

Methoden zur objektiven Absicherung der Ergonomie in Fahrererkabinen

Timo Schempp, Jens Möhring, Stefan Böttinger

Dieser Beitrag stellt sowohl eine Methode vor, mit der die Gestaltung von Bediensystemen als Teil der kognitiven Ergonomie bewertet werden kann, als auch eine Methode, mit der die Bewegungen des Bedieners und Greifräume als Teil der physischen Ergonomie bewertet werden können. Beide Methoden können bei der Entwicklung einer Fahrererkabine oder zur vergleichenden Analyse angewendet werden. Das Innovative der Methoden ist es einen Bewertungsprozess ohne Probanden zu etablieren, mit dem objektivere und über unterschiedliche Untersuchungen hinweg vergleichbare Ergebnisse erzielt werden können. Die Methode zur Bewertung von Bediensystemen baut auf den ergonomischen Grundlagen der Erwartungskonformität und Bewegungskompatibilität auf. Das Motion-Capturing-Verfahren zur Analyse von Greifräumen und Bewegungen nutzt die Komfortwinkelvorgaben der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV).

Schlüsselwörter

Ergonomie, Fahrererkabine, Bewertung, Methode, Bediensysteme, Greifräume, Motion Capturing

Während sich viele Eigenschaften von Landmaschinen in Zahlen messen und damit objektiv bewerten lassen, muss die ergonomische Bewertung einer Fahrererkabine häufig über die Befragung eines ausreichend großen und heterogenen Probandenkollektivs durchgeführt werden (KOWALEWSKY 2014, WILMER 2015, Ai et al. 2017). Nach dem Probesitzen oder einem längeren Einsatz mit der Maschine werden Probanden zu bestimmten Kriterien befragt. Anhand des gewählten Kollektivs gelingt in gewissen Maßen eine Objektivierung der subjektiven Eindrücke und Bewertungen der einzelnen Probanden. Dass diese Art der Objektivierung nicht immer zielführend ist, zeigt beispielhaft eine Schalldruckmessung mit einem Schalldruckpegel von immerhin 77 dB(A) auf Ohrenhöhe, der vom Probandenkollektiv dennoch als angenehm eingestuft wurde (WILMER 2012). Selbst objektiv messbare Werte können vom Probanden demnach nicht zwangsläufig korrekt eingeordnet werden. Dieser Befund kann mit dem biopsychosozialen Schmerzmodell erklärt werden, wonach Schmerz oder Unwohlsein nicht nur von biologischen, sondern auch von psychischen und sozialen Umständen abhängt (HOHMANN-JEDDI 2015). Den Nachweis liefern TIEMANN et al. (2015) in einer Studie, in der 20 Probanden immer die gleichen Schmerzreize auf ihren Handrücken bekamen. Einmal ohne Creme und einmal mit angeblich schmerzlindernder Creme. Aufgrund ihrer Erwartungshaltung bewerteten die Probanden die gleichen Schmerzreize bei aufgetragener, pharmakologisch nicht wirksamer Creme signifikant schwächer und auch das von den Nervenzellen ausgehende Signalmuster unterschied sich in beiden Fällen. Bezogen auf die hier vorgestellte Methode zur Bewertung der Greifräume lässt sich ableiten, dass eine unangenehme Bewegung oder Körperhaltung in der Kabine von Probanden womöglich nicht als störend empfunden wird, wenn sie die Erwartung haben, dass es eine angenehme Bewegung oder Haltung ist. Diese Annahme spricht für einen Bewertungsprozess ohne Probanden. Das gilt auch

für die Methode aus dem Bereich der kognitiven Ergonomie: Ein Bediensystem lässt sich hinsichtlich der Gestaltung der Verstell- und Betätigungsrichtungen von Bedienelementen anhand einschlägiger Literatur objektiver und über unterschiedliche Untersuchungen hinweg vergleichbarer bewerten.

Theoretische Grundlagen

Abbildung 1 zeigt, wie die später beschriebenen Prüfinhalte und Methoden in den Gesamtkontext aus Mensch, Arbeitsplatz, Arbeit und Arbeitsumgebung eingeordnet werden. Am Arbeitsplatz führt der Mensch in einer Arbeitsumgebung seine Arbeit aus. Daraus resultieren für ihn physische und/oder kognitive Belastungen. Aus der Arbeitsumgebung ergeben sich Lärm, Schwingungen, Klima, toxische Stoffe und die Lichtverhältnisse als Belastung (DUPUIS 1981). Jeder Mensch erfährt an einem gegebenen Arbeitsplatz und bei gegebener Arbeit die gleichen Belastungen. Die Beanspruchung eines Menschen ist jedoch individuell und hängt von dessen Leistungsfähigkeit, Befinden und Motivation ab. Belastung und Beanspruchung sind positiv korreliert, weswegen eine Reduktion der Belastung auch zu einer Reduktion der individuellen Beanspruchung führt. Durch Schulung, gesundheitsfördernde Maßnahmen und Mitarbeitermotivation gelingt es, die Beanspruchung eines Menschen bei gegebener Belastung zu reduzieren. Die Aufgabe des Ingenieurs und Entwicklers liegt in der optimalen Anpassung der Belastungen auf den Menschen. Dabei wird nicht eine absolute Minimierung der beiden Größen angestrebt, sondern ein Belastungs- und Beanspruchungsoptimum, sodass der Mensch weder über- noch unterfordert ist. Die Belastungen aus der Arbeitsumgebung sind weitestgehend quantifizierbar und durch Richtlinien und Normen überprüfbar. Die aus der Arbeit resultierenden, nicht direkt messbaren, physischen und kognitiven Belastungen können mit den im Folgenden vorgestellten Bewertungsmethoden erfasst werden.

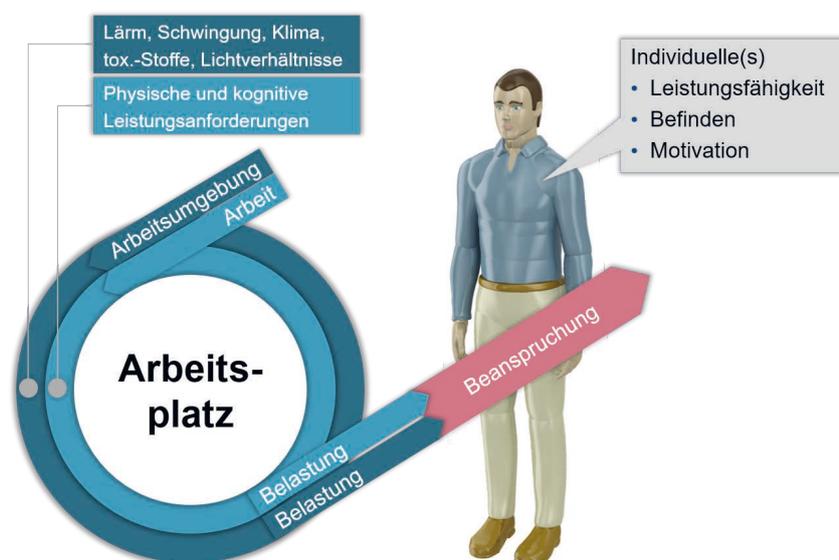


Abbildung 1: Allgemeines Grundschema der aus dem Arbeitsplatz resultierenden Belastungen und Beanspruchung des Menschen nach DUPUIS (1981)

Eine Fahrerkabine für Landmaschinen muss –aufbauend auf Abbildung 1 – folgenden Anforderungen genügen; die Inhalte unserer Prüfmethode sind grün markiert (Abbildung 2):

- Sicherheit bei Unfällen – Die Kabine muss bei Unfällen den Fahrer ausreichend gegen mechanische Einwirkung schützen. An dieser Stelle lassen sich die Sicherheitsstrukturen ROPS, FOPS und OPS, sowie Rückhaltesysteme auf Sitzen nennen. Genaue Anforderungen beschreibt eine EU-Verordnung (EU 2016).
- Schutz gegen Einflüsse aus der Arbeitsumgebung – Der Fahrer soll gegen gesundheitsschädliche oder leistungsmindernde Einflüsse aus der Arbeitsumgebung geschützt werden. Das sind im Einzelnen das Klima, toxische Stoffe, Lärm, Schwingungen und die Lichtverhältnisse. Genaue Anforderungen beschreibt auch hier eine EU-Verordnung (EU 2016).
- Komfort – Zum Komfort zählen Einrichtungen wie Radio, Getränkehalter, Ablagen etc.
- Arbeitsplatz zur Erfüllung der Arbeitsaufgabe – Der Fahrer soll auf seinem Arbeitsplatz in der Kabine alle Arbeitsaufgaben unter angemessener kognitiver und physischer Belastung ausführen können. Der Begriff der Belastung ist zunächst neutral zu sehen, da sich eine Belastung in diesem Fall positiv, neutral oder negativ auf das Empfinden des Fahrers auswirken kann (DIN 2011a). Deshalb sollte die optimale Belastung nicht mit „möglichst reduziert“, sondern mit „angemessen“ beschrieben werden.

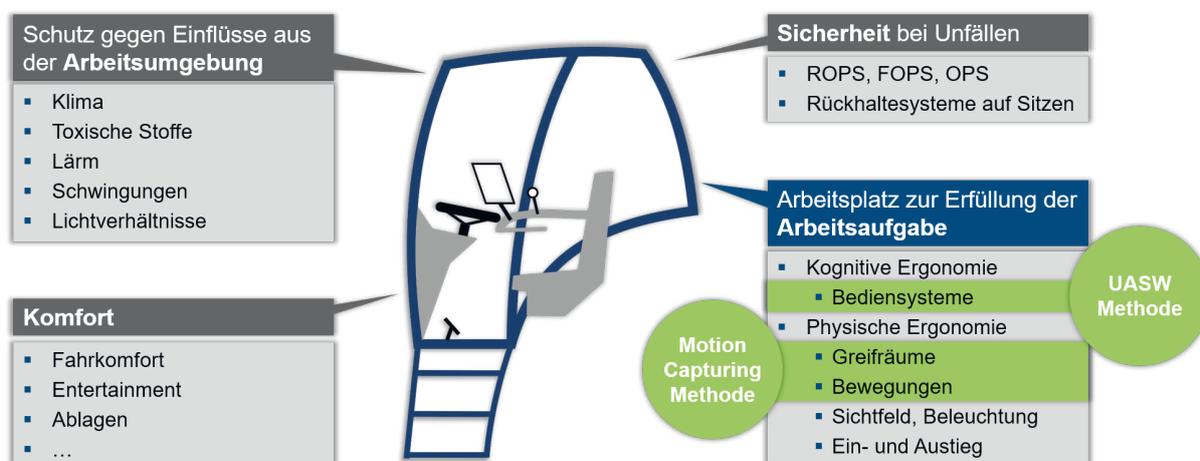


Abbildung 2: Hauptfunktionsbereiche einer Fahrerkabine und durch die Methode abgedeckte Prüfinhalte (grün)

UASW-Methode zur Bewertung von Bediensystemen

Theoretische Grundlagen

Laut ZÜHLKE (2005) umfasst die kognitive Ergonomie alle gedanklichen Vorgänge zur Bedienung eines Systems. Je weniger ein Bediener über das Bedienen nachdenken muss, desto intuitiver ist das Bediensystem gestaltet. Dies ist der Fall, wenn bereits erlernte Vorgehensweisen zur Bedienung technischer Systeme aktiviert werden können. Eine erlernte Vorgehensweise ist beispielweise das Drehen eines Drehknopfes im Uhrzeigersinn in Erwartung einer Wertzunahme und das Drehen gegen den Uhrzeigersinn in Erwartung einer Wertabnahme. Die erlernten Vorgehensweisen wecken Erwartungen beim Bediener, wie Stellteile zu bedienen und Anzeigen zu lesen sind. Die Vorgehensweisen und Erwartungen sind für eine breite Bediener- oder Bevölkerungsgruppe allgemein gültig. Man spricht deshalb von Populationsstereotypen. Das Bemerkenswerte ist, dass Benutzer in Stresssituationen selbst dann in diese Populationsstereotypen zurückfallen, wenn sie entsprechend ihrer Ausbildung in entgegengesetzter Weise handeln müssten (DIN 2009). Diese Populationsstereotypen sollten sich daher in der Bedienung von Maschinen widerspiegeln, damit diese so intuitiv wie möglich genutzt werden können.

Das Wissen über die Funktionalität einer Maschine ist davon abzugrenzen. Die Bedienbarkeit einer Maschine kann nur dann intuitiv sein, wenn die Funktionalität der Maschine bekannt ist. Das Modell in Abbildung 3 verdeutlicht die Zusammenhänge: Einzelne Produkte lassen sich funktional gesehen immer einer Überkategorie zuordnen. Das Wissen über die Funktionalität wird über die Kategorien hinweg bis zum einzelnen Produkt mitgezogen und erweitert. Im Bereich der mobilen Arbeitsmaschinen und insbesondere beim Traktor übersteigt die zur Wertschöpfung notwendige Funktionalität die primäre Fahraufgabe bei Weitem und ist für einen Maschinentyp in der Regel nicht intuitiv bekannt, sondern nur nach Einweisung oder Selbststudium. Ein Fahrer braucht eine gewisse Zeit diese kennenzulernen. Das ist die Teillernzeit t_F für die Funktionalität.

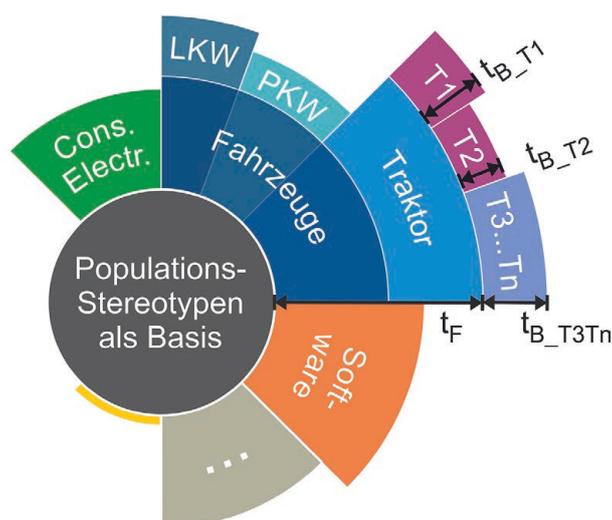


Abbildung 3: Modell zur Beschreibung der Lernzeit als Summe aus den Teillernzeiten t_F für die Funktionalität und t_B für die Bedienbarkeit; die Intuitivität eines Bediensystems basiert maßgeblich auf der Teillernzeit t_B für die Bedienbarkeit

Sobald einem Fahrer die funktionalen Möglichkeiten eines Maschinentyps bekannt sind, entscheidet sich anhand der Gestaltung des Bediensystems über die Teillernzeit t_B für die Bedienbarkeit, wie intuitiv die Bedienbarkeit ist. Beispielsweise haben alle Standardtraktoren weitestgehend die gleiche Funktionalität, unterscheiden sich aber ohne Zweifel in ihrer Bedienbarkeit von Hersteller zu Hersteller. Die Funktionalität und Bedienbarkeit lassen sich in der Gebrauchstauglichkeit oder Usability zusammenfassen.

Entscheidendes Qualitätsmerkmal ist die Gesamtlernzeit ($t_{Lges} = t_F + t_B$), die ein Fahrer benötigt, um eine Maschine nach der Definition für Gebrauchstauglichkeit (DIN 2011b) möglichst effektiv, effizient und zufriedenstellend zu nutzen. Während die Anforderungen an die Funktionalität eines Traktors allgemeiner Natur sind, ist die Gestaltung des Bediensystems im Entwicklungsprozess produktspezifisch. An dieser Stelle soll für die Herleitung der ersten Prüfmethode deshalb der Fokus auf die Lernzeit t_B für die Bedienbarkeit gelegt werden. Die Grundlage der Methode ist folgende Feststellung: Je mehr die Gestaltung eines Bediensystems den Populationsstereotypen als Basis entspricht desto kürzer ist die Lernzeit t_B und desto intuitiver ist ein Bediensystem (DIN 2009). Obwohl die Traktoren T1 und T2 im Beispiel in Abbildung 3 mit gleichem Funktionsumfang vom gleichen Hersteller sind, ist die Teillernzeit t_{BT2} kleiner als t_{BT1} . Das Bediensystem von T2 entspricht folglich eher dem Populationsstereotypen als das von T1. Der Hersteller von T3 gestaltet alle Bediensysteme gleich, weswegen der Fahrer für alle weiteren Traktoren T_n keine weitere Lernzeit mehr aufwenden muss. Ferner ist anzunehmen, dass eine umso größere Lernzeit für die Bedienbarkeit eine umso kürzere Halbwertszeit des Wissens über die erlernte Bedienung bedingt.

Für die stereotypgerechte Gestaltung von Bediensystemen definiert BULLINGER (1994) die Begriffe der Erwartungskonformität und der Bewegungskompatibilität. Über die Erwartungskonformität und Bewegungskompatibilität werden die theoretischen Zusammenhänge der Grundelemente User (U), Anzeige (A), Stellteil (S) und Wirkteil (W) einer Mensch-Maschine-Schnittstelle im UASW-Modell beschrieben (SCHMID 2003). Dieses Modell wird als Grundlage der Bewertungsmethode genutzt. In Abbildung 4 sind die Zusammenhänge, bezogen auf unsere Anwendung, dargestellt: Eine Maschine hat n Funktionen und für jede Funktion k gibt es eine Beziehung aus User, Anzeige, Stellteil und Wirkteil. Die Summe aller Anzeigen A_k und Stellteile S_k ist das Bediensystem. Das Wirkteil W_k verursacht die eigentliche Wirkung einer Funktion k , zum Beispiel eine Zustandsänderung, Wertänderung oder Bewegung. Die Erfüllung der Erwartungskonformität zwischen Anzeigen, User und Stellteil sowie der Bewegungskompatibilität zwischen Anzeige, Stellteil und Wirkteil sind die Bewertungsgrundlagen der Methode.

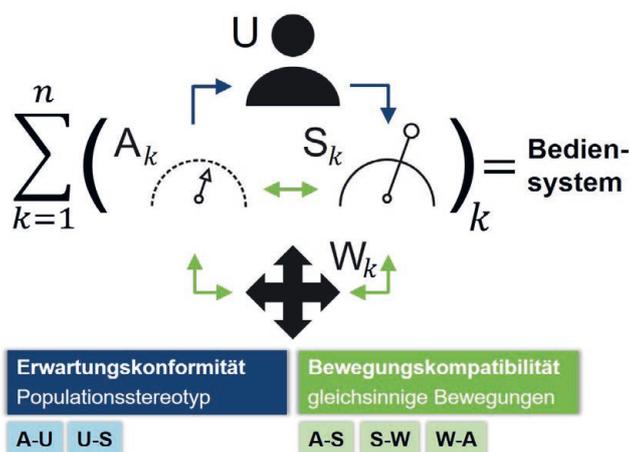


Abbildung 4: Das UASW-Modell und Kompatibilitäts- und Konformitätsanforderungen an die einzelnen Elemente

Ausführung der Methode

Die Methode kann entweder auf die UASW-Gruppen aller Funktionen, eines Funktionskollektivs, auf eine spezielle Funktion oder nach dem Prinzip des Most-Frequent-Case und Worst-Case angewendet werden. Jede UASW-Gruppe wird mit dem in Tabelle 1 gezeigten Schema bewertet.

Tabelle 1: Bewertungsschema für die UASW-Methode

Name der Funktion:			
Kriterium	Beziehung	Erfüllungsgrad (eg)	Begründung
Erwartungskonformität	U - A		
	U - S		
Bewegungskompatibilität	S - A		
	A - W		
	W - S		
	Σ_{err}		
	Σ_{max}	20	
	Bedienbarkeitsfaktor (BF)	$\Sigma_{err}/\Sigma_{max}$	

Der Erfüllungsgrad wird mit der Punkteskala nach VDI 2225-3 bestimmt (VDI 1998). Abbildung 5 zeigt beispielhaft die Bewertung der Bewegungskompatibilität zwischen Wirkteil W und verschiedenen Anordnungen a, b, c eines Stellteils S.

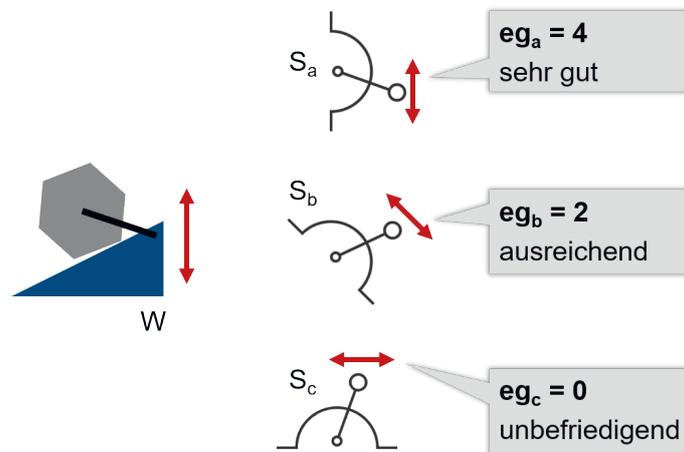


Abbildung 5: Beispiel zur Bewertung der Bewegungskompatibilität. Wirkteil W: Vorsatz, Stellteil S: Höhenverstellung

Die einzelnen Schritte der Methode lassen sich nun an einem Beispiel aus der Bedienung von Mähdreschern zusammenführen (Abbildung 6). Es werden zunächst Use-Cases auf dem Mähdrescher bestimmt, die bewertet werden sollen. Zum Beispiel einen oder mehrere Most-Frequent-Case(s) und einen oder mehrere Worst-Case(s). In diesem Fall „Vorsatz heben und senken“ als Most-Frequent-Case und „Auflagedruck des Vorsatzes einstellen“ als Worst Case.

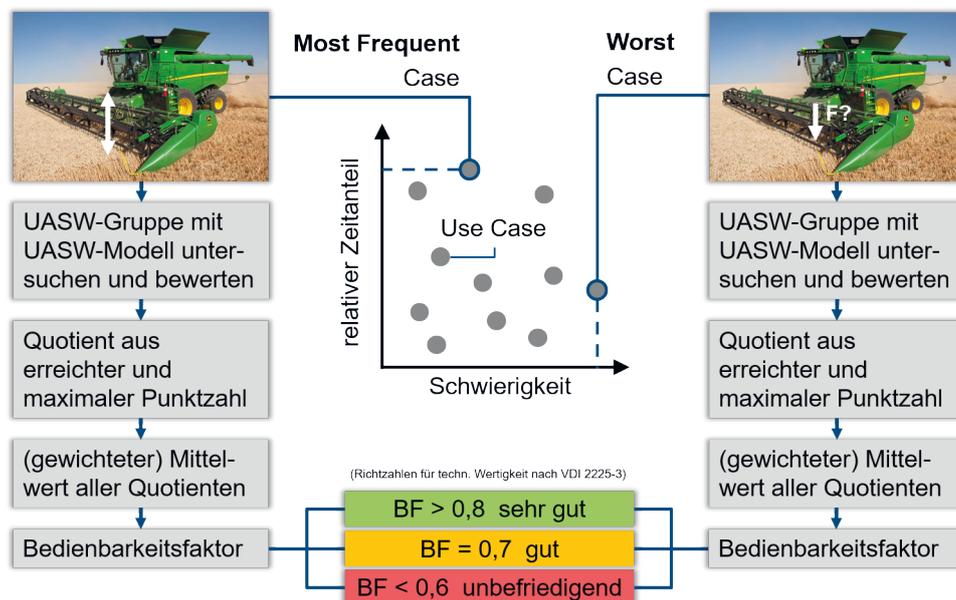


Abbildung 6: Ganzheitliche Darstellung der UASW-Methode

Anschließend wird für jede Funktion die UASW-Gruppe mit dem UASW-Modell analysiert und bewertet. Die Quotienten der untersuchten UASW-Gruppen sind gleichzeitig die Bedienbarkeitsfaktoren (BF) der einzelnen Funktionen. Die Bedienbarkeitsfaktoren einzelner Funktionen können wiederum über einen (gewichteten) Mittelwert zu einem Gesamt-Bedienbarkeitsfaktor für eine Funktionsgruppe

pe oder für das gesamte Bediensystem zusammengefasst werden. Das Bediensystem ist damit absolut oder relativ zu anderen bewertbar. Auf diese Weise kann das Bediensystem auch in einem frühen Entwicklungsstadium oder ohne Prototyp im Konzeptstadium bewertet werden. BÖTTINGER et al. (2011) zeigten die Methode erstmals beim Vergleich der Bediensysteme von drei Mähdreschern, SCHEMPPE und BÖTTINGER (2015) stellten eine weiterentwickelte, ausführlichere Anwendung zur Bewertung der Bediensysteme von zwei Traktoren dar.

Grundsätzlich können bei der Bewertung von Bediensystemen sieben Dialogprinzipien herangezogen werden (DIN 2008). Im Kontext des Bediensystems einer Landmaschine und der hier beschriebenen Prüfmethode lässt sich die Berücksichtigung der Prinzipien wie folgt einordnen:

- Die *Aufgabenangemessenheit* wird vorausgesetzt, indem davon ausgegangen wird, dass alle Funktionen zum Einsatz des Traktors im Lastenheft definiert und bedienbar sind.
- Die *Selbstbeschreibungsfähigkeit* wird vorausgesetzt, da für den Benutzer zu jeder Zeit die durch ein Symbol gekennzeichneten haptischen Bedienelemente im Direktzugriff erreichbar sind.
- Die *Einhaltung der Erwartungskonformität* ist Teil der Prüfmethode.
- Die *Lernförderlichkeit* ist mit der Einhaltung der Erwartungs- und Bewegungskonformität positiv korreliert (Abbildung 4) und damit in der Methode berücksichtigt.
- Die *Steuerbarkeit eines Dialogs* ist nicht berücksichtigt, da bei der eigentlichen Bedienung von Landmaschinen das Durchlaufen eines Softwaredialoges eine untergeordnete Rolle spielt.
- Die *Fehlertoleranz* im Sinne von Fehlererkennung und Korrekturvorschlägen ist nicht berücksichtigt. Hingegen zielt die Bewertung und Einhaltung der Erwartungs- und Bewegungskonformität darauf ab Fehlbedienungen zu vermeiden.
- Bediensysteme von Landmaschinen sind in geringem Umfang individualisierbar. Die *Individualisierbarkeit* stellt aber kein Kriterium in dieser Prüfmethode dar.

Motion-Capturing-Methode zur Bewertung von Greifräumen und Bewegungen

Theoretische Grundlagen zum Motion Capturing und dem Messsystem

Zur digitalen und damit objektiven Erfassung von Körperhaltungen und Bewegungen gibt es verschiedene Verfahren (BUBB et al. 2015). An dieser Stelle wird die Entwicklung und Anwendung eines markerlosen optischen Verfahrens beschrieben. Optische und markerlose Verfahren haben den Vorteil, dass am Probanden keine Messaufnehmer in Form von Goniometern oder Markern platziert werden müssen. Nachteilig sind jedoch die notwendige optische Zugänglichkeit zu allen Gelenken und die geringfügige Variabilität des gemessenen Abstandes der Gelenkpunkte zueinander respektive die gemessene Länge der Körperelemente. Für die Bewegungsanalyse wird die Kamera „Microsoft Kinect v2“ verwendet.

Die zeitliche und räumliche Genauigkeit der Microsoft Kinect v2 beim Tracken von Körperbewegungen wurde in wissenschaftliche Untersuchungen bewertet (CAPECCI et al. 2016). In Bezug auf die zeitliche Genauigkeit erreicht die Kinect v2 mit dem Referenzsystem vergleichbare Werte: die mittlere Abweichung beträgt je nach Anwendungsfall 0,5 bis 1,4 Frames bei einer Aufzeichnungsfrequenz von 30 fps (frames per second). CAPECCI et al. (2016) bestätigen damit die Ergebnisse von XU et al. (2015) und GALNA et al. (2014). Die räumliche Genauigkeit untersuchten CAPECCI et al. (2016) anhand von Körperhaltungen und -bewegungen. Bezüglich des Oberkörpers wurden während der Bewegungen relative Fehler von 5,3 bis 12,7 % ermittelt. Bei den Haltungen lag der Wert für die Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme bezüglich der Distanz der Ellbogen zueinander zwischen 2,7 und

4,7 cm. OTTE et al. (2016) bewerten die Kinect v2 mit Abweichungen von 1 bis 2 cm zum Referenzsystem im Oberkörperbereich als verlässliches und für klinische Messungen geeignetes Werkzeug. Im Einzelnen ist die Erfassung der Bewegungen anterior/posterior als hervorragend, medial/lateral als gut und lediglich vertikal als mäßig bis gut beurteilt. In allen Quellen wird eine weniger gute Genauigkeit im Bein- und Fußbereich festgestellt. Für den hier beschriebenen Anwendungsfall im Oberkörperbereich kann die Kinect v2 demnach als ein geeignetes Messinstrument zur Datenerhebung genutzt werden.

Ausführung der Motion-Capturing-Methode

Abbildung 7 zeigt die Arbeitsschritte der Methode, die im Folgenden beschrieben sind. Zunächst legt ein Algorithmus insgesamt 25 Gelenkpunkte auf die gefilmte Person und bestimmt deren Positionen im Raum mit 30 fps. Für jedes Körperelement wird daraus ein lokales kartesisches Koordinatensystem (KOS_{xyz}) berechnet, von dem eine Koordinatenachse in der Längsachse des Körperelementes liegt.

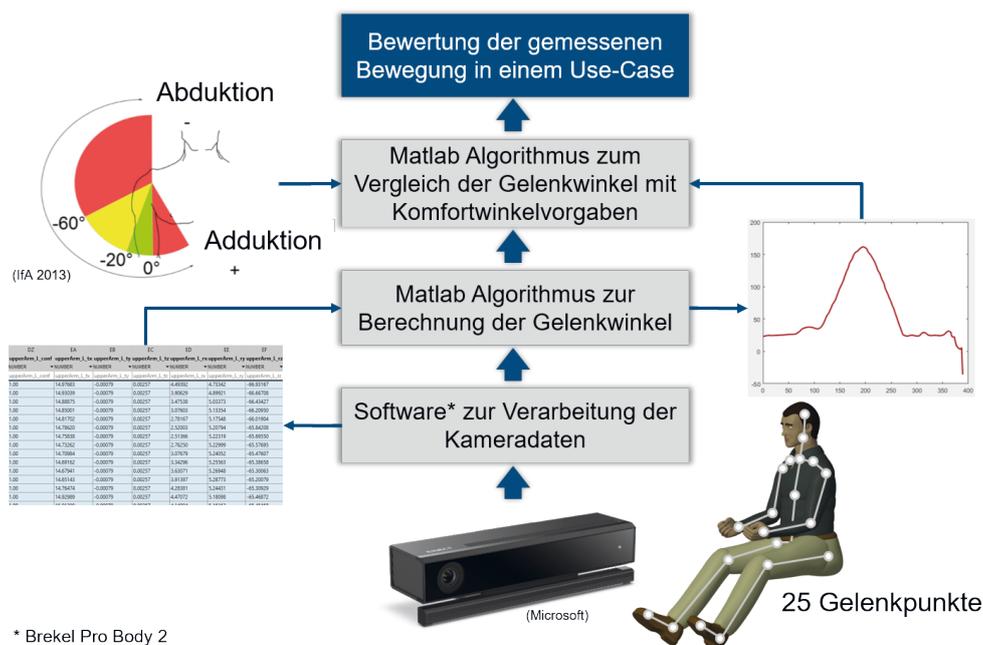


Abbildung 7: Motion-Capturing-Methode basierend auf einer Kinect-v2-Kamera

Die Lage eines lokalen KOS_{xyz} eines Körperelementes referenziert sich auf das lokale KOS_{uvw} des weiter proximal liegenden Körperelementes, wobei der Hüftpunkt der Nullpunkt ist. Die Lage ist über Eulersche Drehwinkel beschrieben, die sich durch Rotation des lokalen KOS_{xyz} um die Achsen des übergeordneten KOS_{uvw} in der Reihenfolge u-Achse, v-Achse und w-Achse ergeben. Der Ursprung eines lokalen KOS_{xyz} eines Körperelementes ist gleichzeitig das distale Ende des weiter proximal liegenden Körperelementes. Die Länge eines betrachteten Körperelementes ist damit der Betrag des Vektors zwischen den beiden Ursprungs koordinaten. Abbildung 8 zeigt die Systematik der Koordinatensysteme für das Schulter- und Ellbogengelenk.

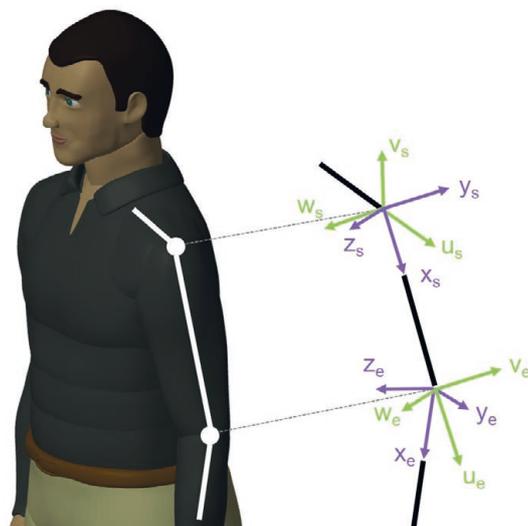


Abbildung 8: Systematik der Koordinatensysteme der Körperelemente am Beispiel des Schultergelenks (Index s) und des Ellenbogengelenks (Index e)

Am Beispiel der Abduktion und Adduktion des Schultergelenkes in der Frontalebene des Körpers kann die in den Matlab-Algorithmus integrierte Berechnung der Winkelwerte nachvollzogen werden. Der Vektor a_{xyz} beschreibt die Länge und Lage des Oberarmes und ist nach Gleichung 1 definiert:

$$a_{xyz} = \begin{pmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{pmatrix} \tag{Gl. 1}$$

Die Drehmatrizen R_u , R_v und R_w beschreiben die Drehung des lokalen KOS_{xyz} des Oberarms mit den Achsen x_s , y_s und z_s um das lokale KOS_{uvw} der Schulter mit den Achsen u_s , v_s und w_s . Mit der Koordinatentransformation nach Gleichung 2 lässt sich der Vektor a_{xyz} im lokalen KOS_{uvw} der Schulter mit den Achsen u_s , v_s und w_s beschreiben:

$$a_{uvw} = R_w R_v R_u a_{xyz} \tag{Gl. 2}$$

Durch eine anschließende Projektion des Vektors a_{uvw} in die u_s - v_s -Ebene der Schulter kann der Winkel zum Beispiel zur Koordinatenachse v_s und damit relativ zur Schulter berechnet werden. Der Betrag des Vektors a_{xyz} ist die Länge des Oberarmes.

Die Bewegungsanalyse und -bewertung

Abbildung 9 zeigt, wie die aufgenommenen Bewegungen in einem ersten Schritt visuell analysiert werden können. Die Graphen zeigen den Verlauf der Gelenkwinkel für die rechte Schulter und Ellenbogen für eine zweimalige Ausführung des Anwendungsfalls „Lenkrad, Joystick, Seitenkonsole und zurück“. Die zweimalige Ausführung zeigt die Wiederholgenauigkeit der Kamera unter der Annahme, dass der Proband sich möglichst gleich bewegt.

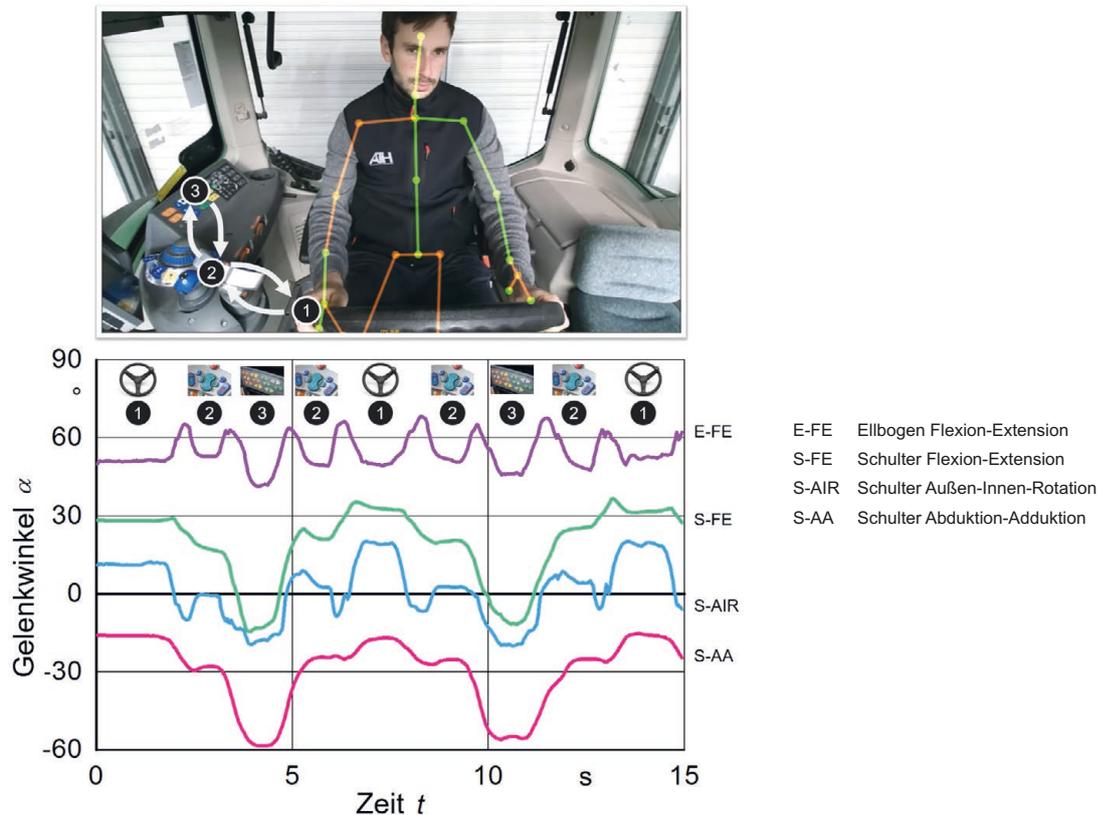


Abbildung 9: Gelenkwinkelverläufe für die rechte Schulter und Ellenbogen zwei Mal für den Use-Case „Lenkrad, Joystick, Seitenkonsole und zurück“

In einem weiteren Schritt werden über einen Matlab-Algorithmus die Bewegungen bewertet. Der Algorithmus vergleicht Komfortwinkel aus der Literatur mit den berechneten Winkelwerten (Abbildung 7). In unserer Studie wird das Ampelsystem des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA 2015) verwendet. Dabei basiert die Bewertung auf den drei Kriterien grün, gelb und rot (Abbildung 10). Zunächst wird jedem Gelenkwinkelwert in jedem Frame eine der Bewertungsfarben grün, gelb und rot zugeordnet. Die prozentuale Verteilung der Farben für jeden Gelenkwinkel über alle Frames hinweg erlaubt einzelne Gelenkwinkel zu bewerten. Für die Bewertung der gesamten Körperbewegung werden über alle Gelenkwinkel hinweg die prozentualen Werte einer gleichen Farbe aufsummiert und durch die berücksichtigte Anzahl an Gelenkwinkeln geteilt. Zur Klassifizierung wird das Klassifizierungssystem aus VDI 2225-3 angewandt. Für die Klassifizierung wird nur der prozentuale Wert der grünen Farbe berücksichtigt: Wenn der Wert der grünen Farbe über 80 % liegt, ist die Gestaltung der Greifräume für den geprüften Use-Case gut. Wenn der Wert für die grüne Farbe zwischen 60 und 80 % liegt, ist die Gestaltung der Greifräume akzeptabel. Bei einem Wert unter 60 % ist die Gestaltung der Greifräume nicht akzeptabel. Neben dem Ampelsystem gibt es noch andere Bewertungssysteme für Körperhaltungen wie das „Rapid upper limb assessment - RULA“ (IFA 2007).

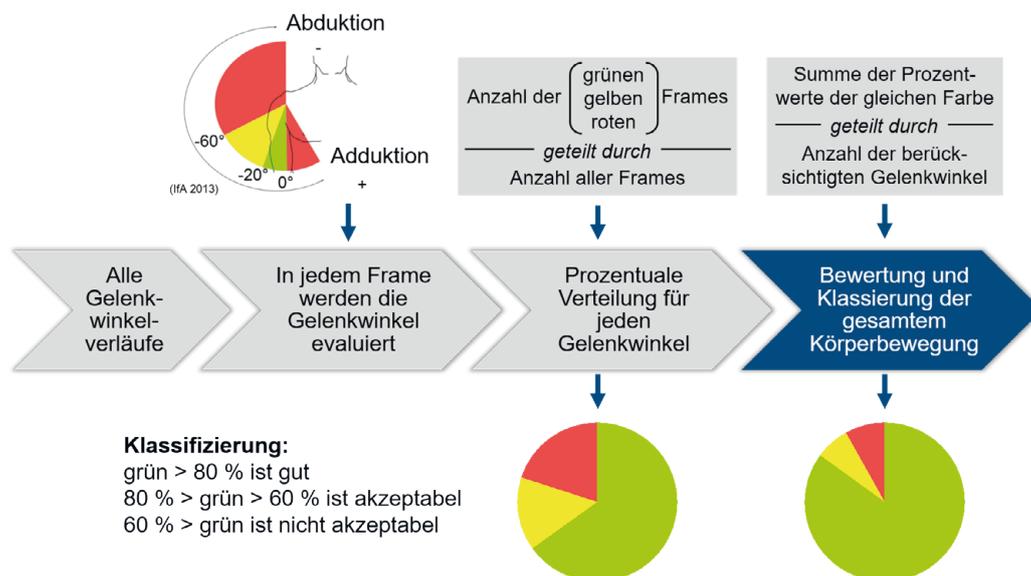


Abbildung 10: Konzept für die Integration des Ampelsystems in den Bewertungsalgorithmus der Motion-Capturing-Methode

Statistische Untersuchung der Einflüsse auf die automatisierte Bewertungsmethode

Eine Studie mit 28 Probanden (22 männlich, 6 weiblich) und 17 Use-Cases (7 Körperhaltungen und 10 -bewegungen) in der Panoramakabine eines Fendt Vario 313 wurde statistisch ausgewertet (n = 476 Beobachtungen). Dabei mussten die Probanden alle Use-Cases ausführen und auf einer metrischen Skala von 0 bis 100 % bewerten. Die metrische Skala war mit einer Ordinalskala verbunden, in der 0 % mit „nicht akzeptabel“, ab 60 % mit „akzeptabel“, ab 80 % mit „gut“ und 100 % mit „sehr gut“ beschrieben war. Dies entspricht der oben beschriebenen Klassifizierung der Bewertungsmethode. Die statistische Untersuchung wurde genutzt, um das Bewertungssystem auf personenbezogene Einflüsse wie Alter, Körperhöhe oder Geschlecht zu prüfen. Ebenso, ob die Art des Use-Cases (Körperhaltung oder -bewegung) einen Einfluss hat. Zudem konnte geprüft werden, ob ein Zusammenhang zwischen dem persönlichen Empfinden des Probanden und dem Ergebnis des Bewertungssystems vorliegt.

Die Null-Hypothese der statistischen Untersuchung lautet: Das Ergebnis des Bewertungssystems als Zielvariable wird von den zu untersuchenden, unabhängigen Einflussvariablen nicht beeinflusst. Folgende Variablen wurden erfasst:

- Das Ergebnis des Bewertungssystems als Zielvariable
- Das Empfinden des Probanden als kontinuierliche Einflussvariable
- Das Geschlecht eines Probanden als kategorische Einflussvariable
- Das Alter eines Probanden als kontinuierliche Einflussvariable
- Die Körperhöhe eines Probanden als kontinuierliche Einflussvariable
- Die Nummer des Probanden als kategorische Einflussvariable
- Die Use-Case-Nummer als kategorische Einflussvariable
- Kategorie des Use-Cases (statisch/dynamisch) als kategorische Einflussvariable

Die Use-Cases wurden allen Probanden im Vorfeld erklärt. Jeder Proband konnte die Position des Sitzes und des Lenkrades für sich passend einstellen. Die Variation zwischen den Probanden und Use-Cases wurde kontrolliert, indem die Variablen der Probandennummer und Use-Case-Nummer als

zufällige Effekte ins Modell aufgenommen wurden. Dadurch ist sichergestellt, dass die Korrelation der Messungen bei einem Probanden über alle Use-Cases hinweg und die Korrelation der Messungen in einem Use-Case über alle Probanden hinweg im Modell abgebildet ist. Der Modellansatz zielt nämlich darauf, die Korrelation innerhalb einer Use-Case-Probanden-Kombination zu bewerten. Die kategorischen Variablen wie Geschlecht und Kategorie sind als feste Effekte definiert. Zusätzlich wurden die Kovariablen Alter, Körperhöhe und das Empfinden des Probanden ins Modell aufgenommen. Die Interaktionen der Kovariablen mit Geschlecht und Kategorie wurden testweise ebenfalls ins Modell aufgenommen, allerdings nur bei Signifikanz beibehalten. Von den Interaktionseffekten war nur das geschlechtsspezifische Empfinden der Probanden signifikant. Um zufällige und feste Effekte zu erfassen, wurde ein gemischtes lineares Modell nach Gleichung 3 verwendet:

$$y = X\beta + Zu + \varepsilon \quad (\text{Gl. 3})$$

wobei

- y der $n \times 1$ Zielvariablenvektor für das Ergebnis des Bewertungssystems ist,
- β der $p \times 1$ Vektor der festen Effekte im Modell ist,
- X eine $n \times p$ Designmatrix ist, die den Beobachtungen die festen Effekte zuordnet,
- u der $q \times 1$ Vektor für die zufälligen Effekte ist,
- Z eine $n \times q$ Designmatrix ist, die den Beobachtungen die zufälligen Effekte zuordnet, hier also die 28 Probandennummereffekte und die 17 Use-Case-Nummereffekte und
- ε der Fehlervektor von y ist.

Das lineare gemischte Modell wurde im Statistikprogramm R (R CORE TEAM 2018) mit dem lme4 Package (BATES et al. 2015) mit der Maximum-Likelihoodmethode an die Daten unserer Studie angepasst. Feste Effekte wurden mit dem Likelihood-Quotiententest auf Signifikanzen geprüft. Hierbei wurde das volle Modell jeweils gegen ein Modell ohne den zur Frage stehenden festen Effekten getestet. Für Alter, Körpergröße und Kategorie ergaben sich keinen Signifikanzen. Die Interaktion von Geschlecht mit Empfinden des Probanden war signifikant ($\chi^2(1) = 4,7$; $p = 0,0313$). Für das volle Modell (Gleichung 3) ergaben sich graphisch in den Residuenplots keine auffälligen Abweichungen bezogen auf die Annahmen Varianzhomogenität und Normalverteilung. Die Analyse des Modells ergab einen signifikanten Effekt der Interaktion zwischen Geschlecht und Empfinden des Probanden, wobei beide Steigungen negativ waren. Bei den Frauen ist die Steigung signifikant von Null verschieden ($-0,11 \pm 0,034$), bei den Männern nicht ($-0,02 \pm 0,027$). Für die Ausprägungen der Kovariablen Alter ($0,0004 \pm 0,0004$) und Körperhöhe ($-0,0005 \pm 0,0009$) kann kein signifikanter Einfluss auf das Ergebnis des Bewertungssystems ermittelt werden. Anhand der Vertrauensintervalle lassen sich für die maximale Altersdifferenz (40 Jahre) ein maximaler Einfluss von $-1,8$ bis $+5,3\%$ und für die Körperhöhendifferenz (36 cm) ein maximaler Einfluss von $-8,7\%$ bis $+4,7\%$ auf das Ergebnis des Bewertungssystems ermitteln. Auch für das Geschlecht wurde kein Unterschied gefunden (Bewertungsunterschied $1,7\%$; $p = 0,372$). Aufgrund der geringen Stichprobenzahl der weiblichen Probanden wurde zusätzlich die Güte berechnet (STROUP 2002). Für eine Differenz von 10% ergab sich mit der gegebenen Stichprobengröße eine Güte von 80% . Aus den Daten lässt sich ferner ableiten, dass die Varianz der Use-Cases etwa doppelt so groß wie die Varianz der Probanden ist.

Schlussfolgerungen

Für die Bewertung von kognitiver und physischer Ergonomie losgelöst von der Befragung eines Probandenkollektives wurden zwei Methoden vorgestellt, die sowohl in der Entwicklungsphase als auch zur späteren Analyse der Kabinenergonomie angewandt werden können. Die UASW-Methode hilft, Bediensysteme systematisch zu untersuchen und deren Intuitivität zu bewerten. Anhand eines standardisierten Bewertungsschemas ist sichergestellt, dass ein subjektiver Einfluss des Prüfers so gering wie möglich gehalten wird. Wie bei der Bestimmung der technischen Wertigkeit von Konstruktionslösungen bleibt aber ein kleiner subjektiver Anteil des Prüfers im Ergebnis. Weiterhin hat die Methode nicht den Anspruch ideal-intuitive Bediensysteme zu erzwingen, sondern ist eine Hilfestellung bei der Auswahl und dem Vergleich von Gestaltungsvarianten, die in letzter Konsequenz immer leicht kompromissbehaftet sein werden. Abbildung 3 zeigt ein Modell als Grundlage der UASW-Methode, das die Unterteilung der Gebrauchstauglichkeit eines Produktes in Funktionalität und Bedienbarkeit beschreibt. Diese Unterteilung ist wichtig, um zu verstehen was ein intuitives Bediensystem braucht – nämlich eine möglichst den Populationsstereotypen entsprechend gestaltete Bedienbarkeit.

Die Motion-Capturing-Methode ermöglicht eine rein objektive Aufnahme der Bewegungen eines Probanden, die daraufhin automatisiert analysiert und bewertet werden können. Das System wurde bisher lediglich auf stillstehenden Ackerschleppern eingesetzt. Die Kinect-v2-Kamera bietet für die in diesem Beitrag beschriebenen Untersuchungen eine gute Genauigkeit. Die Prozesssicherheit der Kinect v2 war in unseren Versuchen nicht immer gegeben, weil Messungen bisweilen wiederholt werden mussten, nachdem die Kamera einen Probanden während der Messung plötzlich nicht mehr erkannt hatte. Durch die Anschaffung eines markerbasierten, professionellen Motion-Capturing-Systems ist die Prozesssicherheit mittlerweile gegeben. Die Bewertung der Bewegungen über Komfortwinkel aus der Literatur ist zielführend, da die auftretenden Gelenkwinkel während einer Bewegung oder Körperhaltung für das Wohlbefinden und die Gesundheit des Bewegungsapparates entscheidend sind. Die Literatur zur Ergonomie hält viele Bewertungssysteme basierend auf Komfortwinkelvorgaben vor. In einem ersten Schritt wurde das Ampelsystem des IFA (2015) in den Auswertalgorithmus integriert. Dieses kann durch andere Bewertungssysteme ersetzt werden. Die Systeme unterscheiden sich teilweise etwas in ihren Komfortwinkelvorgaben. Die statistische Untersuchung der Motion-Capturing-Methode mit unserer Studie zeigt, dass weder das Alter (22 Jahre bis 62 Jahre), die Körperhöhe (1,62 m bis 1,98 m), das Geschlecht noch die Art des Use-Cases (Kategorie statisch/dynamisch) einen signifikanten Einfluss auf das Bewertungsergebnis haben. Eine erwartete aber nicht vorhandene Signifikanz der Variable Körperhöhe kann damit erklärt werden, dass jeder Proband sich den Fahrerplatz vor der Messung frei einstellen konnte und die Verstellwege offenbar ausreichend waren. Es kann bezüglich aller Variablen daher weiterhin die Gültigkeit der Nullhypothese angenommen werden: Das System ist für Körperhaltungen und -bewegungen einsetzbar und es sind keine besonderen Anforderungen an das Probandenkollektiv bezüglich Varianz von Alter, Körperhöhe und Geschlecht notwendig. Das Empfinden der Probanden ist mit dem Ergebnis des Bewertungssystems negativ korreliert, bei den Frauen ist diese negative Korrelation sogar signifikant. Das scheint zunächst nicht plausibel. Unter der Voraussetzung einer erfolgreichen Verifizierung des eingesetzten Messsystems und der Berechnung der Gelenkwinkel sowie der erfolgreichen Validierung der Komfortwinkelvorgaben durch das Institut für Arbeitsschutz der DGUV bleiben zwei Ursachen für die nicht erfolgreiche Validierung der Ergebnisse des Bewertungssystems über das Empfinden der Probanden in dieser Studie. Mögliche erste Ursache: Das Empfinden eines Probandenkollektives ist nicht ausnahmslos

der Realität entsprechend, weil – wie schon in der Einleitung beschrieben – das Schmerzempfinden nicht nur von biologischen, sondern auch psychischen und sozialen Umständen abhängig ist. Das würde die Absicht stützen einen Bewertungsprozess ohne Probanden zu etablieren und lässt die Formulierung einer Hypothese zu, die in weiteren Arbeiten untersucht werden muss: Ein Probandenkollektiv kann Greifräume, Körperhaltungen und Bewegungen nicht der tatsächlichen biologischen Beeinträchtigung entsprechend bewerten. Mögliche zweite Ursache: Das in Abbildung 10 beschriebene Bewertungskonzept ist nicht ausreichend genau und muss angepasst werden. Stellschrauben könnten eine unterschiedliche Gewichtung einzelner Gelenkwinkel oder die Systematik der Klassifizierung sein. Damit ergäbe sich als weitere Forschungsperspektive die Entwicklung eines genaueren Bewertungskonzeptes. Allgemein betrachtet bleibt es interessant zu sehen, ob in weiteren derartigen Untersuchungen die Null-Hypothese aus unserer Studie weiter bestätigt oder aber widerlegt werden kann – vor allem im Hinblick auf einen zu erwartenden Einfluss der Variable „Körperhöhe“.

Literatur

- Ai, A.; Goldmann, J.; Tauber, H.-J.; Schuchmann, G.H. (2017): DLG-Prüfbericht 6766. Fendt 828 Vario S4. DLG-Prüfbericht (6766), S. 1–16
- Bates, D.; Mächler, M.; Bolker, B.; Walker, S. (2015): Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software* 67(1), <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Böttinger, S.; Leipold, T.; Maier, T. (2011): Bewertung von Mährescher-Bediensystemen. *LANDTECHNIK* 66(5), <https://doi.org/10.15150/lt.2011.885>
- Bubb, H.; Bengler, K.; Grünen, R.E.; Vollrath, M. (2015): *Automobilergonomie*, Wiesbaden, Springer Vieweg
- Bullinger, H.-J. (1994): *Ergonomie. Produkt- und Arbeitsplatzgestaltung*, Wiesbaden, Vieweg+Teubner Verlag
- Capecchi, M.; Ceravolo, M.; Ferracuti, F.; Iarlori, S.; Longhi, S.; Romeo, L.; N. Russi, S.; Verdini, F. (2016): Accuracy evaluation of the Kinect v2 sensor during dynamic movements in a rehabilitation scenario. In: 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 16–20 August, Orlando, USA, IEEE
- DIN (2008): *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung*. DIN EN ISO 9241-110:2008-09, Berlin, Beuth Verlag
- DIN (2009): *Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen – Teil 1: Allgemeine Leitsätze für Benutzer-Interaktion mit Anzeigen und Stellteilen*. DIN EN 894-1:2009-01, Berlin, Beuth Verlag
- DIN (2011a): *Ergonomie – Genereller Ansatz, Prinzipien und Konzepte*. DIN EN ISO 26800:2011-11 Berlin, Beuth Verlag
- DIN (2011b): *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme*. DIN EN ISO 9241-210:2011-01, Berlin, Beuth Verlag
- EU (2016): *Verordnung (EU) Nr. 167/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. Februar 2013 über die Genehmigung und Marktüberwachung von land- und forstwirtschaftlichen Fahrzeugen*
- Dupuis, H. (1981): *Ergonomische Gestaltung von Schleppern und landwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen*, Köln, Verlag TÜV Rheinland
- Galna, B.; Barry, G.; Jackson, D.; Mhiripiri, D.; Olivier, P.; Rochester, L. (2014): Accuracy of the Microsoft Kinect sensor for measuring movement in people with Parkinson's disease. *Gait & Posture* 39(4), pp. 1062–1068, <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2014.01.008>
- Hohmann-Jeddi, C. (2015): Schmerz ist subjektiv. *Pharmazeutische Zeitung* 160(12), S. 51–52
- IFA (2007): *Das „Rapid Upper Limb Assessment (RULA)“*. <https://www.dguv.de/medien/ifa/de/pub/rep/pdf/rep07/biar0207/rula.pdf>, Zugriff am 23.10.2018

- IFA (2015): Bewertung physischer Belastungen gemäß DGUV. https://www.dguv.de/medien/ifa/de/fac/ergonomie/pdf/bewertung_physischer_belastungen.pdf, Zugriff am 23.10.2018
- Kowalewsky, H.-H. (2014): Traktor-Vergleichstest: Welche Kabine punktet? (Teil 6). <https://www.agrarheute.com/technik/traktoren/traktor-vergleichstest-welche-kabine-punktet-teil-6-447789>, Zugriff am 16.05.2018
- Otte, K.; Kayser, B.; Mansow-Model, S.; Verrel, J.; Paul, F.; Brandt, A.U.; Schmitz-Hübsch, T. (2016): Accuracy and Reliability of the Kinect Version 2 for Clinical Measurement of Motor Function. PLoS ONE 11(11), <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0166532>
- R Core Team (2018): R: A Language and Environment for Statistical Computing, Vienna, Austria, R Foundation for Statistical Computing
- Schempp, T.; Böttinger, S. (2015): Entwicklung eines idealisierten Bedienkonzeptes für Ackerschlepper auf Grundlage einer Most-Frequent-Case und Worst-Case Analyse aktueller Bedienkonzepte. In: Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft, 35. GIL-Jahrestagung, 23.-24. Februar 2015, Geisenheim, Germany, S. 165-168
- Schmid, M. (2003): Benutzergerechte Gestaltung mechanischer Anzeiger mit Drehrichtungsinkompatibilität zwischen Stell- und Wirkteil. Dissertation, Universität Stuttgart
- Stroup, W.W. (2002): Power analysis based on spatial effects mixed models: A tool for comparing design and analysis strategies in the presence of spatial variability. Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics 7(4), pp. 491-511, <https://doi.org/10.1198/108571102780>
- Tiemann, L.; May, E.S.; Postorino, M.; Schulz, E.; Nickel, M.M.; Bingel, U.; Ploner, M. (2015): Differential neurophysiological correlates of bottom-up and top-down modulations of pain. Pain 156(2), pp. 289-296, <https://doi.org/10.1097/01.j.pain.0000460309.94442.44>
- VDI (1998): Technisch-wirtschaftliches Konstruieren. VDI-Richtlinie 2225-3, VDI-Verlag, Düsseldorf
- Wilmer, H. (2012): Zuggleistung mit Reserven. Fendt 939 Vario SCR. profi 24, S. 12-18
- Wilmer, H. (2015): Worin fahren Sie am besten? profi 27, S. 14-25
- Xu, X.; McGorry, R.; Chou, L.-S.; Lin, J.-H.; Chang, C.-C. (2015): Accuracy of the Microsoft Kinect™ for measuring gait parameters during treadmill walking. Gait & Posture 42(2), pp. 145-151, <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2015.05.002>
- Zühlke, D. (2005): Der intelligente Versager – Das Mensch-Technik-Dilemma. Darmstadt, Primus-Verlag

Autoren

Dipl.-Ing. Timo Schempp ist wissenschaftlicher Mitarbeiter/Ergonomie in Fahrer кабинен, **Prof. Dr.-Ing. Stefan Böttinger** ist Leiter des Fachgebietes Grundlagen der Agrartechnik am Institut für Agrartechnik, Fachgebiet Grundlagen der Agrartechnik, Universität Hohenheim, Garbenstraße 9, 70599 Stuttgart. E-Mail: timo.schempp@uni-hohenheim.de

Jens Möhring ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kulturpflanzenwissenschaften, Bereich Biostatistik, Universität Hohenheim, Fruwirthstrasse 23, 70599 Stuttgart