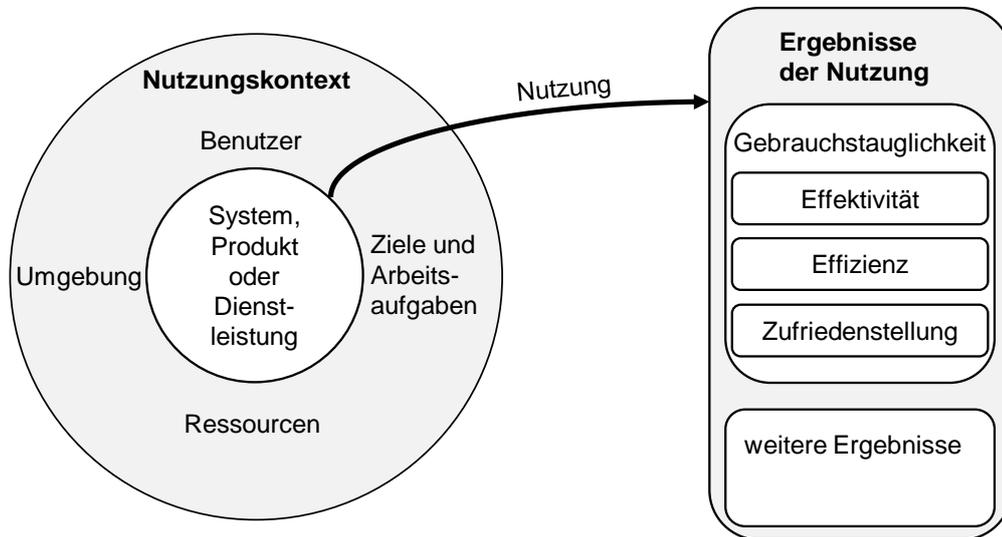


Abbildung 8: Gebrauchstauglichkeit eines Systems, Produkts oder einer Dienstleistung (DIN-EN-ISO-9241-11, 2017, S. 14)

Die Usability wird vor allem durch eine gelungene Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstellen gewährleistet. Diese transformieren Maschinendaten in von Menschen wahrnehmbare Informationen und umgekehrt. Eine ergonomische Gestaltung der Software bedeutet folglich deren Anpassung an die Prozesse menschlicher Informationsverarbeitung. (DGUV, 2016)

Gelungene Softwareergonomie hat direkte Auswirkungen auf die erfolgreiche Wissensgenerierung und Informationsverarbeitung des interagierenden Nutzers. Zur Informationsaufnahme ist vor allem die Lesbarkeit von Bedeutung (DGUV, 2015). Nur wenn Benutzer in der Lage sind, dargestellte Informationen wahrzunehmen und kognitiv zu verarbeiten, können sie diese auch für ihre Arbeitsaufgabe nutzen.

Die Anpassung von Umfang und Form der dargestellten Informationen an die Arbeitsaufgabe ist ebenfalls bedeutsam. Für die Interaktionsgestaltung der jeweiligen Aufgabe im Arbeitsprozess sind, wenn möglich, nur Informationen mit Bedeutung für die Bearbeitungsschritte darzustellen. Die zentrale Rolle im Informationsverarbeitungsprozess fällt dem Benutzer zu, welcher die Arbeitsaufgabe unter Nutzung seiner Fähigkeiten und Erfahrungen bearbeitet. Die Anpassung der Software an den zu bearbeitenden Prozess und alle zu berücksichtigenden Bedingungen ist eine große Herausforderung in der Softwareergonomie. (DGUV, 2016)

Zur Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktionen gibt die DIN-9241-100 (2006) sieben Grundsätze vor. Diese verfolgen nicht zwingend komplementäre Zielsetzungen, sodass ihre benötigte Ausprägung im Zweifelsfall gegeneinander abgewogen werden muss.

Aufgabenangemessenheit

- Das System unterstützt die Benutzer dabei, ihre Aufgabe zu erledigen.
- Funktionalität und Dialog bilden charakteristische Eigenschaften der Arbeitsaufgabe ab.
- Angezeigte Dialoge beschränken sich auf Informationen, die im Zusammenhang mit der erfolgreichen Erledigung der Aufgabe stehen und bilden diese möglichst vollständig ab.
- Ein- und Ausgabe der dem System zugeführten Informationen passen sich der jeweiligen Arbeitsaufgabe an.
- Typische Eingabewerte werden dem Benutzer voreingestellt zur Verfügung gestellt.
- Notwendige Quelldaten werden von vorhandenen Schnittstellen unterstützt.
- Die Abfolge des auszuführenden Dialoges ist an die Arbeitsaufgabe angepasst.

Selbstbeschreibungsfähigkeit

- Den Benutzern ist zu jeder Zeit offensichtlich, an welcher Stelle sie sich im Software-dialog befinden und wie sie welche Interaktionen unternehmen können.
- Angezeigte Informationen leiten die Benutzer dazu an, den Dialog erfolgreich abzuschließen (Anleitungen, Rückmeldungen, Zustandsinformationen).
- Während der Interaktion sind digitale Benutzerhandbücher und andere externe Informationen verfügbar, aber auch ausblendbar.
- Das System informiert über Zustandsänderungen und Eingabeaufforderungen.
- Form und Inhalt der einzugebenden Daten sind für den Nutzer offensichtlich.

Erwartungskonformität

- Der Softwaredialog entspricht den im Nutzungskontext vorherrschenden und allgemein anerkannten Konventionen.
- Vokabular und Strukturen sind dem Benutzer vertraut und an dessen Kenntnisse und Erfahrungen angepasst.
- Handlungen erzeugen beim Benutzer unmittelbar eine erwartete Rückmeldung.
- Abweichungen von der nutzerseitig erwarteten Reaktionszeit des Systems sind entsprechend gekennzeichnet.
- Bei gleichen und ähnlichen Arbeitsaufgaben bleiben Dialogverhalten und Informationsdarstellung konstant.
- Angezeigte Rückmeldungen geben konstruktive Vorschläge.

Lernförderlichkeit

- Das System unterstützt den Benutzer beim Erlernen seiner Bedienung.
- Den Nutzern stehen Regeln und Konzepte für das Erlernen der Software zur Verfügung.
- Unterschiedliche Benutzer erhalten an diese angepasste Unterstützungsangebote.
- Bei selten verwendeten Dialogen stehen zusätzliche Lernunterstützungen bereit.
- Benutzerunterstützungen bringen den Nutzer dazu, dem Programm zu vertrauen.
- Den Nutzern wird ein konzeptionelles Verständnis des Systems vermittelt.
- Benutzer können Dialogschritte ohne negative Auswirkungen erneut mit alternativen Eingaben ausprobieren.
- Nutzer erhalten regelmäßig Rückmeldungen und Darstellungen ihrer Handlungsergebnisse.

Steuerbarkeit

- Nutzer sind in der Lage, den Dialogablauf sowie dessen Richtung und Geschwindigkeit bis zur Zielerreichung zu beeinflussen.
- Nutzer bestimmen den Wiederaufnahmepunkt unterbrochener Dialoge.
- Dialogschritte sind reversibel.
- Bei großen Datenmengen kann deren Anzeige gesteuert werden.
- Verfügbare Ein-/Ausgabemittel sind steuerbar.
- Bei der Veränderung der Daten sind die Originaldaten weiterhin verfügbar.

Fehlertoleranz

- Fehleingaben sind mit minimalem Korrekturaufwand richtigzustellen (Fehlererkennungs-, Fehlerkorrektur- und Fehlermanagementsysteme).
- Vor der Verarbeitung der Daten werden diese geprüft und gegebenenfalls korrigiert.
- Das System unterstützt den Benutzer bei der Erkennung von Eingabefehlern.
- Bei erkannten Eingabefehlern ermöglicht das System dem Benutzer eine automatische Korrektur.
- Nutzer sind nicht dazu in der Lage, undefinierte Fehlerzustände zu erzeugen.
- Beim Auftreten eines Fehlers sind Erläuterungen zu dessen Korrektur vorgehalten, besonders an Stellen, an denen diese zu erwarten sind.
- Fehlerkorrekturen stellen auf keinen Fall verpflichtende Optionen dar.
- Eine temporäre Rückstellung der Korrektur ist möglich.
- Die Fehlerkorrektur erfordert möglichst wenige Schritte.

Individualisierbarkeit

- Benutzer können die Darstellung der Informationen an ihre Fähigkeiten und Bedürfnisse anpassen.
- Der Umfang von Erläuterungen und Hilfestellungen passt sich an Wissen und Präferenzen der Nutzer an.
- Benutzer haben die Möglichkeit, ihr eigenes Vokabular in das System einzubinden.
- Die Interaktionsgeschwindigkeit wird von den Nutzern, nicht dem Programm, vorgegeben.
- Nutzer können Dialogelemente (soweit zweckmäßig) ordnen oder hinzufügen.
- Nutzer haben immer die Möglichkeit, den Originalzustand wiederherzustellen.

2.4 Usability Tests

Ziel eines Usability Tests sind die Bewertung der Funktionsfähigkeit der Software im prototypischen Aufbau hinsichtlich der sieben Grundsätze der Mensch-Maschine-Interaktionen nach DIN-9241-100 (2006) und die Erschließung von Verbesserungspotenzialen. Bei Usability Tests wird zwischen formativer und summativer Evaluation unterschieden. Formative Evaluation hat eine Verbesserung des getesteten Systems zum Ziel, wohingegen die summative Evaluation eine abschließende Kontrolle eines Produkts darstellt. Weiterhin unterscheidet man zwischen

Experten-Evaluation, bei der Usability-Experten die Applikation begutachten, und empirischen Tests mit realen späteren Nutzern. (Richter & Flückiger, 2013; Möller S. , 2017)

Eine Beispielmethode für die **Expertenevaluation** von Usability ist das „Cognitive Walkthrough“. Hierbei versetzt sich der Usability Experte in die Rolle eines unerfahrenen Users und führt Schritt für Schritt die gestellte Aufgabe durch. Zuvor wird für die Lösung dieser Aufgabe ein idealer Lösungspfad entworfen. Dieser wird schrittweise abgegangen und mit dem real gewählten Pfad des Experten verglichen. Abweichungen und mögliche Ursachen für diese werden notiert. Ergebnis der Prozedur ist eine Liste mit Usability-Problemen. (Richter & Flückiger, 2013; Möller S. , 2017)

Eine weitere Variante des Verfahrens ist das „pluralistic Usability Walkthrough“. Hier wird der skizzierte Lösungsweg von einer Gruppe aus repräsentativen Nutzern, Entwicklern und Usability-Experten untersucht. In der Praxis wird diese Form der Untersuchung meist mit einer heuristischen Evaluierung verbunden. Dort werden verschiedene Heuristiken vorgegeben, die als Fokuspunkt für die Untersuchung dienen sollen. Beispiele für solche Heuristiken sind „Sprich die Sprache des Nutzers“, „Selbstbeschreibungsfähigkeit“ und „Sicherstellen hoher Zuverlässigkeit“. (Möller S. , 2017)

Der **empirische Nutzertest** mit zukünftigen Anwendern ist in der Regel deutlich zuverlässiger als die Expertenevaluation. Hier zeigen sich reale und nicht angenommene Probleme, welche sich auf Grundlage umfangreicherer quantitativer Daten erheben lassen. Nachteilig ist jedoch der hohe organisatorische und zeitliche Aufwand der Untersuchung und die dadurch entstehenden Kosten. (Möller S. , 2017)

Vor der Durchführung eines empirischen Usability-Tests sind dafür spezielle **Aufgaben** zu entwerfen. Diese sollten Standardaufgaben sein, welche sich zwischen den verschiedenen Testpersonen nicht unterscheiden. Weiterhin sind diese Aufgaben möglichst realistisch zu halten, sollten also in solcher oder ähnlicher Form auch im realen Anwendungskontext auftreten. Bei der Aufgabenformulierung sollte das Lösen einer Problemstellung und nicht die Ausführung verschiedener Features und Eingabeabfolgen erforderlich sein. Es ist relevant festzulegen, ab welchem Zeitpunkt die Aufgabe als erfüllt gilt. Der Schwierigkeitsgrad der erstellten Aufgabe sollte weder zu niedrig noch zu hoch gewählt werden. Dies setzt einen Einblick in den Kenntnisstand der Zielgruppe voraus. (Richter & Flückiger, 2013; Möller S. , 2017)

Neben der Aufgabe ist auch die Auswahl der Versuchspersonen (VP) von Bedeutung. Diese sollten sich möglichst aus dem Nutzerkreis der späteren Anwendung zusammensetzen. Mit einer ausgiebigen Analyse der VP und ihrer Eigenschaften lassen sich bereits zu einem frühen

Zeitpunkt Probleme antizipieren und Designentscheidungen treffen. Die Testgruppe sollte möglichst alle Typen von späteren Nutzern umfassen. Bei besonders schwierigen Anwendungen für Experten empfiehlt es sich, vor der Durchführung der Aufgaben einige Instruktionen zu geben. (Richter & Flückiger, 2013)

Für die **Versuchsumgebung** sollte ein Usability-Labor verwendet werden. Ein solches ist gekennzeichnet durch einen mit Kameras ausgestatteten Testraum, welcher durch eine Glasscheibe von einem Beobachtungsraum getrennt ist. Ein solcher Aufbau erlaubt sowohl die Aufzeichnung der Testperson als auch des Testobjektes und lässt spontane Interaktion zu. (Richter & Flückiger, 2013; Möller S. , 2017)

Während der eigentlichen **Testphase** sind verschiedene Regeln zu beachten. So muss es der VP gestattet sein, den Versuch jederzeit zu unterbrechen oder komplett abubrechen. Einzelnen VP sollte es zudem möglich sein, überfordernde oder unangenehme Aufgaben zu überspringen. Es empfiehlt sich, die Testperson Gedankenprozesse laut aussprechen zu lassen. Auf diese Weise können Gedankenprozesse (zumindest teilweise) aufgezeichnet werden. Die VP werden durch diese Form des Testes jedoch in ihrem Verhalten beeinflusst. (Richter & Flückiger, 2013; Möller S. , 2017)

Im Anschluss an den Test empfiehlt sich eine Nachbesprechung, um die aufgezeichneten Videoaufnahmen mit den VP analysieren und besprechen zu können. Hierbei sollte der Fokus sowohl auf positiven als auch negativen Erlebnissen mit dem Produkt liegen. Abschließend sollte es den VP ermöglicht werden, Verbesserungsvorschläge und andere Anmerkungen zu geben. (Richter & Flückiger, 2013)

2.5 Mobilität in der Arbeit

In der modernen Arbeitswelt nimmt die Mobilität der MA angesichts der fortschreitenden Globalisierung und neuer Kundenanforderungen einen immer höheren Stellenwert ein und gehört mittlerweile zu den allgemeinen Anforderungen im Arbeitsmarkt. (Brandt, 2010)

Nach Kesselring (2012) werden Tätigkeiten als mobiles Arbeiten bezeichnet, „die zumindest 20 % in der Arbeitsstätte und der eigenen Wohnung stattfinden und bei denen Dienstreisen eine zentrale Rolle spielen“. Maschke, Nies und Vogl (2014) wiederum betrachten zusätzlich Arbeitsplätze, an denen MA aus eigener Entscheidung außerhalb des angestammten Arbeitsplatzes (u. a. am Heimarbeitsplatz) arbeiten. Laut Empirica (2000) sind mobile Arbeiter (hier Teleworkers) MA, die mindestens 10 Stunden in der Woche außerhalb des Firmen- und Heimarbeitsplatzes sind und dabei mit Hilfe von Computern online arbeiten. Meissner, Gentile, und

Sprenger (2015) bezeichnen ortsunabhängige Arbeit, welche dem MA die freie Wahl des Arbeitsortes überlässt, als mobile Arbeit.

Vogl und Nies (2013) unterscheiden zwischen der Mobilität der Arbeitsinhalte und der Mobilität der Beschäftigten. Die entsprechenden Mobilitätsanforderungen unterscheiden sich hierbei grundlegend. Mobilität der Beschäftigten setzt eine Ortsflexibilität des Mitarbeitenden voraus, wonach dieser mobil sein muss, um seine Arbeit überhaupt verrichten zu können. Ortsflexible Arbeitsinhalte wiederum wirken komplett gegenteilig. Durch ihre lokale Flexibilität steht den MA frei, an welchen Orten sie ihre Arbeit verrichten, wodurch ihnen eine Mobilität in der Arbeit ermöglicht, jedoch nicht abgefordert wird.

Tabelle 2 stellt die Mobilitätsformen nach Vogl und Nies (2013) in einer Übersicht dar.

Tabelle 2: Formen mobiler Arbeit, angepasste Darstellung nach Vogl und Nies (2013, S. 15)

Mobilität der Arbeitsinhalte	Mobilität der Beschäftigten
<p>Arbeit zuhause</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reine Telearbeit • Alternierende Telearbeit • Virtuell vernetzte Projektarbeit 	<p>Arbeit an verschiedenen Standorten</p> <p>(im Regelfall beim Kunden) z. B.:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Unternehmensberatung • Außendienst • Servicetechniker
<p>Mobile Telearbeit</p> <ul style="list-style-type: none"> • Im Hotel • Im Zug • Auf dem Weg zum Kunden 	

Trotz des wachsenden Anteils an Mobilität, die durch neue Technologien kompensiert wird, steigt die Anzahl der jährlichen Geschäftsreisen weiter an (allein in Deutschland von 175,8 Millionen im Jahr 2014 auf 189,3 Millionen im Jahr 2018) (VDR, 2019, S. 7). Einen besonderen Stellenwert hat die mobile Telearbeit, welche sowohl die Mobilität der Beschäftigten als auch der Arbeitsinhalte voraussetzt. Diese kann je nach Kontext der Reisetätigkeit selbst gewählt oder betrieblich induziert sein (Vogl & Nies, 2013).

Die Literatur zeigt große Unterschiede in der Bedeutung des Mobilitätsbegriffs in der Arbeitswissenschaft. Der Begriff „mobile Arbeit“ wird hier sowohl für ortsfeste Arbeit mit mobilen Arbeitspersonen an unterschiedlichen Arbeitsorten (Monz & Vogl, 2020; Ducki & Nguyen, 2016; Huber, 2014) als auch für ortsflexible Arbeit verwendet (Carstensen, 2020; Bruhn, 2020; Köffer & Urbach, 2018), welche oftmals in Form von heimischer Telearbeit ausgeführt wird.

Ortsflexible Arbeit wird dabei häufig auf Wunsch der Beschäftigten eingeführt, welche damit sogar eine Mobilitätersparnis anstreben. So nennen 55 % der MA im Home-Office die Fahrzeiterparnis als Vorteil für diese Beschäftigungsform (Grunau, Ruf, Steffes & Wolter, 2019). Ein Ziel der Beschäftigten in dieser Form der „mobilen Arbeit“ ist damit also die Vermeidung von Mobilität. Im weiteren Verlauf wird die „mobile Arbeit“ als Arbeit angesehen, welche die Mobilität des Beschäftigten erforderlich macht (Schmicker, Waßmann & Mewes, 2020). Diese lässt sich nach Ducki und Nguyen (2016) in berufsassozierte und berufsbedingte Mobilität untergliedern:

Als **berufsassozierte Mobilität** beschreiben sie eine residenzielle oder zirkuläre Überwindung einer Distanz zwischen Wohn- und Arbeitsort. Diese Mobilitätsform ist das Resultat der Koordination von beruflichen und außerberuflichen Anforderungen an die MA. Sie wird nicht betrieblich festgelegt und ist daher auch nur in Ausnahmefällen durch den Betrieb beeinflussbar. Hier können räumliche Flexibilisierungsmaßnahmen überfordernde Mobilität reduzieren. (Ducki & Nguyen, 2016)

Berufsbedingte Mobilität wiederum ist ein fester Bestandteil der Arbeitsaufgabe. Die Rahmenbedingungen, in denen diese stattfindet (Dauer, Häufigkeit, Rhythmus), werden durch betriebliche Strukturen und Entscheidungsträger festgelegt und sind dementsprechend durch diese beeinflussbar. Die berufsbedingte Mobilität lässt sich weiterhin darin unterscheiden, ob die Bewegung das zentrale Element der Aufgabe ist (Transportaufgabe) oder durch Arbeit an wechselnden Orten außerhalb des angestammten Arbeitsplatzes erforderlich wird. (Ducki & Nguyen, 2016)

Die Intensität der Mobilität kann sich bei allen Mobilitätsformen stark unterscheiden. So kann die Frequenz des Arbeitsortwechsels variieren, wobei bei einigen Tätigkeitsprofilen ein regelmäßiger Wechsel des Arbeitsortes erforderlich ist (z. B. ambulante Pflege, Servicetechniker). Bei anderen ist Mobilität unregelmäßig und externe Einsatzorte müssen nur sporadisch aufgesucht werden (Geschäftsreisen). Diese Arten der Mobilität können auch kumulieren, was bei betroffenen Personen zur Multimobilität führt. Die Einordnung von berufsassoziierter und berufsbedingter Arbeit nach Ducki und Nguyen (2016) ist in Abbildung 9 dargestellt.

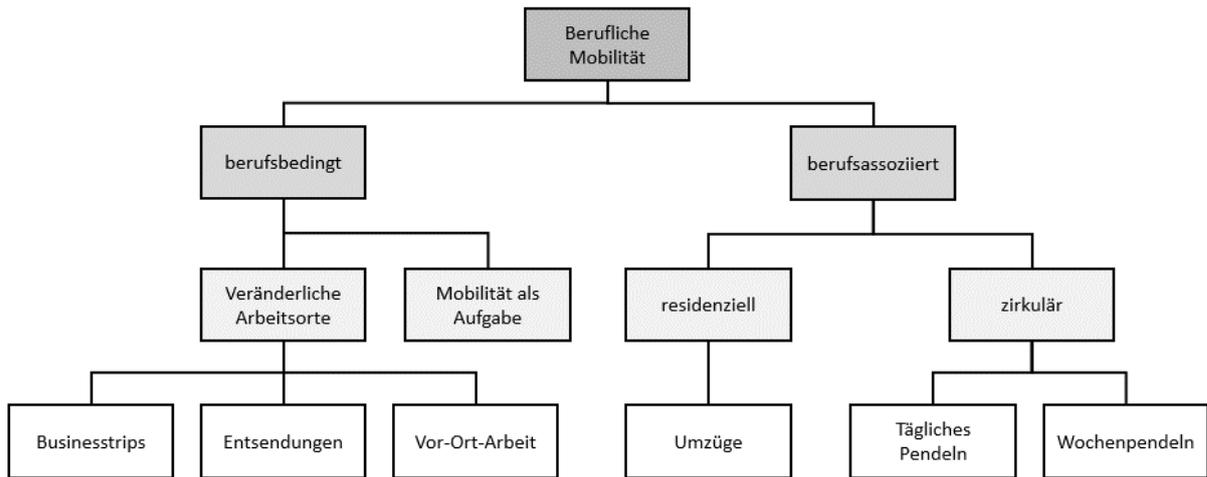


Abbildung 9: Übersicht der Formen von Mobilität (eigene Darstellung in Anlehnung an Ducki & Nguyen (2016, S. 17))

Bei **berufsassoziierter** Mobilität entstehen nach Ducki und Nguyen (2016) je nach ihrer Form verschiedene Arten von Belastungen.

Als **Umzug** bezeichnet man einen dauerhaften Wechsel des Wohnorts. Meist treten assoziierte Beschwerden kurz nach dem Wohnortswechsel auf, welche sich jedoch durch Anpassungen an das neue Umfeld schnell wieder aufheben. Wenn Umzüge freiwillig und nicht allzu häufig erfolgen, kann von vergleichsweise geringen negativen gesundheitlichen Auswirkungen ausgegangen werden. (Ducki & Nguyen, 2016)

Beim **Pendeln** ist ein wiederkehrender Wechsel zwischen Wohn- und Arbeitsort notwendig. Tägliches Pendeln ist mit negativen Folgen für körperliche und psychosoziale Gesundheit verbunden. Deren Ausmaße hängen von verschiedenen Einflussgrößen wie der Fahrdauer, der Wahl des Verkehrsmittels, der Freiwilligkeit der Mobilität und der Planbarkeit verkehrsbedingter Ereignisse ab. (Ducki & Nguyen, 2016)

Auch **Wochenpendeln** kann in erster Linie psychosoziale Belastungen und körperliche Beschwerden zur Folge haben. Hierbei spielt u. a. die Qualität der erlebten Partnerschafts- und Familiensituation eine Rolle. Diese sind meist Auslöser der Mobilitätsentscheidung und gleichzeitig die wichtigste Ressource zur Verarbeitung der zusätzlich entstehenden Beanspruchung. Als Faktor für den Erhalt dieser Beziehungen wird vor allem physische Präsenz genannt. (Ducki & Nguyen, 2016)

Auch bei **berufsbedingter Mobilität** treten je nach deren Ausprägung und Art verschiedene Belastungen auf.

Businessstrips umschreiben berufsbedingte Kurzreisen, welche häufig über die Landesgrenzen hinausgehen und mindestens eine Übernachtung notwendig werden lassen. Sie lassen sich nach den Merkmalen Anlass, Reiseentfernung, Dauer und Häufigkeit kategorisieren. Je nach Ausprägung dieser Merkmale haben sie körperliche und soziale Belastungen in unterschiedlicher Stärke zur Folge. Körperliche Anstrengungen können u. a. durch verschiedene Zeitzonen (Jet-lag), klimatische Differenzen und ergonomische Mängel des gewählten Reisemittels entstehen. Bei einer erhöhten Häufigkeit von Dienstreisen können Gewöhnungseffekte auftreten, welche die Beanspruchungen der MA senken. (Ducki & Nguyen, 2016)

Bei **Entsendungen** wechseln MA für mehrere Monate oder sogar Jahre ihren Arbeitsort in das Ausland, um dort ihr Unternehmen zu vertreten und z. B. einen neuen Markt zu erschließen. Andere Formen der Entsendung entstehen meist im öffentlichen Dienst, bei Aufgaben wie der politischen Ländervertretung, Entwicklungsdiensten oder humanitärer Hilfe. Vorteile der Entsendung für die Beschäftigten sind hoher Abwechslungsreichtum, kulturelle und thematische Vielfalt sowie die Stärkung von Sprach- und Organisationskompetenzen. Durch Entsendungen entstehen aber auch verschiedene gesundheitliche Risiken. So kann durch länderspezifisch fehlende Hygienestandards die Ansteckungsgefahr mit ortsüblichen Krankheiten steigen. Eine besondere Rolle nimmt bei der Entsendung die Familie ein. Werden die familiären Aufgaben der Entsendeten vom Lebenspartner problemlos kompensiert, so ist dessen Mobilitätszustand deutlich weniger beanspruchend. (Ducki & Nguyen, 2016)

Bei der **Mobilität als Aufgabe** entsteht die Wertschöpfung im Arbeitsprozess direkt durch den Transport von Waren, Gütern, Personen und Informationen (bspw. Fernfahrer, Piloten). Dauer, Häufigkeit und Rahmenbedingungen werden hier vom Betrieb reguliert (Ducki & Nguyen, 2016). Belastungen von Fernfahrern beispielsweise entstehen vor allem durch ungünstige Arbeitszeiten (Schichtarbeit, Überstunden), Ermüdung durch Daueraufmerksamkeit, häufigen Termindruck und insbesondere Abwesenheit von Zuhause (Evers, 2009).

Bei **Vor-Ort-Arbeit** müssen Arbeitsprozesse an wechselnden fixierten Orten außerhalb des Firmengeländes durchgeführt werden. Dazu müssen MA also zum jeweiligen Arbeitsort (in der Regel zu einem Kunden) reisen. Vorteile dieser Arbeitsform sind die erhöhte Unabhängigkeit und Selbstbestimmung in der Tätigkeit. Die entstehenden Belastungen unterscheiden sich je nach Arbeitsaufgabe stark. Beispielsweise können zusätzliche Stressoren durch Verkehr, die beeinträchtigte Planbarkeit der Arbeitseinsätze, den erschwerten Zugang zu Arbeitsmitteln und Informationen sowie eine gestörte Trennung von Arbeit und Freizeit entstehen (Ducki &

Nguyen, 2016). Typische Beispiele für Vor-Ort-Arbeitskräfte sind Vertriebsmitarbeiter, Monteure und die in der vorliegenden Dissertation fokussierten Servicetechniker, deren Arbeit im nächsten Kapitel erläutert wird.

Abschließend ist zu erwähnen, dass sich über die verschiedenen Formen sowohl der berufsbedingten als auch der berufsassozierten Mobilität je nach Ausprägung der Mobilitätsintensität (Mobilitätshäufigkeit und Entfernung zum Arbeitsort), soziodemografischen Merkmalen der Arbeitsperson (z. B. Einkommenshöhe, Alter der Kinder) sowie vorhandenen Ressourcen die resultierenden Belastungen und Beanspruchungen stark ähneln können. Beispiele hierfür sind Belastungen aus dem Verkehr, die Abtrennung von sozialen Netzen sowie Konflikte zwischen Arbeit und Familie. (Ducki & Nguyen, 2016)

2.6 Arbeit im technischen Service

Der technische Service bezeichnet Instandhaltungstätigkeiten, welche als Dienstleistung angeboten werden. Für die Arbeitsperson kombinieren sich hierbei die verschiedenen Charakteristika der mobilen Arbeit und Interaktionsarbeit mit den generellen Anforderungen der Instandhaltungsarbeit. DIN-EN-13306 (2018) definiert den Begriff Instandhaltung als „Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus eines Objekts, die dem Erhalt oder der Wiederherstellung seines funktionsfähigen Zustands dient, sodass es die geforderte Funktion erfüllen kann“. Die Instandhaltung erhöht die Gesamtlebensdauer und Produktivität bestehender Anlagen und trägt damit zu den Zielen der Produktions- und Funktionssicherung bei. Damit ist sie eine wesentliche Voraussetzung für die Aufrechterhaltung wertschöpfender Prozesse. Dennoch wird sie oft als Kostenverursacher gesehen, da sie nicht direkt im Wertschöpfungsprozess verankert ist (Pawellek, 2016).

DIN-EN-13306 (2018) beschreibt das Ziel der Instandhaltung als Aufrechterhaltung eines Abnutzungsvorrates (Vorrat möglicher Funktionserfüllungen einer technischen Anlage). Diesen Prozess können verschiedene Instandhaltungsmaßnahmen in unterschiedlicher Form beeinflussen. Der Einfluss der Instandhaltung im Abnutzungsprozess am Beispiel der Instandsetzung einer technischen Anlage ist in Abbildung 10 dargestellt.

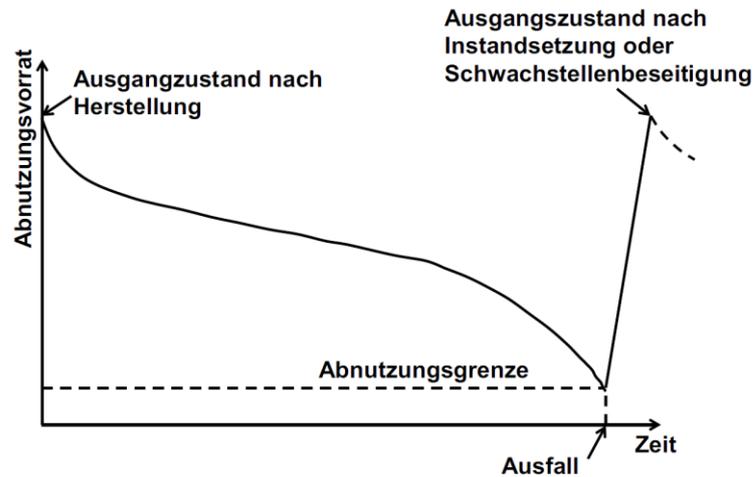


Abbildung 10: Typische Abbaukurve des Instandhaltungsvorrats nach DIN-31051 (2012, S. 8)

Die Instandhaltung untergliedert sich nach DIN-31051 (2012) in Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung. In Tabelle 3 sind die einzelnen Bestandteile der Instandhaltung aufgeführt und definiert.

Tabelle 3: Definition der Bestandteile der Instandhaltung nach (DIN-31051, 2012)

Wartung	Maßnahmen zur Verzögerung des Abbaus der möglichen Abnutzung des Wartungsgegenstandes
Inspektion	Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Ist-Zustandes eines Systems, einschließlich der Bestimmung der Ursachen für die Abnutzung und dem Ableiten notwendiger Konsequenzen für die künftige Nutzung
Instandsetzung	Physische Maßnahmen zur Wiederherstellung der Funktion einer fehlerhaften Einheit
Verbesserung	Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen zur Steigerung der Zuverlässigkeit, Instandhaltbarkeit und/oder Sicherheit eines Systems ohne ihre ursprüngliche Funktion zu ändern

Die moderne Datenverarbeitung erlaubt dabei in der Instandhaltung immer häufiger die vorausschauende Instandsetzung gefährdeter Maschinen. So erlaubt das „Predictive Maintenance“ vorrausschauende Reaktionen auf bestimmte Arten des Anlagenverhaltens, welche auf zukünftige Schäden hinweisen. Dies ist besonders für die hochkomplexen und stark vernetzten Fertigungsstraßen und Anlagen der Industrie 4.0 von besonderer Bedeutung. (Lughofer & Sayed-Mouchaweh, 2019)

Die Arbeitstätigkeiten in der Inspektion und Instandsetzung von Industrieanlagen erfordern ein hohes Maß an Problemlösefähigkeit (Bergmann & Jens, 1997). Bei Inspektionstätigkeiten sind

hierbei umfassende Kenntnisse der zu identifizierenden Störungsparameter erforderlich. Bei Instandsetzungsaufgaben ist die Fehlerursache nach der Analyse zu beheben. Die auftretenden Fehler sind von Art und Alter der Anlage sowie verschiedenen äußeren Umständen abhängig (Haase, 2017). Abgesehen von Routinestörungen geschieht die Fehleranalyse hauptsächlich wissensreguliert. Der Anspruch der Störungsdiagnose ist von der Vielzahl möglicher Störungsursachen, der Seltenheit des Auftretens der Störung, der Mehrdeutigkeit der Störungssymptome, der zeitlichen Veränderlichkeit der Störung im Anlagenlebenszyklus und der Wahrnehmbarkeit der Störung abhängig (Bergmann & Jens, 1997).

Die zur Ausführung von Instandhaltungsarbeiten notwendigen Fähigkeiten sind mit Seminar-konzepten nur schwer vermittelbar und werden im Regelfall erst durch langjährige Berufserfahrung erworben. Dies liegt in der Komplexität der Nachstellung von Fehlerursachen begründet. Besonders zum Beheben selten auftretender Störungen müssen MA ein tiefgreifendes Verständnis der inspizierten Anlage und deren Umgebung vorweisen. (Haase, 2017)

Zur Bewertung der Störungsdiagnosekompetenz von Instandhaltungsfachkräften nennen Bergmann & Jens (1997) verschiedene Kriterien, welche Rückschlüsse auf die Produktivität zulassen. Hierzu wird in der Realität die Verfügbarkeit der Anlagen als Indikator verwendet. Indirekt beschreibt sich diese auch über die Dauer bis zur Störungsbehebung. Mit den Kriterien

- Diagnoseerfolg,
- Diagnosezeit,
- Gesamtzahl der Prüfschritte und
- Anzahl der Prüfschritte im relevanten Bereich

können sowohl die Effektivität als auch die Effizienz des Diagnosevorganges evaluiert werden.

Die zunehmenden Kundenerwartungen und der wachsende Kostendruck im technischen Service führen dabei zu immer höheren Anforderungen an die dort beschäftigten MA. Gleichzeitig steigt durch die häufigere und intensivere Verkettung der immer komplexer werdenden Maschinen und Prozesse der Anspruch an deren Tätigkeit (Pawellek, 2016). Mobile digitale AS können hier durch die Bereitstellung und Systematisierung von Informationen und Handlungsanweisungen potenziell Abhilfe schaffen (Mecke et al., 2020).

Zusätzlich zu umfangreichen fachlichen Aufgabenprofilen zeigt Haase (2017) Entwicklungen auf, in denen Service-MA zahlreiche überfachliche Kompetenzen benötigen, welche sich jedoch durch den digitalen Wandel in ihrer Art und Ausprägung verändern. So beschreibt sie eine Veränderung von Team- zu Einzelarbeit, welche sich in technologischen Entwicklungen durch

entlastende AS und Werkzeuge, zusätzliche Informationen durch Sensoren an den Anlagen sowie steigenden Kostendruck erklären lässt. MA im technischen Service treffen Entscheidungen zur Beseitigung der auftretenden Probleme häufig erfahrungsbasiert. Wo früher eine Gruppe von Service-MA über eine Lösung diskutierte, sind Entscheidungen nun von einzelnen MA zu treffen. Die zusätzliche Verantwortung kann auch bei erfahreneren MA erhöhten psychischen Druck zur Folge haben. Zur Klärung auftretender Fragen zwischen einzelnen MA werden aktuell häufig Mobiltelefone verwendet, jedoch ist die Diagnoseunterstützung auf Distanz ohne ein genaues Fehlerbild sehr schwierig. Hier bieten digitale AS mit Möglichkeiten zur Videotelefonie oder zu plattformbasiertem Wissensmanagement ein hohes Unterstützungspotenzial. Die Einführung der neuen Technologien kann jedoch zu höheren Anforderungen an die Digitalkompetenz der MA führen. Im Ergebnis werden weniger direkte sozial-kommunikative Kompetenzen im Team abgefordert. Es bedarf jedoch an zusätzlicher individueller Problemlöse- und Entscheidungskompetenz, gekoppelt mit der Fähigkeit zur digitalen Kommunikation. Eine weitere Folge der Einzelarbeit ist die häufige Isolation der MA, welche gesondertes Gefährdungspotenzial zur Folge hat. Dieses muss mit zusätzlichen Sicherheitsmaßnahmen kompensiert werden, wozu regelmäßige Kontrollgänge/-anrufe, Personennotsignalanlagen (Totmannfunktion) und die Herstellung der Sicht-/Rufweite zu MA des Kunden zählen (Stüber & Lange, 2010). Besonders in der mobilen Instandhaltung wechseln die MA zudem häufig das Arbeitssystem. Hier müssen sie die technischen Gegebenheiten der jeweiligen Betriebsstätte, die Arbeitsorganisation sowie die soziokulturellen Gegebenheiten der Kundenarbeitsstätte beachten. Der Kontakt mit den MA des Kunden verlangt dem Instandhaltungs-MA hierbei ein hohes Maß an sozialer Kompetenz ab (Haase, 2017).

Aus dem häufigen Wechseln von Arbeitssystem und Arbeitsumgebung folgt bei mobiler Arbeit auch ein Wechsel der Gefahrenstellen, wonach das Unfallrisiko bei Berufseinsteigern besonders hoch ist. So ereignen sich nach einer Untersuchung der Europäischen Gemeinschaft von Kohle und Stahl 5 % aller Unfälle am ersten Arbeitstag (Lehder, 2005). Neben anderen Ursachen spielt hier die Unkenntnis über die Gefahrenstellen im jeweiligen Arbeitssystem eine Rolle. Dieses zusätzliche Risiko kann auf mobile Instandhaltungsarbeit übertragen werden.

Aufgrund der notwendigen Mobilität der MA vermischt sich die mobile Arbeit beim Kunden häufig mit mobiler Telearbeit. Hier werden verschiedene organisatorische Vor- und Nachbereitungen unterwegs oder in Heimarbeit erledigt. Auch aus diesem Grund verschwimmen die Grenzen zwischen Arbeit und Freizeit in mobilen Instandhaltungstätigkeiten immer häufiger. (Maschke et al., 2014)

Im Vergleich zur standardisierten Produktionsarbeit sind die Arbeitsplätze im mobilen Service noch deutlich seltener ergonomisch optimiert. Die Beanspruchung der MA stellt aufgrund der seltenen Durchführung am jeweiligen Arbeitsplatz in der Konzeption eine untergeordnete Rolle dar. Aus diesem Grund nehmen Instandhaltungs-MA häufig ergonomische Zwangshaltungen ein. Diese führen zu schädlichen statischen Muskelbeanspruchungen und Leistungseinbußen, wenn Instandhaltungsobjekte außerhalb des funktionellen Bewegungsraumes des Instandhalters positioniert sind. Folgen von Zwangshaltung sind neben gesundheitlichen Risiken für die MA u. a. verminderte Arbeitsleistung und eine Erhöhung des Zeitbedarfs sowohl aus der Arbeit selbst als auch aus erholungsbedingten Pausen. (Strunz, 2012)

Tabelle 4 fasst die Herausforderungen im technischen Service der modernen Arbeitswelt zusammen. Der Einsatz digitaler AS erscheint für die Lösung der genannten Problembereiche der technischen und organisatorischen Arbeitsgestaltung bei technischen Servicetätigkeiten vielversprechend und unterstreicht damit auch die Bedeutung des gewählten Promotionsthemas.

Tabelle 4: Zusammenfassung der Herausforderungen im mobilen technischen Service der modernen Arbeitswelt (Bergmann & Jens, 1997; Haase, 2017; Maschke et al., 2014; Mecke et al., 2020; Strunz, 2012; Stüber & Lange, 2010)

Physische Herausforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • Ortsfeste wechselnde Arbeitsorte mit variablen, teilweise widrigen Arbeitsbedingungen (z. B. Zwangshaltungen, Umgebungsbedingungen) • Häufig hoher physischer Krafteinsatz erforderlich • Arbeitsstellen sind selten ergonomisch optimiert • Mit wechselndem Arbeitsort wechseln auch Gefahrenstellen
Kognitive Herausforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • Komplexe Diagnosekompetenzen sind nur schwer vermittelbar und erfordern langjährige Berufserfahrung • Steigende Komplexität von Maschinen und Prozessen führt zu wachsenden Anforderungen an die Tätigkeit und zunehmender Verantwortung der MA • Industrie 4.0 – Entwicklungen verlangen neue digitale Kompetenzen mit hohen Lernerfordernissen
Technische Herausforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • Wechselnde Arbeitsumgebung führt zu unterschiedlichen infrastrukturellen Voraussetzungen (z. B. Vorhandensein und Ausprägung mobilen Internets) • Unterschiedliche Anlagen haben verschiedene Schnittstellen mit wechselnden Datenformaten
Organisatorische Herausforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • Wachsender Kostendruck führt zu immer häufigerer Einzelarbeit, mit besonderen Herausforderungen für die Arbeitssicherheit • Steigende Erwartungshaltung der Kunden und fortschreitende Globalisierung erfordern höhere Flexibilität und führen zu überfordernder Mobilität • Arbeitszeit und insbesondere Arbeitsende sind häufig nur schwer zu planen
Soziale Herausforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • Wechselnde Arbeitssysteme führen zu unterschiedlichen Ansprechpartnern • Auftreten und Verhalten der Mitarbeiter wird als Teil der Dienstleistung wahrgenommen • Gefahr der sozialen Isolation und Entgrenzung zwischen Arbeit und Privatheit

Im nachfolgenden Kapitel 3 wird ein Analyse- und Bewertungsmodell entwickelt, welches die Güte digitaler Assistenzsysteme im Bezug zum jeweiligen Anwendungskontext erfassbar machen soll.

3 Analyse- und Bewertungsmodell für digitale Assistenzsysteme

Zur ganzheitlichen Bewertung der Güte von AS sind diese sowohl aus Sicht der MA als auch des Unternehmens zu analysieren. Für die erfolgreiche Einführung der Technologie ist eine Verbesserung des Status quo sowohl hinsichtlich der Arbeitsbedingungen als auch der wirtschaftlichen Situation notwendig. Ist keine menschengerechte Verwendung des neuen Arbeitsmittels sichergestellt, kann durch dieses die Arbeitsbelastung der MA steigen. Entsteht durch die Implementierung der neuen Technologie kein wirtschaftlicher Mehrwert oder sogar Schaden, ist deren Einführung für die unternehmerischen Entscheidungsträger unattraktiv. Das zu erarbeitende Modell soll die Güte digitaler AS daher sowohl hinsichtlich der Menschgerechtigkeit als auch der Produktivität bewerten.

Für die Betrachtung der **Menschgerechtigkeit** wurden die **fünf Ebenen der Arbeitsgestaltung** nach Hacker (1986) und Quaas (1999) ausgewählt (vgl. Kap. 2.1.3). Die **Produktivität** eines AS soll über die drei Dimensionen des Dreiecks für Projektmanagement: **Zeit, Leistung** und **Ressourcen** beschrieben werden. Diese stellen nach der Gesellschaft für Projektmanagement die wichtigsten Parameter für den Projekterfolg dar und stehen in wechselseitigen konkurrierenden Beziehungen zueinander (Möller T. , 2010). Um dieses Modell für die Entwicklung von Gestaltungsvorschlägen für AS nutzbar zu machen, müssen die einzelnen Parameter zunächst für den speziellen Anwendungsfall (hier Inspektionstätigkeiten im technischen Service) spezifiziert werden, was wiederum tiefgreifende Kenntnisse über die entsprechenden Arbeitssysteme voraussetzt.

Die erste Ebene der Menschgerechtigkeit von Arbeit ist die **Ausführbarkeit**. Sie beschreibt, inwiefern es den Arbeitspersonen aufgrund ihrer sinnesphysiologischen Eigenschaften möglich ist, die Arbeit unter den gegebenen Bedingungen auszuführen. Im Modell wird die Einführung eines AS als digitaler Transformationsprozess untersucht, welche das Vorhandensein eines bestehenden ausführbaren Arbeitsprozesses voraussetzt. Zur Sicherstellung der Ausführbarkeit ist in diesem Kontext also zu betrachten, ob der Arbeitsprozess mit der digitalen Technologie als neues Werkzeug durchführbar bleibt oder nicht. Ist die Ausführbarkeit nicht gegeben, macht dies jedoch auch jede weitere Form der Evaluation unmöglich. Damit ist die Ausführbarkeit eine Voraussetzung dafür, dass überhaupt Testungen durchgeführt werden können. Aus diesem Grund wird die Ausführbarkeit als gegeben erachtet und ist aus diesem Grund für die Erarbeitung eines entsprechenden Evaluationsmodells nicht von Relevanz.

Zur Sicherstellung der **Schädigungslosigkeit** sind langfristige Folgeschäden wie Berufskrankheiten durch die neue Technologie auszuschließen. Eine **Beeinträchtigungsfreiheit** durch ein

AS ist erreicht, wenn keine kurzfristigen Beanspruchungsfolgen wie Schwindel, Schmerzen oder Monotonie hervorgerufen werden. In der Erfassung dieser Kenngrößen ist, anders als bei deren Beschreibung, durch ihren fließenden Übergang ineinander keine klare Abgrenzung möglich. Zu hohe physische Belastung kann bspw. bei Überbeanspruchung von Muskulatur und Gelenken kurzfristige Ermüdungserscheinungen auslösen (Beeinträchtigungsfreiheit verletzt) und bei höherer Ausprägung oder zu langer Dauer chronische Erkrankungen des Muskel-Skelett-Systems verursachen (Schädigungslosigkeit nicht gegeben). Aus diesem Grund werden die beiden Ebenen im Rahmen der Analysen in der vorliegenden Arbeit zur Ebene **Unversehrtheit** aggregiert. Um diese zu ermitteln, können bspw. Arbeitsbewertungsverfahren, Beanspruchungstests sowie verschiedene quantitative und qualitative Befragungsmethoden verwendet werden.

Die Persönlichkeitsförderlichkeit wird durch die Entwicklung zusätzlicher Fähigkeiten und die persönliche Weiterentwicklung beschrieben. Die Einführung eines digitalen AS sollte durch den zusätzlichen Kontakt mit neuen Technologien immer die „Digital Fitness“ und damit die Kompetenz im Umgang mit diesen fördern (DGFP, 2016). Gleichzeitig soll der Einsatz von AS zu einer schnelleren Abarbeitung von Routinetätigkeiten führen und so Zeit für kreative Aufgaben ermöglichen. Andererseits befürchten manche Experten durch die Automatisierung einiger Gedankenprozesse eine Dequalifizierung der MA (Niehaus, 2017; Mital & Pennathur, 2004).

Um die **Sozialverträglichkeit** des AS nachzuweisen, darf dieses Kommunikation und soziale Beziehungen der MA untereinander und deren soziales Privatleben nicht negativ beeinflussen (z. B. Abschottung der Nutzer durch das AS und das Erschweren klassischer Kommunikation). Weiterhin können sich durch AS arbeitsorganisatorische Rahmenbedingungen verändern. So können diese z. B. einen Umbruch von Gruppenarbeit zur Einzelarbeit einleiten, was unter Umständen negative Auswirkungen auf die Belastungssituation der MA zur Folge hat. Zudem ist sicherzustellen, dass durch die Nutzung des AS keine negative Beeinflussung des außerberuflichen Lebens der MA stattfindet (z. B. Entgrenzung).

Auch für Persönlichkeitsförderlichkeit und Sozialverträglichkeit können, je nach individueller Situation der MA, identische Ursachen zur Beeinflussung unterschiedlicher Parameter führen. Für die Darstellung im Modell werden beide Parameter zum **Entfaltungspotenzial** zusammengefasst. Eine Erhebung ist durch qualitative oder quantitative Befragungsmethoden möglich.

Auf Seiten der **Produktivität** werden zunächst die **Ressourcen** betrachtet. Hierzu sind die entstehenden Kosten vor und nach der Einführung des AS, insbesondere hinsichtlich anzuschaffender Geräte und Software, über einen anwendungsbezogenen Abschreibungszeitraum aufzuschlüsseln. Einsparungen sind in der Instandhaltung z. B. über den Verzicht auf klassische Schreibmaterialien oder Einsparungen von Personalkosten durch die schnellere Arbeitsdurchführung zu erwarten. Bei Letzteren sind etwaige Überstunden besonders hervorzuheben, da diese häufig besonders vergütet werden und durch schnelle Arbeitsausführungen abgebaut werden.

Zur Bewertung der **Leistung** ist das Konzept des AS zu analysieren. Erweitert die Technologie das Leistungsportfolio, (z. B. über predictive Maintenance) ist der entstandene Mehrwert für den Kunden als Steigerung der Dienstleistungsqualität gesondert zu analysieren. Weiterhin kann sich auch die Qualität etablierter Leistungen verändern. Eine Evaluation der Leistungsqualität ist in der Instandhaltung z. B. über eine Änderung der Anlagenverfügbarkeit zu realisieren. Die Verfügbarkeit definiert sich über „...die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein System zu einem beliebigen Zeitpunkt in einem Zustand befindet, indem es seine definierte Funktion erfüllen kann“ (Eberlin & Hock, 2014, S. 65). Neben der Verfügbarkeit wird die Qualität der Instandhaltung, analog zu Bergmann & Jens (1997), auch über die Parameter Diagnoseerfolg (korrekte Identifikation der Fehlerursache), Gesamtzahl der Prüfschritte, Anzahl der Prüfschritte im relevanten Bereich und Diagnosezeit (welche in diesem Modell gesondert betrachtet wird) beschrieben.

In der Kategorie **Zeit** ist die Dauer aller vorbereitenden, durchführenden und nachbereitenden Schritte zu messen, um so eine ganzheitliche Betrachtung der Instandhaltungsdienstleistung zu ermöglichen. Dazu sind die Planungs-, Vorbereitungs-, Ausführungs- und Nachbereitungszeit vor und nach der Einführung des AS gegenüberzustellen.

Die einzelnen Elemente des Modells und ihre Zugehörigkeit sind in Abbildung 11 dargestellt.

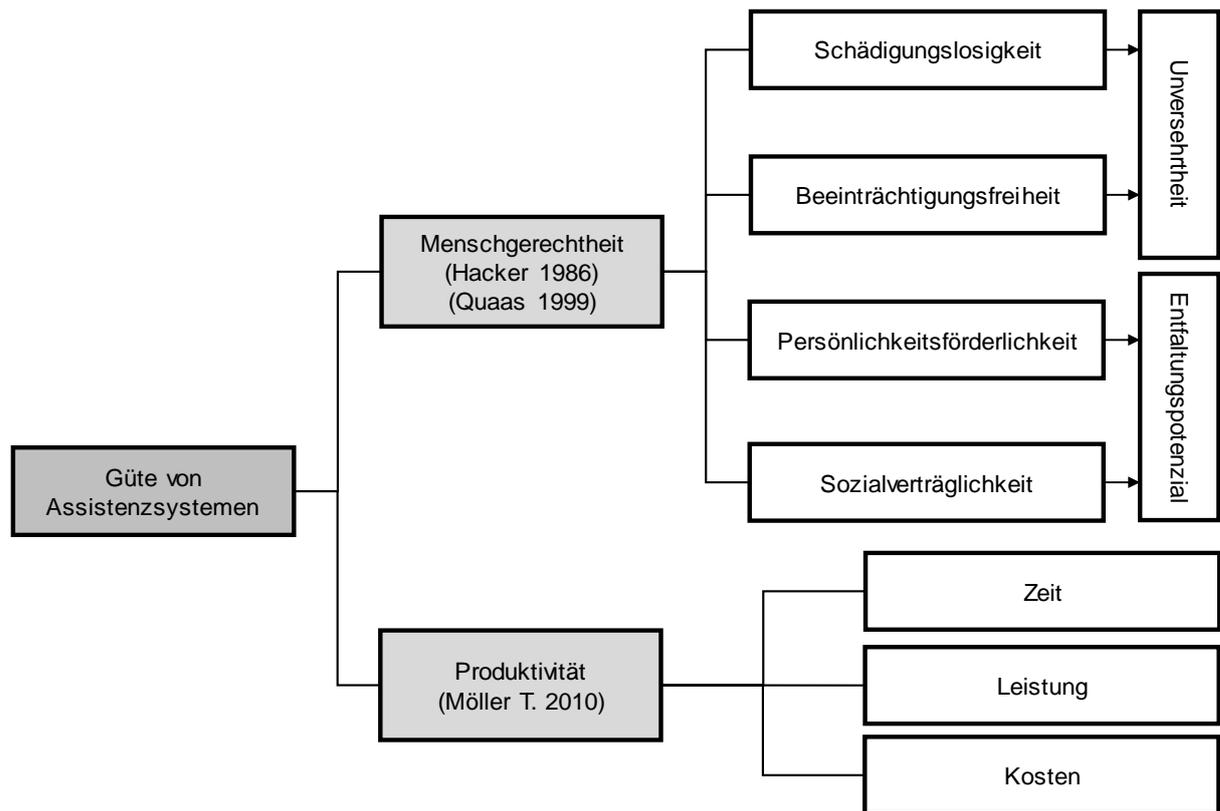


Abbildung 11: Aufbau des Modells zur Beschreibung der Güte von Assistenzsystemen in Anlehnung an (Möller T., 2010, S. 57; Hacker, 1986, S. 511; Quaas, 1999, S. 9)

Zur Evaluation dieses Modells wird das im BMBF geförderte Forschungsprojekt „Gesundes mobiles Arbeiten mit digitalen AS im technischen Service“ (ArdiAS) entwickelte AS „Pocket-Assist“ genutzt (Mecke et al., 2020). Als Beispielarbeitssystem wurde hierzu die „Inspektion von Windenergieanlagen“ (WEA) ausgewählt. Bei diesem werden WEA im Halbjahresrhythmus auf ihre Funktionstüchtigkeit, ihren Verschleißzustand und mögliche Fehlerquellen untersucht. Zur Analyse des Arbeitssystems wurden die ausführenden Fachkräfte in erkundenden Interviews zu ihrer Arbeit befragt und bei einigen Inspektionen begleitet (Mewes et al., 2018). Im Folgenden werden die Anlagen, die Tätigkeiten der Service-MA und daraus entstehende Arbeitsanforderungen im Rahmen einer Inspektion beschrieben.

4 Das Arbeitssystem „Inspektion von Windenergieanlagen“

Der nachfolgende Abschnitt beschreibt das Arbeitssystem „Inspektion von Windenergieanlagen“. Dazu wird zunächst der Aufbau von WEA dargestellt. Anschließend wird die Servicetätigkeit selbst, aufgeteilt in Planung, Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung, erläutert.

4.1 Aufbau von Windenergieanlagen

Die ersten Windkraftanlagen zur Erzeugung elektrischer Energie wurden in Dänemark ab dem Jahr 1885 in experimenteller Form betrieben. Mit diesen wurden zunächst eher ländliche Gebiete versorgt, die weit von Kraftwerken entfernt lagen. In Deutschland wurden erste Windkraftanlagen vor dem ersten Weltkrieg zum Betrieb von Wasserpumpen eingesetzt. Eine geringe Anzahl dieser wurden auch damals schon für die Stromerzeugung umgebaut. (Gasch & Schubert, 2016)

In der Bauform variieren Windenergieanlagen hauptsächlich in der Form des Energiewandlers bzw. des Rotors. Zu unterscheiden sind hier primär Rotoren mit vertikaler und mit horizontaler Drehachse, wobei letztere in Deutschland besonders verbreitet sind. Dies liegt vor allem an den verstellbaren Rotorblättern, durch welche die Anlagen in der Lage sind, Drehzahl und Leistungsabgabe zu regeln. Zudem dienen diese Funktionen dem Schutz vor Überdrehzahlen bei extremen Windgeschwindigkeiten. Weiterhin erreichen Anlagen mit Horizontalachsen durch die Propellerbauart höhere Wirkungsgrade. (Hau, 2016)

Abbildung 12 zeigt die schematische Darstellung einer Horizontalachsen-Windenergieanlage. Moderne Varianten dieser Anlagen können eine Nabenhöhe bis 150 m und einen Rotordurchmesser bis 170 m aufweisen. Aktuelle Rotoren sind meistens mit drei Rotorblättern ausgestattet, welche aus Faserverbundstoffen auf Glas- oder Kohlefaserbasis bestehen (Gasch & Schubert, 2016). Aufgabe des Rotors und der Rotorblätter ist die Aufnahme der kinetischen Energie des Windes. Der aerodynamische Wirkungsgrad (Leistungsbeiwert) liegt aktuell bei maximal 50 %. Die Drehbewegung des Rotors wird über einen Generator in elektrische Energie transformiert. Dieser kann mit einem Getriebe ausgestattet sein oder die Kräfte direkt aufnehmen. (Reich & Reppich, 2018)

Über die Windrichtungsnachführung wird das Maschinenhaus (inklusive Rotor) an die aktuell vorherrschende Windrichtung angepasst. Der Turmkopf liegt hierbei auf einem Azimutlager (Turmkopflager) auf, welches als Wälz- oder Gleitlager ausgeführt wird. Beim Erreichen der

Zielposition wird die Gondel durch die Azimutbremse abgebremst und festgestellt. (Reich & Reppich, 2018)

Der Turm der Anlage hebt das Maschinenhaus auf eine für den Betrieb nutzbare Höhe, nimmt die dynamischen Lasten auf und überträgt sie an das Fundament (Manwell & McGowan, 2009). Als Folge dieser Funktionen muss der Turm auch die zur Übertragung der erzeugten elektrischen Energie benötigten Leitungen aufnehmen. Diese werden meistens bis ins Fundament geführt und dort unterirdisch an ein Inselnetz oder das öffentliche Versorgungsnetz weitergeleitet. (Reich & Reppich, 2018)

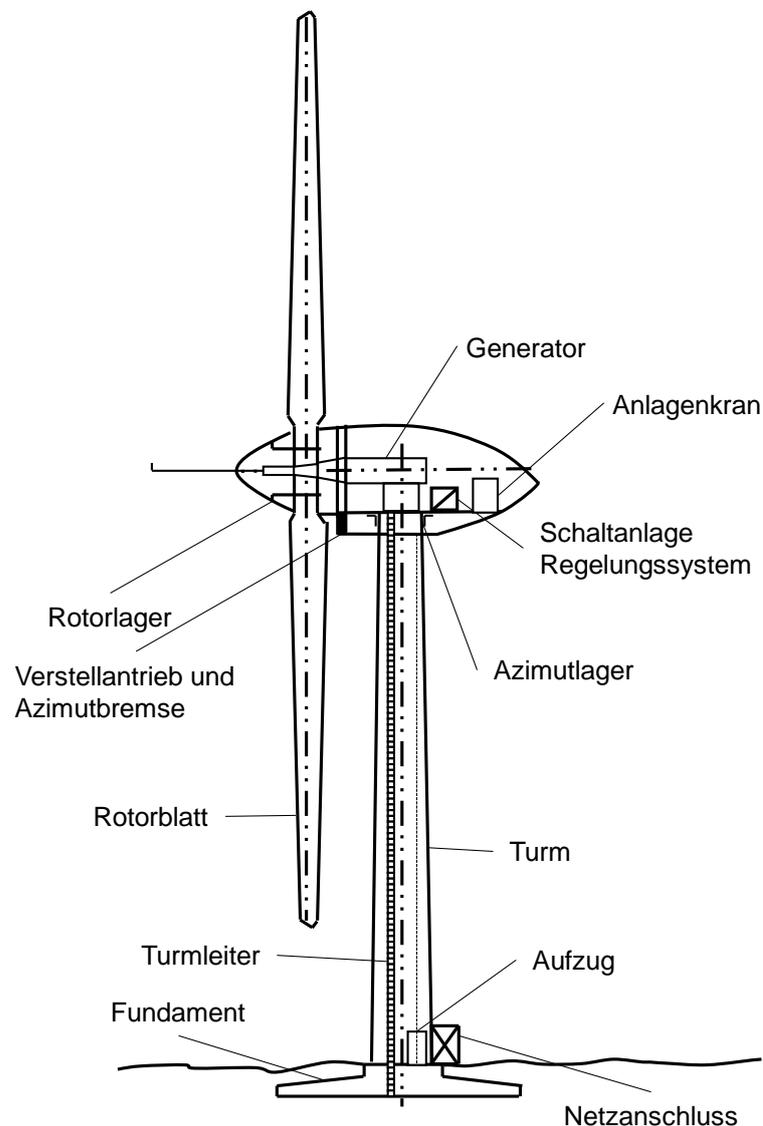


Abbildung 12: Getriebelose Horizontalachsen-Windenergieanlage nach Reich & Reppich (2018, S. 180)

4.2 Planung der Servicetätigkeit

Vor Beginn der Inspektion (zumeist am Vortag) sind diverse planende Tätigkeiten zu erledigen. Zuerst werden die zu untersuchenden Anlagen selektiert, wobei neben der Dringlichkeit der Inspektion besonders die lokale Nähe der Anlagen zueinander zu beachten ist. Dabei werden neben dem Verschleißzustand auch verschiedene externe Einflussgrößen betrachtet. Bspw. werden durch die Berücksichtigung erhöhter Windstärke unnötige Risiken bei der Inspektion im Außenbereich des Maschinenhauses sowie der inspektionsbedingte Stillstand der Anlage bei guten Betriebsbedingungen und damit verbundene Umsatzeinbußen vermieden.

Im Anschluss wird die Historie des Anlagenbetriebs der zurückliegenden Wochen überprüft, welche die Inspektoren online über eine Software abrufen. Ziel dieser Recherche ist die Identifikation von wiederkehrenden Fehlern und Auffälligkeiten im laufenden Anlagebetrieb. Zusätzlich werden Wartungsprotokolle vergangener Rundgänge gesichtet, auf deren Basis die Qualität vergangener Wartungsaufgaben durch die verschiedenen Serviceunternehmen bewertet werden. Kenntnisse zu systematischen Fehlern verschiedener Anlagen oder Anlagentypen sind bei der Inspektion besonders wertvoll. Dieses Erfahrungswissen liegt nur bei den versiertesten Inspektoren des Unternehmens vor und muss von unerfahreneren MA im Vorfeld bei den Kollegen erfragt werden. Zum Abschluss der Vorbereitung werden eventuelle Sonderaufgaben wie z. B. der Wechsel eines Feuerlöschers oder Modems geklärt. Außerdem wird passend zum jeweiligen Anlagentyp eines von zwei Inspektionsprotokollen vorbereitet.

Sind alle Faktoren berücksichtigt, werden die genauen Positionen der WEA ermittelt und der Anfahrtsweg geplant. Die Inspektionen sind aus Sicherheitsgründen grundsätzlich von mindestens zwei MA durchzuführen (DGUV, 2014), welche sich im Vorfeld terminlich abstimmen müssen.

4.3 Vorbereitung der Servicetätigkeit

Am Inspektionstag wird neben den bereits vorbereiteten Informationen und dem Wartungsprotokoll zunächst die nötige Ausrüstung zusammengestellt. Dazu gehören witterungsgerechte Kleidung, ein Universalwerkzeug, ein Schutzhelm mit Helmlampe und Arbeitshandschuhe. Zur Ausführung der Inspektionstätigkeit ist weiterhin ein Fotoapparat nötig, mit dem verschiedene Auffälligkeiten und Abnutzungsspuren während der Inspektion dokumentiert werden. Die Kombination aus mitgeführter Prüfliste und Kamera wird im weiteren Verlauf der Arbeit als PLK abgekürzt.

Aufgrund der extremen Arbeitshöhe und verschiedenen Arbeitsstellen mit ständiger Absturzgefahr sind die Inspektoren mit einer Kletterausrüstung ausgestattet. Diese besteht aus einem Klettergeschirr mit zwei Sicherheitshaken zur Absicherung an verschiedenen Stellen innerhalb der WEA und einem Fallschutzgurt mit Fallschutzläufer zur sicheren Nutzung der Zugangsleiter. Die Art des Läufers ist auf die Sicherheitsschiene der Leiter abzustimmen, welche sich bei verschiedenen Anlagentypen unterscheidet. Zur Sicherheit wird zudem ein Rettungsgerät mitgeführt, mit dessen Hilfe sich verunfallte MA im Ernstfall abseilen lassen (DGUV, 2014). Außerdem werden für den Zugang zur WEA die passenden Schlüssel für Anlage und Schaltschrank benötigt.

4.4 Durchführung der Servicetätigkeit

Nach dem Eintreffen an der Anlage meldet einer der MA die Inspektion bei der Servicezentrale des Energieunternehmens an. Dabei informiert er den Anlagenbetreiber über einen sprachbasierten Chat-Bot über das Betreten der Anlage bevor die eigentliche Inspektion beginnt.

Die Anlagenbegehung lässt sich abhängig von der Position in der Anlage in verschiedene Ablaufabschnitte unterteilen (dargestellt in Abbildung 13). So werden im Außenbereich z. B. Schilder, Zuwege und das Anlagenfundament überprüft. Im Turmfuß werden verschiedene technische Funktionalitäten, wie Schaltanlage und Aufzug untersucht. Zudem werden vergangene Aktivitäten im Logbuch der Anlage überprüft und abfotografiert, bevor die aktuelle Inspektion in diesem dokumentiert wird. Andere Prüfabschnitte sind der Anlagenkeller, der Turm inklusive Aufstiegssystem aus Leiter und Aufzug (soweit vorhanden), der Azimutbereich zwischen Turm und Maschinenhaus, das Maschinenhaus sowie das Anlagendach.

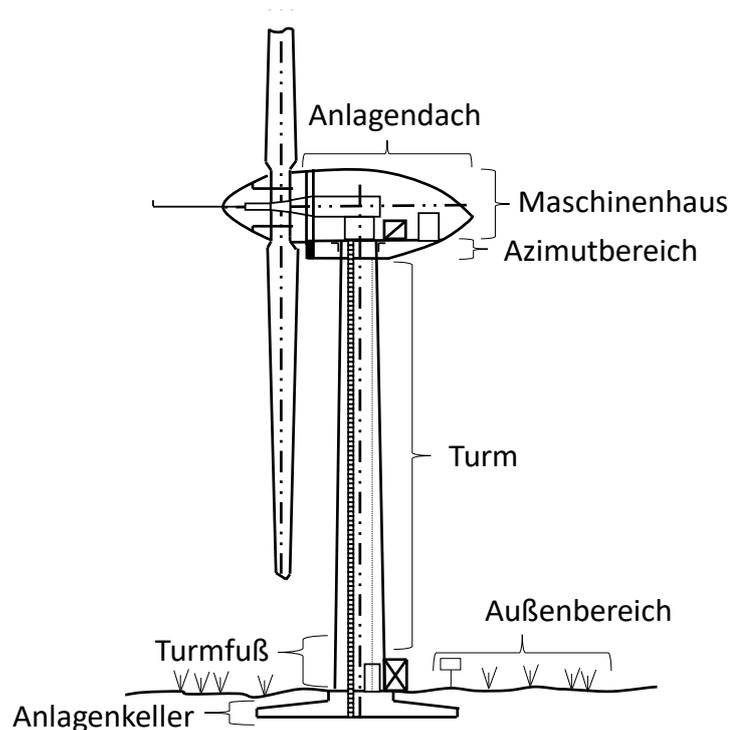


Abbildung 13: Örtliche Trennung der Inspektionsabschnitte (eigene Darstellung)

Während der Inspektion teilen beide MA die Inspektionsschritte untereinander auf, bleiben aber in unmittelbarer Nähe voneinander. So überprüft im Turmfuß z. B. einer der beiden Inspektoren den Schaltschrank, während der Andere das Fundament untersucht. Hierbei führt jedoch nur ein Kollege das Protokoll. Der nicht schriftführende MA teilt dem Protokollführer seine Erkenntnisse im Anschluss an die durchgeführten Prüfabschnitte mit. In der Praxis wird das Protokoll, auch aufgrund der beengten Bedingungen innerhalb der WEA, meist nach der Überprüfung der Zwischenabschnitte an einem zentralen Punkt aktualisiert.

Der Großteil der Prüfpunkte wird durch eine **betrachtende Prüfung** analysiert. Hierbei beschaute der Prüfende verschiedene vordefinierte Prüfstellen und Füllstände, fotografiert aufgetretene Mängel und vermerkt sie im Protokoll. Tritt kein Mangel auf, wird der jeweilige Prüfpunkt mit einem Haken als i. O. vermerkt.

An einigen Prüfpunkten wird vom Auftraggeber auch im i.-O.-Zustand das Anfertigen einer **Fotografie** verlangt. So werden z. B. die Rotorblätter auch ohne das Feststellen von Mängeln fotografisch dokumentiert.

In einigen Arbeitsschritten werden aus Schaltschränken der Anlage Betriebs- und Sensordaten erfasst. Diese **Datenerfassung** kann aufgrund einiger Defizite der komplizierten Bedienoberflächen dieser Maschinen und Steuerkästen selbst für erfahrene Monteure eine Herausforderung

darstellen. Hierbei kommt erschwerend hinzu, dass aus Fehlern weitreichende Folgen, wie Schäden an der Maschine, resultieren können.

Einige Arbeitsschritte erfordern eine **mechanische Prüfung**. So wird z. B. der Aufzug vor der Verwendung bestiegen und leicht angefahren, um dessen Funktionsfähigkeit sicherzustellen und den Notablass zu testen. Auch beim Aufzugskran im Maschinenhaus werden wichtige Grundfunktionalitäten überprüft.

Bestimmte Prüfstellen erfordern eine **akustische Prüfung**. So werden Schraubverbindungen im Turm mit einem Klopfest überprüft. Hier sollen ausreichende Drehmomente auf den Schrauben sichergestellt und Schäden im Werkstoff ausgeschlossen werden. Auch beim An- und Ablauf des Generators achten die Inspektoren auf Irregularitäten im akustischen Maschinenverhalten. Hier liegt der Fokus auf eventuell auftretenden rumpelnden oder polternden Geräuschen aus den Maschinen.

Die beschriebenen Prüfkategorien werden in Tabelle 5 zusammenfassend dargestellt und zusätzlich mit der Anzahl ihres Auftretens bei der Wartung einer Windenergieanlage vom Typ Vestas V90 unterlegt.

Tabelle 5: Beschreibung und Anzahl des Auftretens der definierten Prüfkategorien im Arbeitssystem Inspektion einer Windenergieanlage (Mewes, Waßmann, Adler, Minow & Schmicker, 2019, S. 2)

Prüfkategorie	Beschreibung	Anzahl
Betrachtende Prüfung	Betrachtung einzelner Maschinen und statischer Bauteile hinsichtlich verschiedener Verschleißmerkmale Zusätzliche Dokumentation auftretender Mängel via Digitalkamera	24
Mechanische Prüfung	Überprüfung der Funktionsweise einzelner Maschinen und Werkzeuge innerhalb der Anlage durch Verwendung von Testabläufen Bspw. Test des Laufs eines Lastkrans durch dessen Anfahren	3
Akustische Prüfung	Test des Klangverhaltens von Maschinen und Materialien	2
Datenerfassung	Übertragung von Maschinendaten und anderen Messwerten in das Prüfprotokoll	2
Fotografie	Fotografische Protokollierung betroffener Bauteile und Maschinen zusätzlich zur betrachtenden Prüfung, auch ohne Störungsdiagnose	6
Sonstige	Notwendige Arbeitsschritte, welche nicht im Prüfprotokoll auftreten	6

Während der Inspektion müssen sich die MA an vielen Prüfpunkten in Zwangspositionen begeben, in welchen die Bewegungsfreiheit verschiedenster Muskelgelenksysteme teilweise stark eingeschränkt ist. Besonders die Armbewegung wird in vielen Arbeitspositionen beeinträchtigt. Aufgrund beengter baulicher Gegebenheiten herrscht im gesamten Arbeitssystem ständige

Stoßgefahr. Zudem kann es innerhalb der Anlage häufig zum Kontakt mit Schmierstoffen oder Verunreinigungen kommen.



Abbildung 14: Beispiele eingeschränkter Positionen bei der Betriebsbegehung einer Windenergieanlage (Mewes et al., 2018, S. 5)

Die Umgebungsverhältnisse innerhalb der WEA sind je nach Lokalität des Prüfpunkts, Typs der Anlage und Inspektionszeitpunkts gänzlich unterschiedlich. So können die Lichtverhältnisse in der Anlage je nach Prüfpunkt und Wetter von absoluter Dunkelheit bis zu Tageslicht mit direkter Sonneneinstrahlung variieren. Auch die Temperaturbedingungen wechseln abhängig von der Wetterlage. So ist innerhalb der Anlage mit Temperaturen im Bereich von 40° C an heißen Sommertagen und bis zu -10° C Außentemperatur im Winter zu rechnen.

Während der Inspektion stimmen sich die MA verbal zu ihren Tätigkeiten ab. Hierbei besprechen sie hauptsächlich die Aufteilung der Inspektionspunkte und den Erfahrungsaustausch zum Umgang mit bestimmten Prüfstellen. Bei einigen Arbeitsschritten bewegen sich die MA außerhalb des gegenseitigen Sichtfelds. In diesen Situationen wird mit kurzen Absprachen abgesichert, dass beide Inspektionspartner im Fall eines Unfalles außerhalb des Sichtfeldes in angemessener Zeit Hilfe leisten können.

In seltenen Fällen wird, um zusätzliche Informationen abzurufen, eine Kommunikation mit der Firmenzentrale nötig. Dies ist laut Aussage der MA durch den schlechten Handyempfang in ländlichen Regionen teilweise gar nicht möglich. Auch mobile Internetverbindungen haben nur selten eine ausreichende Stärke für den Datentransfer.

4.5 Nachbereitung der Servicetätigkeit

Nach Abschluss der Inspektionen werden die Daten am Büroarbeitsplatz vom händisch geführten Protokoll in einen digitalen Bericht überführt. Weiterhin erfolgt eine Zuordnung der angefertigten Fotografien zu den jeweiligen Anlagen und Prüfpunkten, wobei ausgewählte Mängel

visuell hervorgehoben werden um die Erkennbarkeit durch Dritte sicherzustellen. Die nachgelagerte Zuordnung der Bilder zum Entstehungsort kann sehr mühselig werden, da sich die Fehlerbilder innerhalb der Anlagen häufig ähneln. Sind alle Daten verarbeitet, wird der Prüfbericht an relevante Institutionen versendet.

4.6 Bewertung des Arbeitssystems nach ErgoInstrument REBA 9.0

Das Softwaresystem „Analyse, Bewertung und Gestaltung von Tätigkeiten unter Berücksichtigung von Sicherheit und Gesundheit - ErgoInstrument REBA 9.0“ ist ein rechnergestütztes Dialogverfahren zur Bewertung und Gestaltung von Arbeitstätigkeiten. Es ermöglicht die psychologische Bewertung von Arbeitsinhalten bereits in frühen Phasen der Arbeitsprozessgestaltung und berücksichtigt zusätzlich Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz. (Pohlandt, 2009)

Im Ergebnis der Analyse des Arbeitssystems mit REBA 9.0 zeigen sich für das Arbeitssystem „Inspektion von WEA“ verschiedene Ergebnisse für die einzelnen Kriterien des Tätigkeitsbewertungssystems nach Hacker (1986). So kann die Ausführbarkeit des Arbeitssystems laut REBA 9.0 nicht gewährleistet werden. Die Ursache hierfür liegt in der Nichteinhaltung der anthropometrischen Körperwerte und der Richtigkeit der handlungsanweisenden Informationen. Diese sind auf die in der Instandhaltung üblichen Enge der Arbeitssysteme an zahlreichen Prüfstellen und die Undurchsichtigkeit einiger Softwareoberflächen und Steuerungen in der Anlage zurückzuführen. Eine Beeinflussung der ergonomischen Gegebenheiten für das Arbeitssystem ist aufgrund des begrenzten Bauraumes nur schwer zu erreichen. Die Schädigungslosigkeit bewertet das Programm als eingeschränkt. Dies ergibt sich aufgrund einiger Gefahrenstellen (z. B. Absturzgefahr auf dem Dach und Stoßgefahr im Maschinenhaus), welchen jedoch durch Schutzausrüstung und die zahlreichen Arbeitsschutzvorschriften auf der WEA entgegengewirkt wird. Die Ebenen der Beeinträchtigungsfreiheit und Lern- und Persönlichkeitsförderlichkeit werden ohne Einschränkung als erfüllt bewertet, da insgesamt eine komplexe, fordernde und abwechslungsreiche Tätigkeit vorliegt.

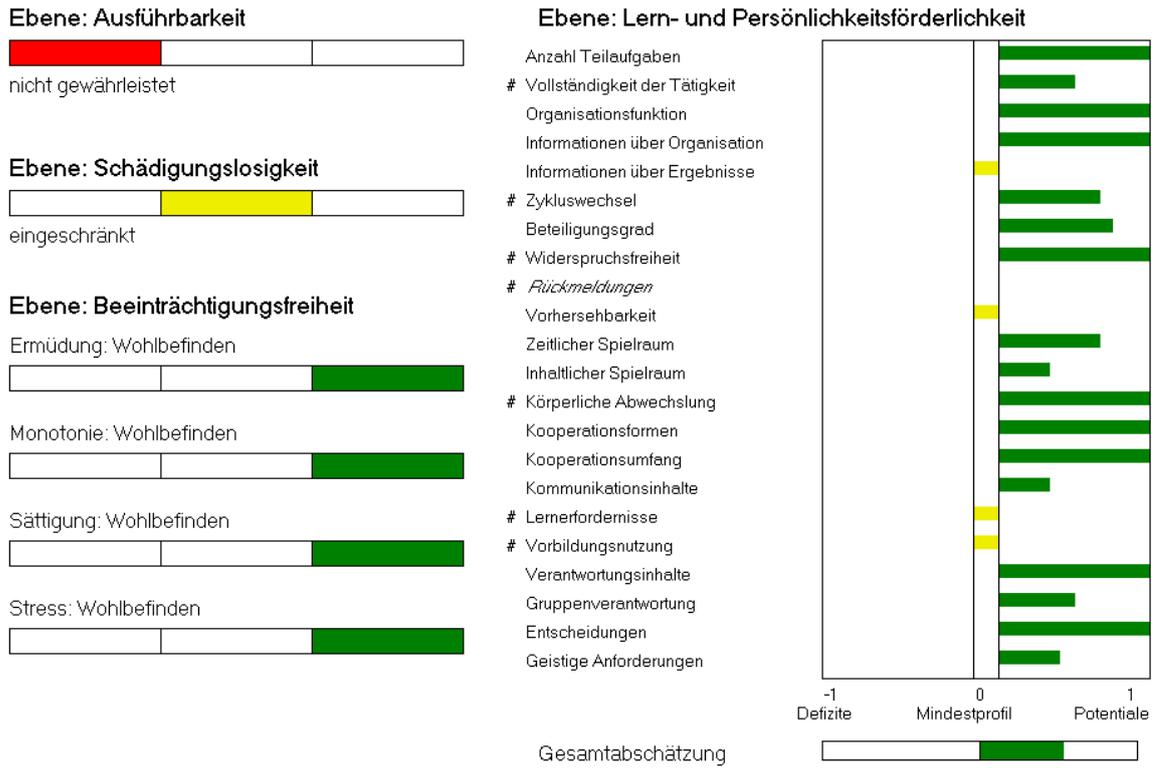


Abbildung 15: Ergebnisse der Arbeitssystemanalyse „Inspektion von Windenergieanlagen“ mit dem Analyseinstrument REBA 9.0, Pohlandt (2009)

5 Das digitale Assistenzsystem „Pocket-Assist“

Um die Vorbereitung, Durchführung und Nachbearbeitung mobiler Servicetätigkeiten zu unterstützen, wurde das digitale AS „Pocket-Assist“ entwickelt. Dieses AS wird als Hypertext-Markup-Language (HTML) basierte Anwendung auf einem Einplatinencomputer (Raspberry Pi) ausgeführt (Abbildung 16), auf welchem sich verschiedene Mobilgeräte per W-LAN einwählen und über ihren Webbrowser zeitgleich Zugriff erhalten können. So können mehrere MA gleichzeitig in einer Prüfliste arbeiten. Verliert eines der Endgeräte den Kontakt zum AS, werden in dieser Zeit vorgenommene Änderungen lokal gespeichert. Sobald wieder eine stabile W-Lan Verbindung besteht, findet eine Eintragung der zwischengespeicherten Daten auf den Einplatinencomputer statt.



Abbildung 16: „Pocket-Assist“ (Einplatinencomputer und Powerbank) auf dem Dach einer Windenergieanlage (eigene Darstellung)

Zur Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit wurden zur Umsetzung der Softwareoberfläche von „Pocket-Assist“ die Gestaltungsgrundlagen der DGUV (2016) zur Softwareergonomie berücksichtigt. Das AS ist so strukturiert, dass eine Untergliederung in verschiedene Arbeitsschritte möglich ist. Diese lassen sich mit unterstützenden Beschreibungen in Text- und Bildform sowie größeren Dokumenten unterlegen. So können MA je nach Situation und Erfahrungsstand auf individualisierte Hilfestellungen zugreifen. Der interessierte Leser findet in Anhang A eine Beschreibung des strukturellen Aufbaus des AS „Pocket-Assist“. Zum Verständnis der Dissertation ist dieser Abschnitt jedoch nicht erforderlich.

5.1 Arbeitsansichten von „Pocket-Assist“

Im Folgenden wird die Arbeitsansicht von „Pocket-Assist“ anhand von Abbildung 17 beschrieben.

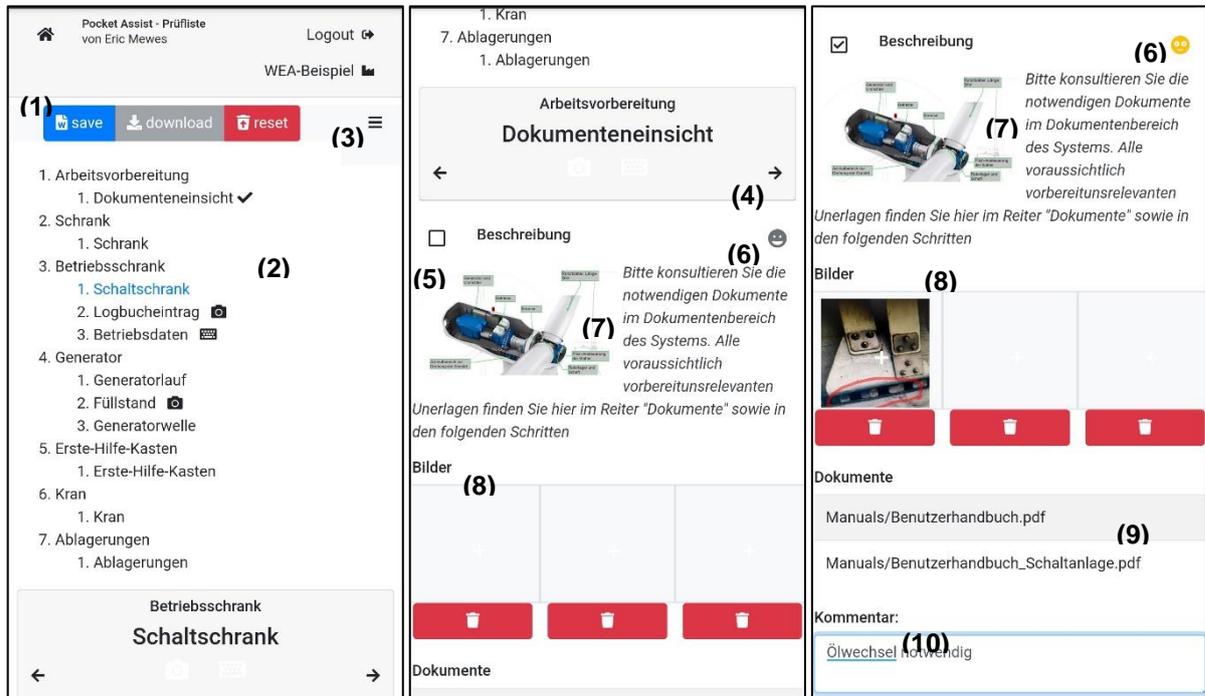


Abbildung 17: Beispiel für die Arbeitsansicht des Assistenzsystems „Pocket-Assist“ (Ansicht von links nach rechts heruntergescrollt)

Im oberen Abschnitt der Ansicht befinden sich allgemeine Dokumentenfunktionen sowie das Inhaltsverzeichnis zu den Prüfschritten der aktuell bearbeiteten Anlage. Die vier Funktionen „save“, „download“ und „reset“ sind im oberen Teil positioniert (1). Mit „save“ speichert der Nutzer die aktuellen Inspektionsdaten. „download“ exportiert die aufgenommenen Prüfdaten im .docx-Format auf das verwendete Endgerät. „reset“ löscht die aktuellen Eingaben im Anlagenprotokoll.

Das Inhaltsverzeichnis (2) unterteilt sich in zwei Gliederungsebenen, wobei die erste Ebene verschiedene Tätigkeiten der zweiten zusammenfasst. Die Ordnung der ersten Gliederungsebene zeigt, analog zum vorhandenen Prüfprotokoll, typische Lokalitäten wie den Turmfuß oder komplexe technische Anlagen vergleichbar zum Generator. Die zweite Ebene beschreibt die genauen Arbeitsschritte bzw. Prüfpunkte. Etwaige Symbole hinter den Punkten verweisen auf das Erfordernis verschiedener Pflichteingaben (bspw. Tastatursymbol → Werteingabe, Kamerasymbol → Fotografie). Abgeschlossene Arbeits-/Prüfschritte sind anschließend mit einem Haken im Inhaltsverzeichnis markiert. Empfindet der Benutzer das Inhaltsverzeichnis als störend, kann er dieses mit (3) aus- und einblenden.

Unter dem Inhaltsverzeichnis schließt der Bearbeitungsbereich an. Mit Hilfe der Pfeilsymbole seitlich der Überschrift **(4)** kann der Nutzer die Arbeitsschritte in vorbestimmter Reihenfolge wechseln. Durch Anklicken des Bestätigungsfeldes **(5)** wird die Durchführung des ausgewählten Prüfpunktes angegeben. Der vorgefundene Anlagenzustand wird über die Farbe und Mundstellung des Smileys **(6)** symbolisch dargestellt. Die Zustände können hierbei zwischen „keine Mängel“ (grün), „leichte Mängel“ (gelb) und „schwere Mängel“ (rot) variiert werden. Dem Informationsfeld **(7)** sind hinterlegte Beschreibungen und Schaubilder zu entnehmen.

Der Inspekteur kann für die einzelnen Prüfpunkte bis zu drei Fotos pro Arbeitsschritt hinterlegen **(8)**. Durch einen Klick auf den Platzhalter für die jeweilige Fotografie wird die Kamera des verwendeten Endgeräts angesteuert. Auf den angefertigten Bildern können anschließend Fehlerstellen und Besonderheiten via Freihandzeichnung markiert werden. Sind zu einem Arbeitsschritt zusätzliche Dokumente wie z. B. Betriebsanleitungen hinterlegt, werden diese unterhalb des Bereichs für die Fotografien angezeigt **(9)**. Eine zusätzliche Möglichkeit der schriftlichen Störungsbeschreibung wird über die Kommentare am Ende des Abschnitts abgebildet **(10)**.

6 Forschungsfragen und Versuchsplanung

Nachdem in den vorherigen Kapiteln die Grundstruktur der Evaluationsmethode, das Beispielarbeitssystem und die zu analysierende Applikation beschrieben wurden, sollen im Folgenden Forschungsfragen formuliert und anschließend der Untersuchungsplan zu deren Beantwortung aufgestellt werden.

6.1 Forschungsfragen

Aufbauend auf dem in Abschnitt 3 aufgestellten Modell zur arbeitswissenschaftlichen Analyse und Bewertung digitaler Assistenzsysteme wurden Forschungsfragen zu den dort definierten Parametern formuliert.

Die Menschgerechtigkeit setzt sich im Modell aus vier der fünf Ebenen der Arbeitsgestaltung nach Hacker (1986) und Quaas (1999) zusammen. Dabei wurde die Ausführbarkeit als notwendiges Kriterium für eine Evaluation als gegeben angenommen (erläutert in Kapitel 3).

Die Unversehrtheit setzt sich aus den Ebenen der Schädigungslosigkeit und Beeinträchtigungsfreiheit zusammen. Beide Kriterien beschreiben die Vermeidung kurzfristiger oder dauerhafter Schädigungen der MA. Um diese auszuschließen, bietet es sich an, die Auswirkungen des AS auf die generelle Beanspruchungssituation zu prüfen. Dementsprechend ergibt sich als erste Forschungsfrage:

F₁: Entstehen bei der Nutzung des Assistenzsystems „Pocket-Assist“ höhere Beanspruchungen als bei der Verwendung der Prüfliste mit zugehöriger Kamera?

In der Analyse des Arbeitssystems zeigte sich zusätzlich, dass die MA während ihrer Tätigkeit in den WEA häufig Zwangspositionen einnehmen müssen. Es wird vermutet, dass diese eine hohe Auswirkung auf die physische Arbeitsbelastung haben. Dementsprechend lautet die zweite Forschungsfrage:

F₂: Entsteht durch das Assistenzsystem „Pocket-Assist“ bei der Verwendung eines Smartphones als Endgerät eine höhere Belastung aus Körperhaltungen als bei der Verwendung der Prüfliste mit zugehöriger Kamera?

Die Qualität der Interaktion mit einem Arbeitsmittel kann die Belastungssituation der MA positiv oder negativ beeinflussen. Als Indikator für die Qualität der Interaktionsgestaltung kann

die Usability oder Gebrauchstauglichkeit (vgl. Kap. 2.3) dienen. Daraus folgt die Forschungsfrage:

F₃: Weist das Assistenzsystem „Pocket-Assist“ eine höhere Gebrauchstauglichkeit auf als die Prüfliste mit zugehöriger Kamera?

Das Entfaltungspotenzial resultiert aus der Persönlichkeitsförderlichkeit nach Hacker (1986) und Quaas (1999) sowie der Sozialverträglichkeit nach Quaas (1999). Hierbei können durch die Einführung des AS die Möglichkeiten der MA zur Selbstverwirklichung und ihr berufliches und privates Umfeld verändert werden. Das AS soll die MA bei der Ausführung ihrer Tätigkeiten unterstützen und die Nachbereitung teilautomatisieren. Durch diese Hilfestellungen könnten Freiräume entstehen, welche mitarbeiterseitige Entfaltungspotenziale fördern. Diesbezüglich ergibt sich folgende Forschungsfrage:

F₄: Ermöglicht die Einführung des Assistenzsystems „Pocket-Assist“ den Mitarbeitenden zusätzliche Freiräume für wichtigere Tätigkeiten oder persönliche Weiterentwicklung?

Aktuell wird bei der Inspektion von WEA ein Prüfprotokoll von zwei MA ausgefüllt. Zur Abstimmung der einzelnen Prüfpunkte müssen diese ablaufbedingt häufig miteinander kommunizieren. Das AS ermöglicht die simultane Arbeit mehrerer MA in einem Prüfprotokoll und könnte die Kommunikation in der WEA negativ beeinflussen. Daraus lässt sich folgende Forschungsfrage ableiten:

F₅: Beeinflusst das Assistenzsystem „Pocket-Assist“ die Kommunikation zwischen den Inspektoren während der Anlageninspektion negativ?

Als Kriterien der Produktivität wurden die drei Dimensionen des Projektmanagementdreiecks der Gesellschaft für Projektmanagement Zeit, Leistung und Kosten festgelegt (Möller T., 2010). Um die Veränderung der Zeit im Arbeitssystem „Inspektion von Windenergieanlagen“ durch die Nutzung des AS zu prüfen, muss die Dauer der verschiedenen Tätigkeiten betrachtet werden. Die entsprechende Forschungsfrage lautet:

F₆: Verkürzt das Assistenzsystem „Pocket-Assist“ die Bearbeitungszeit eines Inspektionsauftrags im Vergleich zur Prüfliste mit zugehöriger Kamera?

Um eine mögliche Veränderung der Leistung festzustellen, muss zunächst erfasst werden, wodurch sich die Qualität der Arbeitstätigkeit bestimmt. In der Inspektion von WEA wird diese maßgeblich durch die Güte der Fehlerdiagnose beeinflusst. Es resultiert die Forschungsfrage:

F7: Kann das Assistenzsystem „Pocket-Assist“ gegenüber der Prüfliste mit Kamera die Entstehung verschiedener Inspektionsfehler verhindern?

Neben der Qualität der vorhandenen Dienstleistung lässt sich der Aspekt der Leistung durch das Schaffen zusätzlicher Mehrwerte für den Auftraggeber steigern, welche sich bestenfalls monetarisieren lassen. Folglich ergibt sich die Forschungsfrage:

F8: Wird durch das Assistenzsystem „Pocket-Assist“ zusätzlicher Mehrwert für die Auftraggeber geschaffen?

Eine Veränderung der Kosten ist sowohl durch zusätzliche Ausgaben als auch durch die Einsparung verschiedener laufender Kosten möglich. Im speziellen Anwendungsfall entstehen Ausgaben durch die Entwicklung des AS und die Anschaffung der zugehörigen Endgeräte. Eine Kostenreduzierung ist nur durch eine Verkürzung der Inspektionszeit und die daraus folgende Einsparung von Personalmitteln denkbar. Folgend entsteht die Forschungsfrage:

F9: Ermöglicht das Assistenzsystem „Pocket-Assist“ eine Ersparnis durch die Vermeidung von Personalkosten?

6.2 Versuchsplanung

Die in Abschnitt 6.1 formulierten Forschungsfragen sollen nun mit Hilfe verschiedener Labor- und Feldversuche beantwortet werden. Das digitale AS „Pocket-Assist“ soll sowohl neue als auch erfahrene MA bei ihrer Arbeit anleitend unterstützen. Aus diesem Grund sind die einzelnen Parameter für ausgebildete Service-MA und Versuchspersonen (VP) ohne Inspektionserfahrung zu testen. Da WEA kostenintensive Großanlagen mit besonderen Sicherheitsbestimmungen sind, können an diesen keine Untersuchungen mit VP ohne MA-Status durchgeführt werden. Um die Grundfunktionen des AS trotzdem von VP ohne Vorkenntnisse testen lassen zu können, wurde ein Laboraufbau konzipiert (vgl. Kap. 8.1), der verschiedene Inspektionsvorgänge in der WEA prototypisch darstellt. Zusätzlich wird durch einen Laboraufbau eine VP-Anzahl ermöglicht, welche im Feld nicht realisierbar wäre.

Die **Unversehrtheit** beschreibt die Auswirkung des Arbeitssystems auf den kurz- und langfristigen gesundheitlichen Zustand der MA. F₁ hinterfragt die Beanspruchungssituation mit den Arbeitsmitteln Assistenzsystem (AS) und Prüfliste mit zugehöriger Kamera (PLK). Diese lässt sich mit dem National Aeronautics and Space Administration – Task Load Index (NASA-TLX) erfassen (Kapitel 7.1). Zur Beantwortung von F₃ soll die Gebrauchstauglichkeit mit Hilfe des ISONORM 9241/110-S nach Prümper (2008) (vgl. Kap. 7.3) vergleichbar gemacht werden. Die Erhebungsinstrumente eignen sich sowohl für Feld- als auch Laboruntersuchungen und werden in beide integriert.

Zur Beantwortung von F₂ sind die in der Anlage häufig eingenommenen Zwangspositionen zu untersuchen. Diese lassen sich mit dem Beobachtungsinstrument Rapid Entire Body Assessment (REBA) (vgl. Kap. 7.2) quantifizieren und vergleichen. In einer Voruntersuchung wurden unter Laborbedingungen nur sehr geringe Unterschiede zum Feld festgestellt. Gleichzeitig ist der Aufwand der entsprechenden Untersuchungen sehr hoch. Aus diesem Grund wird die Körperhaltungsuntersuchung ausschließlich im Feld vorgenommen.

Zur Ermittlung des **Entfaltungspotenzials** sollen die Möglichkeit der persönlichen Weiterentwicklung und die Kommunikation im Rahmen der Tätigkeit „Inspektion von WEA“ betrachtet werden. Diese Phänomene lassen sich nur schwierig quantifizieren und sind aus diesem Grund qualitativ zu erfassen. Zur Beantwortung der Forschungsfragen F₄ und F₅ sollen daher mit leitfadengestützten Interviews die Einstellung der MA gegenüber den Arbeitsmitteln, die Beeinflussung der Kommunikation während der Inspektion der WEA sowie der empfundene Kompetenzgewinn bzw. -verlust durch die Einführung des AS ermittelt werden. Da zur Beschreibung dieser Phänomene eine langfristige Ausführung der Arbeitsaufgabe mit und ohne Einsatz des AS notwendig ist, soll die Erhebungsmethode ausschließlich mit Service-MA durchgeführt werden.

Zur Beantwortung von F₆ ist die benötigte **Zeit** für beide Testgruppen zu evaluieren. In der Voranalyse von Mewes, et al. (2018) stellte sich heraus, dass eine Beobachtung die Arbeitsprozesse in WEA stark beeinflusst. Dies begründet sich insbesondere durch die Enge innerhalb des Arbeitssystems, aufgrund der die Beobachter häufig die Arbeitswege der MA blockierten. Um dies zu umgehen, wurden die MA um die Selbstaufschreibung der jeweiligen Arbeitszeiten zur Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung bei der Inspektion der WEA gebeten. In den Laborversuchen ist jedoch eine genaue Messung der Durchlaufzeiten durch die Versuchsleitung möglich.

Zur Betrachtung der **Leistung** oder Qualität der Dienstleistung ist F_7 zu beantworten und damit die Aufklärungsrate der Fehler zu untersuchen. Dies ist unter Feldbedingungen nicht möglich, da die Inspektion bereits den letzten Schritt der Maßnahmen zur Qualitätskontrolle darstellt. Aus diesem Grund wurden im Labor konstruierte Fehlerbilder entwickelt, welche einen Vergleich der Aufklärungsrate für beide Arbeitsmittel möglich machen. F_8 erfragt die Möglichkeit der Einführung von Verbesserungen, welche zusätzlichen Mehrwert für die Auftraggeber schaffen. Ob diese durch das AS realisiert werden können, wurde durch leitfadengestützte Interviews mit den MA ermittelt.

Zur Beantwortung von F_9 sollen mögliche Einsparungen der **Kosten** zusätzlichen Ausgaben gegenübergestellt werden. Hier ist ein Vergleich verschiedener Ausgaben vor und nach der Einführung des AS vorzunehmen. Einsparungen werden hier vor allem durch Vermeidung von Personalkosten und zusätzliche Ausgaben durch die Anschaffung der Hardware erwartet.

Tabelle 6 ordnet den einzelnen Parametern aus der Evaluationsmethode (vgl. Abbildung 11) die jeweiligen Erhebungsmethoden zu.

Tabelle 6: Gegenüberstellung der Evaluationsparameter und Erhebungsmethoden in Labor und Feld

	Servicemitarbeitende im Feld	Versuchspersonen im Labor
Unversehrtheit	Beanspruchungsbewertung: NASA-TLX (F_1) Körperhaltungsbewertung: Rapid-Entire-Body-Assessment (REBA) (F_2) Usability Bewertung: ISONORM 9241/110-S (F_3)	Beanspruchungsbewertung: NASA-TLX (F_1) Usability Bewertung: ISONORM 9241/110-S (F_3)
Entfaltungspotenzial	Leitfadengestützte Interviews (F_4, F_5)	- - -
Zeit	Selbstaufschreibung der MA (F_6)	Messung der Durchlaufzeiten der VP (F_6)
Leistung	Leitfadengestützte Interviews (F_8)	Vergleich der Anzahl aufgetretener Fehler (F_7)
Kosten	Gegenüberstellung potenziell eingesparter Personalkosten mit entstandenen Kosten durch Hard-/Software des AS (F_9)	- - -

7 Ausgewählte Erhebungsmethoden

In diesem Abschnitt werden verschiedene Erhebungsmethoden vorgestellt, welche zur Beantwortung der in Abschnitt 6.1 aufgestellten Forschungsfragen dienen sollen. Zu diesen zählen die Analyse der Arbeitsbeanspruchung nach NASA-Task Load Index, die Analyse der Körperhaltung nach Rapid Entire Body Assessment und die Erfassung der Usability nach ISONORM 9241/100. Aus Urheberrechtsgründen wird auf eine Darstellung der verwendeten Instrumente im Anhang verzichtet.

7.1 Analyse der Arbeitsbeanspruchung mit dem NASA Task Load Index

Der von der National Aeronautics and Space Administration entwickelte NASA-Task Load Index (NASA-TLX) ist ein multidimensionales Bewertungssystem der Arbeitsbeanspruchung (Hart, 1986). Das Instrument basiert auf der Bewertung von Subskalen für die Parameter geistige Anforderung, körperliche Anforderung, zeitliche Anforderung, erbrachte Leistung, Anstrengung und Frustration (beschrieben in Tabelle 7).

Tabelle 7: Parameter des NASA-TLX und NASA-RTLX und deren Beschreibungen nach (Hart, 2006, S. 908)

Parameter	Beschreibung
Geistige Anforderungen	Welche geistigen Anforderungen waren bei der Informationsaufnahme und -verarbeitung erforderlich (z. B. Denken, Entscheiden, Berechnen, Erinnern, Hinsehen, Suchen?) War die Aufgabe leicht oder anspruchsvoll, einfach oder komplex, erforderte sie eine hohe Genauigkeit oder ist sie fehlertolerant?
Körperliche Anforderungen	Wie viel körperliche Aktivität war erforderlich? (z. B. Ziehen, Drücken, Drehen, Aktivieren) War die Aufgabe leicht oder schwer, langsam oder hektisch, locker oder anstrengend, ruhig oder arbeitsam?
Zeitliche Anforderungen	Welchen Zeitdruck empfanden Sie aufgrund der Geschwindigkeit, mit der die Aufgabe bzw. Aufgabenelemente auftauchten? War die Aufgabe langsam und gemütlich oder schnell und rasant?
Erbrachte Leistung	Wie erfolgreich haben Sie die Aufgabenziele, die der Experimentator (oder Sie selbst) gesetzt hatte, erfüllt? Wie zufrieden waren Sie mit der Aufgabenerfüllung?
Anstrengung	Wie hart mussten Sie arbeiten (geistig, körperlich), um die Leistung zu erbringen?
Frustration	Wie unsicher, entmutigt, irritiert, gestresst und verärgert bzw. wie sicher, zustimmend, entspannt und erfüllt fühlten Sie sich während der Aufgabe?

Im ursprünglichen NASA-TLX (Hart, 1986) werden diese Parameter paarweise hinsichtlich des vom Nutzer empfundenen Beitrags zur Aufgabenbeanspruchung verglichen. Im Ergebnis werden Parameter mit höherer Bewertung der Arbeitsbelastung auch besonders berücksichtigt. In einigen späteren Studien wurde auf paarweise Vergleiche verzichtet. In diesem verkürzten

NASA-RAW TLX oder NASA-RTLX konnte keine klare Tendenz einer Beeinflussung der Ergebnisse gegenüber der Vorversion festgestellt werden (Hart, 2006). Unabhängig von der Testvariante sind die Parameter anschließend auf einem zwanzigstufigen Skalenfeld zu bewerten, welches sich in einem Wertebereich zwischen fünf und 100 in Fünferschritten aufbaut (Hart, 1986). Für die Untersuchungen in dieser Dissertation wurde zur gleichberechtigten Betrachtung aller Parameter der NASA-RTLX verwendet.

7.2 Körperhaltungsanalyse mit Rapid Entire Body Assessment (REBA)

Zur Bewertung physischer Belastungen werden verschiedene körperliche Tätigkeiten und Einflussfaktoren betrachtet. Unterschiedliche Methoden der Analyse adressieren hier variierende Einflüsse mit differierender Gewichtung und behandeln somit verschiedene Ausgangsbedingungen im Arbeitssystem wie z. B. Lastgewichte oder Körperhaltungen mit abweichendem Fokus. Für diese Dissertation wurden die „Leitmerkmalermethode“ (LMM) (Caffier, Steinberg & Liebers, 1999), das „Rapid Entire Body Assessment“ (REBA) (Hignett & Lynn, 2000; Mc Atmaney & Hignett, 2005) und „Ovako Working Posture Analysis System“ (OWAS) (Karhu, Kansi & Kuorinka, 1977) verglichen. Aufgrund des häufigen Auftretens von Zwangspositionen in den untersuchten Arbeitssystemen wurde die REBA-Methode ausgewählt, welche speziell für deren Bewertung entwickelt wurde.

Das Rapid Entire Body Assessment (REBA) (Hignett & Lynn, 2000; Mc Atmaney & Hignett, 2005) wurde entwickelt, um die besonders belastenden Arbeitspositionen aus Bereichen der Pflege und dem technischen Service abbilden zu können. Dazu werden Daten zu Körperhaltung, aufgebrauchten Kräften und Arten der Bewegung sowie deren Wiederholung und Kombination ermittelt. Die erhobenen Daten basieren auf der Lage von Gelenken im Verhältnis zu ihrer neutralen Stellung, wobei der REBA-Score mit zunehmendem Abweichen von der Ruhelage zunimmt. Eine Bewertung erfolgt durch verschiedene Tabellen, welche den Status für das jeweilige Bewegungssystem bestimmen. Aus den Teilergebnissen wird ein REBA-Score ermittelt, welcher Rückschlüsse auf die Ausprägung des Risikos für das Muskelskelettsystem und die Dringlichkeit notwendiger Veränderungen zulässt.

Das REBA-Verfahren untergliedert sich in fünf verschiedene Abschnitte:

1. Aufgabe beobachten

Das Verfahren beginnt mit einer allgemeinen Arbeitsanalyse, welche einen allgemeinen Überblick über die Arbeitsumgebung, die verwendeten Arbeitsmittel und das generelle Verhalten

der MA schaffen soll. Zur genaueren Analyse ist es von Vorteil, die Arbeitsschritte auf Video aufzuzeichnen und mehrere Durchläufe zu betrachten.

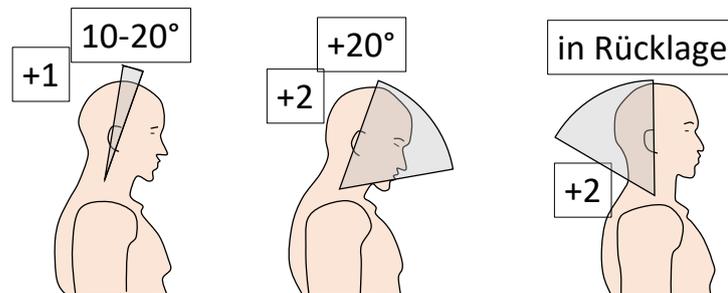
2. Auswahl der zu bewertenden Positionen

Anschließend werden Körperhaltungen aus der vorherigen Analyse anhand folgender Kriterien ausgewählt:

- Häufigste Wiederholungen
- Längste Verweildauer
- Höchste Muskelaktivität
- Bekannte Problemhaltungen
- Instabile und extreme Positionen (besonders in Zwangshaltung)

3. Bewertung der Positionen

Nach der Auswahl der zu untersuchenden Arbeitspositionen werden die einzelnen Gelenksysteme unter Verwendung eines Bewertungsbogens evaluiert. Hierbei erfolgt eine Beurteilung der einzelnen Gelenkposition im Verhältnis zur Ruhelage. Betrachtet werden die Hals-/Nackensposition (Bewertung dargestellt in Abbildung 18), Rumpfposition, Beinstellung, Armstellung, Unterarmstellung und Handposition. Zusätzlich werden Ladegewicht, Handhabungsmöglichkeiten und Wiederholrate einbezogen.



1a: Aufschlag...

Wenn Hals verdreht : +1

Wenn Hals seitlich geneigt: +1

Abbildung 18: Bewertung der Hals-/Nackensposition nach REBA Darstellung, erweitert nach Hignett & Lynn (2000, S. 202)

4. Berechnung der Gesamtwertung

Die Bewertungen der einzelnen Bewegungssysteme werden anschließend mit Hilfe eines tabellarischen Systems zusammengefasst. Hierbei werden zunächst die Belastungen der Hals-,

Rumpf- und Beinbewertung verbunden (Tabelle 8) und auf Basis der Wertung für die Ladungsbelastung mit einem eventuellen Aufschlag versehen. Nach ähnlichem Vorgehen für das Hand-/Armsystem mit eventueller Beaufschlagung einer Handhabungsbelastung werden die Einzelsysteme erneut tabellarisch zusammengefasst. Zur Vervollständigung der Berechnung erfolgt eine zusätzliche Beaufschlagung bei hoher Wiederholrate.

Tabelle 8: Bewertungstabelle zur Zusammenfassung der Hals-, Rumpf- und Beinbelastung nach REBA (Hignett & Lynn, 2000, S. 204)

Tabelle A	Hals												
		1				2				3			
	Beine	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Oberkörper	1	1	2	3	4	1	2	3	5	3	3	5	6
	2	2	3	4	5	3	4	5	6	4	5	6	7
	3	2	4	5	6	4	5	6	7	5	6	7	8
	4	3	5	6	7	5	6	7	8	6	7	8	9
	5	4	6	7	8	6	7	8	9	7	8	9	9

5. Ermittlung des Aktionslevels

Aus den Ergebnissen ist nun eine Ableitung des Risikos für die einzelnen Arbeitsschritte anhand eines Ampelsystems möglich (Tabelle 9). Im Anschluss können die risikoreichsten Tätigkeiten genauer analysiert werden. Hierbei empfiehlt sich eine gesonderte Betrachtung einzelner Gelenksysteme und die anschließende Suche nach Ursachen für die mangelhaften Positionen im Arbeitssystem.

Tabelle 9: Ampelsystem zur Bewertung des Risikos einzelner Arbeitspositionen (Hignett & Lynn, 2000, S. 205)

Aktionslevel	REBA Wert	Risikolevel	Handlungsbedarf
0	1	vernachlässigbar	nicht notwendig
1	2-3	niedrig	möglicherweise notwendig
2	4-7	mittel	notwendig
3	8-10	hoch	bald notwendig
4	11-15	sehr hoch	jetzt notwendig

Abbildung 19 zeigt exemplarisch die Bewertung von Tätigkeitsarten am Beispiel der Inspektion eines Lastkrans in einer WEA.

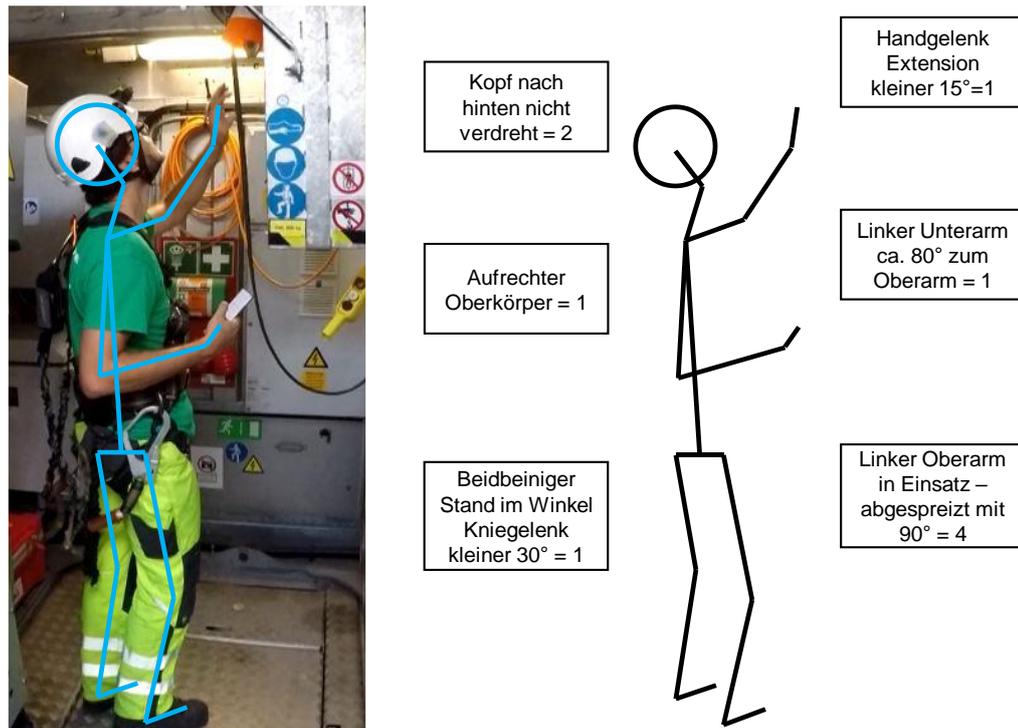


Abbildung 19: Beispielhafte Bewertung der Kraninspektion nach REBA

Die dargestellten Bewertungen wurden in den REBA-Matrizen zusammengefasst, zusätzliche Aufschläge aufgrund des Ausrüstungsgewichts, verdrehter Körperteile oder besonderer Aktivität wurden nicht vorgenommen. Final ergibt sich für den dargestellten Beispielarbeitsplatz ein REBA-Wert von zwei, was einem niedrigen Risiko entspricht.

7.3 Usability-Analyse nach ISONORM 9241/100

Als potenziell geeignete Instrumente zur Bewertung der Nutzerfreundlichkeit wurden der ISO-NORM 9241/100 Fragebogen nach Prümper (1997) und die System Usability Scale (SUS) nach Brooke (1996) betrachtet. Aufgrund der strukturierteren Systematisierung wird für Untersuchungen der ISONORM 9241/100-S (Prümper, 2008) eine verkürzte Version des Fragebogens verwendet.

Der ISONORM 9241/100 Fragebogen ist ein Messinstrument, welches die in der DIN-ISO-9241 beschriebenen Grundsätze der Dialoggestaltung quantifiziert. Er kann unabhängig vom speziellen Dialogsystem bei der Leistungsbeschreibung, Systemgestaltung und Bewertung von Dialogsystemen eingesetzt werden. Dabei dient er sowohl zur Analyse der Anwenderfreundlichkeit bestehender als auch zur Hilfestellung für die Entwicklung neuer Systeme. Die ursprüngliche Ausführung als Langversion mit 35 Items wurde später auf eine Kurzfassung mit 21 Items reduziert (Prümper, 2008). Bei allen Items wird die Zustimmung der VP auf einer

siebenstufigen Skala zwischen zwei gegensätzlichen Aussagen bewertet (Beispiel in Abbildung 20).

Fragebogen auf Basis der ISO 9241-110									
	Das Assistenzsystem...	---	--	-	-/+	+	++	+++	Das Assistenzsystem...
aa1	bietet nicht alle Funktionen um die anfallenden Aufgaben effizient zu bewältigen.	Prüfliste							bietet alle Funktionen um die anfallenden Aufgaben effizient zu bewältigen.
		<input type="radio"/>							
		Smartphone (App)							
		<input type="radio"/>							

Abbildung 20: Beispielim aus dem verwendeten ISONORM 9241/110-S, angelehnt an Prümper (2008)

In der Auswertung des Verfahrens werden die angekreuzten Skalenstufen in Werte von -3 bis +3 kodiert. Zur Sicherung der Qualität der Interaktion hat sich der Richtwert +1 als Mindestwert etabliert. Liegen Einzelparameter oder Durchschnittswerte unterhalb von +1 verweist dies auf einen Optimierungsbedarf des Systems in den entsprechenden Aspekten. Nach der Auswertung können durch die Aufteilung der Items auf die sieben Gestaltungsgrundsätze Schwächen identifiziert und Potenziale erschlossen werden. Die positiv gepolten Formulierungen aller verwendeten Items sind in Tabelle 10 dargestellt. (Prümper, 2008)

Tabelle 10: Positive Formulierungen der Items nach ISONORM 9241/110-S, angepasst nach Prümper (2008)

Item	Beschreibung
aa ₁	bietet alle Funktionen, um die anfallenden Aufgaben effizient zu bewältigen.
aa ₂	erfordert keine überflüssigen Eingaben.
aa ₃	ist gut auf die Anforderungen der Arbeit zugeschnitten.
sb ₁	liefert in zureichendem Maße Informationen darüber, welche Eingaben zulässig oder nötig sind.
sb ₂	bietet auf Verlangen situations-spezifische Erklärungen, die konkret weiterhelfen.
sb ₃	bietet von sich aus situations-spezifische Erklärungen, die konkret weiterhelfen.
ek ₁	erleichtert die Bedienung im System durch eine einheitliche Gestaltung.
ek ₂	informiert in ausreichendem Maße über seinen eigenen Zustand.
ek ₃	lässt sich durchgehend nach einem einheitlichen Prinzip bedienen.
lf ₁	erfordert wenig Zeit zum Erlernen.
lf ₂	erfordert nicht, dass man sich viele Details merken muss.
lf ₃	ist gut ohne fremde Hilfe oder Handbuch erlernbar.
sk ₁	erzwingt keine unnötig starre Einhaltung von Bearbeitungsschritten.
sk ₂	ermöglicht einen leichten Wechsel zwischen einzelnen Menüs oder Masken.
sk ₃	erzwingt keine unnötigen Unterbrechungen der Arbeit.
ft ₁	liefert gut verständliche Fehlermeldungen.
ft ₂	erfordert bei Fehlern im Großen und Ganzen einen geringen Korrekturaufwand.
ft ₃	gibt konkrete Hinweise zur Fehlerbehebung.
lk ₁	lässt sich leicht erweitern, wenn für mich neue Aufgaben entstehen.
lk ₂	lässt sich gut an meine persönliche, individuelle Art der Arbeitserledigung anpassen.
lk ₃	lässt sich im Rahmen ihres Leistungsumfangs von mir gut für unterschiedliche Aufgaben einrichten.

8 Versuche unter Laborbedingungen

Zur Beantwortung der in Abschnitt 6.1 formulierten Forschungsfragen wurden u. a. Versuche unter Laborbedingungen durchgeführt. In diesem Abschnitt werden der Aufbau und Ablauf der Untersuchungen sowie die erzielten Ergebnisse vorgestellt. Zur Analyse potenzieller Mittelwertunterschiede wurde der Wilcoxon-Test eingesetzt – im Falle von mehr als zwei zu vergleichenden Mittelwerten wurden Varianzanalysen (im Englischen analysis of variance, kurz ANOVA) vorgenommen.

8.1 Aufbau des Laborexperiments

Durch den Aufbau eines Labors sollte zu möglichst geringen Kosten eine Umgebung geschaffen werden, um die Erprobung der Funktionsweise von AS in einer WEA zu ermöglichen. Dazu wurden bereits in Mewes et al. (2019) und Mewes, Waßmann, Adler und Schmicker (2020) verschiedene Inspektionsvorgänge konzipiert, welche jede Interaktion zwischen AS und MA bei der Wartung einer WEA (anhand der Prüfkategorien in Tabelle 5) mindestens einmal abbilden. Aufgrund fehlender Fachkenntnisse der ausgewählten VP-Gruppe, wurden die konstruierten Aufgaben dabei deutlich weniger komplex gestaltet. Zusätzlich wurde versucht, die räumliche Enge der Anlagen nachzubilden und damit verschiedene Zwangspositionen zu provozieren. In Abbildung 21 sind Versuchsaufbau und enthaltene Arbeitsstellen dargestellt.

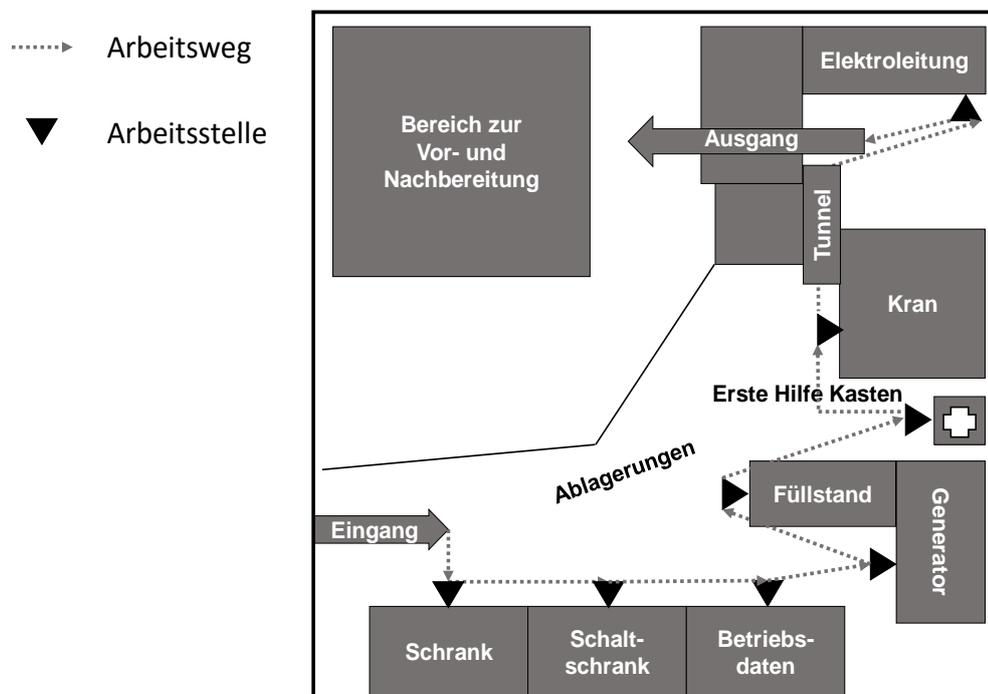


Abbildung 21: Schematischer Aufbau des Versuchsfeldes

Im Folgenden werden die verschiedenen Arbeitsstellen des Versuchsaufbaus inklusive der von den VP zu erfüllenden Aufgaben beschrieben.

Schrankboden

Als erste Arbeitsstation wurde ein Wandschrank mit vier Einlegeböden zur Darstellung einer Sichtprüfungsaufgabe verwendet (Abbildung 22). Zur Erledigung der Aufgabe musste die VP den korrekten Einbau aller Böden prüfen, welche jeweils mit vier Pins befestigt waren. Befanden sich alle Halterungen und Böden in waagerechter Position, stellte dies den korrekten Zustand dar. Konzipiert wurden hier zwei verschiedene Fehlerzustände, wobei ersterer durch das Fehlen eines Pins und der zweite durch eine Schiefelage eines Einlegebodens erzeugt wurden.



Abbildung 22: Arbeitsstation Schrankboden (links: Frontansicht, rechts oben: korrekter Zustand; rechts unten: fehlerhafter Zustand)

Schaltschrank

Bei diesem Aufbau war die korrekte Anordnung von farblichen Pinnadeln an einem Karton mittels Sichtprüfung zu kontrollieren (vgl. Abbildung 23). Zur Provokation von Zwangspositionen wurden die Zwecke in zwei Meter Höhe an einem Karton platziert und die mit Pins durchstochene Prüfseite in einem Abstand von 30 cm der Wand zugewandt. Ein Fehler war zu vermerken, wenn die farbliche Reihenfolge der Zwecke nicht mit der Vorlage übereinstimmte. Im Fall einer Abweichung war diese fotografisch festzuhalten.

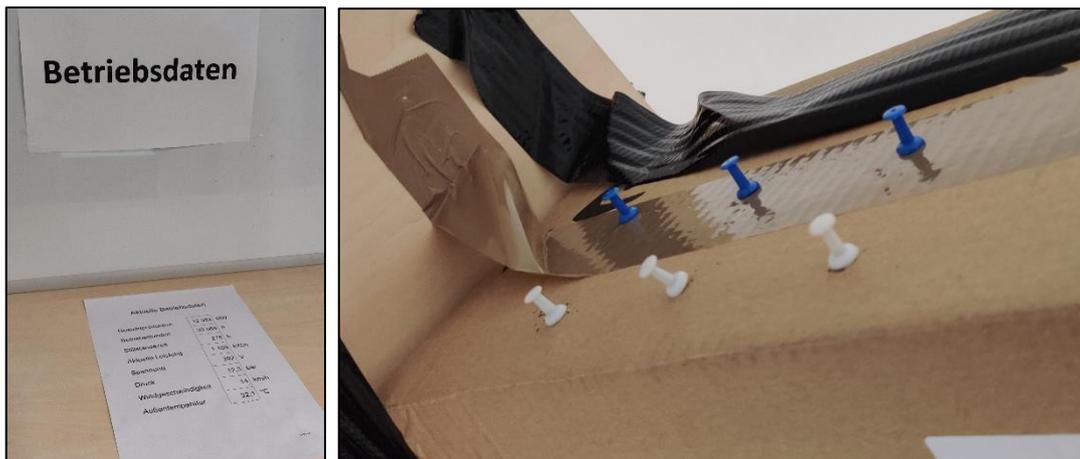


Abbildung 23: Arbeitsstation Betriebsdaten (links) und Schaltschrank mit korrekter Anordnung der Pinnadeln (rechts)

Betriebsdaten

An dieser Station waren typische Betriebsdaten abzulesen und in dafür vorgesehene Felder im Arbeitsmittel zu übertragen. Dazu sollten folgende Daten notiert werden:

- Gesamtproduktion [in MW]
- Betriebsstunden
- Stillstandszeit [in h]
- Windgeschwindigkeit [in km/h]
- Aktuelle Leistung [in kW/h]
- Außentemperatur [in °C]
- Spannung [in V]
- Druck [in bar]

Im fehlerbehafteten Zustand lagen Spannungs- und Druckdaten außerhalb des Toleranzbereichs. In „Pocket-Assist“ werden derartige Abweichungen automatisch hervorgehoben.

Generatorlauf

Zur Darstellung der akustischen Prüfung (analog zum Generator der WEA) wurde ein Tischventilator mit einem Karton verkleidet (Abbildung 24). Dieser war zur Überprüfung von der VP einzuschalten. Lief der „Generator“ normal an, war sein Zustand als „in Ordnung“ zu deklarieren. War nach Einschalten des Geräts ein lautes Klappern (erzeugt durch Einfügen eines Kabelbinders zwischen die Rotorblätter) wahrnehmbar oder fuhr das Gerät nicht an (kein Netzanschluss), waren diese Fehler anzugeben und zu beschreiben.

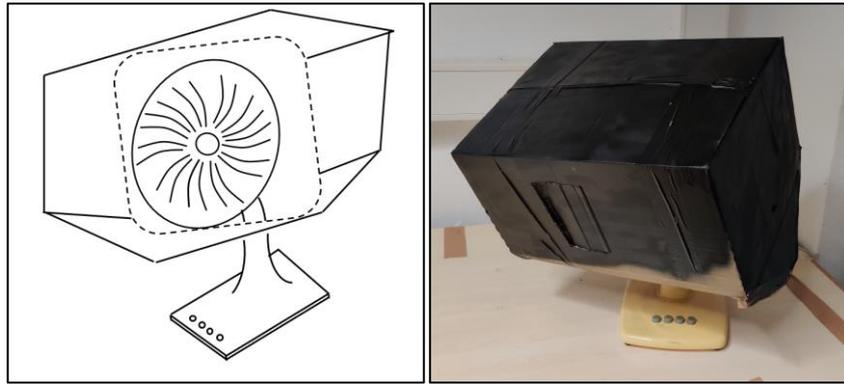


Abbildung 24: Arbeitsstation Generator zur akustischen Prüfung

Füllstand

Als zusätzliche Datenerfassung wurde die Kontrolle des Füllstandes eines mit Wasser gefüllten Messbechers gestaltet (dargestellt in Abbildung 25). Dieser wurde bis zu einer festgelegten Höhe befüllt. Bei der Inspektion der Station sollte die VP den Füllstand des Messbechers mit einer Genauigkeit von 50 ml angeben. Als Hilfsmittel dient eine am Messbecher befindliche Intervallskala in Milliliter. Die Füllhöhe des Wassers war bei jeder Ablesung schriftlich und fotografisch zu dokumentieren.

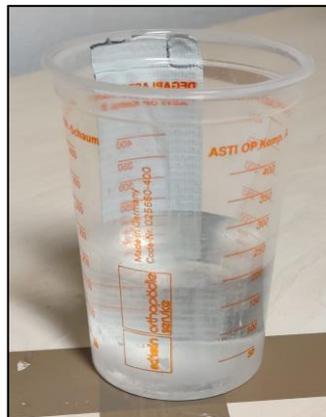


Abbildung 25: Arbeitsstation Füllstandskontrolle

Generatorwelle

Eine weitere Sichtprüfung unter Zwangshaltungen wurde mit der Arbeitsstation Generatorwelle konstruiert. Hierbei war die Aufhängung eines Bauteils zu überprüfen, welches nur durch einen Tunnel unter einem Tisch zugänglich war. Bei einem zu beiden Seiten formschlüssig verbundenen Seil stellte dies den Zustand „in Ordnung“ dar (vgl. Abbildung 26). War einer der Knoten geöffnet, so lag an dieser Station ein Fehler vor, der fotografiert und markiert werden sollte. Die Ausführung der Aufnahme wurde vor allem durch die niedrige Höhe und die geringe Helligkeit deutlich erschwert.



Abbildung 26: Arbeitsstation Generatorwelle (links: Außenansicht, rechts: Prüfansicht im fehlerfreien Zustand)

Erste-Hilfe-Kasten

Bei dieser Arbeitsstation war ein Erste-Hilfe-Kasten auf die korrekte Positionierung im Versuchsfeld und die Aktualität einer in der Innenseite platzierten TÜV-Plakette zu prüfen (siehe Abbildung 27). Die nicht ordnungsgemäße Platzierung des Kastens unter dem dafür vorgesehenen Symbol beschrieb einen Fehlerzustand, das Tragen einer abgelaufenen Plakette einen weiteren.



Abbildung 27: Arbeitsstation Erste-Hilfe-Kasten (links: korrekte Platzierung, rechts: geöffnet mit gültiger TÜV-Plakette)

Kran

Die mechanische Prüfung wurde mittels eines improvisierten Krannachbaus realisiert (Abbildung 28). Dieser bestand aus einer mit Wasser gefüllten Flasche, welche über ein Seil an einigen Sprossen aufgewickelt und am Ende gesichert wurde. Die Lösung der Sicherung sollte ein langsames Gleiten in Richtung Boden ermöglichen. Verharrte das Gewicht in Arbeitslage, war dies als Fehler zu dokumentieren.

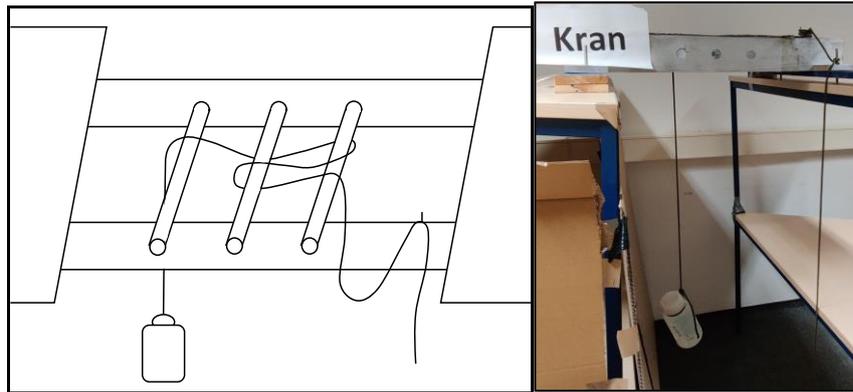


Abbildung 28: Arbeitsstation Kran (links: Skizze, rechts: Fotografie)

Ablagerungen

Teil der Instandhaltungsarbeiten in einer WEA ist das Erkennen verschiedener Formen von Verschmutzungen und Verunreinigungen (z. B. durch Leckagen). Im Labor wurden diese Verschmutzungen durch Kronkorken nachgestellt, die auf dem Boden des Versuchsfeldes platziert wurden (vgl. Abbildung 29). Dabei erhielten die VP keine Information über den Ort des Auftretens der Ablagerungen. Traten sie im Versuchsfeld auf, waren sie von den VP zu fotografieren und zu dokumentieren.



Abbildung 29: Ablagerungen in Form von Kronkorken

Elektroleitung

Eine Steckverbindung, welche zur Provokation von Zwangshaltungen in einem Pappkarton auf zwei Meter Höhe positioniert wurde, bildete die abschließende Arbeitsstation „Elektroleitung“ (Abbildung 30). Ein Fehler trat auf, wenn die Steckverbindung nicht formschlüssig verbunden wurde. Dieser war von der VP fotografisch festzuhalten.

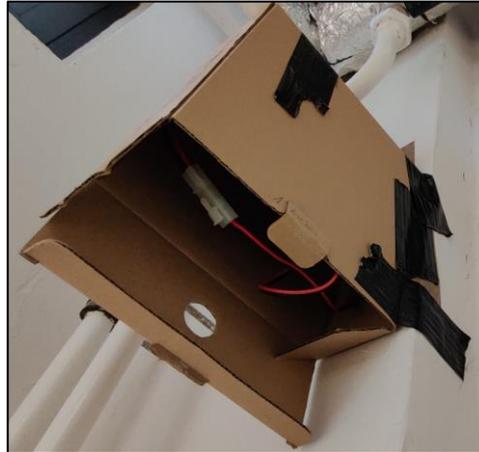


Abbildung 30: Arbeitsstation Elektroleitung geöffnet im fehlerfreien Zustand

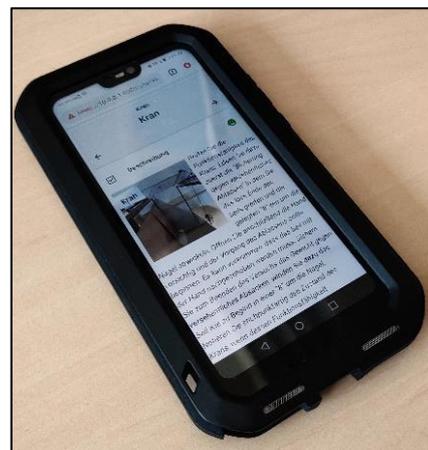
8.2 Verwendete Geräte

Das AS „Pocket-Assist“ kann von verschiedenen mobilen Geräten mit einem Webbrowser abgerufen werden. Im Vorlauf der Versuchsreihe wurden bereits von Mewes et al. (2020) verschiedene Endgeräte zu dessen Bedienung getestet. In der Untersuchung wurden ein Tablet (Samsung Galaxy Tab S4), ein Smartphone (Huawei P20 Lite) und selbiges Smartphone in einer Armhalterung hinsichtlich Zeitbedarf, Fehlerhäufigkeit, empfundener Beanspruchung und Nutzerpräferenz miteinander verglichen. Hierbei stellte sich das Smartphone in der Standardverwendung in allen Belangen als geeignetstes Endgerät heraus.

Auf Grundlage dieser Studie wurde zum Vergleich der Arbeitsmittel das Smartphone als Endgerät für das AS ausgewählt. Tabelle 11 zeigt verschiedene technische Spezifikationen des verwendeten Geräts.

Tabelle 11: Technische Daten des verwendeten Smartphone-Endgeräts (Huawei P20 Lite)

Gerätebezeichnung	Huawei P20 Lite
Abmaße (in cm)	17 x 9,5 x 1,1
Betriebssystem	Android 8.0.0
Bildschirmdiagonale	5,84 Zoll
Gewicht	367 g
Auflösung	1920 x 1080



Vor der Einführung des AS wurde die Inspektion von WEA mit einer Prüfliste durchgeführt. Zur Bilddokumentation der verschiedenen Prüfpunkte diente zusätzlich eine Digitalkamera. Im Versuch wurde hierzu eine Panasonic Lumix DMC-TZ8 verwendet (vgl. Tabelle 12).

Tabelle 12: Technische Daten der verwendeten Kamera

Gerätebezeichnung	Panasonic Lumix DMC-TZ8
Abmaße (in cm)	100 x 60 x 33
Gewicht	214 g
Auflösung	1280x720



8.3 Versuchsablauf des Laborexperiments

Zu Beginn des Versuchs wurden die VP von der Versuchsleitung empfangen, welche ihnen anschließend Zielstellung und Ablauf der Versuchsdurchführung erläuterte. Dazu erfolgte ein Rundgang durch das Versuchsfeld, in welchem die fehlerlosen Zustände der einzelnen Stationen demonstriert und die durchzuführenden Prüfschritte erläutert wurden. Es folgte eine Einführung der VP in die Bedienung der relevanten Funktionen des AS „Pocket-Assist“, woraufhin sie sich mit diesem vertraut machen und offene Fragen mit der Versuchsleitung klären konnten.

Vor Beginn der Versuchsdurchführung gaben diejenigen VP, welche dazu bereit waren, verschiedene Stammdaten (z. B. Alter, Geschlecht) an und willigten in notwendige Einverständniserklärungen (z. B. Datenverarbeitung und -weitergabe) ein. Einwilligenden VP wurde zusätzlich ein EKG-Gerät angelegt, um deren physische Beanspruchung über die Dauer des Laborexperiments erfassen zu können. Die hierbei entstandenen Vitaldaten wurden vom Arbeitsmedizinischen Bereich des Universitätsklinikums Magdeburg ausgewertet. Eine gemeinschaftliche Publikation der Ergebnisse ist bereits geplant. Um die körperliche Belastungssituation der VP in möglichst hohem Maße an die Bedingungen in einer realen WEA anzupassen, wurde ihnen zudem eine Fallschutzausrüstung angelegt. Diese wird in gleicher Ausführung auch zur Inspektion von Anlagen im Feld getragen (vgl. Abbildung 31). Nach der für die EKG-Untersuchung minimal notwendigen Ruhephase von fünf Minuten (vgl. z. B. Sammito et al. (2014)) begann der erste Teilversuchsdurchlauf.



Abbildung 31: Ausrüstung der Versuchspersonen vor dem Versuch (Mewes et al., 2020)

Die VP absolvierten jeweils zwei Durchläufe mit beiden Arbeitsgeräten. Um Reihenfolgeeffekte möglichst gering zu halten, begannen die Versuche jeweils alternierend mit der PLK oder dem AS, woraufhin das jeweilige Arbeitsmittel wechselte. Insgesamt wurden pro VP vier Teilversuche durchgeführt, zwischen denen die Versuchsleitung die Prüfstationen im Versuchsfeld in andere Zustände versetzte. Hierzu wurden im Vorfeld verschiedene Zustandskombinationen für die einzelnen Arbeitsstationen definiert (vgl. Tabelle 13).

Tabelle 13: Zustände der einzelnen Stationen in den Versuchsdurchläufen

Station \ Zustand	1	2	3	4
Schrankboden	Halterung fehlt	Kein Fehler	Schief	Halterung fehlt
Schaltschrank	Zwecke fehlt	Kein Fehler	Kein Fehler	Farbreihenfolge falsch
Betriebsdaten auslesen	Auslesen	Auslesen	Auslesen	Auslesen
Generator	Klappert	Läuft nicht an	Kein Fehler	Kein Fehler
Füllstand	150 ml	350 ml	100 ml	200 ml
Generatorwelle	Kein Fehler	Lose Verbindung	Kein Fehler	Kein Fehler
Erste-Hilfe-Kasten	Abgelaufene Plakette	Abgelaufene Plakette	Kein Fehler	Abgelaufene Plakette
Kran	Kein Fehler	Unbeweglich	Unbeweglich	Kein Fehler
Elektroleitung	Steckverbindung lose	Kein Fehler	Steckverbindung lose	Kein Fehler
Ablagerungen	Vorhanden	Keine	Keine	Vorhanden

Während der einzelnen Versuchsdurchläufe wurde die Durchlaufzeit gemessen. Nach Abschluss jedes Durchlaufs wurde den VP noch ein NASA-RTLX-Fragebogen zur Bewertung der Arbeitsbeanspruchung vorgelegt. In der Zwischenzeit veränderte die Versuchsleitung die Zustände der einzelnen Prüfstationen, bevor das Arbeitsgerät gewechselt wurde und der nächste Durchlauf starten konnte. Nach Beendigung aller vier Versuchsdurchgänge füllten die VP einen ISONORM 9241/110-S mit vergleichender Bewertung für beide Arbeitsmittel aus (analog zu Abbildung 20). Zudem wurde mit den VP ein abschließendes Kurzinterview geführt, um verschiedene Vor- und Nachteile der einzelnen Lösungen zu erörtern. Vor Abschluss des Experiments war eine erneute Ruhephase von fünf Minuten für die Auswertung der EKG-Daten notwendig. Abbildung 32 zeigt eine schematische Darstellung des Versuchsablaufs inklusive Vor- und Nachbereitung.

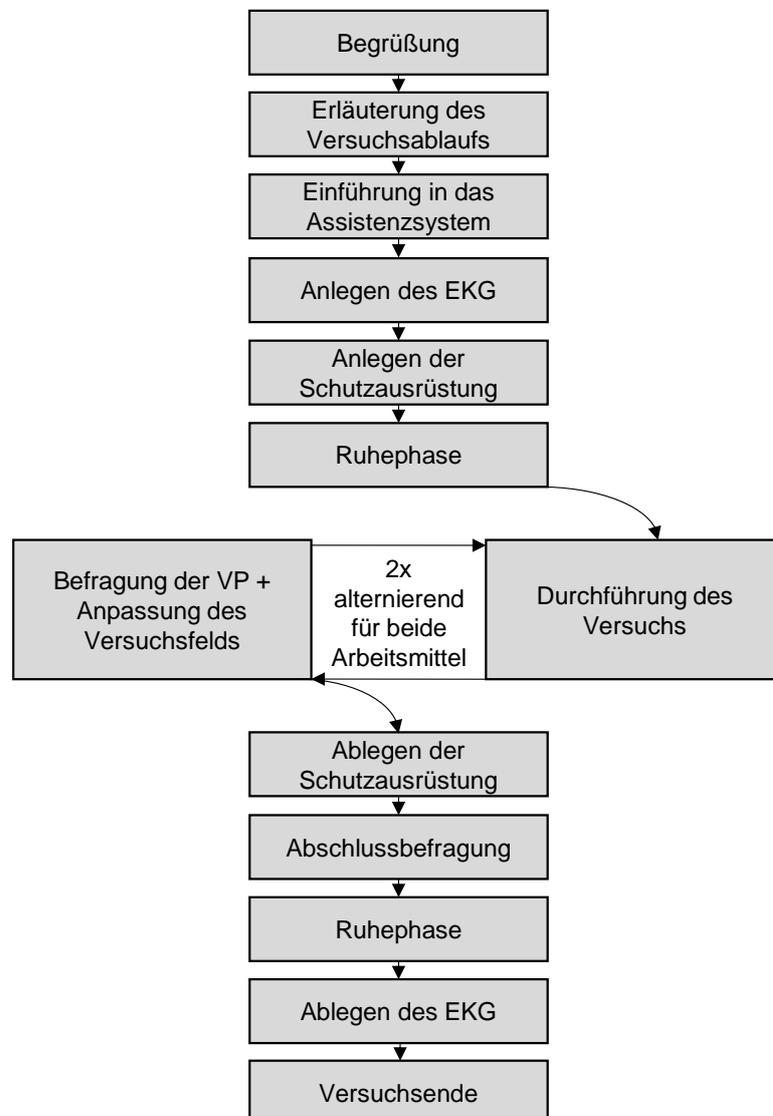


Abbildung 32: Schematische Darstellung des Versuchsablaufs

8.4 Zusammensetzung der Versuchspersonen

Bei der Akquise der VP wurde auf eine möglichst repräsentative Abbildung potenzieller Nutzer geachtet. Dazu wurde eine Teilnehmerzahl von 20 VP mit gleichmäßiger Verteilung von Alter (innerhalb der Altersgruppen unter 30 Jahre (u30), 30-50 Jahre und 51 bis 65 Jahre (ü50)) und Geschlecht angestrebt. Gerade bei der Auswahl von VP ü50 wurde im Hinblick auf die verschiedenen Zwangspositionen im Versuch zusätzlich eine grundlegende Fitness als Teilnahmevoraussetzung festgelegt.

Aufgrund des unerwarteten Ausbruchs der SARS-CoV-2-Pandemie (RKI, 2020) und der entsprechenden Reaktion der Otto-von-Guericke-Universität (OVGU, 2020) wurde die Versuchsreihe jedoch bei einem Stand von 18 untersuchten VP abgebrochen. Zusätzlich wurde eine VP aufgrund von extremen Abweichungen in Durchführungszeit (4,6-fache Standardabweichung) und Fehlerhäufigkeit (5,7-fache Standardabweichung) während der ersten Versuchsdurchführung nachträglich von der Auswertung ausgeschlossen. Durch diese Umstände wurde neben dem Umfang der Untersuchung auch die Gleichverteilung von Alter und Geschlecht beeinflusst.

Schlussendlich wurden die Versuchsdaten von zehn männlichen und sieben weiblichen VP ausgewertet, davon gehörten sieben zur Altersgruppe u30, sechs zu 30-50 und vier zu ü50, wobei das Durchschnittsalter der VP 37 (SD=14,2) Jahre betrug. Die VP waren zwischen 1,60 m und 1,97 m groß (im Durchschnitt 1,75 m SD=0,097 m). Damit konnte das 95. Perzentil männlich, jedoch nicht das 5. Perzentil weiblich nach DIN 33402-2 (2005) abgebildet werden. Die Durchschnittsgröße ist jedoch deutlich näher am deutschen Median als noch im Vergleich der Assistenzgeräte (Mewes et al., 2020). Die mittlere Verteilung der Selbsteinschätzung der Vertrautheit mit Smartphones und Checklisten auf einer siebenstufigen Skala ist in Abbildung 33 dargestellt.

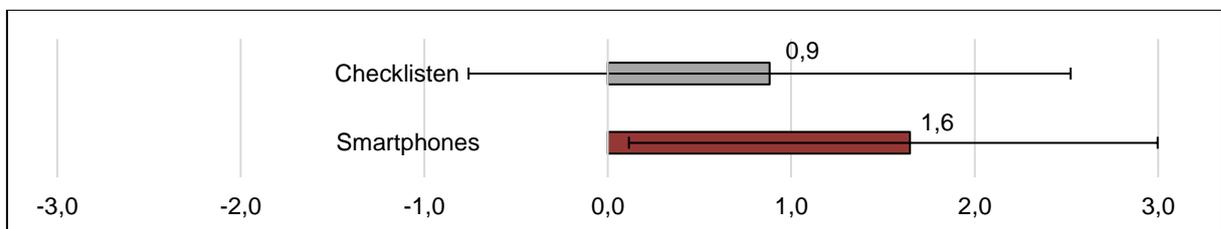


Abbildung 33: Selbsteinschätzung der Vertrautheit der Versuchspersonen mit Smartphones und Checklisten auf einer siebenstufigen Skala von -3 bis 3

Im Vergleich zur vorherigen Untersuchung in Mewes et al. (2020) schätzten die VP ihre durchschnittliche Erfahrung mit Smartphones deutlich geringer ein (+1,6 zu +2,9). Dies erklärt sich

durch die geringere Affinität der älteren VP zu digitalen Geräten. Die Vertrautheit mit Checklisten gestaltet sich jedoch in beiden Untersuchungen nahezu identisch.

8.5 Vergleich psychischer und physischer Beanspruchung

Zur Ermittlung der körperlichen und geistigen Beanspruchung wurde nach jedem der vier Teilversuchsdurchläufe ein NASA-RTLX (Hart, 2006) durchgeführt (vgl. Kap. 7.1). Abbildung 34 zeigt die unterschiedlichen Ausprägungen der Anforderungen im Durchschnitt über alle Teilversuchsdurchläufe und VP-Gruppen.

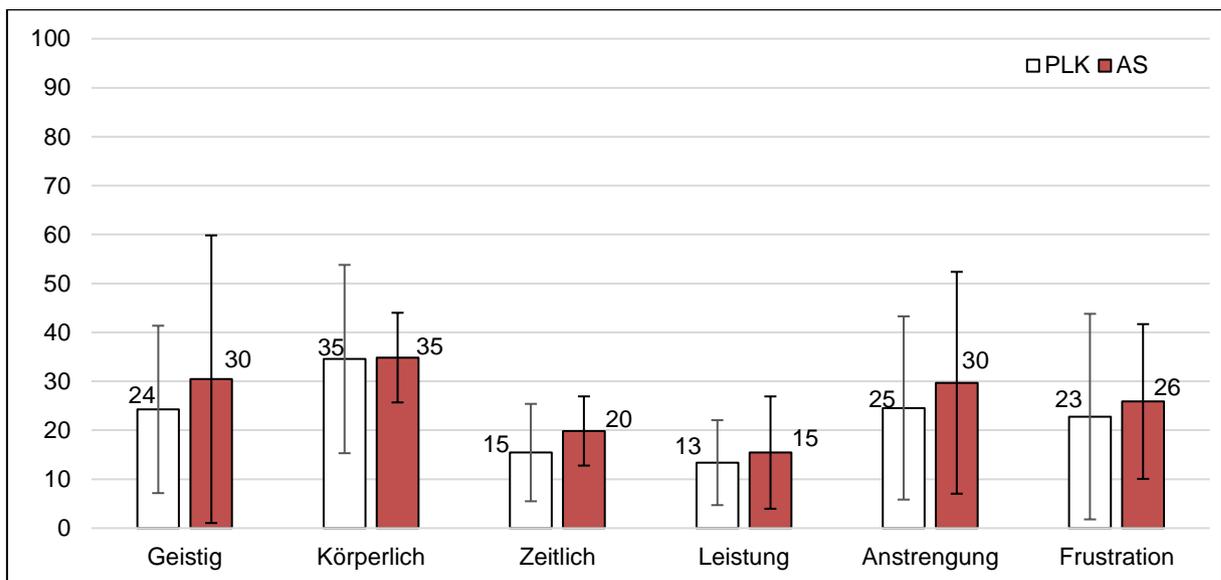


Abbildung 34: Ausprägung des NASA-RTLX für Prüfliste und Assistenzsystem über alle Versuchspersonen

Die Werteverteilung des NASA-RTLX aller VP für das AS ähneln den Skalenbereichen des Vergleichs der Assistenzvarianten (Mewes et al., 2020). Die Standardabweichung fällt in der aktuellen Untersuchung jedoch deutlich höher aus. Die ausgeprägtesten Unterschiede zwischen den Arbeitsmitteln wurden in der geistigen Anforderung und Anstrengung ermittelt. Dabei gaben die VP für beide Beanspruchungskenngrößen beim Test der PLK eine etwas geringere Beanspruchung an. Insbesondere bei der geistigen Anstrengung übersteigt die Standardabweichung beim AS die der PLK deutlich. Dies spiegelt die hohe Anstrengung einiger VP, insbesondere bei der Erstverwendung des AS wieder. Eine statistische Signifikanz in den Unterschieden der Arbeitsmittel konnte nur bei der zeitlichen Anforderung festgestellt werden ($p=0.009$). Tabelle 14 zeigt eine Gegenüberstellung der einzelnen Wertezusammensetzung nach Altersgruppen der VP.

Tabelle 14: Ausprägung des NASA-RTLX für Assistenzsystem und Prüfliste über die verschiedenen Altersgruppen

		Geistig	Körperlich	Zeitlich	Leistung	Anstrengung	Frustration
ü30	PLK	19,3	28,9	15,4	11,1	22,5	23,9
	AS	23,2	28,6	17,5	14,6	23,6	22,9
30-50	PLK	36,3	48,3	16,7	17,5	34,2	20,4
	AS	37,1	49,2	23,3	14,2	39,2	29,2
ü50	PLK	15,0	23,8	13,8	11,3	13,8	24,4
	AS	33,1	24,4	18,8	18,8	26,3	26,3

Bei Betrachtung der altersgruppenspezifischen Ausprägung des NASA-RTLX ergibt sich in der geistigen Beanspruchung von VP ü50 mit 18,1 eine vergleichsweise hohe Differenz zwischen PLK und AS. Weiterhin korreliert das Alter hoch signifikant mit der geistigen Beanspruchung der VP über alle VP-Gruppen ($r=0,453^{**}$). Bei Betrachtung der Ursprungsdaten lässt sich eine sehr hohe geistige Beanspruchung einiger VP, insbesondere bei der Erstverwendung des AS feststellen. Beispielweise liegt die geistige Beanspruchung der VP ü50 in der Erstverwendung des AS bei 47,5 und sinkt bei der Zweitverwendung auf 18,8. Dies weist auf starke Lerneffekte durch mehrmaligen Gebrauch hin. Auch in der Anstrengung traten in dieser Altersgruppe hohe Unterschiede zwischen den Arbeitsmitteln auf. Hier reduzierten sich die Kennwerte in der zweiten Verwendung des AS deutlich (von 38,8 im ersten auf 13,8 im zweiten Durchlauf).

Insgesamt ist die Beanspruchung der VP durch beide Arbeitsmittel innerhalb des Versuchsaufbaus nur selten erhöht. So bleiben alle Mittelwerte in der unteren Hälfte des Skalenbereichs. Auch die Unterschiede zwischen den Arbeitsmitteln wirken sich sehr gering aus. Jedoch ergab sich für die PL für alle Beanspruchungsparameter eine bessere Bewertung.

Zur Veröffentlichung der EKG-Untersuchungen dieser Laborstudie ist eine gemeinschaftliche Publikation mit dem Arbeitsmedizinischen Bereich des Universitätsklinikum Magdeburg geplant.

8.6 Vergleich der Usability nach ISO-NORM 9241/110-S

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Usability-Analyse mit Hilfe eines angepassten ISO-NORM 9241/110-S Fragebogens nach Prümper (2008) dargestellt (vgl. Kap. 7.2).

Abbildung 35 zeigt die Ausprägung der *Aufgabenangemessenheit* (aa). Diese wurde von den VP bei beiden Arbeitsmitteln als annähernd gleichwertig und gut empfunden. Die Bewertung des AS fiel beim *Funktionsumfang* (aa1) und der *Anpassung auf die Arbeitsaufgabe* (aa3) leicht besser aus. Die PLK wurde von den VP bei der *Freiheit von überflüssigen Eingaben* (aa2) etwas

besser bewertet. Es gab keine statistisch signifikanten Unterschiede in der Bewertung der Arbeitsmittel in der Aufgabenangemessenheit ($p_{aa}=.292$; $p_{aa1}=.219$; $p_{aa2}=.739$; $p_{aa3}=.247$).

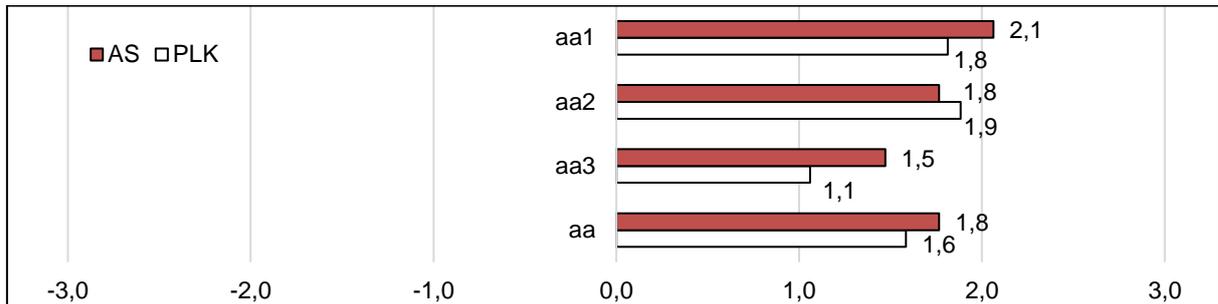


Abbildung 35: Ausprägung der Aufgabenangemessenheit nach ISONORM 9241/110-S

Die Ergebnisse zur *Selbstbeschreibungsfähigkeit* (sb) sind in Abbildung 36 dargestellt. In diesen ist das AS mit einem Unterschied von 1,5 Skalenwerten signifikant besser bewertet worden ($p=.001$) als die PLK. Die *Eindeutigkeit geforderter Eingaben* (sb1) empfanden die VP beim AS als besonders gut und bewerteten auch die PLK mit einer Durchschnittsausprägung von 1,2 noch als ausreichend ($p=.055$). Die *abrufbaren situationsspezifischen Erklärungen* (sb2) wurden mit dem Wert 1,5 beim AS als gut und bei der PLK mit 0,0 als durchwachsen eingestuft. Hierbei wurde ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Arbeitsmitteln nachgewiesen ($p=.026$). Bei der PLK herrscht hier durch die Unterschreitung des Grenzwerts 1,0 bereits Verbesserungsbedarf. In der Bewertung der *automatischen situationsspezifischen Informationen* (sb3) traten mit einem Unterschied von 2,2 Skalenwerten die größten Differenzen zwischen beiden Arbeitsmitteln in der Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit auf, welche zudem statistische Signifikanz aufweisen ($p=.004$). Hierbei wurde die PLK vom Querschnitt der VP mit -0,8 im negativen Skalenbereich bewertet. Insgesamt stuften die VP die Steuerbarkeit des AS mit einer Durchschnittsbewertung von 1,6 um 1,5 Skalenwerte besser ein als die der PLK.

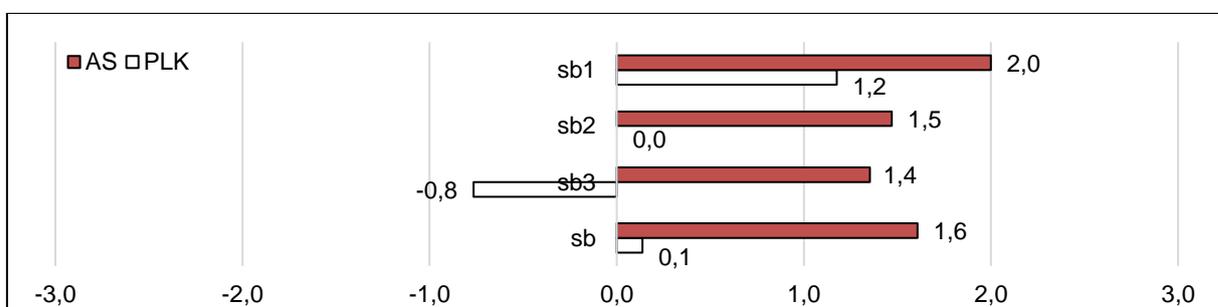


Abbildung 36: Ausprägung der Selbstbeschreibungsfähigkeit nach ISONORM 9241/110-S

Abbildung 37 zeigt die Ausprägung der *Erwartungskonformität* (ek). Dieser Gestaltungsgrundsatz wurde für beide Arbeitsmittel ähnlich bewertet, wobei die VP das AS leicht favorisierten.

Sowohl die *Einheitlichkeit der Gestaltung* (ek1) als auch die *Einheitlichkeit der Bedienung* (ek3) wurden von den VP als positiv empfunden. Verbesserungsbedarf hingegen ergibt sich bei der *Information über den eigenen Zustand* (ek2) für beide Arbeitsmittel. Es wurden keine statistisch signifikanten Unterschiede in der Bewertung der Arbeitsmittel für die Parameter der Erwartungskonformität nachgewiesen ($p_{ek}=.099$; $p_{ek1}=.142$; $p_{ek2}=.570$; $p_{ek3}=.176$).

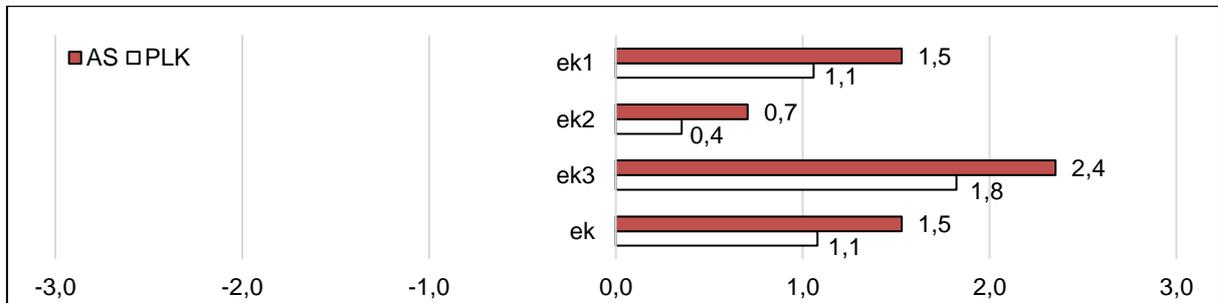


Abbildung 37: Ausprägung der Erwartungskonformität nach ISONORM 9241/110-S

Abbildung 38 zeigt die Bewertung der *Lernförderlichkeit* (lf). Auch in diesem Gestaltungsgrundsatz ähneln sich die Bewertungen beider Arbeitsmittel, jedoch wird von den VP hier die PLK leicht favorisiert ($p_{lf}=.664$). Die einzige signifikante Differenz zwischen den Einzelbewertungen entstand beim *Zeitbedarf zum Erlernen* (lf1, $p_{lf1}=.015$). Diese erzielte bei der PLK mit einer durchschnittlichen Ausprägung von 2,3 die höchste Bewertung aller Unterkategorien in den Gestaltungsgrundsätzen. Auch bei der *selbstständigen Erlernbarkeit* (lf3) wurde die PLK etwas besser bewertet ($p_{lf3}=.509$), wohingegen die *Notwendigkeit des Merkens von Details* (lf2) für das AS die etwas höhere Bewertung erhielt ($p_{lf2}=.282$).

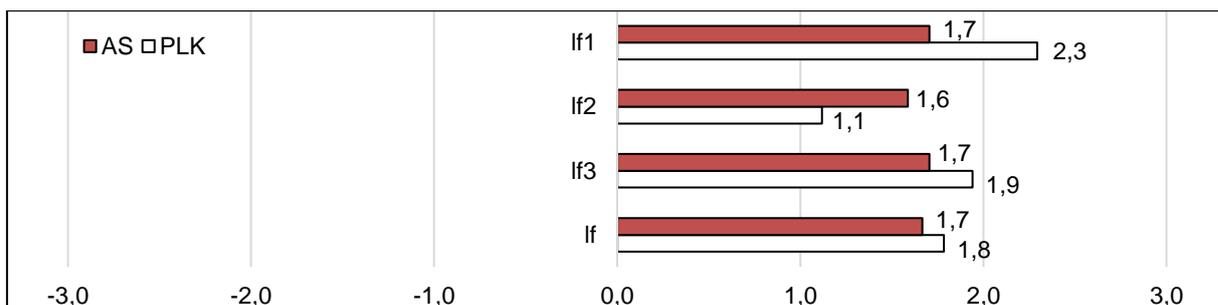


Abbildung 38: Ausprägung der Lernförderlichkeit nach ISONORM 9241/110-S

In Abbildung 39 ist die Bewertung der *Steuerbarkeit* (sk) der Arbeitsmittel dargestellt. Bei dieser ist das AS im Durchschnitt signifikant besser bewertet worden als die PLK ($p_{sk}=.013$). Für die PLK wurde mit dem Durchschnittswert 0,8 insgesamt ein leichter Verbesserungsbedarf ermittelt, welcher sich aus einer Bewertung der *Vermeidung von Arbeitsunterbrechung* (sk3) von 0,1 ergibt. Gegenüber dem AS ergibt sich hier mit einer Differenz von 1,5 Skalenpunkten zudem der deutlichste Unterschied in der Steuerbarkeit, welcher jedoch knapp keine statistische

Signifikanz erreicht ($p_{sk3}=0.062$). Bei der *Flexibilität der Bearbeitungsschritte* (sk1) wurde das AS zwar besser bewertet, es ergibt sich jedoch noch kein akuter Verbesserungsbedarf bei der PLK ($p_{sk1}=0.250$). Für den *leichten Benutzeroberflächenwechsel* (sk2) sind jedoch mit einer Skalenausprägung von 0,9 schon Verbesserungen notwendig. Zudem wurde hier zwischen den Arbeitsgeräten der einzige statistisch signifikante Unterschied in den Parametern der Steuerbarkeit festgestellt ($p_{sk2}=0.036$).

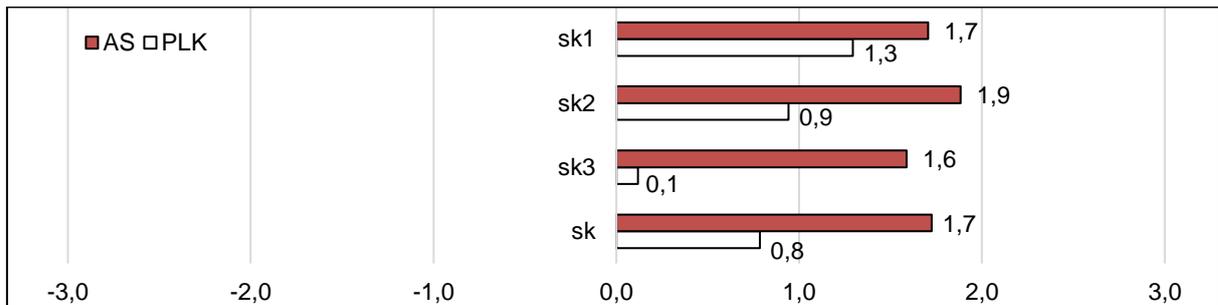


Abbildung 39: Ausprägung der Steuerbarkeit nach ISONORM 9241/110-S

Abbildung 40 zeigt die Bewertung der *Fehlertoleranz* (ft). Für diese wurde ein statistisch signifikanter Unterschied zugunsten des AS sowohl für den Gesamtparameter ($p_{ft}=0.006$) als auch für jeden der Einzelparameter festgestellt. Durchschnittlich ist diese für die PLK im negativen Skalenbereich und für das AS im Bereich knapp unter dem Handlungsbedarf bewertet worden. Die für beide Systeme verhältnismäßig schlechten Bewertungen ergeben sich insbesondere aus dem Mangel an *Hinweisen zur Fehlerbehebung* (ft3, $p_{ft3}=0.018$). Hierbei erzielte die PLK mit einer durchschnittlichen Bewertung von -1,3 den schlechtesten Durchschnittswert eines Parameters in der gesamten Untersuchung der Usability. Auch das AS wurde bei diesem Parameter mit 0,1 mit der schlechtesten Skalenausprägung über alle Items bewertet. Allerdings traten zu diesem Item bei einigen VP Verständnisschwierigkeiten auf. So interpretierten einige die Aussagen als auf die vom Arbeitsmittel vorgegebenen Anweisungen zur Fehlerbehebung im Versuch, andere wiederum als Hinweise zur Korrektur vom Arbeitsmittel verursachter Fehler. Diese Missverständnisse ergaben sich aus der Art der Versuchsdurchführung und wurden in der Planung nicht berücksichtigt. Die *Verständlichkeit der Fehlermeldungen* (ft1, $P_{ft1}=0.010$) wurde beim AS mit einer Bewertung von 1,4 deutlich besser bewertet als bei der PLK mit -0,1. Der *Korrekturaufwand bei Fehlern* (ft2, $p_{ft2}=0.028$) ergab für die PLK einen Veränderungsbedarf, wohingegen das AS mit 1,9 positiv bewertet wurde.

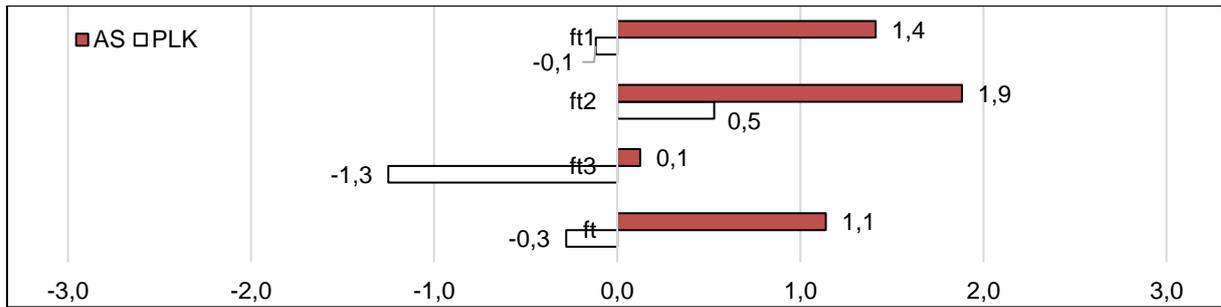


Abbildung 40: Ausprägung der Fehlertoleranz nach ISONORM 9241/110-S

Die einzelnen Ausprägungen der Parameter zur *Individualisierbarkeit* (Ik) sind in Abbildung 41 dargestellt. In dieser wird das AS über alle Kategorien schlechter bewertet als die PLK. Gleichzeitig wurde auch für alle Parameter des AS ein Änderungsaufwand ermittelt. Für die *Anpassbarkeit an unterschiedliche Aufgaben* (Ik3) ergab sich Verbesserungsbedarf für beide Systeme. Für die Individualisierbarkeit wurden keine statistisch signifikanten Unterschiede in der Bewertung der Arbeitsmittel nachgewiesen ($p_{Ik}=.193$; $p_{Ik1}=.282$; $p_{Ik2}=.095$; $p_{Ik3}=.469$).

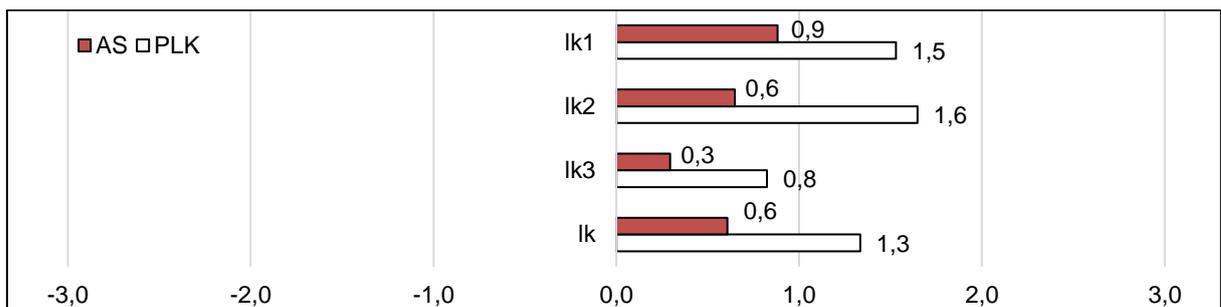


Abbildung 41: Ausprägung der Individualisierbarkeit nach ISONORM 9241/110-S

Abbildung 42 zeigt eine Übersicht aller Mittelwerte für die Gestaltungsgrundsätze nach DIN-9241-100 (2006). Signifikante Unterschiede in der Ausprägung der Bewertung ergeben sich für die *Selbstbeschreibungsfähigkeit* (sb, $p=.001$), *Steuerbarkeit* (sk, $p=.013$) und *Fehlertoleranz* (ft) ($p=.006$). Bei allen wurde ein Vorteil für das AS und Veränderungsbedarf für die PLK ermittelt. In den Aspekten *Lernförderlichkeit* (lf) und der *Individualisierbarkeit* (Ik) wurde die PLK etwas besser bewertet als das AS. Beim AS sind Optimierungen der *Fehlertoleranz* zu empfehlen und der *Individualisierbarkeit* notwendig. Im Durchschnitt aller Gestaltungskriterien wurde das AS mit einem Wert von 1,4 um 0,5 Skalenwerte signifikant besser bewertet als die PLK ($p=.024$). Für diese wurde mit einem Durchschnittswert von 0,9 über alle Gestaltungskriterien ein Änderungsaufwand ermittelt.

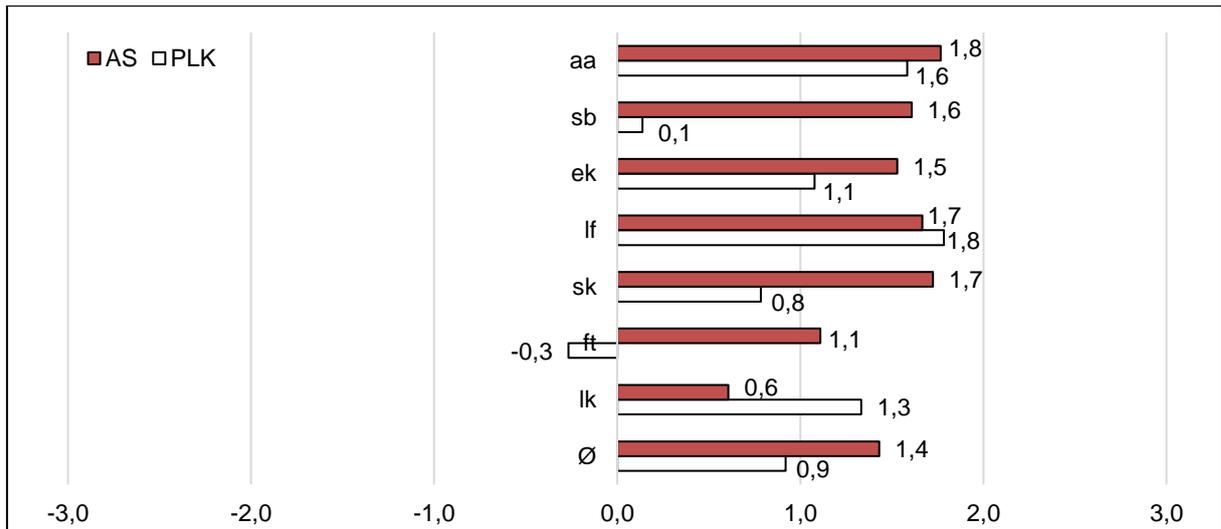


Abbildung 42 Ausprägung der einzelnen Parameter der Gebrauchstauglichkeit nach ISONORM 9241/110-S

Auch innerhalb der einzelnen Altersgruppen unterscheiden sich die Ausprägungen der Gebrauchstauglichkeit (dargestellt in Abbildung 43). So gaben VP ü50 mit jeweils 1,6 Skalenwerten im positiven Bereich die besten Bewertungen für beide Systeme ab und bewerteten diese gleichwertig. Kritischer waren VP unter 50, welche zudem die PLK schlechter bewerteten als das AS. Den einzig signifikanten Unterschied in der Gesamtbewertung der Gebrauchstauglichkeit weisen VP unter 30 Jahren auf ($p=0,043$). Diese bewerteten die Gebrauchstauglichkeit der PLK um insgesamt 0,7 Skalenpunkte schlechter als die des AS.

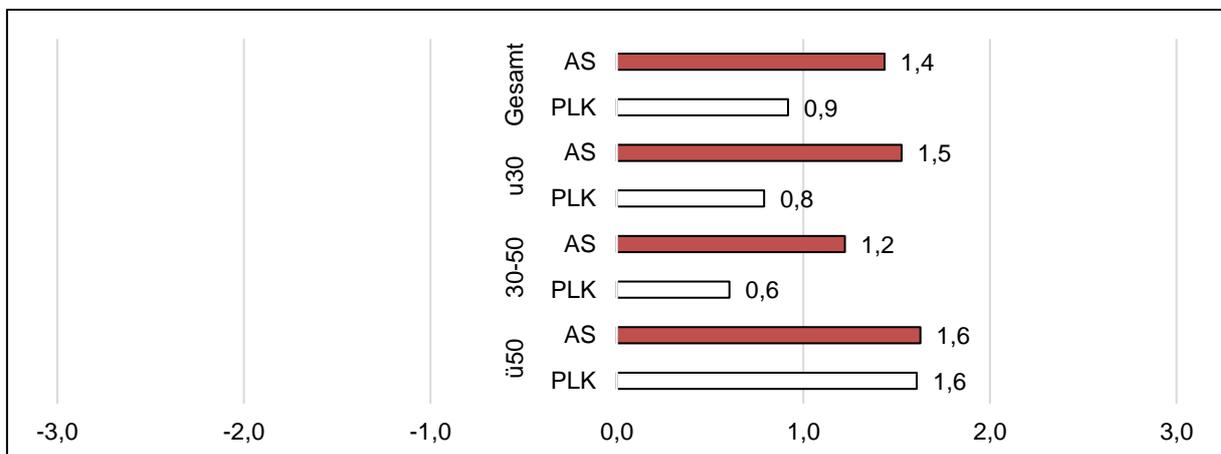


Abbildung 43: Durchschnittliche Gebrauchstauglichkeit nach Altersgruppen

8.7 Vergleich des Zeitbedarfs

Zur Ermittlung des Zeitbedarfs wurde für jeden der einzelnen Versuchsdurchläufe die Durchführungzeit vom Eintreten bis zum Verlassen des Versuchsbereichs erfasst. Die zusammengefassten Mittelwerte über alle VP und Versuchsdurchläufe sind in Abbildung 44 dargestellt.

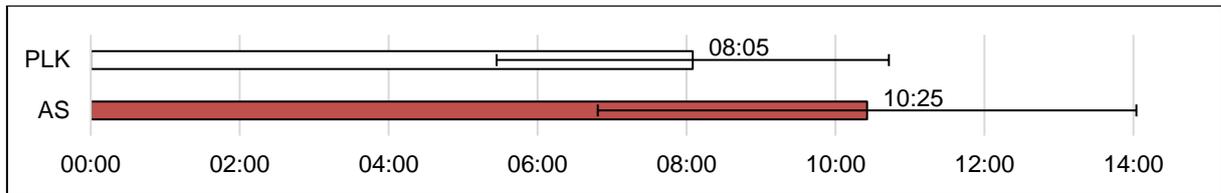


Abbildung 44: Mittelwerte der Durchlaufzeiten in Minuten über alle Versuchspersonen

Im Versuch wurde mit einem mittleren Unterschied von 2 Minuten und 20 Sekunden ein signifikant höherer Zeitbedarf des AS gegenüber der PLK festgestellt ($p=.004$). Auch die Standardabweichung ist bei der Verwendung des AS (03:37 min) deutlich ausgeprägter als bei der PLK (02:38 min). Beide Differenzen sind ausgeprägter als noch in der vorherigen Untersuchung mit ähnlichem Versuchsaufbau (Mewes et al. 2019). Die größten Unterschiede zur Vorstudie ergeben sich aus der Provokation zusätzlicher Zwangshaltungen und der Altersverteilung der VP. Zur genaueren Betrachtung sind die Durchführungszeiten innerhalb der einzelnen Altersgruppen in Abbildung 45 dargestellt.

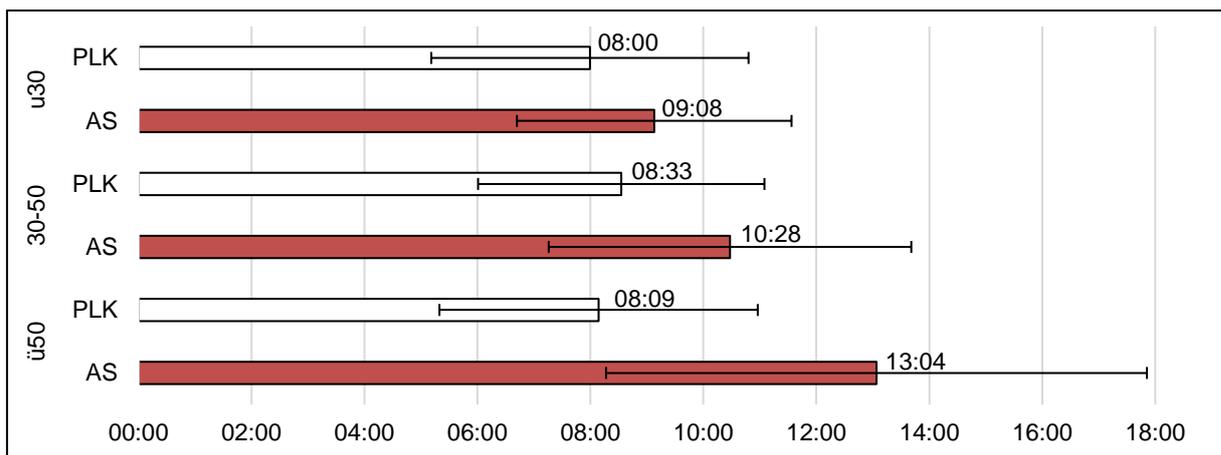


Abbildung 45: Verteilung der Durchführungszeiten in Minuten über unterschiedliche Altersgruppen

In der Betrachtung der benötigten Zeiten über die verschiedenen Altersklassen ergeben sich für die PLK keine signifikanten Unterschiede ($F(2, 14)=0,010$; $p=.990$). Auch die Standardabweichungen nähern sich hier stark an (zwischen 02:32 min und 02:49 min). Bei dem AS hingegen lässt sich ein Anstieg der Durchführungszeiten mit zunehmendem Alter der VP erkennen, deren Unterschiede auch nahezu statistische Signifikanz erreichen ($F(2, 14)=3,099$; $p=.077$). Zudem ergab sich ein hochsignifikanter Zusammenhang zwischen Alter und Durchführungszeit ($r=0,534^{**}$), welcher im ersten Teilversuchsdurchlauf besonders ausprägt war ($r=0,694^{**}$). Neben der durchschnittlichen Dauer der Durchgänge steigt hier auch die Standardabweichung an. So betrug diese bei VP unter 30 Jahren 02:26 min, bei 30-50-Jährigen 03:13 min und bei über 50-Jährigen 04:47 min. Bei VP unter 30 Jahren, wurde für das AS (02:26 min) sogar eine etwas

geringere Standardabweichung ermittelt, als für die PLK (02:48 min). Gleichwohl war der Zeitbedarf selbst im Durchschnitt der jüngsten VP-Gruppe mit dem AS noch um ca. eine Minute höher als bei der PLK.

Um mögliche Lerneffekte zu betrachten, wurden in Abbildung 46 die Durchschnittszeiten bei der ersten und zweiten Verwendung des jeweiligen Arbeitsmittels gegenübergestellt.

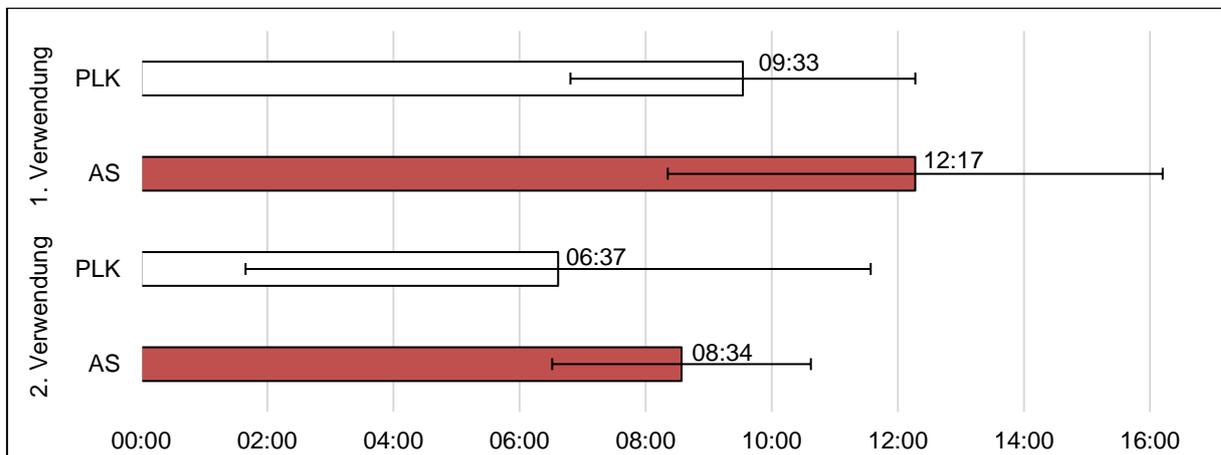


Abbildung 46: Durchschnittszeiten in Minuten nach der 1. und 2. Verwendung des jeweiligen Assistenzsystems

Hierbei zeigt sich für beide Arbeitsmittel eine deutliche Reduzierung der Versuchsdauer für die zweite Verwendung. Die Verbesserung von der ersten zur zweiten Verwendung fällt in absoluten Zahlen beim AS mit 03:42 min zwar etwas besser aus als bei der PLK mit 02:56 min, prozentual beträgt diese jedoch bei beiden ca. 30 %. Die Standardabweichung bei der zweiten Versuchsdurchführung ist jedoch bei der PLK deutlich ausgeprägter als bei dem AS, was für eine steile Lernkurve derjenigen VP spricht, die im ersten Durchgang Probleme mit der Verwendung hatten. Statistisch signifikante Unterschiede ließen sich zwischen der Erst- und Zweitverwendung des jeweiligen Arbeitsmittels nachweisen (AS: $F(1,16)=111,452$; $p=1,2853E-8$; PLK: $F(1,16)=15,484$; $p=.001$). Anders als in Mewes et al. (2019) vermutet, reduziert sich also die Durchführungszeit bei mehrmaliger Verwendung des AS gegenüber der PLK nicht in stärkerem Maße.

8.8 Fehlerhäufigkeit im Versuchsablauf

In der Versuchsdurchführung begingen die VP durch falsche Zustandserkennung, fehlende Kommentare oder fehlende Fotografie verschiedene Inspektionsfehler. Abbildung 47 stellt die Anzahl durchschnittlich entstandener Fehler je Versuchsbedingung der Arbeitsmittel gegenüber.

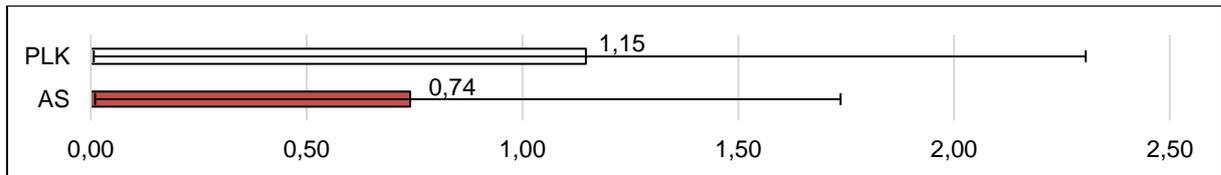


Abbildung 47: Gegenüberstellung aufgetretener Fehler der Versuchspersonen je Versuchsbedingung

Es ergibt sich für das AS eine geringere durchschnittliche Fehlerhäufigkeit als für die PLK. Diese erreicht jedoch ob der geringen Anzahl an VP und der sehr hohen Standardabweichung keine statistische Signifikanz ($p=.191$). Der Unterschied in den Diagnosefehlern, bei denen die VP einen Zustand falsch erkannten oder dokumentierten, war mit 19 Fehlern beim AS und 25 Fehlern bei der PLK nur gering ausgeprägt. Vergessene Fotografien hingegen traten bei der PLK 17-mal, beim AS hingegen nur dreimal auf.

Die geringere Fehlerhäufigkeit lässt sich mit verschiedenen Fehlerverhinderungsmechanismen begründen. So wird die VP bei Prüfstellen, an denen ein Foto zwingend verlangt wird, vom AS auf dieses hingewiesen. Zudem sind Platzhalter für Fotografien in die Struktur des AS integriert, die die VP, auch wenn keine Fotografie erforderlich ist, an diese erinnern. Für beide Arbeitsmittel wurde eine hohe Standardabweichung ermittelt. Dies begründet sich in der sehr unterschiedlichen Fehleranzahl der Versuchspersonen. Die mittleren Fehlerhäufigkeiten sind in Abbildung 48 für die unterschiedlichen Altersklassen dargestellt.

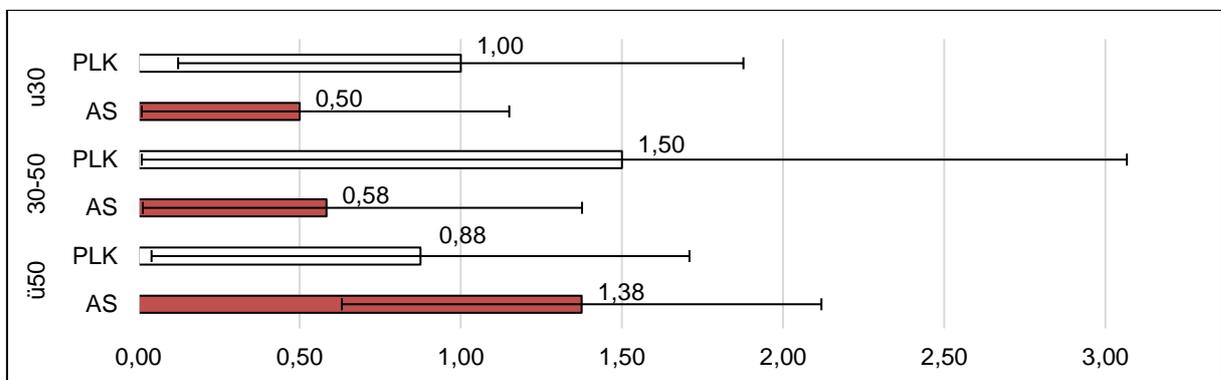


Abbildung 48: Gegenüberstellung aufgetretener Fehler der Versuchspersonen je Versuchsbedingung nach Altersklassen

Auch in der Fehlerhäufigkeit zeigt sich ein effizienterer Umgang der jüngeren Zielgruppen mit dem AS. So trat bei VP unter 30 Jahren mit dem AS durchschnittlich nur in jedem zweiten Durchlauf ein Fehler auf, wohingegen dies bei der PLK in jedem Durchlauf geschah. Auch VP zwischen 30. und 50. begingen mit dem AS seltener Fehler. Diese traten dort im Verhältnis bei Verwendung des AS sogar dreimal seltener auf als mit der PLK. Einzig bei VP ≥ 50 kamen bei

der Nutzung der PLK weniger Fehler vor, wobei sich hier prozentual die geringsten Unterschiede ergaben. Mit der PLK wurden von diesen aber auch die wenigsten Fehler begangen. Statistisch signifikante Unterschiede ergaben sich jedoch für keine der Altersgruppen.

8.9 Ergebnisse Kurzinterviews

Zum Abschluss der Untersuchung wurde die VP zu Vorteilen und Nachteilen beider Systeme befragt. Eine Aufstellung der Aussagen und entsprechender Häufigkeit der Nennungen befindet sich in Anhang B.

15 von 17 VP bemerkten die geringere Anzahl an Werkzeugen bzw. die Vermeidung des Werkzeugwechsels als Vorteil für das AS. Weiterhin wurden die Kamera bzw. die Fotofunktion der App von vielen VP positiv hervorgehoben. Diese stellten hierbei insbesondere die direkte Zuordnung der Fotos zu den jeweiligen Prüfstellen und die Möglichkeit, Markierungen zu setzen (welche an sich keinen Bestandteil der Arbeitsaufgabe darstellten) heraus. Bemängelt wurden das Fehlen des Fotoblitzes und Zooms (welcher von der Software nicht angesteuert wurde) und die geringe Bildqualität (welche eine Folge der Komprimierung der Fotografien zur Speicherung auf dem Einplatinencomputer darstellt).

Die Übersichtlichkeit hingegen empfanden zwölf VP als Vorteil der PLK. Dies begründeten sie damit, dass alle Informationen „auf einen Blick“ sichtbar seien. Auch die generelle Strukturierung der Informationen wurde in der PLK als eindeutiger und besser empfunden. Insbesondere ältere VP bemängelten in Einzelfällen die schlechte Sichtbarkeit der dargestellten Inhalte auf dem Display sowie fehlende analoge Bedienmöglichkeiten.

Einige weitere Kommentare bestätigten zudem die Ergebnisse anderer Untersuchungsteile. So wurden die Bedienfreundlichkeit und die Möglichkeit des direkten Einsehens von Zusatzinformationen beim AS positiv hervorgehoben, was die Ergebnisse des ISONORM 9241/110-S bestätigen. Auch die automatische Markierung von Messwerten außerhalb des Toleranzbereichs wurde positiv erwähnt. Einzig beim empfundenen Zeitbedarf einiger VP ergaben sich Differenzen. So stellten jeweils vier VP sowohl die schnellere als auch die langsamere Bearbeitung der Aufgaben mit dem AS heraus. Laut Messungen benötigten in der zweiten Verwendung der Arbeitsgeräte jedoch alle 17 VP mit der PLK weniger Zeit für die Bearbeitung der Arbeitsaufgabe.

8.10 Bewertung und Diskussion Ergebnisse des Laborversuchs

Die Ergebnisse der Laborversuche zeigen für beide Arbeitsmittel unterschiedliche Stärken und Schwächen auf. So wurde bspw. in der Untersuchung des NASA-RTLX eine geringere Beanspruchung der VP durch die PLK ermittelt. Insgesamt sind die Abweichungen nur sehr gering ausgeprägt. So entsprach die Differenz der Mittelwerte der Parameter etwas mehr als einem halben Skalenwert der zwanzigstufigen Skala. Die größten Unterschiede traten hier in der empfundenen geistigen Beanspruchung und der Anstrengung der VP auf. Diese Unterschiede liegen maßgeblich im Antwortverhalten der VP ≥ 50 begründet und sind für alle VP unter 50 nur sehr gering ausgeprägt. Die Ursachen hierfür könnten zum einen in der höheren Affinität jüngerer Menschen für digitale Technologien liegen. Zum anderen sind aber auch altersbedingte Wahrnehmungsveränderungen und ein genereller Kompetenzunterschied im Umgang mit digitalen Geräten mögliche Einflussfaktoren. Somit kommen sowohl psychische als auch physische Ursachen für die unterschiedliche Einschätzung der Beanspruchung durch die verschiedenen Altersgruppen in Frage.

Die Untersuchung mit Hilfe des ISONORM 9241/110-S weist das AS als gebrauchstauglicheres Arbeitsmittel aus. Dieses wurde im Durchschnitt um 0,5 Skalenwerte besser bewertet als die PLK. Der ermittelte Unterschied entsteht hauptsächlich durch die deutlich besser bewertete Selbstbeschreibungsfähigkeit, Steuerbarkeit und Fehlertoleranz des AS. Bei dem zur Fehlertoleranz gehörenden Item ft_3 häuften sich jedoch, wie bereits beschrieben, verständnisbedingte Nachfragen. Vorteile für die PLK ergaben sich in der Lernförderlichkeit und der Individualisierbarkeit. Ursachen für die hohe Lernförderlichkeit könnten sich durch die starken Vereinfachungen im Versuchsaufbau gegenüber dem Referenzarbeitssystem und die sehr geringe Komplexität der PLK begründen. Das schlechte Abschneiden des AS bei der Individualisierbarkeit lässt sich mit dem frühen Entwicklungsstand des getesteten Demonstrators begründen, bei dem verschiedene Anpassungs- und Komfortoptionen aufgrund der Gegebenheiten im Labor nicht genutzt werden konnten.

Beim Zeitbedarf ergab sich ein klarer Vorteil für die PLK. Mit dieser konnten die VP die gestellte Aufgabe im Schnitt 2 Minuten schneller bearbeiten als mit dem AS. Das entspricht einem Vorteil von 19,4 %. Auch wenn die jüngeren Zielgruppen hier erneut deutlich besser mit der elektronischen Unterstützung zurechtkommen, ergibt sich selbst in der jüngsten Altersgruppe ein Vorteil von knapp über einer Minute für die PLK. Bei VP ≥ 50 sind die zeitlichen Unterschiede besonders ausgeprägt. So waren diese bei Durchgängen mit dem AS fast 5 Minuten langsamer, wodurch sich ein zeitlicher Vorteil der PLK von 37,7 % gegenüber dem AS ergab.

Bei der Fehlerhäufigkeit ergeben sich wiederum klare Vorteile für das AS. So traten bei diesem mit insgesamt 0,41 pro Durchlauf 36 % seltener Fehler auf als bei der PLK. Dabei zeigen sich auch hier Unterschiede in den Altersgruppen. So begingen VP ü50 mit der PLK 36 % weniger Fehler. Folglich wirkte die Unterstützung bei jüngeren VP jedoch umso besser. So konnten VP unter 50 Jahren mit dem AS 43 % der Inspektionsfehler vermeiden.

Zusammenfassend erreichte das AS Vorteile in Gebrauchstauglichkeit und Fehlervermeidung, wohingegen die VP mit der PLK schneller arbeiteten und eine geringere Beanspruchung angaben. Gerade für die VP-Gruppe ü50 fallen die Ergebnisse sehr eindeutig zugunsten der PLK aus. So ist der Unterschied in der Durchführungszeit sehr hoch, die VP-Gruppe begeht mehr Fehler und fühlt sich stärker beansprucht. Einzig die Gebrauchstauglichkeit der Systeme nach ISONORM 9241/110-S bewerten sie als gleichwertig. Dieser Effekt kann zum einen aus einer höheren technischen Affinität und digitalen Kompetenz der jüngeren VP-Gruppe resultieren. Zum anderen wurden die älteren Zielgruppen in den entwicklungsbegleitenden Voruntersuchungen klar unterrepräsentiert. So wurden sowohl in Mewes et al. (2019) als auch in Mewes et al. (2020) keine VP ü50 Lebensjahren untersucht. Dies ist unter anderem darin begründet, dass die Inspektionen von WEA beim untersuchten Anwendungspartner aufgrund der hohen körperlichen Arbeitsbelastung aktuell ausschließlich von unter fünfzigjährigen MA durchgeführt werden.

9 Evaluation unter Feldbedingungen

Zur Evaluation des AS unter Feldbedingungen wurden die ursprünglich verwendeten Arbeitsmittel aus Prüfliste und Kamera (PLK) mit dem AS hinsichtlich verschiedener Parameter verglichen. Dafür wurden neben verschiedenen Befragungen (leitfadengestützte Interviews, NASA-RTLX und ISONORM 9241/110-S) eine Körperhaltungsanalyse nach REBA-Methode (erläutert in 7.2) und eine Beanspruchungsmessung mittels EKG durchgeführt. Diesbezüglich wurden zwei MA zu jeweils zwei Inspektionen von WEA begleitet, in denen sie alternierend die Aufgaben wechselten. Einer der beiden MA führte zum Zeitpunkt der Untersuchungen seit acht Jahren, der andere seit zehn Jahren Inspektionen an Windenergieanlagen durch. Beide VP sind somit als sehr erfahrene Inspektoren einzustufen. Aufgrund der niedrigen VP-Zahl muss auf inferenzstatistische Auswertungsmethoden verzichtet werden. Es werden ausschließlich deskriptive Ergebnisse berichtet. Alle Begehungen wurden in Anlagen des Typs Vestas V90 durchgeführt, welche eine Nabenhöhe von 80 m und einem Rotordurchmesser von 90 m aufweisen (Vestas, 2020).

9.1 Vergleich psychischer und physischer Beanspruchung

Für die Untersuchungen im Feld wurde beiden VP ein 3-Kanal-EKG-Geräte angelegt. Die aufgezeichneten Messdatenauswertungen befinden sich in Anhang C. Beide Diagramme zeigen die höchste Beanspruchung der VP während des Aufstiegs über die Leiter. Aufgrund der unterschiedlichen Zeitpunkte des Aufstiegs im Untersuchungsablauf sind diese Werte jedoch nicht direkt vergleichbar. Die erhobenen EKG-Daten sind ob der geringen Dauer und Durchführungszahl der Untersuchung nicht ausreichend, um belastbare Erkenntnisse aus den Feldversuchen abzuleiten.

Neben diesen Vitalwerten wurde die Beanspruchung durch die Inspektion im Nachgang beider Untersuchungen mit dem NASA-RTLX Fragebogen analysiert (Erläutert in 7.1). Tabelle 15 zeigt die Ergebnisse der Untersuchung. Ein Zusammenhang zwischen der jeweiligen VP und den Angaben konnte ob einer fehlenden Zuordnung der Instrumente nachträglich nicht hergestellt werden. Entsprechend stehen die laufenden Nummern hinter dem jeweiligen Arbeitsmittel in keiner direkten Beziehung.

Tabelle 15: Ergebnisse der NASA-RTLX-Untersuchung nach den Inspektionen im Feld

Eigenschaft der Arbeit	PLK-01	PLK-02	Ø-PLK	AS-01	AS-02	Ø-AS
Geistige Anforderung	65	65	65	15	70	42,5
Körperliche Anforderung	80	85	82,5	10	85	47,5
Zeitliche Anforderung	60	20	40	10	50	30
Erbrachte Leistung	15	15	15	10	15	12,5
Anstrengung	80	80	80	5	70	37,5
Frustration	65	20	42,5	10	35	22,5

Eine Gegenüberstellung der Mittelwerte der Untersuchung lässt ein deutlich besseres Abschneiden des AS in allen Punkten des NASA-RTLX vermuten. Bei Betrachtung der Einzelbewertungen relativiert sich diese Feststellung jedoch. Hier fällt die Wertung bei AS-01 so deutlich niedriger aus, dass eine Beeinflussung der Studie durch unerwünschte Effekte wahrscheinlich ist. Der starke Unterschied der empfundenen körperlichen Beanspruchung ist besonders auffällig, da hier kein kausaler Zusammenhang zu den jeweiligen Arbeitsmitteln besteht. Vergleicht man die Ergebnisse der PLK mit AS-02, ergeben sich nur kleine Veränderungen. Aufgrund der geringen Anzahl der VP in dieser Studie und der vermuteten versuchspersonenseitigen Beeinflussung der Ergebnisse können diese jedoch für die Bewertung der Arbeitsmittel nicht genutzt werden.

9.2 Vergleich physischer Belastung durch Körperhaltung

Die Betrachtung der körperlichen Belastung, resultierend aus Zwangspositionen, geschah mithilfe der REBA-Methode (vgl. Kap. 7.2). Dazu wurden die VP für die gesamte Dauer der begleiteten Anlagenbegehungen gefilmt. Anschließend wurden im Nachgang wiederholende, zeitintensive und besonders belastend anmutende Tätigkeiten ausgewählt und anhand einer für die jeweilige Tätigkeit typischen Position bewertet. Insgesamt wurden 49 Haltungen in vier Inspektionen analysiert, welche sich zu 15 Tätigkeitsarten gruppieren ließen. Tabelle 16 zeigt die Anzahl der Bewertungen zu jeder Tätigkeitsart in Abhängigkeit zum untersuchten Arbeitsmittel. In der weiteren Untersuchung werden lediglich Haltungen betrachtet, die sich eindeutig einer Tätigkeitsart zuordnen ließen.

Tabelle 16: Anzahl der identifizierten Prüfschritte unter Verwendung der Prüfliste und des Assistenzsystems

Tätigkeitsart	PLK	AS	Tätigkeitsart	PLK	AS
Betriebsdaten	1	2	Kranschacht	1	1
Fahrstuhl	2	2	Kühlung	2	2
Feuerlöscher	3	3	Rettungsbox	2	2
Getriebe seitlich	1		Rotornabe	2	2
Getriebe unten	2	2	Schaltschrank	3	1
Hydraulik hinten		1	Türinspektion	2	1
Hydraulik vorn	1	1	Windmesser	2	2
Kraninspektion	2	1			

Trotz identischer Anlagentypen zeigt Tabelle 16 eine ungleiche Verteilung der beobachteten Prüfpunkte innerhalb der Anlagen. So ergaben sich bei Inspektionen mit der PLK insgesamt 26 und bei der Testreihe mit dem AS 23 bewertete Körperhaltungen. Die Inspektion des Schalt-schranks konnte bspw. im Durchgang mit der PLK dreimal so häufig beobachtet werden wie in den Referenzdurchgängen. Eine Untersuchung des seitlichen Getriebes und der hinteren Hydraulik wurde jeweils nur bei einer der vier Inspektionen nachträglich beobachtet. Mögliche Ursachen hierfür werden mit den Ergebnissen der REBA-Untersuchung diskutiert.

Anhand ausgewählter, möglichst repräsentativer Standbilder für die einzelnen Arbeitsschritte erfolgte anschließend eine Bewertung der einzelnen Prüfschritte nach REBA-Verfahren. Zur vergleichenden Bewertung der Ergebnisse wurden Mittelwerte je Tätigkeitsart in Abhängigkeit von der Versuchsbedingung (PLK vs. AS) gebildet (vgl. Tabelle 17).

Tabelle 17: Mittelwerte der REBA-Untersuchung im Feld

Tätigkeitsart	PLK	AS	Tätigkeitsart	PLK	AS
Betriebsdaten	1,0	1,5	Kranschacht	8,0	4,0
Fahrstuhl	4,0	3,5	Kühlung	9,5	4,5
Feuerlöscher	6,0	4,5	Rettungsbox	8,0	4,5
Getriebe seitlich	5,0		Rotornabe	4,5	4,0
Getriebe unten	7,5	7,5	Schaltschrank	4,0	4,0
Hydraulik hinten		4,0	Türinspektion	6,5	3,0
Hydraulik vorn	7,0	7,0	Windmesser	4,0	1,0
Kraninspektion	3,0	2,0	Durchschnitt	5,6	3,9

Im Ergebnis sanken die durchschnittlichen REBA-Mittelwerte nach der Benutzung des AS in fast allen Tätigkeitsarten (9 von 13) und stiegen nur in einer an. Der durchschnittliche REBA-Wert über die gesamte Untersuchung sank von 5,6 mit der PLK um 1,6 Punkte auf 4,0 mit dem AS. Dies kann auf eine ergonomischere Bedienbarkeit des AS gegenüber der PLK hindeuten.

Bei genauer Betrachtung der Arbeitsschritte relativiert sich diese These jedoch. In der umfangreichsten Gruppe gleichartiger Tätigkeiten, der Feuerlöscherprüfung (vgl. Abbildung 49), ist die REBA-Bewertung bei der Inspektion mit PLK im Durchschnitt theoretisch größer (6) als bei der mit AS (4,33). Damit weisen die sechs Haltungen zwar deutliche Unterschiede auf, es erschließt sich jedoch kein kausaler Zusammenhang zwischen REBA-Bewertung und Arbeitsmittel. Auch in anderen Teilen der Analyse sind keine Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen Bewertungen der Körperhaltung und dem verwendeten Arbeitsmittel erkennbar.



Abbildung 49: Bilder der bewerteten Prüfung der Feuerlöscher

Sowohl für die in unterschiedlicher Häufigkeit beobachteten Arbeitsschritte als auch die Unterschiede in den REBA-Bewertungen lassen sich verschiedene Ursachen vermuten. Zum einen reagieren MA auf verschiedene Anlagenzustände unterschiedlich. Mangelbehaftete Prüfstellen können hierbei eine genauere Form der Untersuchung provozieren als eine mangelfreie, was wiederum Auswirkungen auf die Zuordnung durch den Beobachter und die ermittelte REBA-Bewertung haben kann. Zum anderen sind auch individuelle Unterschiede im Prüfverhalten der

MA eine mögliche Ursache für Abweichungen. Zusätzlich ergeben sich trotz identischer Anlagentypen Abweichungen aus kleineren Unterschieden innerhalb der Anlage (z. B. Positionierung des Feuerlöschers in Abbildung 49), welche wiederum unterschiedliche REBA-Bewertungen zur Folge haben.

Eine Verschlechterung der Körperhaltung während des Inspektionsprozesses durch den Einsatz von „Pocket-Assist“ ist zwar unwahrscheinlich, eine valide Aussage aufgrund der geringen Anzahl der VP in der Untersuchung allerdings nicht möglich. Die Ergebnisse weisen jedoch nicht auf die Notwendigkeit einer umfassenderen Analyse hin, welche sowohl einen sehr hohen Aufwand für das Untersuchungspersonal darstellen, als auch die MA während ihrer Arbeit stark zusätzlich belasten würde.

9.3 Vergleich der Usability nach ISO-NORM 9241/110-S

Um die Usability beider Varianten zu prüfen, wurden AS und PLK in der Kurzversion des ISO-NORM 9241/110-S gegenübergestellt (erläutert in 7.3). Anders als beim NASA-RTLX ließ sich hier die Identität der VP nachträglich der laufenden Nummer zuordnen (PLK-01 und AS-01 entsprechen Bewertungen der gleichen VP). Die Ergebnisse sind in einer siebenstufigen Skala von -3 (sehr schlecht) bis +3 (sehr gut) dargestellt.

Vor Beginn der Befragung schätzten die VP zunächst ihre Beherrschung der untersuchten Systeme ab. Hierbei gaben beide Inspektoren an, die PLK perfekt zu beherrschen. Im Umgang mit dem AS „Pocket-Assist“ gab VP 1 eine gute (+2) und VP 2 eine sehr gute (+3) Beherrschung der Systeme an. Die MA sind also mit beiden Arbeitsmitteln sehr gut vertraut.

Abbildung 50 zeigt die Bewertung des Dialogprinzips **Aufgabenangemessenheit**. In dieser wurde das AS (aa=2,3) deutlich besser bewertet als die PLK (aa=0,7). Der größte Unterschied in den Bewertungen der MA ergab der *Funktionsumfang* (aa1) mit 2,5. Uneinig waren sich die VP bei der *Freiheit von überflüssigen Eingaben* (aa2) der PLK, welche eine eher schlecht ($aa_{2p01}=-1$), die andere hingegen sehr gut ($aa_{2p02}=+3$) bewertete.

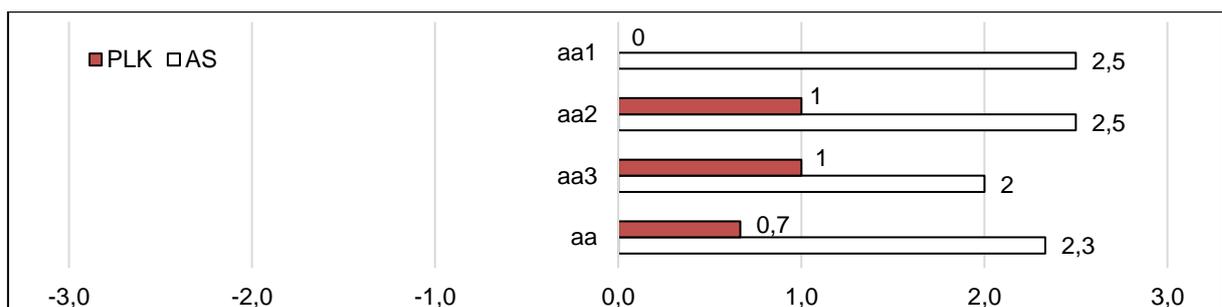


Abbildung 50: Bewertung der Aufgabenangemessenheit nach ISONORM 9241/110-S

Die **Selbstbeschreibungsfähigkeit** (Abbildung 51) stellt die Eigenschaft eines Systems dar, den Bediener mit den notwendigen Informationen für die Durchführung der Arbeitsaufgabe zu versorgen. Diese wurde von den VP bei beiden Arbeitsmitteln als nicht ausreichend bewertet, wobei „Pocket-Assist“ mit einem sb-Wert von 0,8 deutlich besser bewertet wurde als die PLK mit -1,3. Beide VP waren bei beiden Arbeitsmitteln mit der *Eindeutigkeit geforderter Eingaben* (sb1) zufrieden. Deutlich schlechter bewerteten sie die PLK bei *abrufbaren situationsspezifischen Erklärungen* (sb2) und *automatischen situationsspezifischen Erklärungen* (sb3), wobei besonders sb3 auch bei „Pocket-Assist“ deutliches Verbesserungspotenzial bietet.

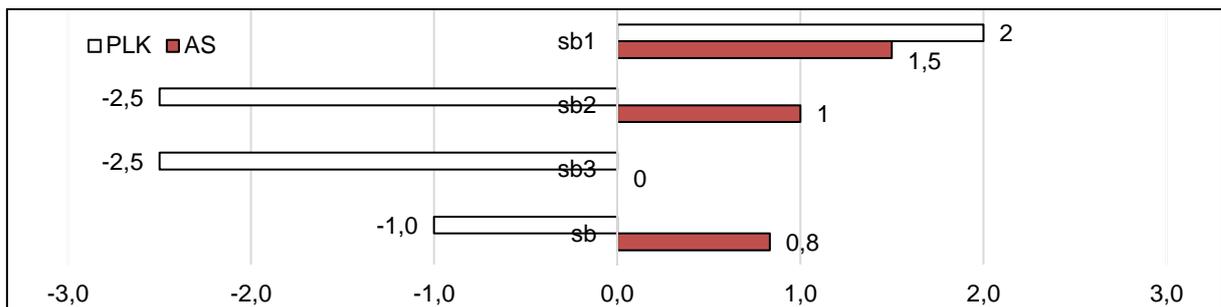


Abbildung 51: Bewertung der Selbstbeschreibungsfähigkeit nach ISONORM 9241/110-S

Die **Erwartungskonformität** (Abbildung 52) bewertet die Darstellung und die Orientierung im System. In dieser schneidet die PLK etwas besser ab als das AS. Die *einheitliche Gestaltung* des AS wurde hier geringfügig besser bewertet als die der PLK. Jedoch gibt die PLK laut Bewertung der MA bessere *Informationen über den eigenen Zustand* (ek2) und weist eine höhere *Einheitlichkeit der Bedienung* (ek3) auf als das AS.

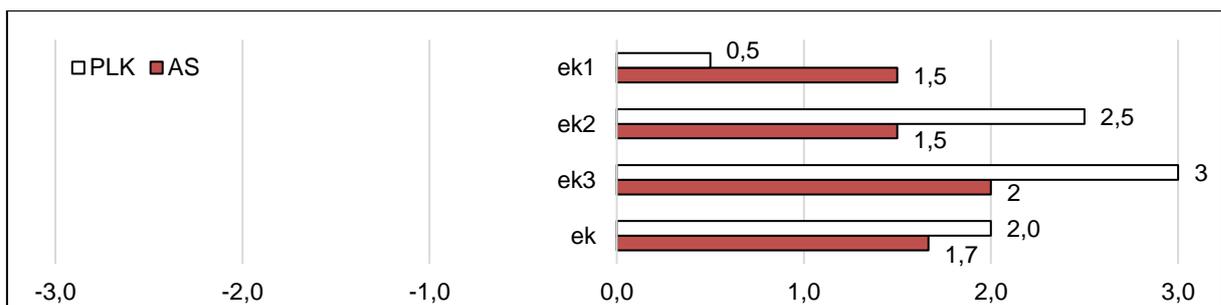


Abbildung 52: Bewertung der Erwartungskonformität nach ISONORM 9241/110-S

Die **Lernförderlichkeit** (Abbildung 53) beschreibt, wie leicht die Bedienung des Systems zu erlernen ist. Hierbei wird die PLK (lf=0,8) etwas schlechter bewertet als das AS (lf=1,3). Dies begründet sich ausschließlich aus einem enormen Vorteil des AS bei der *Notwendigkeit des Merkens von Details* (lf2). Den *Zeitbedarf zum Erlernen* (lf1) und die *selbstständige Erlernbarkeit* (lf3) bewerteten die VP mit leichten Vorteilen für die PLK.

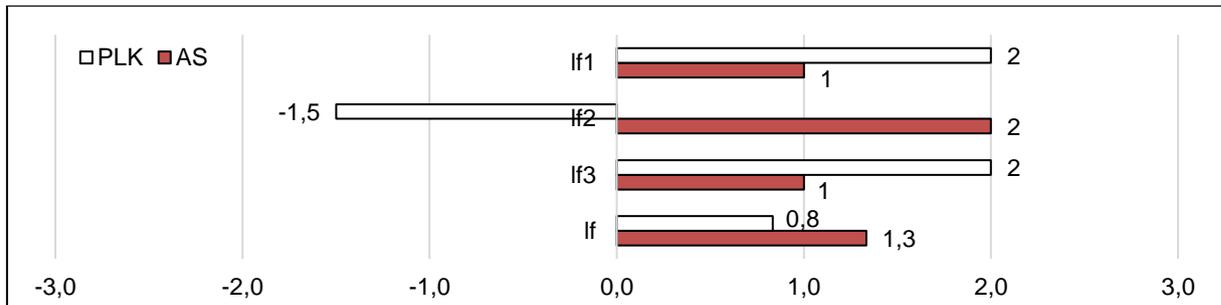


Abbildung 53: Bewertung der Lernförderlichkeit nach ISONORM 9241/110-S

Mit der **Steuerbarkeit** (Abbildung 54) bewerteten die VP die Möglichkeit, die Richtung und Geschwindigkeit des jeweiligen Arbeitsmittels bis zur Zielerreichung zu beeinflussen. Hierbei wurde die PLK als unzureichend bewertet, für das AS wurde kein akuter Verbesserungsbedarf ermittelt. Bei der Bewertung der PLK waren sich die Inspektoren in diesem Kriterium jedoch auffallend uneinig (PLK: $sk_{p01} = 0,3$; $sk_{p02} = 2,3$). Ein besonderer Vorteil für das AS wurde bei der *Vermeidung von Arbeitsunterbrechungen* (sk3) festgestellt.

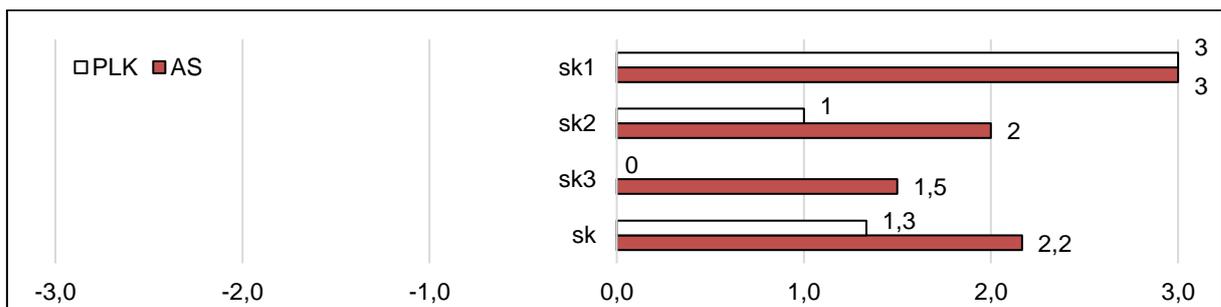


Abbildung 54: Bewertung der Steuerbarkeit nach ISONORM 9241/110-S

Das Dialogprinzip **Fehlertoleranz** (Abbildung 55) beschreibt den Umgang des Arbeitsmittels mit system- und prozessbedingten Fehlern. Dabei wurden beide Systeme im negativen Skalenbereich bewertet. Die Bewertung der PLK ergibt sich hier besonders aus den als schlecht empfundenen *Hinweisen zur Fehlerbehebung* (ft3). Das AS wurde zusätzlich bei der *Verständlichkeit der Fehlermeldungen* (ft1) negativ bewertet. Im nachträglichen Interview gaben die VP hier zudem eine Inkompatibilität des AS mit iOS-basierten Endgeräten an. Diese wurde als besonders störend empfunden, da sie den firmeninternen Technologiestandard bilden.

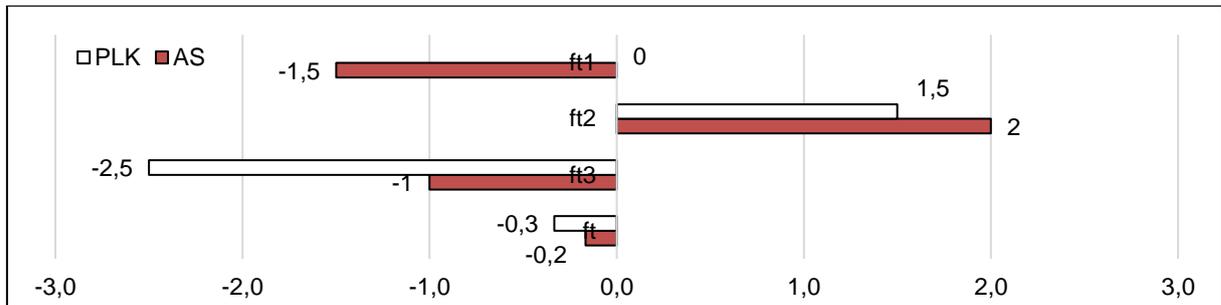


Abbildung 55: Bewertung der Fehlertoleranz nach ISONORM 9241/110-S

Die **Individualisierbarkeit** (Abbildung 56) erfasst die Möglichkeiten zur Anpassung der Arbeitsmittel an MA und Arbeitsprozess. Hierbei wurden keine hohen Unterschiede unter den Werkzeugen festgestellt. Die PLK schnitt bei der *Erweiterbarkeit für neue Aufgaben* (Ik1) leicht besser ab. Das AS bietet laut Meinung der Inspektoren jedoch eine etwas bessere *Anpassbarkeit an individuelle Arbeitsweise* (Ik2) und *Anpassbarkeit an unterschiedliche Aufgaben* (Ik3).

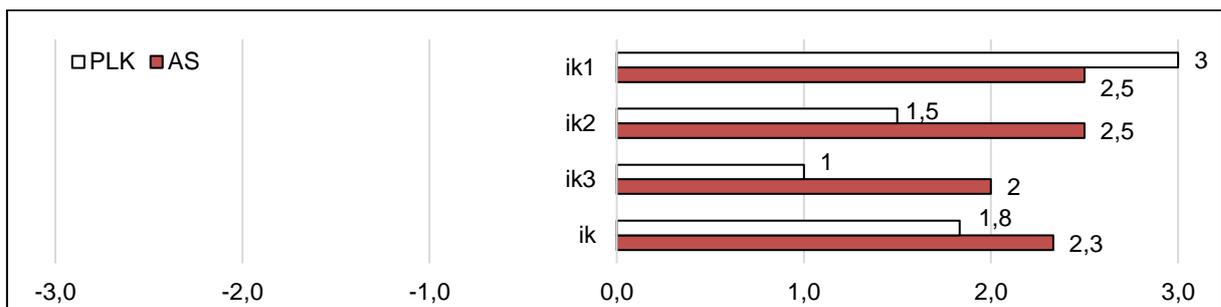


Abbildung 56: Bewertung der Individualisierbarkeit nach ISONORM 9241/110-S

In der Betrachtung aller Grundsätze der Dialoggestaltung unter Feldbedingungen wurde das AS „Pocket-Assist“ mit 1,5 Punkten um 0,7 Punkte besser bewertet als die PLK. Damit wird das AS von den MA insgesamt als solide bewertet, wohingegen sie die PLK als verbesserungswürdig empfanden. Die größten Unterschiede wiesen die Systeme in der **Selbstbeschreibungsfähigkeit** und **Aufgabenangemessenheit** auf. In beiden Dialoggestaltungsrichtlinien wurde das AS besser bewertet. Die **Fehlertoleranz** beider Systeme erhielt die schlechtesten Bewertungen. Hier weist das AS deutliches Verbesserungspotenzial auf. Auch die **Selbstbeschreibungsfähigkeit** des AS ist mit einem Wert von 0,83 unzureichend. Abbildung 57 stellt die Bewertung der Grundsätze der Dialoggestaltung grafisch dar.

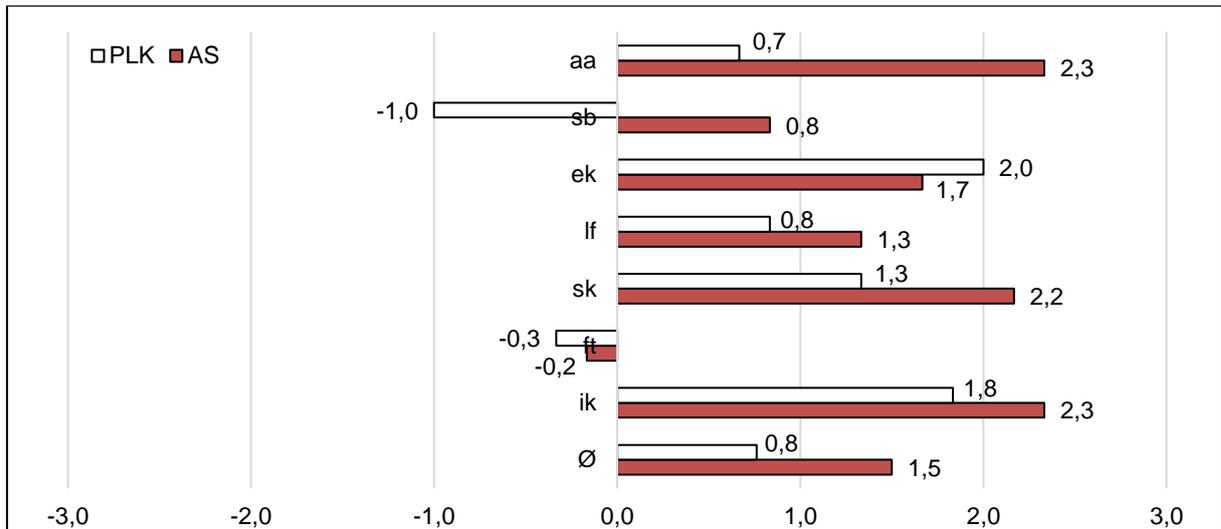


Abbildung 57: Darstellung der Bewertung der Grundsätze der Dialoggestaltung nach ISONORM 9241/110-S

9.4 Vergleich des Zeitbedarfs

Aufgrund der hohen Beeinflussung des Inspektionsprozesses durch die Beobachter und der endlichen zeitlichen Ressourcen aller am Untersuchungsprozess beteiligten Personen wurde eine Evaluation der Inspektionszeiten im Feld durch Selbstaufschreibung der MA erhoben. Hierzu wurden sowohl die Zeiten für die Vorbereitung, die Durchführung, als auch für die Nachbereitung separat erhoben (Teiltätigkeiten sind in Kapitel 3 beschrieben).

Zur Ermittlung der Vorbereitungszeit wurden die Zeiten für verschiedene Teilaufgaben einmalig gemessen. Insgesamt ist hier mit dem AS eine Zeitersparnis von neun Minuten erreicht worden, indem die Dauer der Tätigkeit von 24 auf 15 Minuten gesenkt wurde. Aufgrund der extrem kleinen Stichprobe sind diese Zahlen jedoch nicht als repräsentativ anzusehen.

Zur Ermittlung der Durchführungszeiten wurden die Anlagen zweier unterschiedlicher Hersteller verglichen. Die Anlagen Vestas V90 und Enercon E66 unterscheiden sich im Wesentlichen durch ihren Generator. Dieser ist in der V90 im Unterschied zur E66 mit einem Getriebe ausgestattet. Insgesamt wurden 21 Durchgänge mit der PLK und 14 Durchgänge mit dem AS betrachtet. Die unterschiedlichen Häufigkeiten der aufgenommenen Durchgänge ergaben sich aus ablaufbedingten Beeinflussungen der Daten durch das Anlernen eines neuen Inspektors in verschiedenen Durchläufen mit dem AS. Eine nachträgliche Erhebung der Zeiten war aufgrund verschiedener Einschränkungen durch die Covid-19 Pandemie (RKI, 2020) nicht möglich.

Abbildung 58 zeigt die durchschnittlichen Durchführungszeiten für die Inspektion an beiden Anlagen im Vergleich beider Arbeitsmittel. Auffällig sind hier die sehr geringen Unterschiede

für die Ausführungszeiten zwischen den Arbeitsmitteln und die verhältnismäßig geringen zugehörigen Standardabweichungen. Im Durchschnitt sanken die Durchführungszeiten mit dem AS für Anlagen des Typs Enercon E66 geringfügig und stiegen für Anlagen des Typs Vestas V90 leicht an. Im Verhältnis unterscheiden sich beide Zeiten nur im niedrigen einstelligen Prozentbereich. Bei beiden Anlagentypen wurden keine statistisch signifikanten Unterschiede in der Durchführungszeit nachgewiesen (Enercon $p=.833$; Vestas $p=.345$). Die Durchführungszeit kann der aktuellen Datenlage entsprechend als unverändert betrachtet werden.

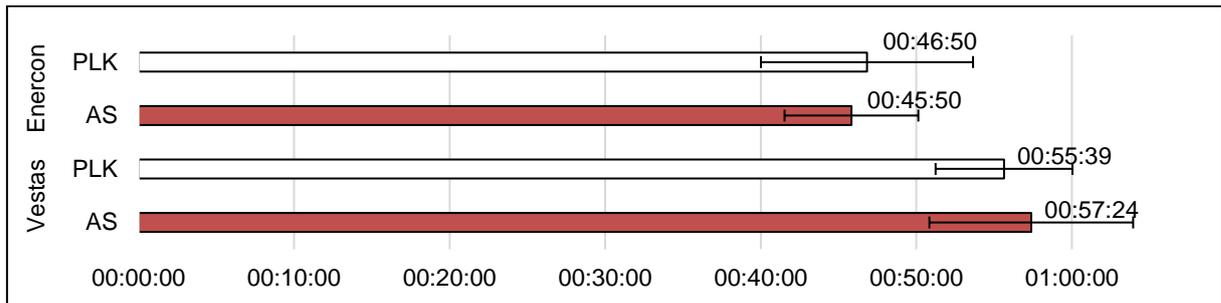


Abbildung 58: Durchführungszeit der Anlageninspektion an Anlagen vom Typ Vestas V90 und Enercon E66 in Minuten

Für die Nachbereitung der WEA-Inspektion konnten aufgrund der Beeinflussung durch eine Kollegeneinweisung für die PLK 15 und das AS 13 von insgesamt 20 erhobenen Datensätzen ausgewertet werden. Die Mittelwerte für diese sind in Abbildung 59 dargestellt. Insgesamt fällt die Nachbereitungszeit für das AS mit 04:51 min kürzer aus als die der PLK mit 06:12 min. Dies entspricht mit einer absoluten Verkürzung der Nachbereitungszeit von 1:21 min einer relativen Zeitersparnis von ca. 20 %. Setzt man sie jedoch ins Verhältnis zur Durchführungszeit der Anlageninspektion, erscheint diese Zeitersparnis vergleichsweise gering. Der Unterschied zwischen den Arbeitsmitteln war jedoch statistisch nicht signifikant ($p=.309$).

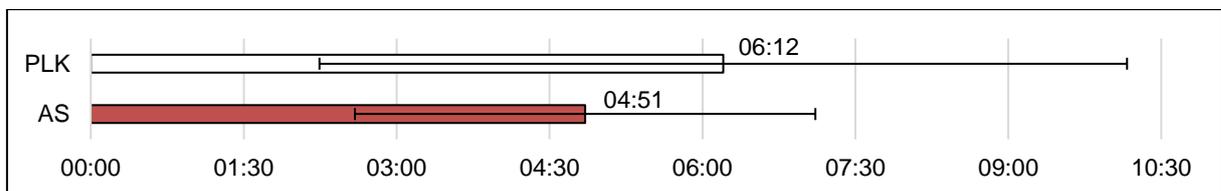


Abbildung 59: Mittlere Nachbereitungszeit für Anlagen vom Typ Vestas in Minuten

9.5 Leitfadengestützte Interviews

Zur Ermittlung nicht quantifizierbarer Auswirkungen des AS auf die Inspektion von WEA wurden die beiden Versuchspersonen zu verschiedenen Sachverhalten befragt. Neben einem finalen Feedback zum AS „Pocket-Assist“ und der Veränderung der Arbeit durch dessen Nutzung wurden mit Hilfe des Interviews auch die arbeitswissenschaftlichen Zielebenen Persönlichkeitsförderlichkeit und Sozialverträglichkeit erörtert.

Beide MA berichteten, dass sie das AS seit der Erstübergabe (ca. sechs Monate zuvor) zu fast jeder Inspektion einsetzen würden. Ausnahmen bildeten nur Inspektionen spezieller internationaler Kunden, welche aufgrund von Übersetzungsproblemen weiterhin auf das alte Protokoll bestünden. Abbildung 60 zeigt die Nutzung von „Pocket-Assist“ in der Windenergieanlage.



Abbildung 60: Impression der Nutzung von „Pocket-Assist“ aus der Windenergieanlage

Der **Vorbereitungsaufwand** für Inspektionen hat sich laut Aussage der MA kaum verändert. Seit Nutzung des AS haben sie jedoch den Vorteil, Begehungen deutlich flexibler durchführen zu können. „Wenn du weißt, dein Gurtzeug ist geprüft und es ist alles da, dann kannst du das schnappen und losmachen“, erklärt einer der Inspektoren. Dies führt vor allem zur flexibleren Inspektionsplanung an Standorten mit zahlreichen Anlagen: „Wenn du merkst, du hast jetzt vier Windkraftanlagen die wir heute machen wollten fertig und merke, eigentlich könnten wir noch eine fünfte machen, dann machst du halt noch eine fünfte hinten dran.“ Vor der Einführung des AS war dies nicht möglich, wenn die zusätzlichen Dokumente nicht „in weiser Vorrausicht“ von den MA vorbereitet und mitgeführt wurden. Diese zusätzliche Flexibilität ermöglicht nach Aussage der Inspektoren gelegentlich eine deutliche Zeitersparnis.

Eine neue Möglichkeit, die **Dienstleistungsqualität** zu steigern, bietet das AS zurzeit nicht. Es macht zwar eine flexiblere Anlagenplanung möglich, diese bietet für den Kunden jedoch keine zusätzlichen Vorteile.

Zur Erörterung des **Entfaltungspotenzials** wurden die MA sowohl nach den Entwicklungen in ihrer Arbeitsweise als auch nach einer möglichen empfundenen Steuerung durch das digitale AS befragt. Nach ihrer Aussage macht „Pocket-Assist“ in erster Linie das „nervige Abschreiben“ in der Nachbereitung überflüssig und schafft in ihrer Wahrnehmung zusätzliche Zeit für andere Tätigkeiten. Dass diese zusätzliche Zeit grundsätzlich sinnvoller genutzt wird, wollten die VP auf Nachfrage zwar nicht bestätigen, generell seien sie jedoch mit ihrer Arbeit zufriedener als zuvor.

Ein Konzept des AS war die Bereitstellung verschiedener Maschinenbeschreibungen und Anleitungen. Diese hinterlegten Unterlagen wurden von den MA nur sehr selten verwendet. Auf Nachfrage gaben sie an, durch die Möglichkeit des schnellen Zugriffs auf diese Daten in ihrer Arbeit etwas mehr **Handlungssicherheit** zu spüren.

Weiterhin wurden die MA zur Beeinflussung der innerbetrieblichen und außerbetrieblichen **sozialen Kontakte** durch die Einführung des AS befragt. Generell nehmen die Befragten das AS durch die simultane Arbeit in einer Datei als Unterstützung für den Abstimmungsprozess wahr. Die verbale Kommunikation innerhalb der Anlage wird nicht negativ beeinflusst: „Bei so einer Begehung muss man halt miteinander reden. Allein schon, weil du gleich zusammen Fahrstuhl fährst. Das muss man halt abstimmen.“ Eine Beeinflussung sozialer Kontakte in der Freizeit nahmen die MA nicht wahr, da es keine Veränderungen in der Arbeitszeit gäbe und auch der Auf- und Abbau von Überstunden keine entsprechenden Entwicklungstendenzen zeigte. Auch eine Veränderung ihrer **Qualifikation** wurde von den MA weder zum Positiven noch zum Negativen festgestellt.

Während der Testphase des AS stellten die MA kleinere Abweichungen zwischen der Reihenfolge und der wirklichen Durchführung in der Anlage fest. Diese wurde ursprünglich an die Reihenfolge der Arbeitsschritte im Prüfprotokoll angepasst. Die Navigation zwischen den einzelnen Prüfpunkten wurde von den MA im AS etwas umständlicher wahrgenommen als bei der PLK, was einer zukünftigen Option zur Veränderung der Reihenfolge der Arbeitsschritte durch die Nutzer zusätzliche Bedeutung gibt. Automatisierte Erinnerungen zu Eingaben und Fotografien wurden von den MA als nützlich empfunden, jedoch beschrieben sie die generelle Bedienung des AS gerade zu Beginn als umständlich: „Die Struktur könnte etwas klarer sein, aber es

ist nicht so, dass man es nicht bedienen kann.“ Eine Notwendigkeit zusätzlicher kompetenzbildender Schulungen und Workshops sahen die sich selbst als technikaffin beschreibenden MA nicht. Für weniger technikbegeisterte Anwender könnten diese jedoch notwendig werden, weshalb als Mindeststandard eine Ersteinweisung in das System vor dem Gebrauch als sinnvoll erachtet wird.

Die größten Probleme für die Nutzung des Systems sehen beide MA in der fehlenden Kompatibilität mit iOS-Betriebssystemen. So weise „Pocket-Assist“, welches zur Ersterprobung für Android-Systeme entwickelt wurde, bei der Nutzung mit iOS-System kleinere Fehler und Performanceprobleme auf. Eine Umstellung auf Android-Systeme sei in der Firma jedoch nicht möglich, da die digitale Infrastruktur auf iOS optimiert ist. Die daraus resultierenden Probleme werden als so gravierend beschrieben, dass einer der MA sich eine firmeninterne Neuentwicklung vorstellen könnte. Gleichzeitig ist der Mehrwert des Systems jedoch groß genug, dass sich beide MA keine Rückkehr zur klassischen Prüfliste vorstellen möchten: „So ein Assistenzsystem muss dir halt dumme Arbeiten abnehmen. Wenn ich, um ein Protokoll zu generieren, fünf oder zehn Arbeitsschritte habe, die unsinnig sind in der heutigen Welt, ist das genau der richtige Ansatz aus meiner Sicht.“

9.6 Bewertung und Diskussion der Evaluation unter Feldbedingungen

Zur Evaluation des AS unter Feldbedingungen wurden verschiedene Analysen mit unterschiedlichem Erfolg durchgeführt. Die Ergebnisse der **Beanspruchungsuntersuchung** nach NASA-RTLX blieben ohne klare Tendenz. Hier ergaben sich zwar Vorteile für das AS, jedoch tritt in der genaueren Betrachtung der Daten eine sehr hohe Differenz in der Bewertung einer der beiden VP zwischen den beiden Arbeitsmitteln auf. Der entstandene Unterschied ist in der ermittelten Ausprägung nicht allein durch deren Wechsel des Arbeitsgeräts begründbar. Diese könnten im hohen zeitlichen Abstand zwischen den Untersuchungen mit und ohne AS begründet liegen. Dieses Vorgehen war jedoch notwendig, um den betrieblichen Ablauf der Inspektion nicht zu sehr zu beeinflussen. Zudem ist auch auf die sehr geringe Anzahl an VP hinzuweisen, welche jedoch zum Zeitpunkt der Untersuchung für die Inspektionstätigkeiten der untersuchten Partnerorganisation eine Vollerhebung darstellte. Die Ergebnisse des NASA-RTLX sind in der Konsequenz nicht aussagekräftig genug für eine repräsentative Aussage zur Beanspruchungssituation.

In der Untersuchung zur körperlichen **Belastung durch Zwangshaltungen** nach der REBA-Methode wurden möglichst prototypische Körperhaltungen für beide Arbeitsmittel verglichen.

Auch in dieser Untersuchung zeigt sich in den Daten ein Vorteil für das AS, allerdings muss hier ebenfalls ein kausaler Zusammenhang zwischen Arbeitsmittel und Messwert angezweifelt werden. Die zum Teil sehr großen Unterschiede in der Körperhaltungsbewertung sind nur unwesentlich ursächlich den Arbeitsmitteln zuzuordnen, sondern werden mutmaßlich durch die unterschiedlichen Anlagenzustände, verschiedene bauliche Gegebenheiten und Präferenzen im Prüfverhalten der MA beeinflusst. Welcher Stichprobenumfang für eine repräsentative Untersuchung der Körperhaltung nach REBA notwendig wäre, ist an dieser Stelle nur schwer abschätzbar. Aufgrund der vorhandenen Daten und dem extrem hohen Aufwand für eine solche Versuchsreihe ist diese jedoch nicht zu rechtfertigen. Für zukünftige Untersuchungen von Tätigkeiten mit niedriger Wiederholungsrate und erprobten Endgeräten empfiehlt sich eine Körperhaltungsuntersuchung im Feld nur beim begründeten Verdacht einer starken Veränderung durch die getesteten Systeme (bspw. bei Exoskeletten).

Zur Bewertung der **Gebrauchstauglichkeit** wurde der in 7.3 vorgestellte angepasste ISO-NORM 9241/110-S nach Prümper (2008) verwendet. Diesen bewerteten die MA für das AS deutlich besser als bei der PLK. Das kann dadurch begründet werden, dass bei der Entwicklung der Software des AS die Gestaltungsgrundsätze bewusst berücksichtigt wurden, wohingegen bei der PLK lediglich die Ausführbarkeit der Arbeitsaufgabe fokussiert wurde. Das Verfahren wurde zwar speziell zur Evaluation von Software entwickelt, für die Untersuchung jedoch angepasst. Trotzdem sind hier kleinere Bevorteilungen des AS durch die Erhebungsmethode nicht auszuschließen. Die positiven Bewertungen des AS auf Basis des ISONORM 9241/110-S werden durch die nachträglich geführten Interviews zusätzlich untermauert. In diesen sehen die MA zwar noch Verbesserungspotenzial im AS, sind jedoch insgesamt deutlich zufriedener als mit der bisher verwendeten PLK.

Zur Betrachtung der **Durchführungszeit** wurden die MA um die Selbstaufschreibung der Zeiten für unterschiedliche Teiltätigkeiten gebeten. Bei Analyse dieser ergeben sich nur unwesentliche Unterschiede für beide Arbeitsmittel. So waren die MA bei Enercon E66 Anlagen mit dem AS und bei Vestas V90 Anlagen mit der PLK etwas schneller. Die Nachbereitung nahm durch das AS etwas weniger Zeit in Anspruch. Hier würde sich eine wesentliche Zeitersparnis ergeben, wenn die MA ausschließlich mit dieser Arbeitsaufgabe beschäftigt wären. Da die Inspektionen in WEA jedoch 20 % des gesamten Tätigkeitsprofils der MA ausmachen, wirkt sich dieser Vorteil im gesamten Prozess nur geringfügig aus.

In den Interviews konnte keine Beeinflussung des **Entfaltungspotenzials** der MA durch die Einführung des AS festgestellt werden. Diese seien mit dem neuen Arbeitsmittel zwar generell

zufriedener als mit der PLK, konnten jedoch keine aus dem AS begründete Verbesserung der generellen Arbeitszufriedenheit, beruflichen Weiterentwicklungsmöglichkeiten oder Beeinflussung ihres Soziallebens feststellen.

In der Reflexion der Felduntersuchung ist vor allem die geringe Anzahl an VP zu kritisieren. Allerdings ergab sich diese notwendigerweise aus der geringen Anzahl an MA, welche Inspektionen an WEA durchführen. Da der Großteil der Inspektionen aktuell von den untersuchten MA durchgeführt wird, war dies die repräsentativste Möglichkeit, einen realistischen Test des Systems für die Zukunft zu ermöglichen.

Des Weiteren wurden die Untersuchungen (insbesondere mit dem NASA-RTLX) durch den langen Zeitraum zwischen den Erhebungen beeinflusst. Diese Entscheidung wurde aufgrund der organisatorischen Einbindung der Untersuchungen in die regulären Abläufe des analysierten Unternehmens gewählt. Insbesondere für die quantitativen Befragungen sollte bei zukünftigen artgleichen Studien die Zeitspanne zwischen den Evaluationen der Arbeitsmittel deutlich verkürzt werden.

10 Analyse und Reflexion der Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die verwendeten Evaluationsmethoden retrospektiv bewertet und verschiedene Verbesserungspotenziale aufgezeigt. Anschließend werden die in Kapitel 6.1 aufgestellten Forschungsfragen anhand der zusammengefassten Ergebnisse beider Untersuchungsteile beantwortet.

10.1 Reflexion der Evaluationsmethoden

Nachfolgend werden die verschiedenen Untersuchungen und Erhebungsmethoden kritisch hinterfragt und Verbesserungspotenziale aufgezeigt. Die Studie lässt sich generell in die Evaluation unter Labor- und Feldbedingungen unterteilen (vgl. Kap. 8 und 9). In den Laborversuchen wurde nach Vorbild einer WEA eine Arbeitsumgebung mit verschiedenen Arbeitsaufgaben konstruiert. Der Versuchsaufbau kam bereits in vorherigen Studien (Mewes et al., 2019; Mewes et al., 2020) zur Anwendung und konnte in diesem Rahmen iterativ weiterentwickelt werden. Entsprechend war der finale Laboraufbau vor dem Hintergrund der vorhandenen finanziellen und organisatorischen Möglichkeiten weit fortgeschritten.

Bei der **Versuchspersonenzusammensetzung** wurde explizit auf eine diverse Altersstruktur geachtet. Retrospektiv kann dies als Erfolg betrachtet werden, da sich die definierten Altersgruppen in den Ergebnissen teilweise stark unterschieden. Die älteste VP-Gruppe (ü50) war aufgrund des vorzeitigen Abbruchs der Studie ob der SARS-CoV-2-Pandemie (RKI, 2020) und der entsprechenden Reaktion der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (OVGU, 2020) sowie des nachträglichen Ausschlusses der Ergebnisse einer VP infolge mehrerer Extremwerte in den Produktivitätskriterien jedoch leicht unterrepräsentiert.

In den Felduntersuchungen hingegen wurden ausschließlich sehr erfahrene MA untersucht. Die zwei analysierten MA des Partnerunternehmens führten zum Zeitpunkt der Studie ca. 80 % der WEA-Inspektionen durch. Aus diesem Grund wurden alle Felduntersuchungen auf diese beiden Personen beschränkt. Damit ist die VP-Anzahl in der Feldstudie zwar extrem gering, entspricht jedoch nahezu einer Vollerhebung der fokussierten Tätigkeitsklasse.

Als **Endgerät** wurde auf Grundlage des Vergleichs verschiedener Interaktionsvarianten in Mewes et al. (2020) das Smartphone ausgewählt. Diese Voruntersuchung arbeitete jedoch mit einer deutlich altershomogeneren VP-Gruppe, welche sich ausschließlich aus unter 30-Jährigen zusammensetzte. Die Ergebnisse zeigen nun eine deutlich höhere Affinität der ältesten VP zur PLK, welche möglicherweise auf Faktoren wie bessere Lesbarkeit oder einfachere Handhabung

zurückzuführen sind. Diese Vermutung wird von den Aussagen in den Kurzinterviews (vgl. Kap. 8.9) zusätzlich gestützt. Diese VP hätten bei Verwendung eines Tablets evtl. bessere Ergebnisse erzielt, zumal auch in der Voruntersuchung nur leichte Vorteile dafür gegenüber dem Smartphone ermittelt wurden.

Zur Erfassung der Beanspruchung wurde sowohl im Labor als auch im Feld der **NASA-RTLX** Fragebogen verwendet (vgl. Kap. 8.5 und 9.1). Dieser erwies sich für die Laborversuche als geeignet. Bei der Untersuchung im Feld hingegen traten größere Abweichungen auf, die nicht allein durch die Variation des Arbeitsmittels begründbar sind. Eine Verkürzung des Abstands zwischen den Felduntersuchungen, welcher sich betriebsbedingt auf 4 Monate erstreckte, hätte unter Umständen zur Vermeidung dieser Abweichungen beitragen können.

Der Einsatz des **Rapid-Entire-Body-Assessment** (REBA) zur Ermittlung der körperlichen Belastung durch Zwangspositionen im Feld (vgl. Kap. 9.2) erzielte durchwachsene Ergebnisse. So weisen diese zwar auf keine Verschlechterung der Körperhaltung durch den Einsatz des AS hin, aufgrund der geringen Reproduzierbarkeit und Wiederholrate der Arbeitsaufgabe sind jedoch keine belastbaren Aussagen möglich. Ohnehin ist eine Überlastung der MA aufgrund der Körperhaltung durch die geringe Wiederholrate der WEA-Inspektion relativ unwahrscheinlich, da Muskel- oder Skeletterkrankungen durch regelmäßige Untersuchungen vorgebeugt wird.

Zur **Usability-Bewertung** erwies sich der ISONORM 9241/110-S als geeignetes Erhebungsinstrument. Im Ergebnis stellte sich das AS als benutzerfreundlicher heraus als die PLK. Jedoch ist anzumerken, dass der verwendete Fragebogen ursprünglich zur Bewertung von Software entwickelt wurde und somit eine leichte Bevorteilung des digitalen AS zu vermuten ist. Weiterhin traten von Seiten der VP zum Item *Hinweise zur Fehlerbehebung* (ft3) einige verständnisbedingte Nachfragen auf. Den VP war hier unklar, ob sich die Fehlerbehebung auf die Zustände im Versuchsfeld oder durch das Arbeitsmittel provozierte Fehler bezog (aufgrund der standardisierten Verwendbarkeit ist die Fehlerbehebung innerhalb der Arbeitsmittel gemeint). Dadurch ist für besagtes Item die jeweilige Interpretation der nicht nachfragenden VP unklar. Bei einer erneuten Untersuchung gleicher Art ließen sich durch eine Anpassung des Items Missverständnisse vermeiden.

In der Messung der **Durchlaufzeiten** wurde im Labor ein statistisch signifikanter Zeitunterschied festgestellt, wobei das AS einen 28,8 % höheren Zeitbedarf aufweist, als die PLK. Obwohl durch die Selbstaufschreibungen bei den Inspektionen im Feld kein statistisch signifikanter Unterschied der Inspektionszeiten vorgefunden wurde, weisen die Zeiten dort dennoch auf

eine Gleichrangigkeit der Arbeitsmittel hinsichtlich der Ausführungszeit hin. Mögliche Ursachen für die Differenz zwischen den Erhebungen in Labor und Feld liegen bspw. in der Vereinfachung der Tätigkeiten für die Laborversuche. Zudem ist die „Inspektion in der WEA“ eine kooperative Tätigkeit zweier MA, die zur Komplexitätsreduktion im Labor nur von einer Person ausgeführt wurde. Die zeitgleiche Arbeit von zwei Personen in einem Prüfprotokoll hatte so im Labor, anders als im Feld, keinen Effekt.

Zum Vergleich der **Anzahl aufgetretener Fehler** wurden im Laborversuch die von den VP begangenen Inspektionsfehler untersucht. Hierbei wurden im Nachhinein einige ablaufbedingte Flüchtigkeitsfehler der Versuchsleitung, wie bspw. falsch erzeugte Zustände, festgestellt. Derartige Fehler traten auch in den Untersuchungen von Mewes et al. (2019) und Mewes et al. (2020) auf und sind generell nur schwer vermeidbar. Durch die nachträgliche Bereinigung sollten diese jedoch nur minimale Auswirkungen auf die Ergebnisse haben.

Die **leitfadengestützten Interviews** dienten zur Erfassung der nicht quantifizierbaren Anteile der Leistung und des Entfaltungspotenzials der MA. In den Interviews wurden keine größeren Unterschiede der genannten Parameter festgestellt. Alternativ wäre eine genauere Betrachtung der psychischen Belastung oder ähnlicher Parameter durch quantitative Instrumente vor und nach Einführung des AS „Pocket-Assist“ möglich gewesen. Hier hätten jedoch verschiedenste Veränderungen in den Arbeits- und Lebenssituationen der MA zwischen den Untersuchungsteilen die Ergebnisse beeinflussen können. Dadurch wäre eine klare Zuordnung eventuell festgestellter Unterschiede zum Wechsel des Arbeitsmittels nicht möglich gewesen.

10.2 Beantwortung der Forschungsfragen

In diesem Abschnitt sollen die in 6.1 aufgestellten Forschungsfragen beantwortet werden.

F₁: Entstehen bei der Nutzung des Assistenzsystems „Pocket-Assist“ höhere Beanspruchungen als bei der Verwendung der Prüfliste mit zugehöriger Kamera?

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurden Untersuchungen mit dem NASA-RTLX durchgeführt (vgl. Kap. 8.5 und 9.1). Die Untersuchungen im Feld lassen aufgrund der beschriebenen Unsicherheiten im Datenmaterial keine entsprechenden Schlussfolgerungen zu.

In den Laborergebnissen ließen sich in der Gesamtheit der VP nur sehr geringe Unterschiede in der Beanspruchung der VP feststellen. Bei genauerer Betrachtung der Altersgruppe ≥ 50 ergeben sich für die geistige Beanspruchung und Anstrengung erhöhte Werte für das AS. Diese reduzierten sich jedoch bei der zweiten Verwendung stark. Insgesamt ist anzunehmen, dass

durch das AS und die zu dessen Bedienung erforderliche Digitalkompetenz leichte zusätzliche Beanspruchungen entstehen. In den Untersuchungen zeigten sich diese insbesondere in der Altersgruppe ≥ 50 , welche im Mittel weniger erfahren im Umgang mit digitalen AS ist. Aufgrund der stark sinkenden Beanspruchung bei der Zweitverwendung ist jedoch anzunehmen, dass eine schnelle Gewöhnung an das neue Arbeitsmittel eintritt und in der Folge nicht mit negativen Beanspruchungen oder gar Beanspruchungsfolgen auf Seiten der Mitarbeitenden zu rechnen ist.

F₂: Entsteht durch das Assistenzsystem „Pocket-Assist“ bei der Verwendung eines Smartphones als Endgerät eine höhere Belastung durch die Körperhaltung als bei der Verwendung der Prüfliste mit zugehöriger Kamera?

Die Felduntersuchung der Belastung aus Körperhaltungen nach Rapid-Entire-Body-Assessment (vgl. Kap. 9.3) ermöglichte keine eindeutige Beantwortung dieser Forschungsfrage. Entgegen der Vermutungen aus den Voruntersuchungen ergaben sich aus den baulichen Gegebenheiten der WEA und dem jeweiligen Anlagenzustand sehr viele Störfaktoren. Aus diesem Grund ist eine klare Aussage zu Veränderungen in den zwangshaltungsinduzierten Körperhaltungen seit Einführung des AS nicht möglich. Die vorhandenen Ergebnisse lassen allerdings keinen Zusammenhang zwischen Arbeitsmittel und körperlicher Belastung vermuten.

F₃: Weist das Assistenzsystem „Pocket-Assist“ eine bessere Gebrauchstauglichkeit auf als die Prüfliste mit zugehöriger Kamera?

Die Untersuchungen der Usability mit Hilfe des angepassten ISONORM 9241/110-S im Feld und im Labor (vgl. Kap. 8.6 und 9.3) weisen auf einen signifikanten Vorteil des AS gegenüber der PLK hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit hin ($p=0,024$). Der Großteil der Items wurde von den VP im Labor und den MA im Feld in ähnlichen Ausprägungen bewertet. Unterschiede in der Tendenz der Ausprägungen traten in der Bewertung der Gestaltungsgrundsätze Erwartungskonformität, Lernförderlichkeit und Individualisierbarkeit auf. Die entsprechenden Ergebnisse werden nachfolgend diskutiert.

Die Erwartungskonformität wurde für die PLK in den Felduntersuchungen leicht besser bewertet als im Labor. Beeinflusst wird dieses Ergebnis insbesondere vom Unterschied in der Bewertung der *Information über den eigenen Zustand* (ek2), welche mit einer Ausprägung von 2,5 von den MA um zwei Skalenpunkte besser bewertet wurde als von den VP im Labor. Ursachen können in der höheren Komplexität der Aufgabe während der Feldtests und der damit einher-

gehenden höheren Komplexität beider Dokumentationen zu finden sein. Eine andere Möglichkeit ist die deutlich höhere Expositionsdauer der MA zu beiden Arbeitsmitteln. Diese wurden von ihnen deutlich länger verwendet, so dass das Auftreten von Fehlern oder unvorhergesehenen Interaktionsrückkopplungen bedeutend wahrscheinlicher wird.

Die Lernförderlichkeit stuften die MA in den Felduntersuchungen, anders als die VP im Labor, mit Vorteilen für das AS ein. Dieser Unterschied äußert sich im Besonderen durch die geringere *Notwendigkeit des Merkens von Details* (If2), bei der die PLK mit -1,5 um 2,7 Skalenwerte schlechter als das AS bewertet wurde. Dies ist durch eine Reduktion der notwendigen Absprachen im Feld auf Grund der Verwendung des AS zu begründen. Während die VP im Labor Arbeitsstationen in Einzelarbeit inspizieren, ist im Feld eine Kooperation der MA notwendig. Hierbei muss sich der nicht schriftführende MA bei Verwendung der PLK die Zustände der einzelnen Stationen merken, bis er sich mit dem Kollegen austauscht. Bei der Verwendung des AS „Pocket-Assist“ hingegen ist eine gleichzeitige Bearbeitung in einem Protokoll möglich, was wiederum das Merken der Prü fzustände überflüssig macht. Insgesamt wurden beide Arbeitsmittel im Feld schlechter bewertet. Hier lässt sich zusätzlich ein Zusammenhang zwischen der deutlich größeren Komplexität der Arbeitsaufgabe und dem entsprechend höheren Anspruch an die Arbeitsmittel vermuten.

In der Individualisierbarkeit bewerteten die MA des technischen Service das AS deutlich besser als die VP in den Labortests. Dabei ist eine gleichmäßige Verbesserung aller Einzelparameter erkennbar. Als Begründung lässt sich hier die Anpassbarkeit der Inhalte und Reihenfolgen des AS im Autorenmodus anführen. So haben die MA die Checklisten aus ihren eigenen Unterlagen selbst erstellt und sind sich der Möglichkeit, Anpassungen vorzunehmen, bewusst. Die VP hingegen arbeiteten mit einer vorgefertigten Liste und hatten nie Kontakt mit dem Autorenmodus.

F₄: Ermöglicht die Einführung des Assistenzsystems „Pocket-Assist“ den Mitarbeitenden zusätzliche Freiräume für wichtigere Tätigkeiten oder persönliche Weiterentwicklung?

Die in Abschnitt 9.5 geführten leitfadengestützten Interviews lassen keinen Zusammenhang zwischen AS und der persönlichen Weiterentwicklung der MA vermuten. Dieses wirkte sich weder positiv noch negativ aus, wobei eine mögliche Überforderung weniger technologieaffiner MA allerdings auf Grundlage vorgefundener Daten nicht auszuschließen ist.

F₅: Beeinflusst das Assistenzsystem „Pocket-Assist“ die Kommunikation zwischen den Inspektoren während der Anlageninspektion negativ?

Auch in der Kommunikation wurde in den Interviews aus Kapitel 9.5 keine negative Beeinflussung durch das AS festgestellt. Zwar ist eine ablaufbedingte Abstimmung der MA nun etwas seltener notwendig, generell stehen diese jedoch noch immer in ständigem Kontakt.

F₆: Verkürzt das Assistenzsystem „Pocket-Assist“ die Bearbeitungszeit eines Inspektionsauftrags im Vergleich zur Prüfliste mit zugehöriger Kamera?

Zur Beantwortung diese Forschungsfrage wurde die Durchführungszeit sowohl im Labor gemessen (vgl. Kap. 8.7) als auch in der Felduntersuchung durch Selbstaufschreibung erfasst (vgl. Kap. 9.4). Für die im Labor konstruierten Arbeitsaufgaben wurde bei der Nutzung des AS ein zusätzlicher Zeitaufwand von 29 % ermittelt. Hierbei ergaben sich jedoch für VP verschiedenen Alters starke Unterschiede in der Durchführungszeit. So ist die Zeiteinsparung in der jüngsten VP-Gruppe (u30) mit 12 % deutlich geringer als bei der ältesten (ü50) mit 38 %. Jedoch bearbeiteten alle VP die gestellten Aufgaben in den Laborversuchen mit der PLK schneller als mit dem AS.

Die Zeitbetrachtung im Feld unterteilt sich in die Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung einer WEA-Inspektion. Hierbei wurden zwischen den Arbeitsmitteln nur marginale Unterschiede festgestellt. Die zur Vorbereitung erfassten Daten lieferten nicht die nötige Genauigkeit für eine Aussage, jedoch ist hier keine starke Beeinflussung durch die Einführung des AS zu erwarten. Bei der Durchführung wurden, abhängig vom untersuchten Anlagentyp, für beide Arbeitsmittel kleinere Zeitvorteile ermittelt. Diese befanden sich allerdings im niedrigen einstelligen Prozentbereich, so dass insgesamt kein klarer Vorteil für eine Lösung ermittelt werden konnte. In der Nachbereitung benötigten die MA für die Aufbereitung der maschinenlesbaren Daten des AS etwas weniger Zeit. Obwohl an dieser Stelle eine Zeiteinsparung von gut 20 % erreicht werden konnte, macht sich die 1,5-minütige Zeiteinsparung im ca. einstündigen Gesamtprozess kaum bemerkbar. Die mobile Technologie ermöglicht allerdings eine höhere Flexibilität in der Anlageninspektion. So kann dank des AS spontan eine weitere Anlage in den Inspektionsvorgang integriert werden, was im Bedarfsfall zu immensen Zeitersparnissen führen kann. Insgesamt konnte der Arbeitsprozess der WEA-Inspektion mit dem AS minimal schneller ausgeführt werden.

Eine klare Beantwortung der Forschungsfrage ist an dieser Stelle nicht möglich. Allerdings ist der wahrscheinliche Zeitvor- oder -nachteil im Arbeitsprozess von keiner besonderen Relevanz im Verhältnis zum gesamten Arbeitsprozess.

F7: Kann das Assistenzsystem „Pocket-Assist“ gegenüber der Prüfliste mit Kamera die Entstehung verschiedener Inspektionsfehler verhindern?

Die Fehlerhäufigkeit der Systeme wurde im Labor getestet (vgl. Kap. 8.8). Hier traten bei Verwendung des AS insgesamt 35 % weniger Fehler auf als bei der PLK. Analog zu den Betrachtungen der Durchführungszeit profitierten hier ebenfalls insbesondere jüngere VP vom Einsatz des AS. Insgesamt wurden hier für VP unter 50 mit dem AS nur ca. 60 % der Fehler festgestellt, die mit der PLK auftraten. VP ü50 hingegen begingen mit der PLK ca. 35 % weniger Fehler als mit dem AS. Vermieden wurden Fehler hauptsächlich beim Anfertigen von Fotografien, welche bei Verwendung des AS 80 % seltener vergessen wurden. Insgesamt kann die Fehlerhäufigkeit durch das AS „Pocket-Assist“ also deutlich reduziert werden.

F8: Wird durch das Assistenzsystem „Pocket-Assist“ zusätzlicher Mehrwert für die Auftraggeber geschaffen?

Eine mögliche Steigerung des Leistungsumfangs wurde in leitfadengestützten Interviews mit den Service-MA erfragt (vgl. Kap. 9.5). Beide Experten konnten keine neuen Mehrwerte für die Auftraggeber feststellen. So wurde das Leistungsspektrum mit der Einführung des AS weder erweitert noch reduziert.

F9: Ermöglicht das Assistenzsystem „Pocket-Assist“ eine Ersparnis durch die Vermeidung von Personalkosten?

Eine Ersparnis wäre möglich, wenn die verkürzte Bearbeitungsdauer eine Einsparung in den Personalkosten zur Folge hätte, welche die Anschaffungskosten der AS übersteigt. Mit der im Projekt ArdiAS gewonnenen Erfahrung der Verbundpartner IFF und METOP GmbH wäre das AS „Pocket-Assist“ in ca. 20 Arbeitstagen umsetzbar (Autorenmodus, Front-End, Ausgabe und Testing jeweils fünf Werktage). Bei einem Tagessatz von 900 € ergeben sich Kosten für die Software in Höhe von 18.000 €. Als Gerätekosten für die zwei Endgeräte und den Raspberry Pi sind ca. 2.000 € zu veranschlagen, wodurch Gesamtkosten von ca. 20.000 € entstehen. Wird nun eine Zeitersparnis von 10 Minuten pro Anlage inklusive Nachbereitung und ein Stundensatz der MA von 100 € angenommen, amortisiert sich das AS nach ca. 1.200 Anlagen. Pro Jahr werden vom untersuchten Unternehmen jedoch nur 100 Anlagen im halbjährlichen Rhythmus

inspiziert. Im Ergebnis dieser hypothetischen Berechnung kann von keiner Amortisation der Entwicklungskosten durch eingesparte Personalkosten ausgegangen werden.

11 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Dissertation wurde ein Modell zur ganzheitlichen Bewertung der Güte von digitalen Assistenzsystemen (AS) auf Grundlage der arbeitswissenschaftlichen Gestaltungsziele nach Hacker (1986) und Quaas (1999) erarbeitet (vgl. Kap. 3). Anschließend wurde anhand des Modells das digitale AS „Pocket-Assist“ (vgl. Kap. 5), welches für die „Inspektion von Windenergieanlagen“ (vgl. Kap. 4) entwickelt wurde, im Vergleich mit der dort zuvor verwendeten Prüfliste mit Kamera (PLK) evaluiert. Dazu wurden verschiedene Forschungsfragen aufgestellt und in Labor- und Felduntersuchungen kritisch beleuchtet (vgl. Kap. 6, 8, und 9).

Aus der Beantwortung der aufgestellten Forschungsfragen (vgl. Kap. 10.2) ergeben sich bei Betrachtung des Analyse- und Bewertungsmodells verschiedene Veränderungen durch die Einführung des AS „Pocket-Assist“ (dargestellt in Abbildung 61).

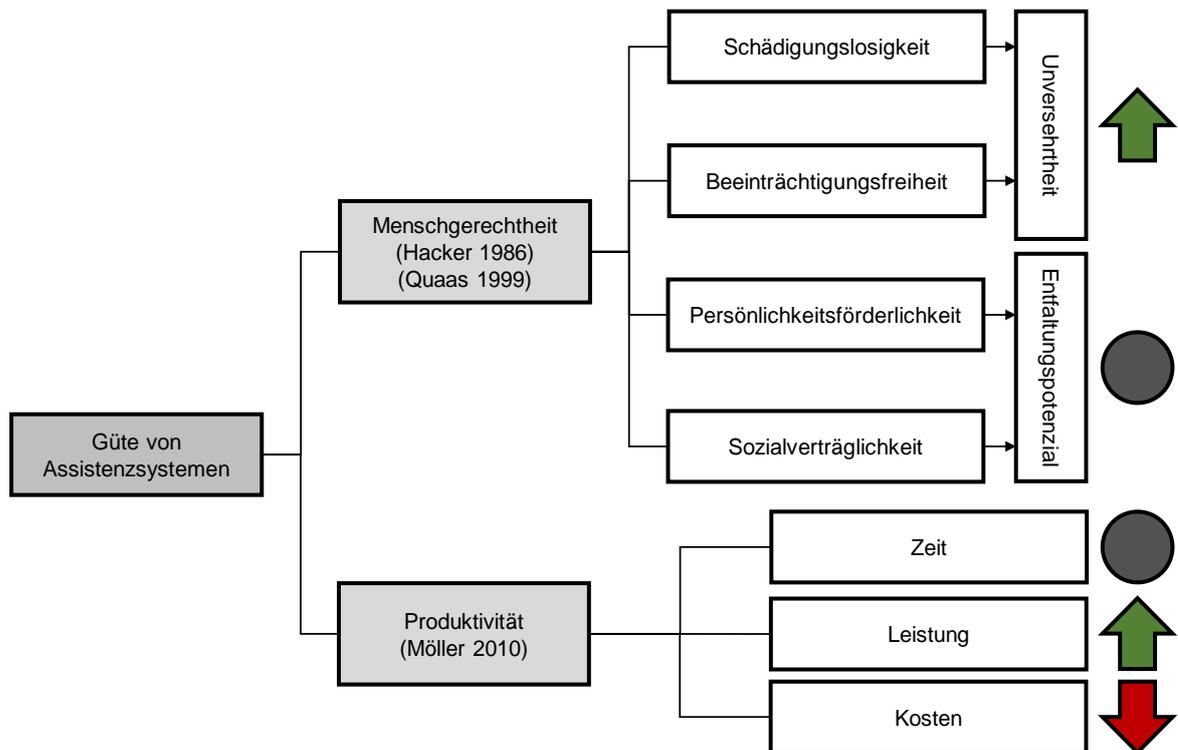


Abbildung 61: Auswirkungen des Assistenzsystems "Pocket-Assist" auf die Arbeitsaufgabe „Inspektion von Windenergieanlagen“

So wurde die **Menschgerechtigkeit** anhand einer verbesserten Unversehrtheit der MA durch die Einführung des AS positiv beeinflusst. Diese Schlussfolgerung begründet sich hauptsächlich durch die bessere Bewertung der Nutzerfreundlichkeit nach ISONORM 9241/110-S. Die zusätzlich zur Erfassung der Unversehrtheit eingesetzten Erhebungsmethoden Rapid Entire Body Assessment und NASA-RTLX zeigten keine größeren Unterschiede zwischen den verwendeten Arbeitsgeräten. Auch das Entfaltungspotenzial scheint sich entsprechend der Ergebnisse der

leitfadengestützten Interviews durch die aktuelle Version des AS nicht zu verändern. Eventuelle Verbesserungen bei der Einarbeitung neuer Servicekräfte wurden hierbei jedoch aufgrund des hohen Aufwands für eine entsprechende Erhebung nicht ermittelt. Hier bieten sich Potenziale für Folgeuntersuchungen.

Bei den Kriterien der **Produktivität** ergaben sich gegenläufige Tendenzen. So wurden im Labor bei der Verwendung des AS gegenüber der PLK 35 % der Inspektionsfehler verhindert, ein Effekt, welcher sich bei jüngeren VP verstärkend auswirkt. Vermieden wurden dabei insbesondere das Auslassen (Vergessen) des Fotografierens verschiedener Prüfstellen.

Die im Labor gemessenen **Durchführungszeiten** hingegen ergaben für das AS gegenüber der PLK einen um 20 % höheren Zeitbedarf. Diese Tendenz konnte sich unter Feldbedingungen jedoch nicht bestätigen. Dort wurde in mehr als 20 Anlagen zweier verschiedener Anlagentypen für die Durchführung der Inspektion kein prozessrelevanter zeitlicher Unterschied festgestellt. Mögliche Gründe für diese Abweichungen ergeben sich aus der für die Durchführung der Laborversuche notwendigen Vereinfachung der Arbeitsaufgabe, welche die Reduktion der kooperativen Tätigkeit in der Windenergieanlage auf ausschließliche Einzelarbeit erforderte. Auf diese Weise konnten sich eventuelle Zeiteinsparungen durch die Reduzierung ablaufbedingter Absprachen nicht auswirken. Im Feld wurde zusätzlich eine Zeiteinsparung in der Nachbereitung ermittelt, welche aufgrund des relativ geringen Anteils an der Gesamtzeit der Inspektion allerdings keine größeren Produktivitätssteigerungen zur Folge hat. Insgesamt kann auf Grundlage der Ergebnisse weder von einer Erhöhung noch von einer relevanten Reduktion der Dauer des gesamten Inspektionsprozesses ausgegangen werden. In Zukunft ist durch eine zusätzliche mitarbeiterseitige Gewöhnung an die Technologie eine weitere Reduzierung der Inspektionszeit durch Lerneffekte möglich. Die aktuelle Datenlage lässt jedoch nicht vermuten, dass sich diese relevant auswirkt.

Besonders herauszustellen sind die im Laborversuch ermittelten Unterschiede in der **Produktivität** der einzelnen Altersgruppen mit dem AS. So traten mit diesem in der jüngsten VP-Gruppe (u30) 64 % weniger Inspektionsfehler auf als in der ältesten (ü50). Gleichzeitig benötigten die jüngeren VP nur 70 % der Inspektionszeit. Diese Abweichung lässt sich zum einen auf die höhere Digitalkompetenz der jüngeren Zielgruppe zurückführen, welche mit den entsprechenden Geräten regelmäßigeren und intensiveren Kontakt hat. Zum anderen sind auch sinnesphysiologische Unterschiede und die persönliche Affinität der VP mögliche Einflussgrößen, welche diese Ergebnisse begründen.

Bei der Betrachtung der **Kosten** ergibt sich aus der bestenfalls sehr geringen Einsparung an Inspektionszeit gegenüber den Anschaffungskosten von Soft- und Hardware kein Vorteil. Vielmehr wäre das AS auch in der mittelfristigen Zukunft ein zusätzlicher Kostenfaktor.

Für eine Verbesserung des Gütekriteriums **Produktivität** ist also die Erhöhung der Qualität durch eine Inkaufnahme zusätzlicher Kosten erreichbar. Zur Gesamtbewertung der Güte digitaler AS ist jedoch eine selektive Betrachtung der unmittelbaren Servicetätigkeit in der Anlage nicht ausreichend. Hier könnte die Untersuchung der Einbettung der Systeme in den Gesamtprozess der Service-Dienstleistung zahlreiche Potenziale aufweisen. So lassen sich durch den aufgezeigten methodischen Ansatz keine Effekte durch z. B. durchgängige digitale Dokumentation, Vermeidung von Doppelparbeit durch simultane Prüflistenabarbeitung oder des Wissensmanagements für die Einarbeitung neuer MA nachweisen. Beispielsweise haben sich die erwarteten zeitlichen Verkürzungen in der Nachbereitung zwar nicht eingestellt, es ist jedoch zu berücksichtigen, dass eine durchgängige digitale Dokumentation auch über diesen Prozessschritt hinaus wirkt. Derartige Effekte wurden im Untersuchungsansatz dieser Dissertation nicht geprüft und bieten Potenziale für weitere Folgestudien.

Zur Optimierung des AS könnte eine Erweiterung der im System speicherbaren Fotografien den Einsatz bei verschiedenen Spezialaufträgen ermöglichen. Hierbei muss eine große Menge an Fotos (ca. 50-100) an verschiedenen Prüfstationen aufgenommen werden. Aktuell unterstützt das AS „Pocket-Assist“ drei Fotografien je Prüfstation. Zudem würde eine Einbindung des Blitzlichtes der jeweiligen Endgeräte die Qualität der Fotografien deutlich steigern.

Insgesamt war eine leichte Verbesserung der Inspektion von WEA durch das AS festzustellen. Allerdings wurden vor Beginn des Projektes und der Evaluation vom Entwicklungs- und Forscherteam insbesondere durch die Teilautomatisierung in der Nachbereitung deutlichere Zeiteinsparungen erwartet, welche in dieser Form nicht erreicht wurden. Zu begründen ist diese Abweichung von Erwartung und Erhebung durch den, im Verhältnis zur gesamten Untersuchung, sehr geringen Anteil der Nachbereitung. Diese wird von den MA als störend und lästig empfunden, weswegen sie diese wahrscheinlich als sehr zeitraubend empfanden und in den Vorgesprächen auch als solche darstellten. Die Anreise zum Inspektionsort, welche je nach Entfernung einen sehr hohen Anteil der Inspektionszeit in Anspruch nimmt, wurde an dieser Stelle aufgrund ihrer schlechten Reproduzierbarkeit nicht berücksichtigt. Diese hätte die Richtung der Ergebnisse jedoch möglicherweise weiter verstärkt. Die untersuchten Anwendungspartner bewerteten die Einführung des AS durchweg positiv, da die zusätzliche Strukturierung

ihrer Arbeit, die Vermeidung verschiedener Inspektionsfehler und die zusätzlichen Komfortfunktionen eine deutliche Optimierung ihrer Arbeitssituation und -ergebnisse ermöglichten.

Auf Basis von Erhebungen, die mit der „Analyse, Bewertung und Gestaltung von Tätigkeiten unter Berücksichtigung von Sicherheit und Gesundheit - ErgoInstrument REBA 9.0“ Software (Pohlandt, 2009) vorgenommen wurden, ergeben sich keine größeren Unterschiede. Geringe Verbesserungen nach der Einführung des AS wurden im zeitlichen Spielraum der Tätigkeit und richtigen Nutzung handlungsrelevanter Informationen erzielt. Leichte Verschlechterungen entstehen laut der Software in den Kommunikationsinhalten. Die Ergebnisse der REBA 9.0-Software für beide Arbeitsmittel sind in Anhang D hinterlegt.

Bisher nicht untersuchtes Potenzial bietet die datenbankbasierte Anlagenstatistik, welche durch die digitale Erfassung der Inspektionsdaten ermöglicht wird. So könnten nach mehrmaliger Inspektion mit Einsatz des AS einzelne Anlagen oder Anlagentypen, welche spezifische Fehler aufweisen, identifiziert und so in Zukunft passgenauer inspiziert werden. Für die Evaluation solcher Features sind jedoch im Vorfeld mehrere Jahre der Datenerhebung notwendig.

Weiterhin bietet die digitale Datenerfassung zusätzliche Potenziale bei Anlagenschnittstellen und der Übertragung der Daten an die Kunden. Hierbei könnten zum einen verschiedene Maschinendaten vom AS abgerufen und automatisch verarbeitet werden, sodass deren manuelle Übertragung durch die MA obsolet wird. Zum anderen wäre eine direkte Übertragung der Daten an die jeweiligen Kunden möglich, welchen im besten Fall die Inspektionsergebnisse in Echtzeit präsentiert werden könnten. Aufgrund der hohen Entwicklungsaufwände und komplexen Schnittstellen der einzelnen Maschinen, wurde darauf jedoch bisher verzichtet.

Zusammenfassend kann das methodische Vorgehen der durchgeführten Evaluation nach dem aufgestellten Modell als erfolgreich betrachtet werden. Durch eine strukturierte Betrachtung verschiedener Parameter wurden Vor- und Nachteile des untersuchten Systems aufgedeckt. Für andere Anwendungsfälle ist die Auswahl der jeweiligen Erhebungsmethoden stets auf den Anwendungsbereich zu prüfen und gegebenenfalls zu variieren. Die aufgezeigte methodische Vorgehensweise hat sich zur Bewertung der Einführung und Gestaltung digitaler AS in der ortsflexiblen mobilen Arbeit insgesamt bewährt und stellt eine wertvolle Ergänzung der Methodik der Arbeitswissenschaft dar. Aufgrund der Untersuchungsmethodenvariabilität kann das entwickelte Modell unter dem schnelllebigen multikausalen Veränderungsdruck der Arbeitswelt 4.0 auch außerhalb des technischen Service langfristig genutzt werden.

Literaturverzeichnis

- Abele, N. D. & Kluth, K. (2020): Beanspruchungsbezogene Evaluierung AR-basierter versus papierunterstützter Rüstinstruktionen zur Einrichtung von Industriemaschinen. In: *Digitale Arbeit, digitaler Wandel, digitaler Mensch? Proceedings des 66. Frühjahrskongresses der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft*, B.2.1, Dortmund: GfA-Press.
- Apt, W., Bovenschulte, M., Priesack, K., Weiß, C. & Hartmann, E. A. (2018). *Forschungsbericht 502 - Einsatz von digitalen Assistenzsystemen im Betrieb*. Berlin: Bundesministerium für Arbeit und Soziales, Institut für Innovation und Technik.
- Barfield, W. (2015). *Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality*. Boca Raton: CRC Press.
- BAuA, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (2016). *Head-Mounted Displays - Arbeitshilfen der Zukunft - Bedingungen für den sicheren und ergonomischen Einsatz monokularer Systeme*. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA).
- BDEW, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (12. Dezember, 2019). Anteil der Bruttostromerzeugung aus Windkraft an der Gesamterzeugung in Deutschland in den Jahren 1998 bis 2019. In: Statista. Zugriff am 21. September 2020, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/239528/umfrage/anteil-der-stromerzeugung-aus-windkraft-in-deutschland/>
- Bendel, O. (2019). Gabler Wirtschaftslexikon - Smartwatches. Zugriff am 21. September 2020, von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/smartwatch-54075/version-368819>
- Bergmann, B. & Jens, W. (1997). Beschreibung der Störungsdiagnosekompetenz bei Instandhaltungstätigkeiten in der flexiblen automatisierten Fertigung. In: N. Schaper & K. Sonntag (Hrsg.), *Störungsmanagement und Diagnosekompetenz*. Zürich: Hochschulverlag Zürich.
- BMAS, Bundesministerium für Arbeit und Soziales (2016). *Weissbuch Arbeiten 4.0 - Arbeit weiter denken*. Berlin.

- BMWi. (30. März, 2020). Investitionen in den Bau neuer Windenergieanlagen in Deutschland in den Jahren 2007 bis 2019 (in Milliarden Euro). In: Statista. Zugriff am 21. September 2020, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/162632/umfrage/investitionen-in-windenergieanlagen-in-deutschland-und-weltweit-seit-2000/>
- Bosse, C. K., Hellge, V. & Schröder, D. (2019). Digitalisierung im Mittelstand erfolgreich gestalten. In: C. K. Bosse & K. J. Zink (Hrsg.), *Arbeit 4.0 im Mittelstand*. (S. 1-11) Kaiserslautern: Springer.
- Brandt, C. (2010). *Mobile Arbeit – Gute Arbeit? - Arbeitsqualität und Gestaltungsansätze bei mobiler Arbeit?* Berlin: ver.di - Vereinte Dienstleistungsgewerkschaft.
- Brauer, R. R., Fischer, M., N. & Grande, G. (2015). Akzeptanzorientierte Technikentwicklung. In: R. Weidner, T. Redlich & J. P. Wulfsberg (Hrsg.), *technische Unterstützungssysteme* (S. 140-146). Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Brettschneider, M., Drössler, S., Magister, S., Zeiser, M., Kämpf, D. & Seiler, A. (2020). Digitalisierung und Psyche – Rahmenbedingungen für eine gesunde Arbeitswelt. Ergebnisse des Projektes GAP. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 74, (S. 63-75).
- Brooke, J. (1996). SUS - a quick and dirty usability scale. In: P. W. Jordan, B. Thomas, B. A. Weerdmeester & I. L. McClelland (Hrsg.), *Usability evaluation in industry* (S. 189–194). London: Taylor & Francis.
- Bruhn, P. (2020). *Homeoffice und mobiles Arbeiten im Team effektiv umsetzen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Brynjolfsson, E. (1993). The Productivity Paradox of Information Technology. *Communications of the ACM*, (S. 67-77).
- Caffier, G., Steinberg, U. & Liebers, F. (1999). *Praxisorientiertes Methodeninventar zur Belastungs- und Beanspruchungsbeurteilung im Zusammenhang mit arbeitsbedingten Muskel-Skelett-Erkrankungen*. Dortmund, Berlin: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- Carstensen, T. (2020). Orts- und zeitflexibles Arbeiten: Alte Geschlechterungleichheiten und neue Muster der Arbeitsteilung durch Digitalisierung. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 74, (S. 195–205).
- Csikszentmihalyi, M. (2014). *Flow and the Foundations of Positive Psychology*. Dordrecht: Springer.

- Davis, F. D., Bagozzi, R. P. & Warshaw, P. R. (1989). User Acceptance Of Computer Technology: A Comparison Of Two. *Management Science*, 35(8), (S. 903-1028).
- DGFP, Deutsche Gesellschaft für Personalführung e. V. (2016). *Leitfaden: Kompetenzen im digitalisierten Unternehmen*. Frankfurt: DGFP-Praxispapiere.
- DGUV, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung. (2014). DGUV Information 203-007 – Windenergieanlagen. Abgerufen am 25.09.2020, von <https://www.arbeitssicherheit.de/schriften/dokument/0%3A5004841%2C20.html>
- DGUV, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2015). *DGUV Information 215-410 Bildschirm- und Büroarbeitsplätze*. Berlin: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V.
- DGUV, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2016). *DGUV Information 215-450 - Softwareergonomie*. Berlin: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V.
- DIN 33402-2. (2005). *Ergonomie - Körpermaße des Menschen - Teil 2: Werte*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN-31051. (2012). *Grundlagen der Instandhaltung*. Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN-9241-100. (2006). *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN-EN-13306. (2018). *Instandhaltung - Begriffe der Instandhaltung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN-EN-ISO-6385. (2016). *Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN-EN-ISO-9241-11. (2017). *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 11: Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN-EN-ISO-9241-210. (2019). *Entwurf: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme (ISO/FDIS 9241-210:2019)*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Ducki, A. & Nguyen, H. (2016). *Psychische Gesundheit in der Arbeitswelt - Mobilität*. Dortmund, Berlin, Dresden: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA).

- Eberlin, S. & Hock, B. (2014). *Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme*. München: Springer Vieweg.
- Empirica. (2000). Benchmarking Progress on new ways of working and new Forms of Business across Europe. Abgerufen am 21.10.2020, von <https://web.fhnw.ch/personenseiten/najib.harabi/publications/books/benchmarking-progress-of-telework-and-electronic-commerce-in-europe>
- Engels, B. (2017). Bedeutung von Standards für die digitale Transformation. In: *IW - Trends*, (S.21-40).
- Engels, D. (2016). Chancen und Risiken der Digitalisierung der Arbeitswelt. In: ISG - Institut für Sozialforschung und Gesellschaftspolitik GmbH, *Forschungsbericht 467 Chancen und Risiken der Digitalisierung der Arbeitswelt für die Beschäftigung von Menschen mit Behinderung*. S.(13-57) Köln: Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS).
- eResult. (2014). Wo nutzen Sie Ihren Tablet-PC? In: Statista. Abgerufen am 23. September 2020, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/182959/umfrage/ort-der-nutzung-von-tablets-in-deutschland/>
- Eurostat. (2015). Anteil der Beschäftigten in europäischen Ländern, die bei der Arbeit einen PC verwenden in den Jahren 2013 und 2014. In: Statista. Abgerufen am 21.09.2020, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/162953/umfrage/anteil-der-europaeischen-beschaeftigten-die-bei-der-arbeit-einen-pc-verwenden/>
- Evers, C. (2009). Auswirkungen von Belastungen und Stress auf das Verkehrsverhalten von Lkw-Fahrern - Inaugural-Dissertation. Bonn. Abgerufen am 21.09.2020, von <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:5-18430>
- Gasch, R. & Schubert, M. (2016). Aus der Geschichte der Windräder. In: R. Gasch & J. Twele, *Windkraftanlagen - Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb* (Bd. 9). Berlin: Springer Vieweg.
- Gerdenitsch, C. K. (2019). *Digitale Transformation der Arbeitswelt : Psychologische Erkenntnisse zur Gestaltung von aktuellen und zukünftigen Arbeitswelten*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Grunau, P., Ruf, K., Steffes, S. & Wolter, S. (2019). Mobile Arbeitsformen aus Sicht von Betrieben und Beschäftigten. Homeoffice bietet Vorteile, hat aber auch Tücken. *IAB-Kurzbericht: Aktuelle Analysen aus dem Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung*, (S. 1-12).

- Haase, T. (2017). *Industrie 4.0: Technologiebasierte Lern- und Assistenzsysteme für die Instandhaltung - Dissertation*. Bielefeld: wbv.
- Haase, T., Keller, A., Radde, J., Berndt, D., Fredrich, H. & Dick, M. (2020). Integrierte Lern- und Assistenzsysteme – Vorschlag für eine Systematik zur Technologieauswahl und -gestaltung. *Digitale Arbeit, digitaler Wandel, digitaler Mensch? Proceedings des 66. Frühjahrskongresses der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft, B.5.1*, Dortmund: GfA-Press.
- Hacker, W. (1986). *Arbeitspsychologie - Psychische Regulation von Arbeitstätigkeiten*. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften.
- Hart, S. G. (1986). *NASA Task Load Index (TLX). Volume 1.0; Paper and Pencil Package*. Moffett Field - Californien - USA.
- Hart, S. G. (2006). Nasa-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later. *proceedings of the human factors and ergonomics society 50th annual Meeting*, (S. 904–908).
- Hau, E. (2016). *Windkraftanlagen - Grundlagen. Technik. Einsatz. Wirtschaftlichkeit* (Bd. 6). Krailling: Springer.
- Hignett, S. & Lynn, M. (2000). Rapid eintire body assessment (REBA). *Applied Ergonomics*, 31, (S. 201-205).
- Hinrichsen, S., Riediger, D. & Unrau, A. (2016). Assistance Systems in Manual Assembly. *Production Engineering and Management. Proceedings 6th International Conference 1/2016*, (S. 3–14).
- Huber, S. (2014). *Zwischen den Stühlen: Mobile und aufsuchende Jugendarbeit im Spannungsfeld von Aneignung und Ordnungspolitik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- ifaa, Institut für angewandte Arbeitswissenschaft (2017). *KPB – Kompaktverfahren psychische Belastung. Werkzeug zur Durchführung der Gefährdungsbeurteilung*. Düsseldorf: Springer Vieweg.
- Kagermann, H. & Wahlster, W. (2013). *Forschungsunion Wirtschaft und Wissenschaft - Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0*. Frankfurt am Main.
- Karhu, O., Kansu, P. & Kuorinka, I. (1977). Correcting working postures in industry: A practical method for analysis. *Applied Ergonomics*, 8, (S. 199-201).

- Kasselmann, S. & Willeke, S. (2016). 4.0 Ready - Technologie-Kompendium - Interaktive Assistenzsysteme. Hannover. Abgerufen am 21.09.2020 von https://www.iph-hannover.de/media/files/downloads/Projekt_40-Ready_Technologie-Kompendium.pdf
- Kesselring, S. (April 2012). Betriebliche Mobilitätsregime Zur sozio-geografischen Strukturierung mobiler Arbeit. *Zeitschrift für Soziologie*, 41, (S. 83-100).
- Kirchner, J. (1986). Belastungen und Beanspruchungen – Einige begriffliche Klärungen zum Belastungs-Beanspruchungs-Konzept. In H. F. Hackstein R (Hrsg.), *Arbeitsorganisation und neue Technologien*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag.
- Köffer, S. & Urbach, N. (2018). Die Digitalisierung der Wissensarbeit – Unternehmen im Spagat zwischen Innovation und Kontrolle. In: J. Hoffmann (Hrsg.), *Arbeit 4.0 – Digitalisierung, IT und Arbeit* (S. 17-27). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Laurig, W. (1992). *Grundzüge der Ergonomie : Erkenntnisse und Prinzipien*. 4. Auflage. Berlin: Beuth.
- Lehder, G. (2005). *Taschenbuch Arbeitssicherheit*. 11. Auflage. Berlin: Erich Schmidt Verlag GmbH & Co.
- Link, M., Schnalzer, K. & Hamann, K. (2020). Erfolgreiche Einführung von digitalen Assistenzsystemen. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 115, (S. 505-508).
- Luczak, H. (1989). Wesen menschlicher Leistung. In: Brokman, W. (Hrsg.), *Arbeitsgestaltung in Produktion und Verwaltung* (S. 88-101). Köln: Wirtschaftsverlag Bachem.
- Lughofer, E. & Sayed-Mouchaweh, M. (2019). Prologue: Predictive Maintenance in Dynamic Systems. In: E. Lughofer & M. Sayed-Mouchaweh (Hrsg.), *Predictive Maintenance in Dynamic Systems* (S. 1-23). Cham: Springer International Publishing.
- Mack, N. & Schmidt, L. (2020). Gebrauchstauglichkeit einer Augmented-Reality-Reiseassistenzanwendung und Vergleich mit herkömmlicher Unterstützung in einem Echtweltszenario. *Digitale Arbeit, digitaler Wandel, digitaler Mensch? Proceedings des 66. Frühjahrskongresses der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft*, B.3.4, Dortmund: GfA-Press.
- Manwell, J. & McGowan, J. (2009). *Wind energy explained*. Massachusetts, Washington - USA: John Wiley und Sons Ltd..

- Maschke, M., Nies, G. & Vogl, G. (2014). Mobile Arbeit: zwischen Autonomie und Fremdbestimmung. WSI-Mitteilungen 2/2014, (S. 156-159).
- Mc Atmaney, L. & Hignett, S. (2005). Rapid Entire Body Assessment. In: N. Stanton, A. Hedge, K. Brookhuis, E. Salas & H. Hendrick (Hrsg.), *Handbook of Human Factors and Ergonomics Methods*. (S. 71-82). Boca Raton, London, New York, Washington D.C.: CRC Press.
- Mecke, R. (2018). ArdiAS - Gesundes mobiles Arbeiten mit digitalen Assistenzsystemen im technischen Service. *TransWork - Arbeit in der digitalisierten Welt* (S. 14-15). Stuttgart: Fraunhofer IAO.
- Mecke, R., Adler, S., Jachmann, D., Weigel, M., Eichholz, S., Schmicker, S., Mewes, E., Böckelmann, I., Minow, A., Bergmüller, A. (2021). Gesundes mobiles Arbeiten mit digitalen Assistenzsystemen im technischen Service (ArdiAS). In: Bauer W., Mütze-Niewöhner S., Stowasser S., Zanker C., Müller N. (Hrsg.), *Arbeit in der digitalisierten Welt – Praxisbeispiele und Gestaltungslösungen aus dem BMBF-Förderschwerpunkt*. Berlin: Springer Vieweg.
- Meier, J.-N., Bovet, J., Geiger, C., Lehmann, P. & Tafarte, P. (2019). Fehlt im Klimapaket ein Flächenziel für die Windenergie an Land? *Wirtschaftsdienst*, (S. 824-828).
- Meissner, J., Gentile, G.-C. & Sprenger, M. (2015). Mobile Work @ Work: zur Genese mobiler Arbeitsformen in Deutsch-Schweizer Unternehmen. *Wirtschaftspsychologie*, 4, (S. 37-48).
- Merhar, L., Höllthaler, G. & Berger, C. (2019). Digitale Assistenzsysteme für die Produktion: Von der Zielfindung bis zur Einbindung gemeinsam mit den Mitarbeitern. In: C. K. Bosse & K. J. Zink (Hrsg.), *Arbeit 4.0 im Mittelstand*. (S. 279-302) Berlin: Springer Gabler.
- Mewes, E., Bergmüller, A., Minow, A., Waßmann, S., Weigel, M., Eichholz, S., Adler, S., Böckelmann, I. Schmicker, S. & Mecke, R. (2020). *Digitale Assistenzsysteme zur mobilen Verwendung im technischen Service - Ein Leitfaden für die Gestaltung und Nutzung*. Magdeburg: Fraunhofer IFF.
- Mewes, E., Schmicker, S., Waßmann, S., Mecke, R. & Böckelmann, I. (2018). Entwicklung und Durchführung einer Anforderungsanalyse zur Identifikation von nutzerunterstützenden Anwendungspotenzialen digitaler Assistenzsysteme in mobilen Servicetätigkeiten. *ARBEIT(S).WISSEN.SCHAF(F)T Grundlage für Management &*

Kompetenzentwicklung: Dokumentation des 64. Arbeitswissenschaftlichen Kongresses, B.1.3. Dortmund: GfA-Press.

- Mewes, E., Schwarz, F., Waßmann, S., Adler, S. & Schmicker, S. (2019). Methodik zur Unterstützung der Hardwareauswahl digitaler Assistenzsysteme für mobile industrielle Servicetätigkeiten. In: M. Schenk & S. Adler (Hrsg.), *Nachhaltigkeit bei der Nutzung digitaler Daten in der Produktion* (S. 6-15). Magdeburg: Fraunhofer-Gesellschaft.
- Mewes, E., Waßmann, S., Adler, S. & Schmicker, S. (2020). Laborexperiment zum Vergleich digitaler Endgeräte als Assistenzsystemhardware für die Anwendung in der mobilen Instandhaltung. *Digitale Arbeit, digitaler Wandel, digitaler Mensch? Proceedings des 66. Frühjahrskongresses der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft* B.19.5, Dortmund: GfA-Press.
- Mewes, E., Waßmann, S., Adler, S., Minow, A. & Schmicker, S. (2019). Entwicklung eines Laboraufbaus zur Erprobung eines digitalen Assistenzsystems für den Einsatz in der mobilen Instandhaltung. *Arbeit interdisziplinär analysieren - bewerten – gestalten Dokumentation des 65. Arbeitswissenschaftlichen Kongresses*, D.1.5, Dortmund: GfA-Press.
- Mewes, E., Waßmann, S., Minow, A., Adler, S. & Schmicker, S. (2019). Laborversuch zur Validierung der Nutzerfreundlichkeit eines digitalen Assistenzsystems für den Einsatz in der mobilen Instandhaltung. *14. Magdeburger Maschinenbau-Tage 2019 - Magdeburger Ingenieurtag - 24. und 25. September 2019 : Tagungsband - Magdeburg: Otto von Guericke Universität Magdeburg*.
- Microsoft. (2019). *docs.microsoft.com*. Abgerufen am 05.05.2020, von <https://docs.microsoft.com/en-us/hololens/hololens1-basic-usage>
- Mital, A. & Pennathur, A. (2004). Advanced technologies and humans in manufacturing workplaces: an interdependent relationship. *International Journal of Industrial ergonomics*, 33, (S. 295-313).
- Moessinger, M.-D. & Miriam, H. (2018). Klare Sicht auf das Problem - Wie digitale Datenbrillen den Service verbessern. (Mittelstand 4.0 - Kompetenzzentrum Stuttgart) Abgerufen am 08. 05 2019, von <https://digitales-kompetenzzentrum-stuttgart.de/klare-sicht-auf-das-problem/>
- Möller, S. (2017). *Quality Engineering - Qualität kommunikationstechnischer Systeme* (Bd. 2. Auflage). Berlin: Springer.

- Möller, T. (2010). Projektmanagementenerfolg. In: M., Gessler (Hrsg.), *Kompetenzbasiertes Projektmanagement (PM3) - Handbuch für Projektarbeit, Qualifizierung und Zertifizierung*, 3. Auflage, (S. 56-69). Nürnberg: GPM Deutsche Gesellschaft für Projektmanagement e.V.
- Monz, A. & Vogl, G. (2020). Mobile Arbeit – räumlich entgrenzt und ortsgebunden. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 74, (S.178-187).
- Müllerleile, T. (2018). *Prozessakzeptanz - Theoretische und empirische Untersuchung der Akzeptanz und Ablehnung betrieblicher Prozesse*. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Neudörfer, A. (2016). *Konstruieren sicherheitsgerechter Produkte: Methoden und systematische Lösungsansammlungen zur EG-Maschinenrichtlinie*, 7. Auflage. Berlin: Springer Vieweg.
- Niehaus, J. (2017). *Mobile Assistenzsysteme für Industrie 4.0 - Gestaltungsoptionen zwischen Autonomie und Kontrolle*. Düsseldorf: FGW – Forschungsinstitut für gesellschaftliche Weiterentwicklung e.V.
- Offensive Mittelstand. (2018). *Potenzialanalyse Arbeit 4.0 - Künstliche Intelligenz für die produktive und präventive Arbeitsgestaltung nutzen: Ein Selbstbewertungscheck zur Einführung der neuen 4.0-Technologien*. Wiesbaden. Abgerufen am 16.10.2020, von https://www.check-arbeit40.de/check-arbeit40/daten/mittelstand/pdf/Potentialanalyse_Arbeit_4.0.pdf
- OVGU, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (13.03.2020). Pandemieplan der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (OVGU) ohne MED. Magdeburg, Sachsen-Anhalt. Abgerufen am 21.09.2020, von https://www.ovgu.de/unimagdeburg_media/Universit%C3%A4t/Dokumente+und+Formulare/2020_03_16+Pandemieplan+Uni+Magdeburg-p-83090.pdf
- Pawellek, G. (2016). *Integrierte Instandhaltung und Ersatzteillogistik : Vorgehensweisen, Methoden, Tools*, 2. Auflage. Berlin: Springer Vieweg.
- Peddy, J. (2017). *Augmented Reality - Where we will all live*. Cham: Springer.
- Pohlandt, A. (2009). *ErgoInstrument REBA 9.0: Handbuch zum PC-Programm; Analyse, Bewertung und Gestaltung von Tätigkeiten unter Berücksichtigung von Sicherheit und Gesundheit*.

- Prümper, J. (1997). Der Benutzungsfragebogen ISONORM 9241/10: Ergebnisse zur Realibilität und Validität. In: B. V. R. Liskowsky (Hrsg.), *Software-Ergonomie '97 - Usability Engineering: Integration von Mensch-Computer-Interaktion und Software-Entwicklung* (S. 253-262). Stuttgart: Teubner.
- Prümper, J. (2008). ISONORM 9241/110-S - Beurteilung von Software auf Grundlage der Internationalen Ergonomie-Norm DIN EN ISO 9241-110. Abgerufen am 21.09.2020, von http://projekt.kke.tu-berlin.de/wp-content/uploads/2015/09/Methode_Isonorm-Fragebogen.pdf
- Quaas, W. (1999). Arbeit neu entdecken und Arbeit neu bewerten - eine zentrale Zukunftsaufgabe der Arbeitswissenschaft. In: W. Quaas (Hrsg.), *Arbeit und Gesellschaft im Wandel - Arbeitswissenschaft und Arbeitsgestaltung im Wandel - Tagungsband* (S. 114-126). Magdeburg.
- Quaschnig, V. (2020). *Erneuerbare Energien und Klimaschutz – Hintergründe, Techniken und Planung. Ökonomie und Ökologie Energiewende*. München: Carl Hanser Verlag.
- REFA, Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung (1984). *Methodenlehre des Arbeitsstudiums*, 7. Auflage. München: Carl Hanser Verlag.
- Reich, G. & Reppich, M. (2018). *Regenerative Energietechnik - Überblick über ausgewählte Technologien zur nachhaltigen Energieversorgung*, 2. Auflage. Augsburg: Springer Vieweg.
- Richter, M. & Flückiger, M. (2013). *Usability Engineering kompakt*. Berlin: Springer Vieweg.
- RKI, Robert Koch Institut (12. 03 2020). Beschreibung des Ausbruchsgeschehens mit dem neuartigen Coronavirus SARS-CoV-2 in Deutschland. *Epidemiologisches Bulletin*, 11/2020, (S. 23-26.). Abgerufen am 21.09.2020, von https://edoc.rki.de/bitstream/handle/176904/6507/11_2020_DOI_6535.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Rohmert, W. (1983). Formen menschlicher Arbeit. In: W. Rohmert & J. Rutenfranz (Hrsg.), *Praktische Arbeitspsychologie*, 3. Auflage, (S. 5-29). Stuttgart: Thieme.
- Rohmert, W. (1984). Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 38, (S. 193-200).
- Rudow, B. (2011). *Die gesunde Arbeit: Arbeitsgestaltung, Arbeitsorganisation und Personalführung*, 2. Auflage. München: Oldenbourg Verlag.

- Salanova, M., Llorens, S. & Cifre, E. (2013). The dark side of technologies: Technostress among users of information. *International Journal of Psychology*, 48, (S. 422-436).
- Sammito S, T. B. (Juni 2014). S2k-Leitlinie: Nutzung der Herzschlagfrequenz und der Herzfrequenzvariabilität in der Arbeitsmedizin und der Arbeitswissenschaft. Abgerufen am 21.09.2020, von https://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/002-0421_S2k_Herzschlagfrequenz_Herzfrequenzvariabilit%C3%A4t_2014-07.pdf
- Schaper, N. (2014). Wirkungen der Arbeit. In: F. W. Nerdinger, B. Gerhard & N. Schaper (Hrsg.), *Arbeits- und Organisationspsychologie*, 3. Auflage (S. 517-539). Berlin: Springer.
- Schlick, C., Bruder, R. & Luczak, H. (2018). *Arbeitswissenschaft*, 4. Auflage. Berlin: Springer Vieweg.
- Schmicker, S., Waßmann, S. & Mewes, E. (2020). Erfolgreich mit ortsflexibler Arbeit: Arbeitswissenschaftliche Begleitung auf dem Weg zum „New Normal“. *Mitteldeutsche Mitteilungen – Informationen aus Wirtschaft | Wissenschaft | Gesellschaft*, (S. 20-21).
- Seyda, S., Wallossek, L. & Zibrowius, M. (2019). Einfach nur Arbeit? Zu Weiterbildung, Einfacharbeit und ausgeübtem Beruf: Eine empirische Untersuchung auf Basis der BIBB/BAuA-Erwerbstätigenbefragung. Abgerufen am 21.09.2020, von <https://www.econstor.eu/handle/10419/194270>
- StatCounter. (20. August, 2020). Marktanteile der führenden Betriebssysteme an der Internetnutzung mit Mobiltelefonen in Europa von Januar 2009 bis Juli 2020. In: Statista. Abgerufen am 21.09.2020, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/184516/umfrage/marktanteil-der-mobilen-betriebssysteme-in-europa-seit-2009/>
- Statistisches Bundesamt. (2017). Pressemitteilung Nr. 240. Abgerufen am 21.09.2020, von https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2017/07/PD17_240_122.html
- Sträter, O. & Bengler, K. (2019). Positionspapier Digitalisierung der Arbeitswelt. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 73, (S. 243-245).
- Strunz, M. (2012). *Instandhaltung: Grundlagen - Strategien - Werkstätten*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Stüber, H.-J. & Lange, D. (2010). Sicherheit für mobile Einzelarbeitsplätze - Informationsbroschüre für Einsteiger. Abgerufen am 21.09.2020, von

<https://silo.tips/download/informationsbroschre-informationsbroschre-fr-einsteiger-it-sicherheit-themenfoku-3>

van Ark, B. (2016). The Productivity Paradox of the New Digital Economy. *International Productivity*, 31, (S. 3-18).

VDR, Verband deutsches Reisemanagement (2019). VDR-Geschäftsreisenanalyse. Abgerufen am 21.09.2020, von <https://www.vdr-service.de/fileadmin/services-leistungen/fachmedien/geschaeftsreiseanalyse/VDR-Geschaeftsreiseanalyse-2019.pdf>

Vestas. (2020). V80-2.0 MW - Hochprofitabel bei hohen Windgeschwindigkeiten. Abgerufen am 07.05.2020, von https://www.vestas.com/en/products/2%20mw%20platform/v90%20_0_mw#!technical-specifications

Vogl, G. & Nies, G. (2013). *Mobile Arbeit: Betriebs- und Dienstvereinbarungen. Analyse und Handlungsempfehlungen*. Frankfurt am Main: Bund-Verlag.

von Thenen, S. & Scheerbaum, P. (2014). Mobile Internetnutzung in Deutschland und Europa 2012. Abgerufen am 21.09.2020, von <https://www.destatis.de/DE/Methoden/WISTA-Wirtschaft-und-Statistik/2014/01/mobile-internetnutzung-2012-012014.html>

VuMA, Arbeitsgemeinschaft Verbrauchs- und Medienanalyse (2019). Anteil der Smartphone-Nutzer in Deutschland nach Altersgruppe im Jahr 2019. In: Statista. Abgerufen am 21.09.2020, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/459963/umfrage/anteil-der-smartphone-nutzer-in-deutschland-nach-altersgruppe/>

Waßmann, S. (2017). *Den Digitalen Wandel gestalten: Ideen, Projekte und Angebote der Magdeburger Arbeitswissenschaft*. Vortrag im Rahmen des Workshops „Digitalisierung der Arbeitswelt“. Dessau: Bauhaus.

Waßmann, S. (2019). *Zukunft der Arbeit: Arbeit 4.0 und die menschengerechte Gestaltung von Arbeit*. Vortrag im Rahmen der IG-Metall Betriebsrätekonzferenz Sachsen-Anhalt 2019. Magdeburg: Hotel Ratswaage.

Zeit-Online (20. September 2019). Weltweiter Massenstreik für Klimaschutz hat begonnen. Abgerufen am 21.09.2020, von <https://www.zeit.de/gesellschaft/zeitgeschehen/2019-09/fridays-for-future-massenprotest-weltweit-australien-europa-usa>

Zink, K. & Bosse, C. (2019). Arbeit 4.0 im Mittelstand. In: K. Zink & C. Bosse (Hrsg.), *Arbeit 4.0 im Mittelstand* (S. 2-6). Berlin, Heidelberg: Springer.

Anhang

A – Struktureller Aufbau von „Pocket-Assist“

Im Backend der Auftragserfassung sind die Entitäten „Verwaltung“ und „Firma“ hinterlegt. Unter „Verwaltung“ lassen sich „Anlagen“, „Prüflisten“ und „Benutzer“ erstellen, aufrufen und editieren. Im Unterpunkt „Anlagen“ können weitere Informationen zu „Stammdaten“ (z. B. Abmessungen, Leistung), „Dokumenten“ und „Material“ für einzelne Maschinen vorgehalten werden. In der Entität „Firma“ werden Informationen zu unterschiedlichen Auftraggebern angelegt, welche Standorte, Stationen und Anlagen mit Maschinenummern beinhalten. Dem Unterpunkt „Firma“ lassen sich mehrere „Standorte“ unterordnen, denen wiederum mehrere „Stationen“ und „Anlagen“ zugeordnet werden können. Abbildung 62 skizziert den schematischen Aufbau der Menüstruktur.

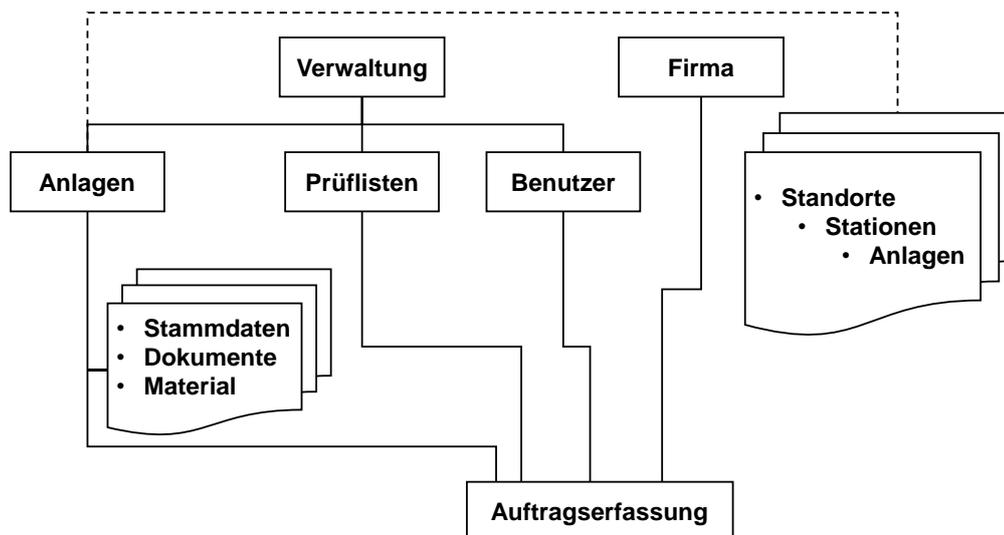


Abbildung 62: Struktureller Aufbau aller Hintergrundinformationen zur Auftragserfassung in „Pocket-Assist“

Zu Beginn der Auftragserfassung wird jeder Auftrag im System manuell mit einer Auftragsnummer versehen. Die zu inspizierenden Anlagen (mit hinterlegten Standorten, Stationen und Maschinen) werden anschließend aus den Firmendaten ausgewählt. Bei einer WEA-Inspektion wird dann die der Anlage zugeordnete Prüfliste ausgewählt. Für Instandhaltungsaufträge benötigte Verbrauchsmaterialien oder Ersatzteile können unter dem Reiter „Material“ vermerkt werden. Ein Auftrag kann hierbei mehrere Inspektionen an unterschiedlichen Anlagen umfassen. Zum Abschluss wird dem Auftrag ein Bearbeiter zugewiesen und die Auftragserstellung bestätigt. Abbildung 63 stellt den Prozess der Auftragserfassung dar.

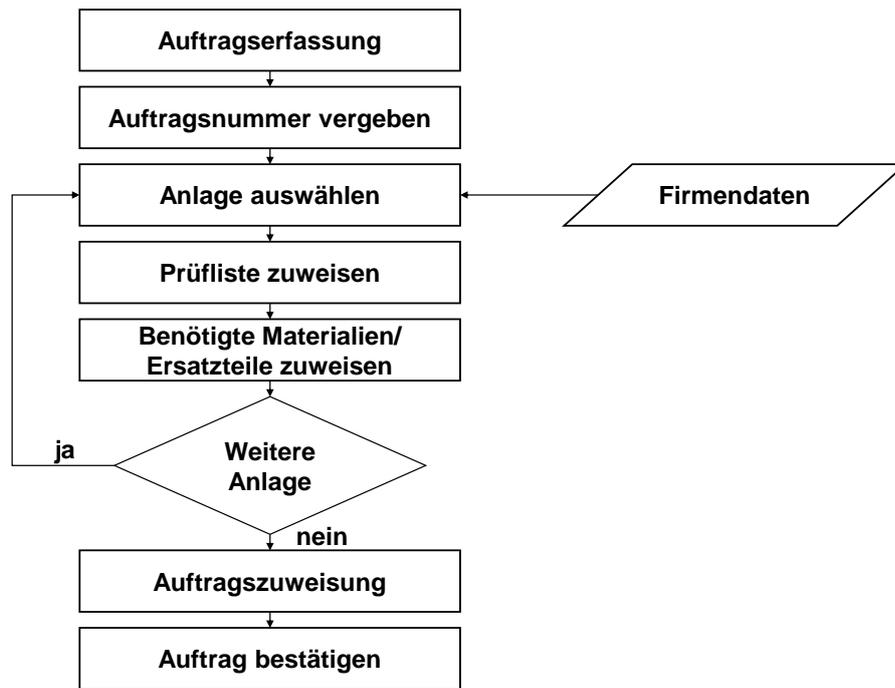


Abbildung 63: Schematische Darstellung des Auftragsstellungsprozesses in „Pocket-Assist“

Zur Auftragsbearbeitung (vgl. Abbildung 64) nimmt der Nutzer einen offenen Auftrag aus der Liste an. Bei der eigentlichen Durchführung des Auftrages unterstützt „Pocket-Assist“ den MA durch Auflistung und Beschreibung verschiedener Arbeitsschritte. Die Bearbeitungsreihenfolge der einzelnen Arbeitsschritte steht ihm frei. Sind alle Punkte abgearbeitet, wird entweder eine weitere Anlage bearbeitet oder der Auftrag abgeschlossen. Im letzteren Fall sind final Arbeitszeit sowie Fahrzeiten und Distanz zum Einsatzort anzugeben.

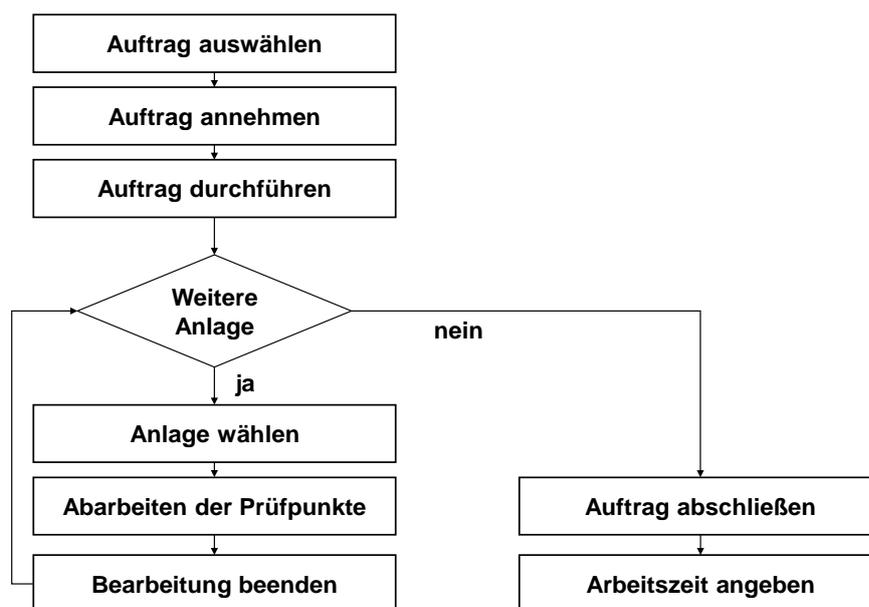


Abbildung 64: Schematische Darstellung der Auftragsabarbeitung in „Pocket-Assist“

B – Ergebnisse Kurzinterviews

Es folgt eine Aufstellung der im Rahmen des Laborversuchs genannten Vorteile (V) und Nachteile (N) beider Arbeitsmittel mit der jeweiligen Nennung.

Tabelle 18: Im Rahmen des Laborversuchs genannte Vorteile (V) und Nachteile (N) beider Arbeitsmittel

Beschreibung:	AS		PLK	
	V	N	V	N
Werkzeuganzahl und -wechsel	15			15
Bedienerfreundlichkeit	6			
Übersichtlichkeit (alle auf einen Blick erkennbar) „scrollen in App“		4	12	
Überspringen/Vergessen einer Rubrik passiert schneller		3		
Arbeitsanweisungen direkt einsehbar/kein Nachschlagen	6			3
Fotoerstellung leichter (direkt in App)	4			
Kamera ohne Blitz		4		2
Schlechte Fotoqualität, Bilder zu klein		2		
Kamera ohne Zoom		3		
Direkte Zuordnung der Fotos	2			
Markierung auf Fotos möglich	2			
Fehlerkorrektur schwierig		1		3
Automatisches Abgleichen Toleranzbereich mit Farbhinterlegung	5			1
Arbeitsmittel ist schneller	4	2	2	
Display zu klein (für Brillenträger [Gleitsicht] und Ältere)		2		
Zu kleines Tastenfeld (dicke Finger), schwierige Bedienung		3		
Keine analogen Tasten für die Bedienung der App		2		
Einarbeitung war schwieriger, dauert länger, ist gewöhnungsbedürftig		3		
Einfache Bedienung unabhängig vom Alter			3	
Leicht verständlich und eindeutig			5	
Simpel/gut strukturiert/aufgebaut			5	
Direkte Digitalisierung (u. a. Datenzuordnung)	3			
Smileys sind gut mit dem Hakensetzen (schnell und einfach)	3			

C – Ergebnisse der EKG-Untersuchungen im Feld

Abbildung 65 und Abbildung 66 zeigen die Herzfrequenzen der Inspekture bei beiden Begehungen, wobei das obere Diagramm die Herzfrequenz während der Begehung mit der PLK und das untere während der Begehung mit dem AS darstellt.

Unterhalb der x-Achse des Diagrammes ist der grobe Ablauf der Begehung in Abschnitten angegeben. Der graue Graph im Diagramm stellt die exakte Herzfrequenz zu einem Zeitpunkt dar, während die grüne Linie die Mittelwerttrendlinie der Herzfrequenz über einen Zeitabschnitt markiert. Eingegrenzt wird die Herzfrequenz von einer rosafarbenen Linie, die den Trend der maximalen Herzfrequenz aufzeigt und einer grauen Linie, welche den minimalen Herzfrequenztrend darstellt. Vertikale rosa- oder graufarbige Balken sind gelöschte Falschaufzeichnungen des EKGs.

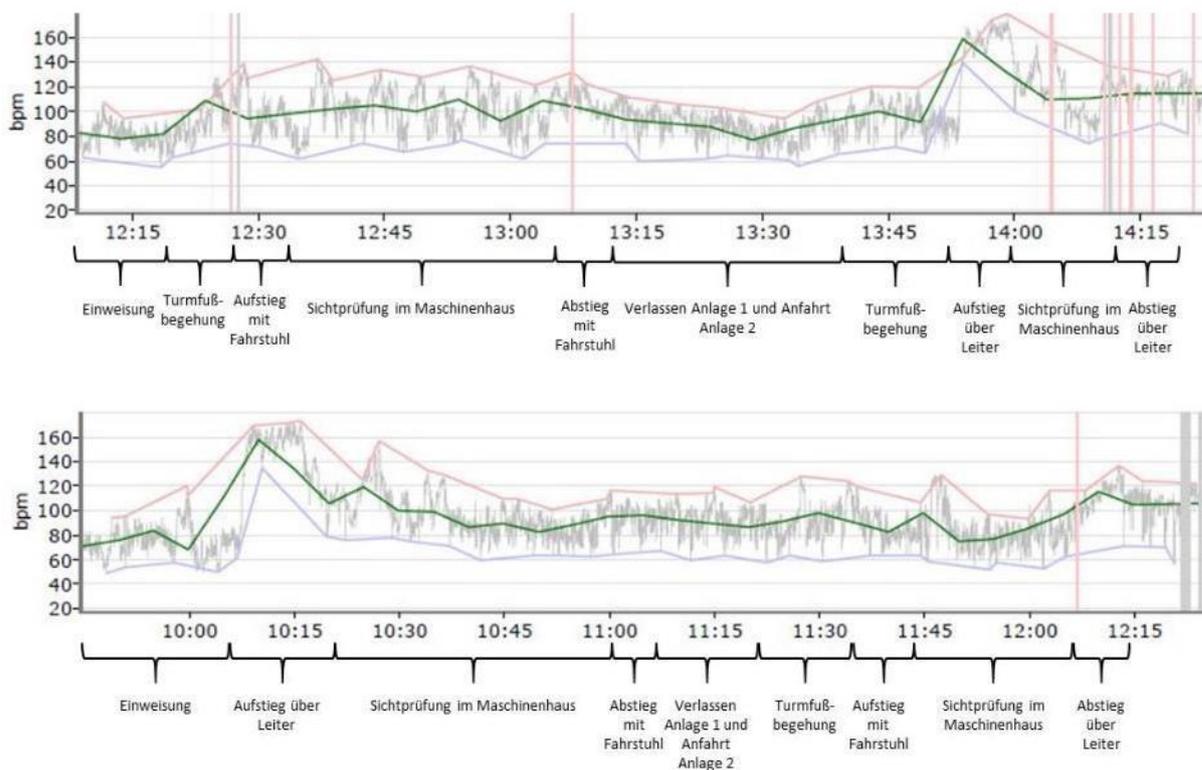


Abbildung 65: Herzfrequenztrend Inspekteur 1 oben Begehung mit Prüfliste, unten Begehung mit Assistenzsystem

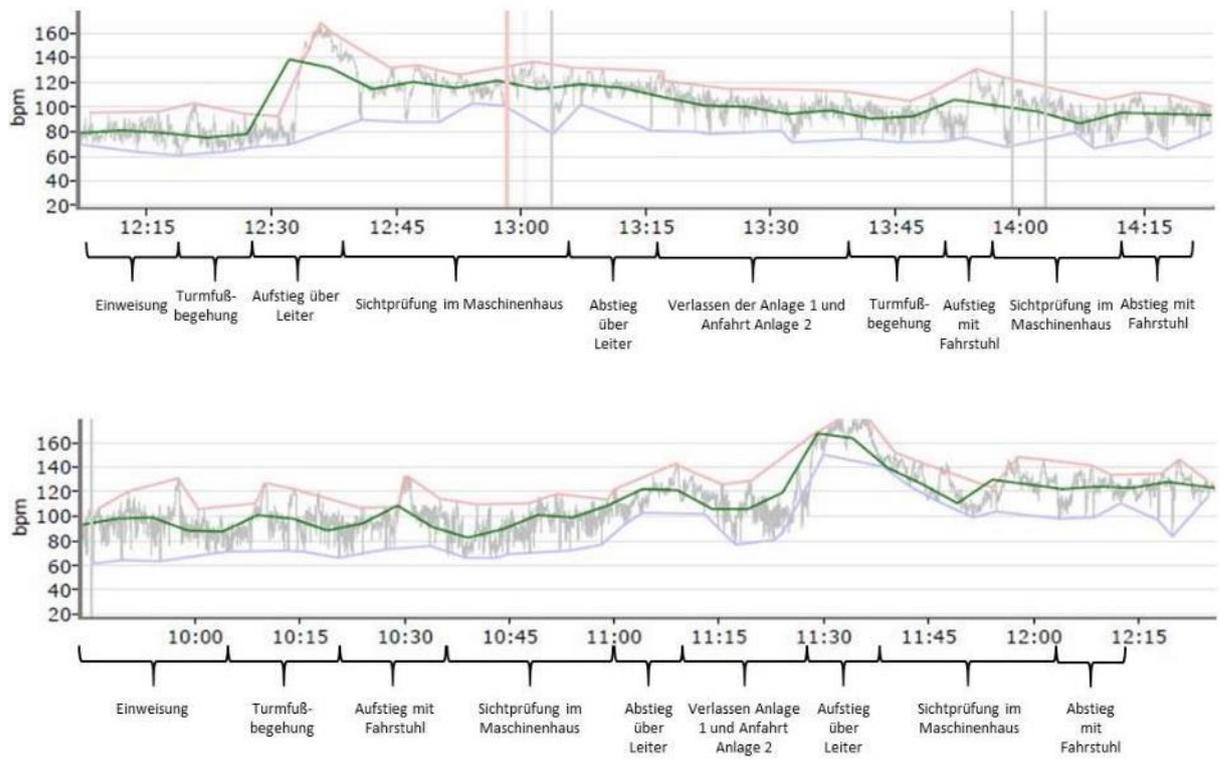


Abbildung 66: Herzfrequenztrend Inspekteur 2 oben Begehung mit Prüfliste, unten Begehung mit Assistenzsystem

D – Ergebnisse nach ErgoInstrument REBA 9.0

Abbildung 67 und Abbildung 68 zeigen die Ergebnisse der Arbeitssystemanalyse nach ErgoInstrument REBA 9.0 (Pohlandt, 2009) vor und nach der Einführung des AS „Pocket-Assist“.

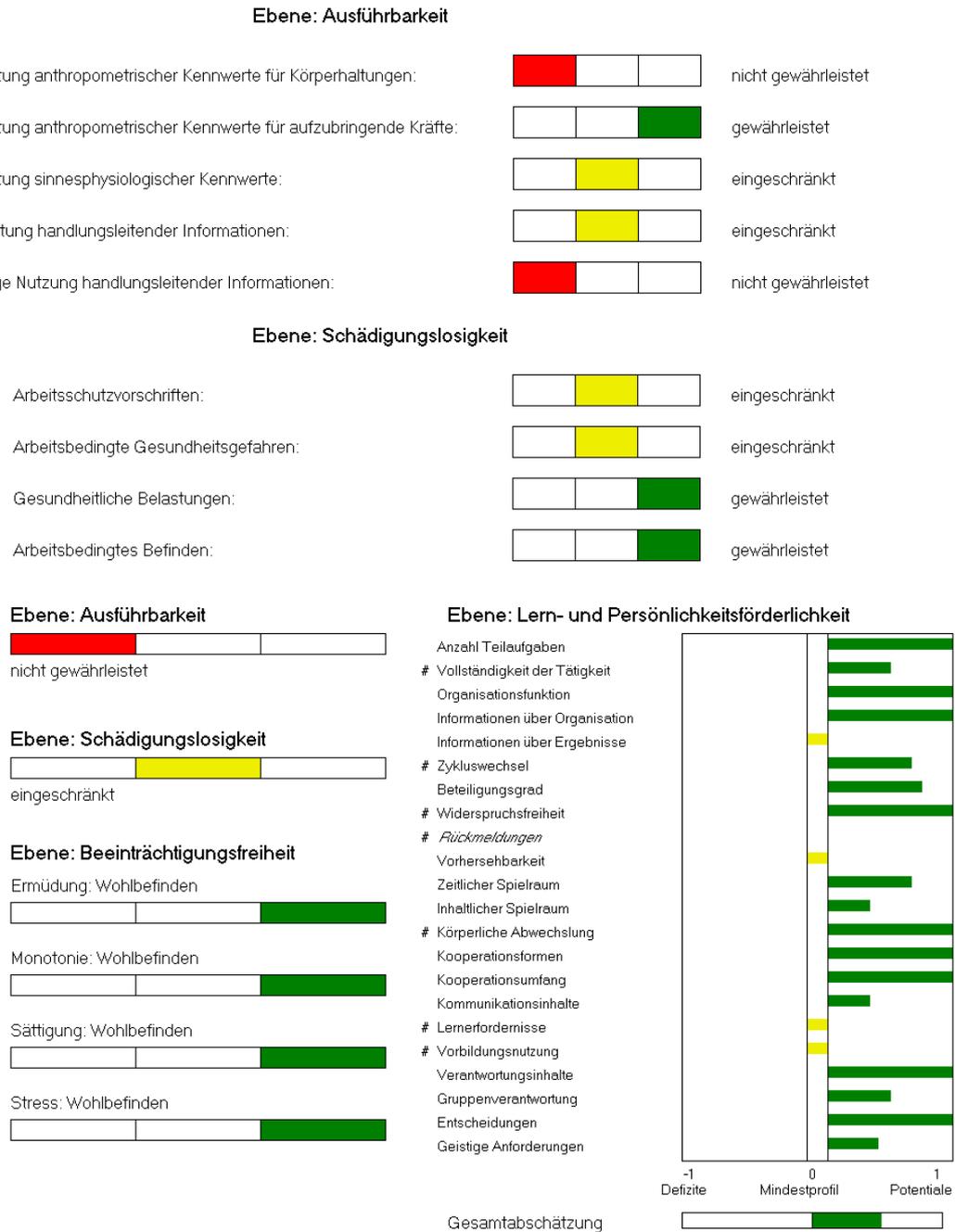
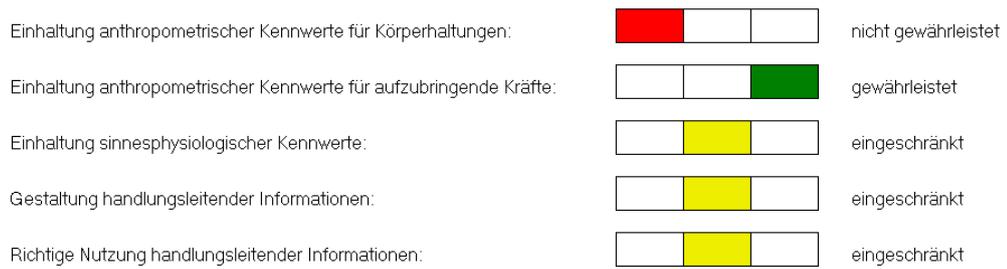
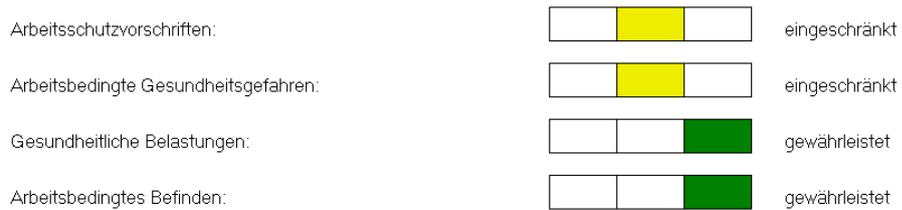


Abbildung 67: Ergebnisse des REBA 9.0 (Pohlandt, 2009) für das Arbeitssystem „Inspektion von Windenergieanlagen“ vor Einführung des Assistenzsystems

Ebene: Ausführbarkeit



Ebene: Schädigungslosigkeit



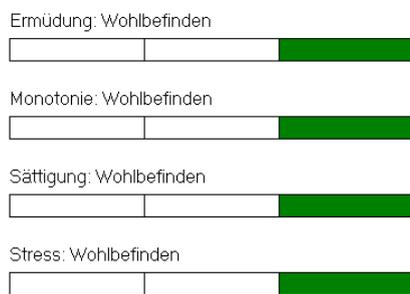
Ebene: Ausführbarkeit



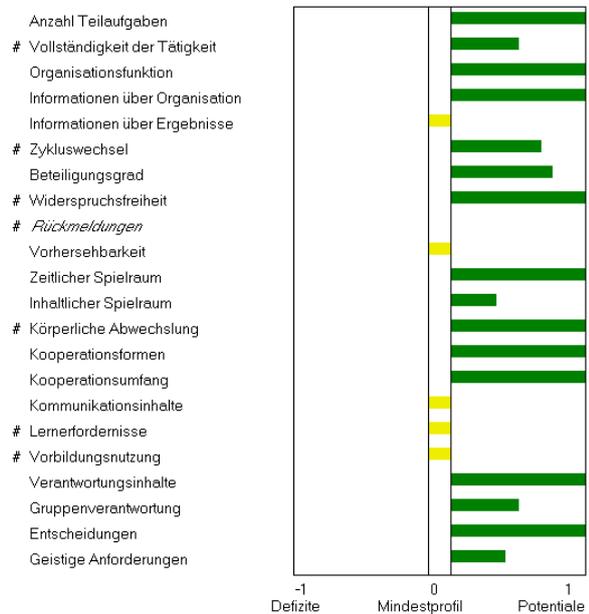
Ebene: Schädigungslosigkeit



Ebene: Beeinträchtigungsfreiheit



Ebene: Lern- und Persönlichkeitsförderlichkeit



-1 Defizite 0 Mindestprofil 1 Potentiale

Gesamtabschätzung



Abbildung 68: Ergebnisse des REBA 9.0 (Pohlandt, 2009) für das Arbeitssystem „Inspektion von Windenergieanlagen“ nach Einführung des Assistenzsystems