

Entwicklung eines Simulators zur Validierung eines Systems zur Optimierung der Fahrerbeanspruchung

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

Dissertation

von

Patrick Lehr, M.Sc.

Tag der mündlichen Prüfung:
Hauptreferent:
Korreferent:

20. August 2026
Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer
Prof. Dr.-Ing. Stefan Böttinger

Kurzfassung

Die Arbeit beschreibt die Entwicklung und den Aufbau eines Fahrsimulators, sowohl zur Validierung eines Assistenzsystems zur Optimierung der Fahrerbeanspruchung für Mähdrescher, als auch zur Bewertung der Akzeptanz unter reproduzierbaren Bedingungen. Der Simulator kombiniert dabei ein immersives Visualisierungssystem, reale Bedienelemente, Sensorik zur Messung der Beanspruchung und eine vollständig integrierte Mensch-Maschine-Schnittstelle.

Für die Konzeption wurden Anforderungen berücksichtigt, die sowohl technische Aspekte, als auch die inhaltliche Abbildung landwirtschaftlicher Arbeitsprozesse umfassen. Dazu zählt die Entwicklung eines strukturierten Katalogs, der typische Feldsituationen, aber auch mögliche Handlungsempfehlungen durch das Assistenzsystem im hochautomatisierten Betrieb berücksichtigt. Es wurden Szenarien für die gezielte Auslösung von Über- und Unterforderung entwickelt. Diese bilden die Basis für adaptive Handlungsempfehlungen. Die Umsetzung berücksichtigte potenzielle Grenzen der Simulation, zeigt aber auch, dass diese für die Validierungsziele dieses Systems nicht kritisch sind, sofern die unterschiedlichen Beanspruchungslevel abgebildet werden können.

In mehreren aufeinander aufbauenden Studien wurde zunächst eine Experimentalaufgabe für das Einstellen verschiedener Beanspruchungslevel entwickelt. Das zu validierende Assistenzsystem wurde zunächst in Teilfunktionen und anschließend als Gesamtsystem untersucht. In den Studien wurde überprüft, wie das Assistenzsystem auf unterschiedliche Beanspruchungszustände reagiert und in welchem Maß es das Beanspruchungsniveau der Fahrer stabilisieren kann. Die Ergebnisse zeigen, dass das System in der Lage ist, Überforderung gezielt zu reduzieren und Unterforderung zu vermeiden, indem situationsabhängig Handlungsempfehlungen ausgegeben werden. In der abschließenden Gesamtsystemstudie konnte die zuverlässige Zusammenarbeit zwischen Sensorik, Entscheidungslogik und Mensch-Maschine-

Schnittstelle im Simulator nachgewiesen werden. Ergänzende Akzeptanzuntersuchungen, unter anderem auf Messen, bestätigten eine hohe Benutzerfreundlichkeit, positive Nutzungserlebnisse sowie eine insgesamt starke Akzeptanz des Systems durch die Nutzer, gemessen mit den Fragebögen „User Experience Questionnaire“ und „Technikaffinität – elektronische Geräte“. Die Ergebnisse einer Feldstudie bestätigen, dass die im Simulator in klar definierten Szenarien gewonnen Erkenntnisse und Funktionslogiken auf den realen Einsatz übertragbar sind.

Die Forschung zeigt, dass Simulatoren ein effizientes Werkzeug zur Entwicklung und Validierung von Fahrerassistenzsystemen darstellen. Sie ermöglichen frühe Fehlererkennung, Kostenreduktion und die Einbindung zukünftiger Anwender in den Entwicklungsprozess. Damit leistet die Arbeit einen Beitrag zur Digitalisierung und Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft, indem sie technologische Innovation mit ergonomischer und sozialer Akzeptanz verknüpft.

Abstract

The thesis delineates the development and construction of a driving simulator, both for validating an assistance system for optimizing driver stress for combine harvesters and for evaluating acceptance under reproducible conditions. This simulator combines an immersive visualization system, real controls, sensors for measuring stress, and a fully integrated human-machine interface.

A comprehensive set of requirements was defined for the design, covering both technical aspects and the content-related mapping of agricultural work processes. This included the development of a structured catalog that takes typical field situations as well as possible recommendations for action by the assistance system in highly automated operation into account. The scenarios derived from this process enable the targeted triggering of over- and under-challenge and form the basis for adaptive recommendations for action. The implementation takes potential limitations of the simulation into account. However, it was determined that these are not critical for the validation objectives of the system, provided that the different stress levels can be mapped.

In a series of consecutive studies, an experimental task was initially developed for the purpose of establishing varying stress levels. The assistance system to be validated was first examined in terms of its individual functions and then as a complete system. The experiments were designed to ascertain the response of the assistance system to varying stress conditions and its capacity to mitigate the driver's stress level. The findings demonstrate that the system is capable of specifically reducing excessive demands and avoiding insufficient demands by issuing situation-dependent recommendations for action. In the final overall system study, the reliable interaction between sensor technology, decision-making logic, and the human-machine interface was demonstrated in the simulator. Supplementary acceptance studies, incorporating events such as trade fairs, confirmed a high level of user-

friendliness, positive user experiences, and overall strong acceptance of the system by users, as measured by questionnaires “User Experience Questionnaire” and “Technikaffinität – elektronische Geräte”. A field study has confirmed that the findings and functional logic obtained in the simulator in clearly defined scenarios can be transferred to real-world applications.

The research indicates that simulators are an efficient tool for the development and validation of driver assistance systems. They enable early error detection, cost reduction, and the involvement of future users in the development process. The work thus contributes to digitalization and sustainability in agriculture by combining technological innovation with ergonomic and social acceptance.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand am Institutsteil Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) entstanden.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer für die wissenschaftliche Betreuung als Doktorvater und die Übernahme des Hauptreferats. Der mir entgegengebrachte Freiraum und das Vertrauen bei der Projektbearbeitung sowie die stetes offene Tür sind keineswegs selbstverständlich und haben maßgeblich zu meiner fachlichen und persönlichen Entwicklung beigetragen. Des Weiteren danke ich Prof. Dr.-Ing. Stefan Böttinger für sein Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Koreferats, sowie den fachlich wertvollen Austausch während des Projekts. Ebenso danke ich Prof. Dr.-Ing. Christoph Stiller für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Meinen Kolleginnen und Kollegen aus dem wissenschaftlichen, technischen und administrativen Bereich des Mobima danke ich herzlich für die fachliche, wie auch persönliche Unterstützung sowohl im Arbeitsalltag, als auch außerhalb davon. Ganz besonders möchte ich mich dabei bei meinem Bürokollegen Steffen Metzger für die ausgezeichnete Zusammenarbeit und kritischen Diskussionen über die gesamte Zeit im Büro 028 bedanken.

Meinen studentischen Hilfskräften sowie Abschlussarbeiterinnen und Abschlussarbeitern, die an diesem Thema mit geforscht haben, danke ich herzlich für die engagierte Unterstützung. Namentlich genannt sei hier Tom Stirnkorb, der mir mit hoher Einsatzbereitschaft über viele Jahre zur Seite stand und dabei stets wertvolle Denkanstöße geliefert hat.

Meinen Projektpartnerinnen und Projektpartnern aus dem Forschungsprojekt „Fahrerkabine 4.0“ danke ich für die wertvolle und vertrauensvolle Zusammenarbeit, die maßgeblich zum außerordentlich erfolgreichen Projektabschluss beigetragen haben.

Von ganzem Herzen danke ich Hannah, die mich beim Verfassen dieser Arbeit stets unterstützt und in den schwierigen Phasen immer zum Weitermachen motiviert hat.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern Barbara und Alois für die bedingungslose Unterstützung während meines Studiums und meiner Promotion und den Rückhalt in allen anderen Lebenssituationen.

*Die Zeit, die du für deine Rose gegeben hast,
sie macht deine Rose so wichtig*
Antoine de Saint-Exupéry, Der kleine Prinz

Karlsruhe, im August 2026

Patrick Lehr

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	iii
Danksagung	v
Inhaltsverzeichnis	vii
Abbildungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xiii
Abkürzungsverzeichnis	xv
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ziel der Arbeit	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Stand der Forschung und Technik	5
2.1 Fahrsimulatoren in Forschung und Entwicklung	6
2.1.1 Fahrsimulatoren	6
2.1.2 Fahrsimulatoren für Land- und Baumaschinen	9
2.1.3 Anforderungen an Fahrsimulatoren für hohe Wiedergabetreue	10
2.2 Validierung in einem Simulator	14
2.2.1 Validierungsprozess	15
2.2.2 Validität in Simulatorstudien	15
2.3 Szenarienentwicklung	17
2.4 Beanspruchung und Stress in Simulation vs. Realität	19
2.4.1 Beanspruchungsmessung durch Herzrate	20
2.4.2 Beanspruchungsmessung durch Eye-Tracking	21
2.4.3 Subjektive Beanspruchungseinschätzung	23
2.4.4 Differenz in der Beanspruchung zwischen Simulator und Realität	24

2.5	Akzeptanzbewertung eines OFA	27
2.5.1	User Experience und Usability.....	27
2.5.2	Technikakzeptanz.....	30
2.5.3	Qualitative Interviews	34
2.6	Forschungsbedarf.....	35
3	Anforderungen für die Validität des Simulators	39
3.1	Anwendungsfall.....	39
3.2	Visuelle Immersion.....	40
3.3	I/O-Module	42
3.4	Anbindung des Assistenzsystems	45
3.5	Erforderliche Fahrscenarien und Handlungsempfehlungen.....	46
3.5.1	Umfragen zu Funktionalitäten eines OFA	47
3.5.2	Entwicklung von relevanten Persona	48
3.5.3	Relevante Fahrscenarien und Handlungsempfehlungen eines OFA.....	50
4	Aufbau des Simulators	59
4.1	Teilsysteme des Simulators	59
4.2	Gesamtaufbau Simulator	66
4.3	Grenzen des Simulators	69
5	Validierungsprozess.....	73
5.1	Szenarioentwicklung	73
5.2	Studienszenarien.....	80
5.2.1	Szenarien für die Validierungsstudien.....	80
5.2.2	Szenarien für die Akzeptanzbewertung.....	89
5.3	Ergebnisse.....	95
5.3.1	Validierung der Experimentalaufgabe.....	96
5.3.2	Ergebnisse der Validierung	97
5.3.3	Ergebnisse der Akzeptanzevaluierung.....	99
5.4	Feldstudie	106
5.5	Einordnung der Validierung auf dem Simulator.....	109
6	Zusammenfassung	111
6.1	Wissenschaftlicher Beitrag	111
6.2	Weiterführende Betrachtungen	114

Literaturverzeichnis.....	117
Eigene Veröffentlichungen.....	128
Anhang	130
A1. Weitere Persona	130
A2. Weitere Teilszenarien	132

In der vorliegenden Arbeit wird zugunsten der besseren Lesbarkeit darauf verzichtet, bei Personenbezeichnungen in die männliche und weibliche Form zu unterscheiden. Das in dieser Arbeit verwendete generische Maskulinum bei Personenbezeichnungen bezieht sich – sofern nicht anders kenntlich gemacht – gleichermaßen auf alle Geschlechter.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Low-level Simulator am Mobima des KIT.....	7
Abbildung 2: Framework für die Validität eines Simulators nach [51]	16
Abbildung 3: Persona Stefan Huber [118]	49
Abbildung 4: Innenansicht des Simulators.....	67
Abbildung 5: Schaltschrank und Arbeitsplatz des Versuchsleiters	68
Abbildung 6: Ablaufplan für die Handlungsempfehlung "Verstellung der Dreschsysteme".....	74
Abbildung 7: Passivtrigger mit hoher Priorität.....	76
Abbildung 8: Startseite Büromodus	78
Abbildung 9: Top Level Ablauf der Produktakzeptanzstudie	79
Abbildung 10: Ablauf der Experimentalaufgabe.....	82
Abbildung 11: Reihenfolge der Szenarien für die Experimentalaufgabe.....	83
Abbildung 12: Ablauf der Studie zur gezielten Beeinflussung durch das Assistenzsystem	85
Abbildung 13: Ablauf der Studie zum Gesamtsystem	88
Abbildung 14: Ablauf des Messeszenarios	91
Abbildung 15: Ablauf der Produktakzeptanzstudie.....	94
Abbildung 16: Ergebnisse der RSME-Werte für die Hauptstudie, (n = 40).....	97
Abbildung 17: Ergebnisse der Befragung zur Gesamtbewertung auf der Agritechnica 2023 mit Standardabweichung, Skala: 1 = überhaupt nicht gut, 5 = sehr gut; n = 202.....	102
Abbildung 18: Ergebnisse UEQ mit Standardabweichung im Benchmark, n = 54	103

Abbildung 19: Ergebnisse TA-EG mit Standardabweichung, Skala: 1 = trifft überhaupt nicht zu, 5 = trifft voll zu, n = 54	105
Abbildung 20: Aufbau des HMI in der Versuchsmaschine [123]	107
Abbildung 21: Zeitbereiche der RSME-Werte in der Feldstudie	108

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beispiele von Simulatoren für Pkw und Nutzfahrzeuge.....	8
Tabelle 2: Anforderungen an die visuelle Immersion	42
Tabelle 3: Anforderungen an die I/O-Module	44
Tabelle 4: Anforderungen an die Anbindung des Assistenzsystems	46
Tabelle 5: Erforderliche Fahrszenarien	53
Tabelle 6: Betriebliche Handlungsempfehlungen	54
Tabelle 7: Handlungsempfehlungen zum Wohlbefinden	55
Tabelle 8: Handlungsempfehlungen im Bereich Medien	55
Tabelle 9: Einstellungen für das Assistenzsystem.....	56
Tabelle 10: Maschinenbezogene Handlungsempfehlungen	57
Tabelle 11: Umsetzung der visuellen Anforderungen.....	61
Tabelle 12: Umsetzung der Anforderungen an das I/O-System	63
Tabelle 13: Umsetzung der Anforderungen an die Anbindung des Assistenzsystems.....	66
Tabelle 14: Pool an Handlungsempfehlungen.....	86

Abkürzungsverzeichnis

3D	Dreidimensionalität (dreidimensional, räumlich)
AF	Autonome Fahrt
AR	Augmented Reality
DALI	Driving Activity Load Index
DeLuTa	Deutsche Lohnunternehmertage
DLG	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft
DOF	Freiheitsgrad, Degree of Freedom
DS	Szenario Dreschsysteme verstellen
DSMS	Szenario Dreschsysteme verstellen + Minispiel
ELSI	ethische, rechtliche und soziale Aspekte
FOV	Sichtfeld, Field of View
HE	Handlungsempfehlung
HMI	Mensch-Maschine-Schnittstelle
HUD	Head-up-Display
I/O-Module	Eingabe-/Ausgabemodule
KI	Künstliche Intelligenz

MEESTAR	Modell zur Ethischen Evaluierung Sozio-Technischer Arrangements
MF	Manuelle Fahrt
NASA-TLX	NASA Task Load Index
OFA	System zur Optimierung der Fahrerbeanspruchung
Pkw	Personenkraftwagen
RSME	Rating Scale Mental Effort
S	Szenario
SAM	Self Assessment Manikin
SD	Standardabweichung, standard deviation
SUS	System Usability Scale
TA-EG	Technikaffinität elektronische Geräte
TAM	Technikakzeptanzmodell
UEQ	User Experience Questionnaire
UTAUT	Unified Theory of Acceptance and Use of Technology
VR	Virtual Reality

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Leistungsfähigkeit der Landwirtschaft wird maßgeblich von der Qualifizierung und Motivation der Landwirte bestimmt. Durch den demographischen Wandel und gestiegene Anforderungen an die Vereinbarkeit von Privat- und Berufsleben, scheiden mehr und mehr Menschen aus diesem Beruf aus, oder ergreifen ihn gar nicht erst, was sich durch das Höfesterben der letzten Jahre bemerkbar macht [1]. Entscheidend für die Sicherung einer wettbewerbsfähigen Landwirtschaft ist daher die Sicherung des Nachwuchses durch ein attraktives Arbeitsumfeld, das Landwirtinnen und Landwirte unterstützt, die Arbeit effektiv und effizient zu erledigen. Dabei sollen moderne digitale Technologien umfassend genutzt werden, um die Arbeitsprozesse zu optimieren und zu parallelisieren.

Im Projekt „Fahrerkabine 4.0“ (Förderkennzeichen: 031B0735A), das Teil des Strategieprozesses „Agrarsysteme der Zukunft“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung war, wurde eine adaptive Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI) für Mähdrescher entwickelt, die das Beanspruchungsniveau von Fahrern erkennen und beeinflussen kann. In beanspruchungsarmen Situationen, also in Phasen mit hoher Automatisierung, können Nebentätigkeiten erledigt werden. Diese Nebentätigkeiten können aus unterschiedlichen Bereichen der betrieblichen und privaten Tätigkeiten kommen und werden entsprechend angeboten. In stressigen, wenig automatisierten Situationen kann der Automatisierungsgrad erhöht werden und es erfolgt eine Fokussierung auf die kritischen und am höchsten zu priorisierenden Parameter, um Überforderung zu vermeiden. [E1]

Ein solches adaptives System zur Optimierung der Fahrerbeanspruchung (OFA) optimiert die subjektive Beanspruchung des Nutzers und hält das Situationsbewusstsein hoch. Dies führt zu ökonomischen und ökologischen Vorteilen, wie der Maximierung der Arbeitsleistung bei gleichzeitiger Mini-

mierung von Fehlern und der präventiven Unterstützung in Notsituationen. Die verbesserte Arbeitsleistung steigert auch das persönliche Wohlbefinden des Nutzers und sichert dessen gesellschaftliche Einbindung.

Durch Head-Up-Displays können abhängig von Beanspruchungszustand und gewählter Nebentätigkeit zusätzliche Elemente flexibel in die Umgebung projiziert werden, ohne die Kabine zu überladen. Damit sorgt ein vollständig vernetztes OFA für eine gleichmäßige und optimale Arbeitsauslastung über den gesamten Arbeitstag. Der Beanspruchungszustand kann dabei durch Eye-Tracking-Systeme oder Fitnessarmbänder ermittelt werden. Mit zunehmender Zufriedenheit steigt auch die Attraktivität des Arbeitsfelds an sich, was für eine nachhaltige Arbeitsgestaltung vorteilhaft ist.

Mit der zunehmenden Automatisierung landwirtschaftlicher Fahrzeuge steigen hingegen die Anforderungen an die Validierung solcher Systeme. Fehlfunktionen oder inadäquate Adaptionstrategien können aufgrund eines veränderten Fokus des Fahrers schwerwiegende Folgen haben, während gleichzeitig eine Erprobung auf realen Maschinen mit hohen Kosten, begrenzter Reproduzierbarkeit und speziell bei Mähdreschern mit kurze Einsatzzeiträumen und hohen potenziellen Ernteverlusten einher geht.

1.2 Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Konzeption, Implementierung und Evaluation eines Fahrsimulators als Validierungs- und Bewertungsplattform für ein OFA für hochautomatisierte Mähdrescher. Der zu entwickelnde Fahrsimulator soll eine realitätsnahe Abbildung typischer Arbeits- und Fahrscenarien ermöglichen. Er soll dabei eine sichere und flexible Umgebung darstellen, in der die einzelnen Funktionen systematisch untersucht und bewertet werden können. Durch den Einsatz des Simulators sollen zeit- und kostenintensive Erprobungen auf realen Maschinen reduziert, sowie potenzielle Ernteverluste vermieden werden.

Ein wesentlicher Vorteil in der simulatorbasierten Validierung liegt in der Reproduzierbarkeit der Testszenarien. Über gesamte Studienreihen hinweg

können identische Betriebs-, Umwelt- und Belastungssituationen kontrolliert erzeugt und wiederholt werden, wodurch vergleichbare Untersuchungen unterschiedlicher Systemkonfigurationen, Adaptionsstrategien und Nutzergruppen möglich werden. Dies schafft die Grundlage für die objektive Bewertung der Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit des OFA.

Da Akzeptanz maßgeblich über die tatsächliche Nutzung und den Erfolg solcher Assistenzsysteme entscheidet, ist deren Untersuchung essenziell. Auf einem Simulator können neue oder ungewohnte Assistenzfunktionen ohne reales Sicherheitsrisiko eingeführt und evaluiert werden. Unterschiedliche Formen der Informationsdarstellung, wie Head-Up-Displays, akustische Hinweise oder haptisches Feedback können systematisch verglichen werden, um deren Einfluss auf Beanspruchung und Akzeptanz zu untersuchen.

Der Simulator soll zudem eine frühe und kontinuierliche Nutzerintegration im Entwicklungsprozess ermöglichen. Verschiedene Personengruppen aus der Landwirtschaft und Landtechnik können also bereits in der Entwicklungsphase in die Evaluation des Systems eingebunden werden, wobei nutzerzentrierte Anforderungen frühzeitig identifiziert und in die Systemgestaltung integriert werden können. Dies ermöglicht eine iterative Weiterentwicklung und fördert die spätere Akzeptanz im realen Einsatz.

1.3 Aufbau der Arbeit

Vor dem Hintergrund der in Kapitel 1 aufgezeigten Motivation ist es das Ziel der Arbeit, einen Simulator aufzubauen, mit dem ein OFA validiert und dessen Akzeptanz in der Zielgruppe bewertet werden kann.

In Kapitel 2 wird die literaturbasierte Analyse von Simulatoren am Markt und in der Forschung mit anschließender Fokussierung auf Simulatoren in der Landtechnik durchgeführt und Anforderungen an eine hohe Wiedergabetreue eines Simulators aufgezeigt. Der Validierungsprozess in Anlehnung an das V-Modell wird dargestellt, ergänzt durch eine Darstellung der physischen und verhaltensbezogenen Validität. Nachfolgend werden Methoden zur

Entwicklung von Szenarien dargelegt. Verschiedene Methoden zur Erfassung des Beanspruchungs- und Stressniveaus werden beschrieben und die Intensitätsunterschiede zwischen Simulator- und Realfahrt werden diskutiert. Da als Teil der Validierung und damit der Funktionalität eines Assistenzsystems auch immer die User Experience und Usability entscheidende Faktoren sind, muss auch die Akzeptanz eines solchen OFA bewertet werden. Im Stand der Forschung werden daher zum Abschluss verschiedene Methoden der Akzeptanzbewertung beschrieben. Darauf aufbauend leitet sich der ergebende Forschungsbedarf und die zugrunde liegende Forschungshypothese ab, sowie die mit dieser Arbeit zu beantwortenden Forschungsfragen.

Kapitel 3 stellt die Anforderungen an einen Simulator für das beschriebene OFA dar. Dies betrifft technische Anforderungen an die Immersion und den Aufbau des Simulators, aber auch eine Sammlung von Handlungsempfehlungen und Fahrscenarien, die für ein OFA in Frage kommen.

Aufbauend auf diesen Anforderungen wird in Kapitel 4 die Umsetzung der Teilsysteme des Simulators dargestellt, sowie das Gesamtsystem beschrieben. Neben der Funktionalität werden verschiedene Grenzen des aufgebauten Simulators dargestellt und warum diese für die Validierung und Akzeptanzbewertung des OFA unkritisch sind.

In Kapitel 5 wird der Validierungsprozess für das OFA auf dem Simulator beschrieben. Dafür werden aus den gesammelten Handlungsempfehlungen und Fahrscenarien ausführlichere Szenarien für eine Experimentalaufgabe zum Einstellen verschiedener Beanspruchungslevel und für die durchgeführten Studien zur Validierung und Akzeptanzbewertung entwickelt. Dies wird anhand eines Beispiels ausführlich erläutert und die weiteren Szenarien für die Studien werden vorgestellt. Anschließend wird kurz auf die Ergebnisse der Experimentalaufgabe, der Validierung und der Akzeptanzbewertung eingegangen und die Resultate einer Feldstudie mit dem OFA präsentiert sowie die Ergebnisse der Validierung auf dem Simulator eingeordnet.

Die Zusammenfassung, der wissenschaftliche Beitrag und weiterführende Betrachtungen schließen die Arbeit in Kapitel 6 ab.

2 Stand der Forschung und Technik

In diesem Kapitel wird der Stand der Forschung und Technik mit Bezug auf die vorliegende Arbeit aufgezeigt und das Forschungsdefizit dargelegt, dem durch die folgenden Methoden und Erkenntnisse begegnet werden soll. Zunächst werden Fahrsimulatoren als Forschungs- und Entwicklungswerkzeuge eingeführt mit einer darauffolgenden Fokussierung auf Simulatoren in der Landtechnik. Auf spezielle Aspekte, wie die visuelle Immersion, Eingabe-/Ausgabemodule (I/O-Module) und Systemanbindung wird ebenfalls eingegangen. Anschließend wird der Validierungsprozess vorgestellt, mit dem ein OFA validiert werden kann, ebenso wie auf Validitätskriterien. Anschließend wird die Szenarienentwicklung und die Validierung eines Assistenzsystems im Simulator beschrieben.

Ebenso adressiert die Arbeit die Frage, inwieweit simulatorbasierte Untersuchungen reale Beanspruchungen abbilden können, wobei sowohl physikalische Messgrößen, als auch die subjektive Einschätzung herangezogen werden. Da für ein umfangreiches Assistenzsystem, das so tief vernetzt ist, wie ein OFA, die Akzeptanz neben der technischen Funktionalität von entscheidender Wichtigkeit ist, werden standardisierte Methoden zur Bewertung von User Experience, Usability, Technikakzeptanz und -affinität eingeführt. Abschließend werden die identifizierten Forschungslücken herausgearbeitet und eine Forschungshypothese mit zugehörigen Forschungsfragen aufgestellt.

2.1 Fahrsimulatoren in Forschung und Entwicklung

In diesem Kapitel werden aktuelle Fahrsimulatoren in der Forschung und Technik, sowie Kriterien für eine hohe Wiedergabetreue von Simulatoren vorgestellt.

2.1.1 Fahrsimulatoren

Fahrsimulatoren sind Systeme zur realitätsnahen Simulation von Fahrzeugen in Fahrumgebungen. Sie ermöglichen die Erforschung von Fahrverhalten, Assistenzsystemen und Mensch-Maschine-Schnittstellen unter kontrollierten und reproduzierbaren Bedingungen ohne Sicherheitsrisiken und mit deutlich geringeren Kosten und Aufwand als reale Testfahrten [2]. Dabei ist die Bandbreite der eingesetzten Fahrsimulatoren sehr groß. Von einfachen, statischen Desktoparbeitsplätzen mit kleinem Sichtfeld (Field of View, FOV) bis hin zu dynamischen Simulatoren mit Bewegungsplattform und 360° FOV gibt es eine Vielzahl an Kombinationen. Klassifiziert werden Simulatoren vor allem auf Basis der Kosten und dem damit einhergehenden Potenzial zur Stimulation der menschlichen Sinnesorgane in die drei Kategorien low-level, mid-level und high-level. [3], [4]

Low-level Simulatoren sind kostengünstig, aber eingeschränkt in ihrem Nutzen. Sie besitzen nur eine grundlegende Wiedergabetreue (englisch Fidelity) in visueller, kinästhetischer und akustischer Hinsicht. Durch den Aufbau als Desktoparbeitsplatz mit einem einzelnen Monitor bieten sie oft lediglich ein schmales Sichtfeld. Abbildung 1 zeigt solch einen low-level Simulator des Mobima, bestehend aus einem Fahrersitz mit Bedienelementen und einem Bildschirm als Anzeigeelement. [4]

Mid-level Fahrsimulatoren, bieten eine höhere Nutzbarkeit. Durch Projektionen auf zylindrische oder sphärische Oberflächen oder direkt auf die Scheiben eines Fahrzeugs oder einer Kabine, bzw. Cockpit wird ein deutlich größeres FOV realisiert. In der Regel werden die Bilder softwaretechnisch verzerrt, um ein zusammenhängendes Bild zu erzeugen, wobei die Kopfposi-

tion des Betrachters und damit der Blickpunkt als statisch angenommen wird. In einem mid-level Simulator kommt für gewöhnlich eine Nachbildung einer Fahrzeugkabine mit Ein- und Ausgabemodulen vergleichbar mit einem realen Fahrzeug zum Einsatz. Dies schafft eine greifbare und physische Immersion, unterstützt durch Force-Feedback beispielsweise bei Lenkrad und Pedalen. Bewegungen, wenn überhaupt vorhanden, beschränken sich auf Fahrzeugvibrationen oder die Simulation von Straßenunebenheiten, selten auch die Darstellung von Neigungen. [4]



Abbildung 1: Low-level Simulator am Mobima des KIT

High-level Simulatoren erweitern das Anzeige-konzept auf bis zu 360° FOV. Die Fahrerkabine ist dabei mindestens mit den gleichen Merkmalen, wie bei einem mid-level Simulator ausgestattet, ist aber auf einem umfangreichen Bewegungssystem montiert. Dieses Bewegungssystem besitzt mindestens sechs Freiheitsgrade (Degree of Freedom, DOF) und kann sowohl hochfrequente (Beschleunigung), als auch niederfrequente (Kurvenfahrt) Bewegungen darstellen. [4]

Gerade im Automobilbereich werden Simulatoren für die Erforschung und Validierung verschiedener Funktionen schon lange und breit eingesetzt. Beispiele von Simulatoren für Pkw und Nutzfahrzeuge verschiedener Level sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Beispiele von Simulatoren für Pkw und Nutzfahrzeuge

Simulator	Merkmale	Einsatzbereich
NADS-1 [5]	Hexapod + Schlitten, 330° Drehwinkel, Dom mit 360° Projektion	Forschungssimulator automatisiertes Fahren
BMW High Fidelity [6]	Hexapod + XY Antrieb, Dom mit 360° Projektion	Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen
Dresden Driving Simulator [7]	Hexapod auf Reifenfahrwerk, Dom mit 225° Projektion	Forschung zu hochautomatisiertem Fahren und Übernahmeszenarien inkl. Mensch-Maschine Interaktion
FTM-Simulator der TU München [8]	Hexapod, 210° Projektion auf Leinwand	Forschung zu Assistenzsystemen für LKW

Auch die Untersuchung der Mensch-Maschine-Interaktion im Fahrzeug ist ein zentraler Anwendungsbereich von Simulatoren. Neue Anzeige- und Bedienkonzepte können entwickelt und evaluiert werden, bevor teure Prototypen in Fahrzeugen verbaut werden. In Simulatoren können sogar riskante oder ablenkende Bedienkonzepte unabhängig vom technischen Stand einer Automatisierungslösung getestet werden. [9]

Durch die immersive Umgebung, die ein Fahr Simulator bereitstellen kann, werden frühe Bedienkonzepte erlebbar gemacht. Versuchspersonen können in einem simulierten Cockpit Platz nehmen, während die Außenwelt virtuell eingestellt werden kann. Änderungen am Layout der Bedienelemente oder der Softwareoberfläche lassen sich schnell und einfach umsetzen, evaluieren und iterativ verbessern. [10], [11]

Im Bereich der teilautomatisierten Fahrzeuge wird derzeit an HMI-Konzepten geforscht, die dem Fahrer seine aktuelle Verantwortlichkeit klar macht und Vertrauen in die Automatisierung schafft. So konnte ein kooperatives Überholassistenten-System für LKW an der TU München erfolgreich in Simulatoren getestet werden. [12]

Fahrsimulatoren, die in der Automobilbranche weit verbreitet sind, stellen eine flexible Experimentierplattform dar und sind ein essenzieller Teil der nutzerzentrierten Entwicklung im Bereich Assistenzsysteme und HMI. Kontrollierte Vergleichsstudien ermöglichen eine systematische Untersuchung verschiedener Interfacevarianten durch die Analyse der Interaktionen eines Fahrers oder die Bewertung eines Interfaces über eine größere Anzahl an Fahrern hinweg. Die Herausforderung bleibt, die Repräsentativität sicherzustellen.

2.1.2 Fahrsimulatoren für Land- und Baumaschinen

Insgesamt sind Fahrsimulatoren in der Land- und Baumaschinentechnik weniger verbreitet als im Automobilbereich, was vor allem auf die höheren Kosten aufgrund des spezielleren Nutzens im Vergleich zum Massenmarkt Pkw zurückzuführen ist. Gleichwohl zeigen aktuelle Übersichtsarbeiten einen zunehmend wissenschaftlichen Fokus auf virtuelle Schnittstellen, Simulatoren und VR-basierte Trainingsumgebungen. [13], [14].

Anders als im Automobilbereich wurden Simulatoren in der Landtechnik erst deutlich später eingesetzt, wobei die ersten Ansätze hauptsächlich zu Ausbildungszwecken vorgestellt wurden [15]. Beispiele sind der John Deere GoHarvest Premium [16] oder die Simulatoren von Tenstar [17], Hydri-ve [18] und SimAgri [19] oder im Bereich der Baumaschinen Simulatoren von Liebherr [20] oder Volvo [21]. Auf den Simulatoren können arbeitsprozessbezogene Aufgaben, wie dem Ernten verschiedener Fruchtsorten der Simulation von Ertragsparametern und Verlusten in der Landtechnik oder Graben, Materialtransport und Arbeiten in schlecht einsehbaren Bereichen simuliert werden. Dabei sind Serienmaschinen mit den zugehörigen Prozesssimulationen implementiert und die Szenarien bilden aktuelle Maschinen,

Maschinenabläufe und Automatisierungsgrad ab. Zielgruppen für diese Simulatoren sind dabei Hersteller und deren Händler, die Fahrerschulungen kostensparend und gefahrenlos durchführen können. [15] - [21]

Wie in der Automobilbranche reichen moderne Simulatorplattformen von statischen Systemen mit Ein-, bzw. Mehrschirmprojektionen oder VR-Visualisierungen bis hin zu Simulatoren mit Bewegungsplattformen [17] - [24]. Simulatoren werden auch zur Untersuchung von Ergonomie, Arbeitsbelastung und Mensch-Maschine-Interaktion für aktuelle Serienmaschinen genutzt. So wurden im Bereich der Landtechnik Studien über das Situationsbewusstsein bei zunehmender Automatisierung [25], für Gefahrensituation [23] oder für halb- bzw. vollautomatisierte Dreschvorgänge [26] in Simulatoren durchgeführt. Im Bereich der Baumaschinen gibt es beispielsweise den Simulator der TU Dresden, mit dem die Mensch-Maschine-Prozess-Interaktion bewertet werden kann [24].

Diese Beispiele zeigen die Machbarkeit eines solchen Fahrssimulators. Es handelte sich jedoch immer um speziell für diese Untersuchungen entwickelte Simulatorumgebungen. Einen frei konfigurierbaren Simulator für Forschungs- und Validierungszwecke, der auch ein Automatisierungslevel abbilden kann, das derzeit noch nicht in Serienmaschinen umgesetzt werden kann, ist bislang nicht verfügbar.

2.1.3 Anforderungen an Fahrssimulatoren für hohe Wiedergabetreue

Im Folgenden werden die zentralen Aspekte hoher Wiedergabetreue von Fahrssimulatoren vorgestellt, insbesondere visuelle Immersion, I/O-Module und die Anbindung des Assistenzsystems.

Visuelle Immersion

Die visuelle Authentizität ist der am direktesten wahrnehmbare Aspekt der Wiedergabetreue eines Simulators. Da Fahrer vor allem auf ihr Sehvermögen angewiesen sind, sollte die Visualisierung des Simulators den realen Fahr-

szenarien in Bezug auf FOV, Auflösung, Tiefenwahrnehmung und Inhalt so nahe wie möglich kommen. Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, werden in heutigen Simulatoren häufig Bildschirme oder Projektoren verwendet, um ein Sichtfeld von bis zu 360° zu erreichen [27]. Ein horizontaler FOV von mindestens 50° ist nötig, bestimmte Fahrszenarien erfordern jedoch einen FOV von mindestens 180° . In vertikaler Richtung ist ein FOV von 40° ausreichend. [28].

Neben dem statischen Sichtfeld ist auch die dynamische Visualisierung wichtig. Dies umfasst eine hohe Bildwiederholrate und eine minimale Latenz zwischen Fahreraktion und Anzeigenreaktion. Menschen nehmen kontinuierliche Bewegungen ab ca. 24 Hz wahr und können Unregelmäßigkeiten bis zu 500 Hz spüren [29]. Eine Anzeige mit zu niedriger Bildwiederholrate oder ein spürbarer Input-Lag können die Fahraufgabe erschweren und steigern das Risiko auf Simulatorkrankheit, auf die in Kapitel 2.4.4 näher eingegangen wird. Beide Fälle haben Auswirkungen auf die Beanspruchung des Fahrers [30], [31]. Die Visualisierung sollte also so realistisch und flüssig, wie möglich sein, ohne den Fahrer übermäßig zu belasten.

Eine hohe Grafikedetailtiefe in Form einer detailreichen und glaubwürdigen Umgebung verstärkt ebenfalls die Immersion. Realistische und detailreiche Grafikt Texturen, Dynamik und Beleuchtung relevanter Objekte tragen zur psychologischen Authentizität bei. Wenn die Szene realistisch gestaltet ist, wird sie vom Gehirn des Fahrers authentischer wahrgenommen. Eine Erhöhung der Immersion erhöht das Situationsbewusstsein der Fahrer, sodass sich Verhalten und Beanspruchung stärker an realen Fahrsituationen orientieren. [30], [32], [33]

Um diese Grafikt Texturen darstellen zu können, ist eine hohe visuelle Auflösung in Form von geringen Bogenminuten pro Pixel ein entscheidender Faktor. Normale menschliche Sehschärfe entspricht ca. 1 arcmin/px und wird deshalb als augenlimitierende Auflösung und angestrebtes Ideal für immersive Displays angesehen [34]. Diese hohe Auflösung wird für Detailwahrnehmungen benötigt, wenn die Lesbarkeit von Straßenschildern in der korrekten Entfernung gegeben sein muss. Erfahrungswerte zeigen, dass bereits

2-3 arcmin/px eine sehr gute visuelle Immersion erlauben, während bei über 6-8 arcmin/px die Bildqualität merklich abfällt und Unschärfe und Flimmer-Effekte auftreten. [35]

I/O-Module

Neben der visuellen Ausgabe trägt auch die physische Ausgestaltung des Simulators erheblich zur Immersion und Validität bei. Die Integration echter Kabinenmerkmale oder einer echten Kabine verstärkt diese Immersion des Fahrers im Bezug auf das reale Fahren. Fahrer können so ihr gewohntes Muskelgedächtnis und ihre Haptik nutzen und wissen intuitiv, wie der Simulator zu bedienen ist. Auch die Spiegel und Anzeigen sollten die virtuelle Umgebung korrekt abbilden. Fahrzeuganzeigen und Warnleuchten sollten ebenfalls im Simulator vorhanden und animiert beziehungsweise simuliert sein, insbesondere dann, wenn ein Assistenzsystem mit solchen Anzeigen interagiert. Ein echtes Fahrzeuginterieur verstärkt das Präsenzgefühl erheblich. [30], [33]

Neben dem Interieur sind auch Audiomodule Bestandteil der I/O-Komponenten. Maschinen- und Umgebungsgeräusche liefern wichtige Zusatzinformationen, ein Surround-Sound-System trägt dazu bei, die Richtung von Schallquellen korrekt darzustellen [36]. Akustische Rückmeldungen des Assistenzsystems müssen ebenfalls integriert und in realistischer Lautstärke und Tonqualität wiedergegeben werden [37].

Simulatoren mit Bewegungsplattform erzeugen kinästhetische Reize für Beschleunigung oder Kurvenfahrten, die im stationären Simulator fehlen. Diese kinästhetischen Reize tragen zur Immersion bei, da sie dem Vestibularsinn des Fahrers Rückmeldung über die Fahrzeugbewegung geben [38]. Fehlen diese, kann ein Widerspruch zwischen Gesehenem und Erlebtem entstehen, der Simulatorekrankheit begünstigt [39]. Gleichzeitig erhöhen Bewegungssysteme die Komplexität und Kosten eines Simulators erheblich [4]. Für die Validierung eines OFA muss geprüft werden, ob eine Bewegungsplattform für die zu untersuchenden Phänomene ausschlaggebend ist. Im Großteil der in Kapitel 2.4 angeführten Studien werden statische Simulatoren genutzt und dennoch gute relative Validität in den Ergebnissen erreicht.

Die I/O-Module stellen also sicher, dass der Fahrerarbeitsplatz im Simulator dem im echten Fahrzeug möglichst nahekommt. Für die Validierung eines OFA ist es wichtig, dass Fahrer ohne Umgewöhnung mit der Steuerung eines Simulators interagieren, sodass die Ergebnisse übertragbar sind. [40]

Anbindung des Assistenzsystems

Von zentraler Bedeutung ist die Integration des zu validierenden Assistenzsystems in die Simulatorumgebung. Das OFA muss im Simulator so angebunden sein, dass es wie in einem realen Fahrzeug agiert. Dies umfasst sowohl die funktionale Logik, also auch das HMI des Systems.

In die Entwicklung wird das Assistenzsystem oder dessen Prototyp auf einem separaten Steuergerät oder Rechner ausgeführt, der mit einem Simulator gekoppelt wird (Hardware-in-the-Loop). Die Simulator-Software stellt dann in Echtzeit alle erforderlichen Fahrzeug- und Umgebungsdaten bereit. So kann das Assistenzsystem den Maschinenzustand, Abstand zu Hindernissen oder Objekten und die Umgebungssituation wie im realen Fahrzeug nutzen. Gleichzeitig müssen die Outputs des Systems zurück in den Simulator fließen. Will das System einen Hinweis geben oder aktiv in die Steuerung eingreifen, muss dies im Simulator entsprechend umgesetzt sein. Dieser Cross-Domain-Datenfluss zwischen virtueller Fahrsimulation und realer Assistenzhardware erfordert standardisierte Schnittstellen. Oft werden in der Forschung dafür Frameworks wie ROS (Robot Operating System) oder spezifische APIs (Application Programming Interface) genutzt. [41], [42]

Ein einfacheres Vorgehen, falls kein echter Steuergeräte-Prototyp vorliegt, ist der Software-in-the-Loop-Ansatz, bei dem das Assistenzsystem direkt auf dem Simulationsrechner oder in einer Co-Simulation läuft. Dies erleichtert die Synchronisation, da keine externe Kommunikation nötig ist. In diesem Fall müssen die Systemgrenzen klar definiert sein, insbesondere wenn das Assistenzsystem die Kommunikationssysteme des Fahrzeugs nutzt oder mit anderen Steuergeräten kommuniziert. [41]

Ein weiterer Cross-Domain-Aspekt ist die Simulation von Sensoren, falls das Assistenzsystem Umgebungsdaten erfordert. Ein OFA braucht zusätzlich zur

Beanspruchungsmessung ebenfalls Umgebungsdaten, wie weitere Fahrzeuge, Feldposition und generelle Maschinendaten. Verschiedene dieser Daten lassen sich direkt aus den Szenarien oder der Simulation generieren. Wird ein physischer Sensor emuliert, kann ein virtuelles Sensorsignal generiert werden, das dasselbe Format ausgibt, wie ein realer Sensor [43], [44].

Während der Studien muss die Zuverlässigkeit der Systemanbindung sichergestellt sein. Verzögerungen oder Ausfälle in der Kommunikation zwischen den Systemen würden Messungen verfälschen. Echtzeitsysteme und Priorisierung der Assistenzfunktionen sind relevant. Es können ebenfalls zur Sicherheit Fallback Lösungen eingebaut werden, wie das manuelle Triggern von Szenarien, falls das Assistenzsystem im Simulator nicht wie erwartet reagiert [45]. Der Wizard-of-Oz-Ansatz ist dabei eine Methode, der Teilnehmer glauben lässt, sie interagieren mit einem autonomen System, während im Hintergrund tatsächlich ein Mensch die Steuerung übernimmt [46].

Auch wenn im Simulator keine mittelbare Gefahr besteht, sollen Versuchspersonen keinem unnötigen Stress oder Gefahr ausgesetzt werden, falls das Assistenzsystem ein Fehlverhalten zeigt. Mechanismen, wie Not-Aus-Schalter oder Pausetasten geben der Versuchsleitung jederzeit die Möglichkeit, einzugreifen. [47]

Die Anbindung des Assistenzsystems hat einen großen Einfluss auf die Validität der Ergebnisse. Die Disziplinen Fahrzeugsimulation, Regelungstechnik, HMI und Ergonomie müssen für eine nahtlose Integration genau aufeinander abgestimmt sein.

2.2 Validierung in einem Simulator

In diesem Kapitel wird kurz auf die Grundlagen des Validierungsprozesses für ein Assistenzsystem und die Validität in Simulatorstudien eingegangen.

2.2.1 Validierungsprozess

Die Validierung eines neuartigen Assistenzsystems, das unter komplexen oder sicherheitskritischen Situationen im Einsatz ist, findet häufig zunächst im Labor oder Simulator statt, bevor Tests im realen Fahrzeug erfolgen. In der Regel folgt die Validierung von Fahrassistenzsystemen einem stufenweisen Prozess, beginnend mit einzelnen Komponenten, bzw. Teilsystemen bis hin zum gesamten System. Die Vorgehensweise entspricht dem etablierten V-Modell in der System- und Softwareentwicklung. Typische Teststufen sind Modul- bzw. Komponententests, darauf aufbauend Integrationstests, gefolgt von Gesamtsystemtests und gegebenenfalls abschließende Abnahme, bzw. Akzeptanztests. Zunächst wird also jedes Teilsystem getestet, um sicherzustellen, dass es isoliert korrekt funktioniert. Anschließend werden in Integrationstests die Schnittstellen und Kommunikation der Komponenten geprüft, bevor das Gesamtsystem im vorgesehenen Einsatzkontext validiert und die Akzeptanz überprüft wird. [48], [49]

Simulationen können bei der Validierung eine zentrale Rolle spielen, da sie die Untersuchung einer großen Bandbreite an Szenarien, Umgebungseinflüssen und vor allem kritischen Situationen reproduzierbar und ohne Gefährdung der Versuchspersonen ermöglichen. Für Systeme, die auf das Beanspruchungsniveau reagieren, kommen neben der rein technischen Simulation Fahrsimulatoren zum Einsatz um den Menschen als zentrales Teil des Systems mit einzubinden. Durch ein hohes Maß an Realismus kann eine Untersuchung von Fahrverhalten, Beanspruchung und Akzeptanz unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt werden. [48]

2.2.2 Validität in Simulatorstudien

Die Validität in Simulatorstudien ist eine Grundvoraussetzung dafür, dass sich die Ergebnisse auf reale Fahrbedingungen übertragen lassen. Für gewöhnlich wird in physikalische und in verhaltensbezogene Validität unterschieden [50]. Physikalische Validität bezeichnet das Maß, in dem die simulierte Umgebung und ein simuliertes Fahrzeug mit einem realen Fahrzeug in einer realen Umgebung korrelieren. [51]

Die Verhaltensvalidität beschreibt, in wie weit das Verhalten der Versuchspersonen im Simulator dem Verhalten unter vergleichbaren Bedingungen beim realen Fahren entspricht. Nur wenn Fahrer in der Entscheidungsfindung ähnlich reagieren, können Ergebnisse aus einem Simulator auf die Realität bezogen werden. Neben der quantitativen Validität von Kenngrößen muss auch die qualitative Validität sichergestellt werden, also ob Fahrer die gleichen Verhaltensmuster zeigen. [50] - [52]

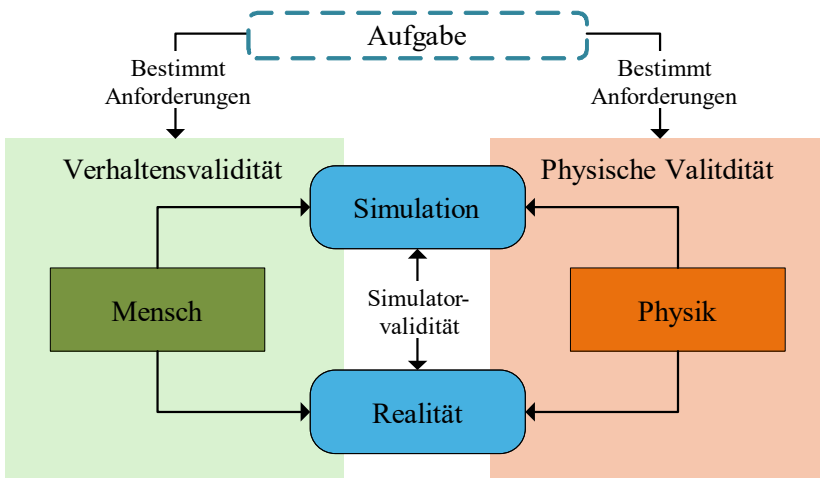


Abbildung 2: Framework für die Validität eines Simulators nach [51]

Die Validität wird weiterhin in absolute und relative Validität unterschieden. Absolute Validität bedeutet, dass Fahren im Simulator die gleichen Ergebnisse in absoluten Zahlen liefert, wie das reale Fahren. Relative Validität bedeutet hingegen, dass die Ergebnisse im Simulator einen ähnlichen Trend aufweisen, wie in der Realität, beispielsweise durch die Anwendung eines Skalierungsfaktors. [50], [51]

Hinsichtlich dieser relativen und absoluten Validität der im Simulator erzielten Ergebnisse im Vergleich zur realen Fahrt kommen mehrere Studien zu dem Schluss, dass absolute Validität für alle Messgrößen nur sehr schwer zu

erreichen ist. Für bestimmte Messgrößen hinsichtlich Fahrleistung und Arbeitsbelastung kann aber relative Validität erreicht werden. So wurde gezeigt, dass die Durchschnittsgeschwindigkeit in einem Simulator mittlerer Wiedergabetreue denen auf realen Straßen entspricht, was in diesem Fall eine absolute Validität für die Geschwindigkeit bedeutet. Die Messwerte für die mentale Beanspruchung dagegen stimmten in absoluten Zahlen nicht überein, der Verlauf der Arbeitsbelastung zeigte jedoch in beiden Umgebungen einen ähnlichen Trend, was eine relative Validität für die Beanspruchung bedeutet. [53] - [56]

Zudem muss sichergestellt werden, dass das Experiment wirklich das gewünschte Konstrukt misst. Soll die Beanspruchung untersucht werden, muss also auch genau diese stimuliert und gemessen werden. Deshalb sind für die Studien eine solide theoretische Herleitung und Definition der interessierenden Größen sicherzustellen. Konstruktvalidität erfordert demnach eine enge Verzahnung zwischen Theorie, Experimentaldesign und Messmethode. [57], [58]

Für die Validierung eines OFA bedeutet dies, dass eine Simulatorstudie so gestaltet werden muss, dass die richtigen Konstrukte erhoben werden, die Umgebung eine ausreichende Wiedergabetreue aufweist, die Ergebnisse reale Leistungskriterien abbilden und das Fahrverhalten vergleichbar mit dem realen Fahren ist.

2.3 Szenarienentwicklung

Die Szenarienentwicklung beinhaltet die Definition von unabhängigen Variablen, wie Aufgaben und Ereignissen, sowie abhängigen Variablen, wie das Beanspruchungsniveau, die als Indikatoren für das zu untersuchende Verhalten dienen. Die Szenarien legen fest, wo und wann Objekte und Trigger lokalisiert sind und wie eine Simulation ablaufen soll für eine vorhersehbare Erfahrung der Testpersonen. Szenarienentwicklung ermöglicht es, kontrollierte Umgebungen zu schaffen, in denen spezifische Verhaltensweisen und Reaktionen untersucht werden können, da die Rahmenbedingungen

und der Ablauf von Studie zu Studie exakt reproduzierbar sind. Dies ist entscheidend, um Hypothesen zu testen und belastbare Schlussfolgerungen zu ziehen. Im Training können realitätsnahe Szenarien dazu beitragen, Fähigkeiten und Reaktionen in einer sicheren Umgebung zu üben und zu verbessern. Diese Methodik ist besonders wichtig für die Forschung, das Training und klinische Anwendungen und dient zur Analyse und Verbesserung komplexer Systeme und Verhaltensweisen. [45]

Zusätzlich können Szenarien in der Entwicklung von Technologien und Produkten eingesetzt werden, um deren Benutzerfreundlichkeit und Funktionalität zu testen. Sie bieten eine Plattform, um potenzielle Probleme frühzeitig zu identifizieren und zu beheben, bevor sie in der realen Welt auftreten. [59]

In der Forschung müssen Szenarien so gestaltet sein, dass sie relevantes Verhalten zuverlässig stimulieren. Nur unter realitätsnahen Bedingungen lassen sich spezifische Verhaltensweisen und Reaktionen beobachten und fundierte wissenschaftliche Erkenntnisse gewinnen. Für die Bewertung von Prototypen und Systemen ist es zudem erforderlich, dass Szenarien klare und messbare Leistungsindikatoren bereitstellen, anhand derer Effektivität und Nutzerakzeptanz beurteilt werden können. [45], [59]

Technologische Fortschritte haben die Möglichkeiten der Szenariengestaltung deutlich erweitert. Frühe Simulationen waren auf feste Szenarien beschränkt, was bedeutete, dass die Abläufe und Ereignisse vorab festgelegt und nicht veränderbar waren [59]. Moderne, dynamische und adaptive Szenarien reagieren flexibel auf Eingaben und Umgebungsveränderungen, wobei prozedurale Methoden die algorithmische Generierung einer großen Vielfalt an Situationen und Umgebungen ermöglichen, was insbesondere für hochrealistische Simulatoren und virtuelle Realität von Bedeutung ist [60]. Zusätzlich zu diesen Entwicklungen haben auch Fortschritte in der künstlichen Intelligenz (KI) und dem maschinellen Lernen die Möglichkeiten von Simulationen erweitert um realistische Verhaltensmuster und Interaktionen innerhalb der Simulationen zu erzeugen, wodurch die Authentizität und der Nutzen der Szenarien erhöht wird [61].

Ein weiterer Aspekt ist die Integration von Virtual Reality (VR) und Augmented Reality (AR) in Simulationen. Diese Technologien ermöglichen es Personen, vollständig in die simulierten Umgebungen einzutauchen und interaktiv mit ihnen zu agieren. Dies ist besonders wertvoll in der Ausbildung und im Training, da es eine immersive Lernumgebung schafft, die das Verständnis und die Aufnahme von Informationen verbessert. [62], [63]

In der Landtechnik, insbesondere im Ackerbau, können Simulationen eingesetzt werden, um verschiedene Bewirtschaftungstechniken zu testen und zu optimieren, die Effizienz von Maschinen zu steigern und die Auswirkungen unterschiedlicher Wetterbedingungen auf die Ernte zu analysieren [64], [65]. Durch die Nutzung von 3D-Grafik und prozeduralen Methoden können realistische Modelle von Feldern und landwirtschaftlichen Maschinen erstellt werden, die es Landwirten ermöglichen, ihre Strategien zu planen und anzupassen [19].

Für die Validierung hochautomatisierter Fahrzeugsysteme in der Landtechnik, wie dem zu untersuchenden OFA, werden also Szenarien benötigt, die spezifisch auf dieses System entwickelt werden. Diese müssen sowohl typische Einsatzsituationen mit allen möglichen Beanspruchungszuständen abbilden, um die Fähigkeit des Systems zu überprüfen, die Beanspruchung des Fahrers auf einem mittleren Beanspruchungsniveau zu halten. Dabei ist es notwendig, gezielt Situationen zu simulieren, die eine Über- oder Unterforderung hervorrufen. Derzeit existiert kein strukturierter Testfällekatalog, der eine Validierung und Akzeptanzbewertung des OFA in Frage kommt, dieser muss zuerst gesammelt und entwickelt werden.

2.4 Beanspruchung und Stress in Simulation vs. Realität

Bei der Validierung eines OFA ist eine zentrale Frage, ob bei Fahrern im Simulator ein valides Beanspruchungslevel im Vergleich zur realen Welt hervorgerufen werden kann und wie die Messung der Beanspruchung erfolgen kann. Physiologische Marker, wie beispielsweise elektrische Aktivität

des Herzens, elektrodermale Aktivität, Augenparameter oder die subjektive Einschätzung der Versuchspersonen können erfasst und ausgewertet werden. Zahlreiche Studien haben sowohl die Beanspruchung, als auch den Stresslevel zwischen simulierten und realen Umgebungen verglichen [66]. Aufgrund der Anforderungen an das OFA wurden nur minimalinvasive Messverfahren betrachtet.

2.4.1 Beanspruchungsmessung durch Herzrate

Für die Messung des Beanspruchungsniveaus wird die Herzrate häufig als ein Indikator herangezogen. Im Allgemeinen deutet eine erhöhte Herzrate auf eine höhere Beanspruchung hin. [67] - [70]

Beim Fahren in einer realen Umgebung beobachteten [71] und [72] höhere Herzfrequenzen und elektrodermische Aktivität während vergleichbarer Aufgaben im Vergleich zum Fahren in einem Simulator. Dies stützt die Annahme, dass die reale Umgebung größeren physiologischen Stress verursacht. Demgegenüber zeigten [73] ähnliche Muster in Herzfrequenz und elektrodermaler Erregung bei erhöhter kognitiver Belastung im simulierten Fahren im Vergleich zum Fahren auf der Straße, jedoch mit höheren absoluten Werten in der realen Welt. Relative Veränderungen der physiologischen Marker können somit ähnlich verlaufen, die absolute Intensität ist in Simulatoren normalerweise gedämpft.

Potenziell gefährliche oder anspruchsvolle Fahrsituationen können schwächere physiologische Stressreaktionen in Simulatoren als auf realen Straßen hervorrufen, obwohl die Verhaltensweise in beiden Situationen vergleichbar ist. Die Validität eines Simulators zum Testen einer Stressreaktion eines Fahrers im Speziellen bei Gefahrensituationen muss genau evaluiert werden. [74]

Die Beanspruchung von Fahrern im Simulator und im realen Fahrzeug zeigt eine ähnliche Tendenz. Die Beanspruchung durch sekundäre Aufgaben verursacht ähnliche Muster der physiologischen Marker in Simulation und Realität mit höheren Werten in der realen Umgebung. [73]

Auf der anderen Seite zeigt [53], dass das Ausführen kognitiv anspruchsvoller Aufgaben in einem Simulator die Herzfrequenz auf ein vergleichbares oder sogar höheres Niveau als in der realen Welt anheben kann. Sowohl in einem realitätsnahen Simulator, als auch während einer realen Fahrt mussten Versuchspersonen n-back Gedächtnisaufgaben als sekundäre kognitive Aufgabe ausführen. In beiden Fällen stieg die Herzfrequenz signifikant an und die durchschnittliche Herzfrequenz zeigte keinen signifikanten Unterschied. Dies impliziert, dass bei moderaten Arbeitsbelastungen, die parallel zur Fahraufgabe stattfindet, im Simulator bestimmte physische Marker ähnlich angesprochen werden wie bei der realen Fahrt. Bei sehr hohen Arbeitsbelastungen konnte diese Reaktion allerdings nicht reproduziert werden. Dies zeigt, dass Herzfrequenz und Herzvariabilität eine relative Validität aufweisen, da sie sich in beiden Umgebungen in die gleiche Richtung mit der Arbeitsbelastung änderten. [53]

Bei der realen Fahrt ist die Herzfrequenz tendenziell höher in Gefahrensituationen, während beim Fahren im Simulator die Herzfrequenz bei kognitiv anspruchsvollen Aufgaben übereinstimmt oder diese sogar übertrifft. Für die Validierung eines OFA sollte die Herzfrequenz nicht als einziger Indikator aufgenommen werden, sondern diese zusammen mit weiteren Messwerten und unter Berücksichtigung der Grenzen des Simulators und der betrachteten Szenarien interpretiert werden. [53], [71] - [74]

2.4.2 Beanspruchungsmessung durch Eye-Tracking

Wichtige Parameter zur Beanspruchungsmessung durch Eye-Tracking sind die Blinzelrate und -dauer, die prozentuale Zeit, in der die Augen geschlossen sind, Fixationsdauer und -frequenz, sowie der Pupillendurchmesser. [75], [76]

In sehr gut kontrollierbaren Umgebungen, die ein Simulator bereitstellen kann, reagiert der Pupillendurchmesser sensitiv auf Änderungen der Beanspruchung, wobei der Pupillendurchmesser nicht zwischen mentaler und visueller Beanspruchung unterscheidet [75]. Die Methode „index of cognitive activity“ berücksichtigt Beleuchtungseffekte und kann somit die Beanspru-

chung von Fahrern sowohl in Simulatoren, als auch bei realen Fahrten ermitteln [77]. Da diese Methode patentiert ist, kann sie nicht eingesetzt werden.

Der relative Pupillendurchmesser beim Fahren im Simulator ist signifikant größer als beim Fahren auf der realen Straße. Da dieser Studie die Werte relativ zum Ausgangswert in jeder Umgebung aufgenommen wurden, können Beleuchtungseffekte ausgeschlossen werden und die Pupillenerweiterung auf die Arbeitsbeanspruchung zurückgeführt werden. In ihrer Studie führte das Ausüben einer sekundären Aufgabe zur höchsten relativen Pupillenerweiterung, während die gleiche Aufgabe im realen Fahrzeug eine geringere Pupillenreaktion zeigte. [53]

Ebenso reagiert die horizontale Blickdispersion sensitiv auf die Beanspruchung des Fahrers. Mit zunehmender Arbeitsbelastung sinkt der horizontale Bereich, der während der Fahrt gescannt wird. Studien zufolge zeigen horizontale Blickdispersion und die Häufigkeit von Blicken abseits der Straße eine relative Validität zwischen Simulator und realer Fahrt. [53]

Weitere Aspekte, wie beispielsweise die Wahrnehmung von Gefahren hängen stark vom Realismus des Szenarios ab. So kann eine bevorstehende Gefahr bei der realen Fahrt ein weites Scannen oder schnelle Blicke in die Spiegel auslösen. [78] zeigten, dass die Wahrnehmung von Gefahren in einem Fahr-simulator qualitativ ähnliche visuelle Aufmerksamkeitsmuster wie bei der realen Fahrt hervorrufen kann, was die relative Validität im Bezug auf die Blickrichtung der Fahrer auch in Stresssituationen zeigt.

Ein Absinken der Blinzelrate und -dauer deutet für gewöhnlich auf eine erhöhte Beanspruchung hin, während ein Anstieg beider Parameter auf Müdigkeit und Monotonie hinweist. [75] stellten eine Verringerung der Blinzeldauer bei erhöhter visueller Beanspruchung in Simulatorstudien fest.

Augenparameter zeigen eine Veränderung der Beanspruchung sowohl in Simulatoren, als auch in realen Fahrzeugen in qualitativ ähnlicher Weise. Im Bezug auf absolute Werte oder den gesamten Bereich, der von den Fahrern abgedeckt wird, kann in Simulatoren die Beanspruchung bei hoher visueller Beanspruchung überschätzt, oder bei Gefahrensituationen unterschätzt

werden. Deshalb muss sichergestellt werden, dass die Simulatorumgebung natürliche Blickmuster durch hohe visuelle Wiedergabetreue und relevante Stimuli hervorruft.

2.4.3 Subjektive Beanspruchungseinschätzung

Neben objektiven Messwerten, wie Herzrate und Eye-Tracking ist die subjektive Einschätzung der Arbeitsbelastung ebenfalls eine sehr wichtige und zuverlässige Methode zur Bewertung der Beanspruchung. Diese kann durch verschiedene Skalen, wie den NASA Task Load Index (NASA-TLX), den Driving Activity Load Index (DALI), die Rating Scale Mental Effort (RSME) oder das Self Assessment Manikin (SAM) bewertet werden.

Der NASA-TLX ist ein etabliertes Werkzeug zur Bewertung der Arbeitsbelastung in verschiedenen Tätigkeitsfeldern. Er misst die Dimensionen mentale und physische Anforderung, Zeitdruck, Leistung, Anstrengung und Frustration. Teilnehmer bewerten diese Dimensionen auf einer Skala von 0 - 100 und vergleichen sie paarweise, um die Gewichtung festzulegen. Diese zusätzliche Gewichtung erfordert einen gewissen Zeitaufwand. Dennoch bleibt der NASA-TLX aufgrund seiner Vielseitigkeit und der praxisnahen Anwendbarkeit eine Methode zur Bewertung der Arbeitsbelastung speziell für anspruchsvolle Tätigkeiten, bei denen kognitive, physische und emotionale Faktoren eine Rolle spielen. Basierend auf dem NASA-TLX wurde der Driving Activity Load Index speziell auf die mentale Beanspruchung beim Fahren angepasst. [79], [80]

Die RSME ist ein eindimensionales Verfahren zur Erfassung der subjektiv empfundenen mentalen Beanspruchung. Sie besteht aus einer 150 mm langen Linie mit neun Ankerpunkten, die von „gar nicht anstrengend“ bis „außerordentlich anstrengend“ reichen. Die Versuchspersonen markieren darauf die von ihnen wahrgenommene mentale Beanspruchung. Dieses Verfahren ermöglicht eine effiziente Bewertung der Aufgabe und wird häufig in der Mensch-Computer Interaktion eingesetzt. [81]

SAM wurde 1994 als nonverbales, bildbasiertes Bewertungsverfahren zur direkten Messung der drei Dimensionen Valenz, Erregung und Dominanz vorgestellt und verwendet dabei einfache grafische Figuren zur emotionalen Bewertung. Es liefert konsistente und valide Messungen der emotionalen Dimensionen und ist dabei sehr benutzerfreundlich und reduziert sprachliche Verzerrungen. [82]

Versuchspersonen berichten von höheren subjektiven Beanspruchungen bei realen Fahrten in verkehrsreichen Umgebungen im Vergleich zu Szenarien in Simulatoren mit hoher Wiedergabetreue. Diese Diskrepanz entstand durch die erhöhten Anforderungen an die Aufmerksamkeit und erhöhte Risiken im realen Straßenverkehr. Daher tendiert die wahrgenommene Beanspruchung aufgrund der unterbewussten Anerkennung der künstlichen Sicherheit durch die Fahrer niedriger zu sein, wenn Simulatoren visuell komplizierte Szenarien nachbilden. [71]

Handelt es sich beim eingesetzten Simulator um ein System mit geringer Wiedergabetreue, kann dieser Effekt umgekehrt sein. So zeigten Versuchspersonen eine erhöhte subjektive Beanspruchung, da sie sich möglicherweise nicht sicher in der Steuerung fühlten und das Fahren im Simulator deshalb als schwieriger empfanden. [54]

Zu beachten ist allerdings, dass die Simulatorkrankheit, auf die nachfolgend eingegangen wird, einen signifikanten Einfluss auf die subjektive Beanspruchung hat. Selbst eine leichte Simulatorkrankheit kann so die Selbsteinschätzung der Beanspruchung deutlich beeinflussen. [83]

2.4.4 Differenz in der Beanspruchung zwischen Simulator und Realität

Zu den in der Literatur identifizierten Gründen für die unterschiedliche Intensität der Beanspruchung zwischen Simulatoren und Realität gehören die Wahrnehmung von Risiko und Konsequenzen, sensorische Wahrnehmung, Neuheit, Simulatorkrankheit, sowie die Abwägung zwischen Aufgabenbelastung und emotionalem Stress.[74]

Wahrnehmung von Risiko und Konsequenzen

Das Bewusstsein, dass im Simulator keine tatsächliche Gefahr besteht, beeinflusst die Stresssituation erheblich. So kann ein Ball oder ein Fußgänger im realen Fahrzeug eine tiefsitzende Angst vor einem Unfall auslösen, während die Fahrer im Simulator sich der virtuellen Natur der Situation bewusst sind und keine physischen und rechtlichen Folgen fürchten müssen. Dieses Gefühl der Unverwundbarkeit reduziert die Angstreaktion, die normalerweise Stressreaktionen untermauert. Physiologische Marker werden möglicherweise nicht oder nur in sehr geringem Maße ausgelöst, selbst, wenn die Person sich aktiv bemüht, die Gefahr zu vermeiden. [74]

Sensorische Wahrnehmung

In einem realen Fahrzeug erfahren Fahrer eine Vielzahl an sensorischen Reizen, wie Beschleunigungskräfte, Motorvibrationen, Windgeräusche oder das Gefühl von Geschwindigkeit. Viele Simulatoren können diese Reize nur bedingt bereitstellen. Beim Fahren, insbesondere mit höheren Geschwindigkeiten, kann das Fehlen realer Fahrzeugbewegungen in einem feststehenden Simulator das Gefühl von Geschwindigkeit und Gefahr verringern. Dies erklärt, warum einige Studien keine Veränderungen der Atemfrequenz oder eine niedrigere Herzfrequenz beim Fahren in Simulatoren im Vergleich zum Fahren in realen Fahrzeugen messen konnten. Im Wesentlichen kann eine geringere physische Wiedergabetreue zu einem geringeren unterbewussten Stress führen, selbst wenn visuell ein gefährliches Szenario abläuft. [74]

Simulatorkrankheit

Auf der anderen Seite können Simulatoren mit der Simulatorkrankheit eine eigene Art von Stress induzieren, die sich vom Stress beim realen Fahren unterscheidet. Die Simulatorkrankheit als eine Art der Reisekrankheit wird durch ein visuell-vestibuläres Missverhältnis hervorgerufen und kann Reaktionen wie Schwindel oder Übelkeit hervorrufen. Schwere Simulatorkrankheit führt zumeist dazu, dass Teilnehmer sich zurückziehen, anstatt unter Stress weiterzumachen, während milde Symptome von der Fahraufgabe ablenken können. So kann bei einem Fahrer, der sich unwohl fühlt, die Herzfrequenz

aufgrund von Unbehagen und nicht aufgrund von Beanspruchung steigen. [39], [74]

Neuheit

Auch die bisherige Erfahrung der Versuchspersonen mit Simulatoren oder dem in Simulatoren abgebildeten System spielt eine wichtige Rolle. Technologischer Stress kann zu anfänglicher Angst oder einem Leistungsabfall führen, wenn Versuchspersonen nicht an die Simulatorumgebung gewöhnt ist. Dies kann entweder durch Nervosität das Stresslevel erhöhen oder umgekehrt das Situationsbewusstsein durch Ablenkung senken [66]. Eine Studie ergab, dass ältere Personen und Personen, die noch nie in Simulatoren saßen, bei ihrer ersten Simulatorfahrt ein höheres Stresslevel erreichten, das sich jedoch im Laufe der Zeit verringerte [84]. Einer Studie zufolge benötigen sowohl jüngere, als auch ältere Personen etwa 240 Sekunden nach dem Beginn der Simulatorfahrt, um sich an den Fahrsimulator zu gewöhnen [85].

Simulatoren können ebenfalls ein höheres Beanspruchungsniveau induzieren als ein reales Fahrzeug, wenn das Interface und Interieur zu stark von dem abweichen, was die Testpersonen gewohnt sind. Die Interpretation des neuen Interfaces und der veränderten Steuerung eines Fahrzeugs erfordern eine höhere mentale Kapazität. [86]

Differenzieren zwischen kognitiver Beanspruchung und emotionalem Stress

In den Szenarien selbst muss zwischen hoher Beanspruchung und emotionalem Stress, bzw. Angst unterschieden werden. Simulatoren können hohe Beanspruchungen durch komplexe Szenarien, Multitasking oder Nebentätigkeiten erzeugen, auch wenn diese in der Realität absolut gesehen noch einmal höher ist [53], [72], [73], [78]. Simulatoren sind dagegen weniger geeignet, um emotionalen Stress zu triggern, die physiologischen Marker deutlich geringer ausgeprägt sind, auch wenn die Verhaltensreaktion die gleiche ist [74]. Dies unterstützt die Annahme, dass in Simulatoren zwar psychologische Wiedergabetreue hinsichtlich der Beanspruchung erreicht werden kann,

nicht jedoch emotionale Wiedergabetreue in Bezug auf Angst und Risikowahrnehmung [74].

2.5 Akzeptanzbewertung eines OFA

Die Nutzerakzeptanz neuer Assistenzsysteme ist entscheidend für deren Erfolg [87], [88]. Unter Nutzerakzeptanz versteht man die Verhaltensreaktion von Anwendern gegenüber einer neuen Technologie [89]. Klassische Modelle, wie das Technikakzeptanzmodell (TAM) erklären die Akzeptanz durch Faktoren, wie wahrgenommener Nutzen und Bedienerfreundlichkeit [90]. In der Praxis werden zur Bewertung der Akzeptanz jedoch meist mehrere Methoden kombiniert, um ein umfassendes Bild zu erhalten. Insbesondere kommen strukturierte Fragebögen zum Einsatz, um quantifizierbare Daten zu sammeln, sowie qualitative Interviews, um tiefergehende Einsichten in die Nutzererfahrung zu gewinnen. Im Folgenden wird auf verschiedene quantitative Methoden in der Ermittlung der User Experience und Technikakzeptanz sowie qualitative Methoden, wie die Durchführung von Interviews, eingegangen. Diese Methoden erlauben es, sowohl Usability- und User-Experience Aspekte zu erfassen und vor dem Hintergrund der Technikaffinität der Versuchspersonen zu diskutieren, als auch subjektive Rückmeldungen der Nutzer zu einem OFA zu erfassen.

2.5.1 User Experience und Usability

Die User Experience (UX) ist in der ISO 9241-11 definiert als die „[...] Wahrnehmungen und Reaktionen einer Person, die aus der tatsächlichen und/oder der erwarteten Benutzung eines Systems [...] resultieren.“ [91] und beschreibt das Nutzungserlebnis einer Person mit einem Produkt oder System einschließlich Emotionen, Wahrnehmungen und Reaktionen, die vor, während und nach der Nutzung entstehen. Usability ist ein Teilbereich der UX und wird definiert als „Das Ausmaß, in dem ein System [...] durch bestimmte Benutzer in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um bestimmte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen.“ [91]

In der Praxis werden UX und Usability mit standardisierten Fragebögen gemessen, um die subjektive Wahrnehmung der Nutzer quantitativ zu erfassen. Solche Messinstrumente sind schnell einsetzbar und erlauben den Vergleich mittels Benchmark Datenbanken. In den folgenden Abschnitten werden verschiedene User Experience/Usability Fragebögen vorgestellt.

User Experience Questionnaire

Der User Experience Questionnaire (UEQ) ist ein standardisierter Fragebogen zur Messung der Nutzererfahrung interaktiver Produkte. Er wurde 2008 entwickelt und liegt in über 30 Sprachen vor. Der UEQ umfasst 26 gegensätzliche Adjektivpaare, anhand derer Nutzer verschiedene Aspekte ihres Nutzererlebnisses auf Likert-Skalen bewerten. Konkret werden sechs Dimensionen bewertet: [92]

- Attraktivität: Gesamteindruck des Produkts
- Übersichtlichkeit: Leichtes Verstehen und intuitive Bedienung
- Effizienz: Effektives Arbeiten ohne unnötigen Aufwand
- Zuverlässigkeit: Verlässlichkeit und Kontrolle über Interaktion
- Stimulation: Spaß und Motivation bei der Nutzung
- Neuheitswert: Innovationsgrad und Kreativität des Designs

Diese Skalen lassen sich in pragmatische (Übersichtlichkeit, Effizienz, Zuverlässigkeit) und hedonische (Stimulation, Neuheitswert) Qualität einteilen, während die Attraktivität eine übergreifende Gesamtbewertung darstellt. Der UEQ liefert für jede Dimension einen Mittelwert, der mit Benchmarkdaten aus früheren Akzeptanzstudien verglichen werden kann. Dadurch lässt sich ein neues System hinsichtlich UX im Kontext einordnen. [92], [93]

In Anwendung auf ein HMI eines OFA in einem Simulator kann der UEQ wertvolle quantifizierbare Ergebnisse zur Bedienerzufriedenheit liefern. So wurde der UEQ beispielsweise eingesetzt, um die Nutzererfahrung eines neuartigen HMI für Baumaschinen zu evaluieren. Dabei wurden die nicht instrumentellen Qualitäten der Schnittstelle erfasst und mit den vorhandenen Benchmarkwerten verglichen [94]. Auch in der Automobilforschung wird der UEQ oder die Kurzversion, der UEQ-S, eingesetzt [95]. Allgemein ist der

UEQ leicht einsetzbar, wird durch umfangreiche Auswertungstools unterstützt und liefert eine schnelle, valide Einschätzung der wahrgenommenen Usability und User Experience eines Assistenzsystems [92].

System Usability Scale

Die System Usability Scale (SUS) ist ein sehr weit verbreiteter, kurzer Usability Fragebogen mit 10 Aussagen. Jedes SUS Item wird auf einer Likert Skala bewertet. Aus den Antworten wird dann ein Summenwert zwischen 0 und 100 berechnet, der als Maß für die wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit dient. Ein höherer Wert bedeutet dabei eine bessere Usability. [96]

SUS zeichnet sich durch die Produktunabhängigkeit aus, kann für eine Vielzahl an Systemen eingesetzt werden und ist in unter einer Minute ausgefüllt. Trotz ihrer Kürze hat diese Methode sich als zuverlässig und valide erwiesen. Da SUS bereits in vielen Studien verwendet wurde, liegen umfangreiche Vergleichsdaten für eine Benchmarkinterpretation vor. [97]

AttrakDiff

Der AttrakDiff ist ein Fragebogen, der speziell die wahrgenommene hedonische und pragmatische Qualität eines Produkts misst. Ähnliche, wie der UEQ besteht AttrakDiff aus 28 Gegensatzpaaren von Adjektiven auf einer 7-Punkte-Skala und deckt 4 Dimensionen ab [98]:

- Pragmatische Qualität: Aufgabenorientierte Qualität, Effizienz
- Hedonische Qualität – Stimulation: Begeisterung, Neugier
- Hedonische Qualität – Identität: Wie das Produkt den Nutzer anderen gegenüber präsentiert
- Attraktivität: positiv-negativ Gesamturteil zum Produkt

Diese Dimensionen ähneln teilweise den UEQ-Skalen. Während [92] zum Schluss kommen, dass konzeptionell ähnliche Dimensionen von UEQ und AttrakDiff hoch korrelieren, kommen [99] zu unterschiedlichen Ergebnissen in der UX Bewertung eines Systems mit diesen beiden Methoden. Dies ist damit zu erklären, dass AttrakDiff stärker auf Hedonische Qualität mit der

Unterscheidung in Stimulation und Identität setzt und damit besser für Konsumprodukte geeignet ist, während der UEQ eine ausbalanciertere Struktur aufweist [99].

AttrakDiff wird häufig in frühen Phasen des Produktdesigns eingesetzt, um herauszufinden, wie ein Interaktionskonzept sowohl funktional-pragmatisch, als auch emotional beim Nutzer ankommt. Die pragmatische Qualität gibt Auskunft darüber, ob ein System praktikabel ist, während die hedonische Qualität im Bezug auf Stimulation und Identität zeigt, ob das Design Spaß macht und zum Image des Nutzers passt. Eine hohe Attraktivität kombiniert mit hoher pragmatischer Qualität ist dabei das Ziel. Durch die semantische Differenzial Methode lassen sich detaillierte Profile erstellen, die zeigen, welche Eigenschaften besonders positiv oder negativ bewertet werden. [100], [101]

2.5.2 Technikakzeptanz

Während User Experience- und Usability Fragebögen das subjektive Nutzungserlebnis und die Zufriedenheit mit einem bestehenden System messen, befassen sich Technikakzeptanzmodelle primär mit der Bereitschaft von Nutzern, eine neue Technologie annehmen und zu verwenden.

Die Wurzeln vieler Modelle basieren auf sozialpsychologischen Theorien. Daraus abgeleitet entstand das Technikakzeptanzmodell (TAM) [90]. Spätere Erweiterungen sind das deutschsprachige Modell „Technikaffinität erfassen – Elektronische Geräte“ (TA-EG) [102], TAM2 [103], TAM3 [104] und die Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT) [105].

Im industriellen Kontext werden diese Modelle genutzt, um beispielsweise die Fahrerakzeptanz autonomer Fahrzeuge oder Bedienerakzeptanz automatisierter Maschinen zu untersuchen. So zeigte eine Studie, dass TAM und UTAUT moderat in der Lage sind, die Nutzungsabsicht für vollautomatisierte Fahrzeuge vorherzusagen. Der wahrgenommene Nutzen und sozialer Einfluss wurden dabei als stärkste Einflussfaktoren wahrgenommen, eine erleichterte Bedienung hingegen hatte kaum Einfluss. [106]

Technikakzeptanzmodell TAM

Das Technikakzeptanzmodell (TAM) ist eines der am häufigsten verwendeten Modelle zur Erklärung der Nutzerakzeptanz. Ursprünglich wurde das TAM für IT-Systeme im Arbeitsumfeld entwickelt, lässt sich aber auf viele Technologien übertragen. Im Kern besagt das TAM, dass die Akzeptanz, gemessen an der Absicht, etwas zu nutzen, vor allem von zwei Hauptfaktoren abhängt: [90]

- **Wahrgenommene Nützlichkeit (Perceived Usefulness):** Der Grad, zu dem eine Person glaubt, dass die Nutzung der Technologie die Arbeitsleistung verbessert.
- **Wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit (Perceived Ease of Use):** Der Grad, zu dem eine Person glaubt, dass die Nutzung der Technologie ohne großen Aufwand möglich ist.

Ein Vorteil von TAM ist seine Schlichtheit. Mit nur wenigen Konstrukten bleibt das Modell übersichtlich und leicht anwendbar [90]. Daher wird TAM in unterschiedlichen Bereichen, wie Gesundheitswesen, E-Learning oder IoT-Studien eingesetzt [107].

Ein Kritikpunkt am TAM ist das Fehlen subjektiver Normen und sozialer Einflüsse. Zudem liefert das TAM zwar die Information, dass Nutzen und Einfachheit wichtig sind, aber nicht direkt, wie man ein System einfacher oder nützlicher machen kann. In industriellen Anwendungen werden daher oft erweiterte TAM-Varianten oder Kombinationen mit anderen Theorien eingesetzt. [107]

Erweiterte TAM-Modelle TAM2 und TAM3

Um die Schwächen des ursprünglichen TAM auszugleichen, wurden die Erweiterungen TAM2 und TAM3 entwickelt.

TAM2 integriert vor allem soziale Einflüsse und kognitive Instrumentalfaktoren in TAM, wie die subjektive Norm, Erfahrungen des Nutzers und verschiedene Faktoren, wie Relevanz für die Aufgabe des Nutzers, Qualität der

Ausgaben und Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse. Weiterhin erfolgt eine Unterscheidung, ob eine Nutzung freiwillig oder verpflichtend ist. Insgesamt erhöht TAM2 die Aussagekraft für die wahrgenommene Nützlichkeit, indem es zeigt, wodurch diese geprägt wird. [103]

TAM3 fügt die Einflüsse auf die wahrgenommene Einfachheit hinzu, wie Selbstwirksamkeit im Umgang mit Computern, der Spaß an der Nutzung und die Technikängstlichkeit. TAM3 liefert damit eine vollständige Abdeckung aller wichtigen Einflussgrößen auf Akzeptanz, von individuellen Fähigkeiten über organisatorische Unterstützung bis hin zu Emotionen. [104]

TAM2 und TAM3 haben das klassische TAM deutlich erweitert und an heutige Anforderungen angepasst. Soziale Faktoren im Arbeitsumfeld, individuelle Unterschiede und affektive Faktoren wurden integriert. Aufgrund der hohen Komplexität werden in der Praxis jedoch oft reduzierte Versionen genutzt, um die Balance zwischen Modellkomplexität und Praktikabilität zu halten. [108]

Unified Theory of Acceptance and Use of Technology

Die Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT) vereint mehrere bestehende Modelle in ein einheitliches Modell mit hoher Aussagekraft. UTAUT identifiziert dabei vier Hauptfaktoren, die die Verhaltensabsicht zur Nutzung bestimmen [105]:

- Erwartete Leistung: analog zu TAM wahrgenommene Nützlichkeit
- Erwartete Benutzerfreundlichkeit: analog zu TAM wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit
- Sozialer Einfluss: Subjektive Normen durch das soziale Arbeitsumfeld
- Erleichternde Umstände: Wahrnehmung, ob organisatorische und technische Voraussetzungen zur Nutzung gegeben sind

Zusätzlich definiert UTAUT mehrere Moderationsvariablen, wie Geschlecht, Alter, Erfahrung und Freiwilligkeit der Nutzung, welche die Gewichtung der Faktoren beeinflussen. So hatte der soziale Einfluss bei älteren Personen oder

in Pflichtnutzungssituationen einen stärkeren Einfluss, als bei jungen oder freiwilligen Nutzern. [105]

UTAUT baut ein umfassendes Rahmenwerk, das in Akzeptanzstudien häufig als Basis für Fragebögen dient. UTAUT ist komplexer als TAM, ermöglicht aber auch eine ganzheitliche Betrachtung inklusive sozialer und organisatorischer Faktoren der Technikakzeptanz. [109]

Technikaffinität TA-EG

Der Fragebogen Technikaffinität erfassen – Elektronische Geräte (TA-EG) ist ein deutschsprachiges Instrument, das mit der persönlichen Affinität einer Person zu Technik einen weiteren Aspekt der Akzeptanz misst, um in Studien die Technikbereitschaft von Versuchspersonen quantitativ einzuschätzen. Menschen unterscheiden sich darin, wie aufgeschlossen sie generell gegenüber neuen Technologien sind. Dies kann entscheiden, ob eine bestimmte Innovation angenommen wird oder nicht. Der TA-EG umfasst 19 Aussagen und bildet vier Dimensionen ab: [102]

- Kompetenz: selbsteingeschätzte technische Kompetenz
- Begeisterung: Generelle Neugier und Begeisterungsfähigkeit
- Positive Einstellung: Erwartete Vorteile durch Technik
- Negative Einstellung Befürchtete Nachteile durch Technik

Durch den TA-EG kann die Technikaffinität erfasst werden, die oft als Kontrollvariable in Usability- und Akzeptanzstudien dient. So können vor einem Usability Test die TA-EG Werte von Versuchspersonen erhoben werden um zu prüfen, ob Versuchspersonen mit hoher Affinität die Usability anders bewerten, als solche mit niedriger Affinität. Er ist also ein nützliches Werkzeug, um die Stichprobe zu beschreiben und Ergebnisse zu segmentieren. Er ist somit kein Akzeptanzmodell im engeren Sinne, sondern ein diagnostisches Tool, um Nutzermerkmale zu erfassen. [102]

2.5.3 Qualitative Interviews

Neben quantitativen Fragebögen und Modellen stellen qualitative Methoden, wie Interviews, eine unverzichtbare Methode dar, um die Akzeptanz eines Assistenzsystems in der Tiefe zu verstehen. Während Fragebögen zumeist numerische Bewertungen liefern, geben Interviews Aufschluss über die Hintergründe zu diesen Bewertungen und ermöglichen, subjektive Eindrücke zu sammeln. Im Falle eines OFA kann Feedback zu verschiedenen Komponenten und Funktionen eingeholt werden und so neben der generellen Bewertung durch Usability Tests die Frage beantwortet werden, warum die Bewertung entsprechend ausgefallen ist. Typischerweise wird hierfür ein leitfadengestütztes, halbstrukturiertes Interview durchgeführt, bei dem vorab definierte Themen besprochen werden, aber auch Raum für spontane Anmerkungen bleibt, um herauszufinden, warum bestimmte Aspekte akzeptiert oder abgelehnt werden, welche Bedürfnisse, Erwartungen und Bedenken vorliegen und welche Erfahrungen die Haltung prägen.

Zumeist werden Kombinationen aus verschiedenen Methoden durchgeführt. Zunächst wird ein quantitativer Fragebogen ausgefüllt und anschließend das Interview durchgeführt. Der Ansatz kombiniert die objektiv messbaren Bewertungen mit einer subjektiven Reflektion. Nach [110] liefert die Kombination von qualitativen und quantitativen Methoden in einem standardisierten Testprotokoll wertvolle Einblicke, um die Akzeptanz ganzheitlich zu bewerten.

Im Bereich des autonomen Fahrens werden Versuchspersonen nach Testfahrten regelmäßig befragt, wie sicher sie sich fühlten, wo sie Unsicherheiten hatten, ob sie dem System vertrauen und warum bzw. warum nicht. Dadurch werden Bedenken oder das Verständnis für Systementscheidungen zum Vorschein gebracht, die dann in einem Nachfolger des HMI gezielt adressiert werden können. [111], [112]

Typische qualitative Techniken im HMI-Kontext sind neben Interviews auch Think-Aloud-Protokolle [113], Kontextbeobachtungen am Arbeitsplatz [114], Focus Groups mit mehreren Nutzern oder Workshops mit Nutzern und Designern [113]. Alle diese Methoden generieren viele und aussagekräftige

Daten, die allerdings aufwendig ausgewertet werden müssen [115]. Sie werden deshalb dann eingesetzt, wenn die Fragestellung explorativ ist oder nach Abschluss quantitativer Tests bestimmte Auffälligkeiten untersucht werden sollen.

Gerade in modernen, nutzerzentrierten Prozessen werden Personen immer stärker mit einbezogen. Qualitative Methoden spielen eine Entscheidende Rolle in der Akzeptanzbewertung und ermöglichen es, subtile Akzeptanzbarrieren und Treiber aufzuzeigen. Zahlen quantifizieren die Akzeptanz und Worte erklären sie. [115]

2.6 Forschungsbedarf

Die Anforderungen an das HMI hochautomatisierter Maschinen verändern sich durch den steigenden Automatisierungsgrad durch eine sich verändernde Fokussierung und Beanspruchung des Fahrers während des Steuerns einer Maschine. Dabei wandelt sich die Rolle des Fahrers von einer dauerhaft überwachenden und aktiv eingreifenden Tätigkeit hin zu einer primär kontrollierenden Instanz, die nur noch situativ und partiell eingreift, während die Maschine zunehmend längere Zeitbereiche ohne kontinuierliche Überwachung bewältigen kann. Um diesen neuen Anforderungen Rechnung zu tragen, ist es heute schon erforderlich, die Rolle des Menschen auf Maschinen sowie in den daran angepassten Kabinen der Zukunft in den Fokus zu setzen und entsprechende Fahrassistenzsysteme zu entwickeln. Da Maschinen mit einem Automatisierungsgrad vergleichbar SAE-Level 3 [116] heute nicht am Markt verfügbar sind, können diese Assistenzsysteme in Szenarien in einem Simulator validiert werden, sowie die Akzeptanz solcher Systeme sowohl evaluiert, aber gleichzeitig auch aufgebaut werden. Die User-Experience in einem Fahrzeug lebt von der Interaktion mit allen Bedienelementen des Systems sowie der Einbettung in das Design. Bedien- sowie Designelemente können im Zuge von Studien anhand des Feedbacks individuell verändert, sowie angepasst werden. Zur Veränderung verschiedener Elemente und Baugruppen, ist es essenziell, die Plattform durch standardisierte Schnittstellen so offen wie möglich zu gestalten.

Obwohl Fahrsimulatoren in der Automobilforschung weit etabliert sind, sind Simulatoren in der Landtechnik bisher noch weniger verbreitet. Simulatoren ermöglichen kontrollierte, sichere und vergleichsweise günstige Testszenarien, die strikt reproduzierbar sind. Es fehlt eine Analyse, welche konkreten Anforderungen hinsichtlich immersiver Elemente, Module und relevanter Szenarien an einen Simulator für die Validierung und Akzeptanzbewertung eines OFA für Mähdrescher bestehen, insbesondere unter Berücksichtigung geeigneter Simulationsszenarien, Simulatormethoden und Studienmethoden.

Die in Kapitel 2.1.2 aufgeführten Beispiele zeigen die Machbarkeit eines solchen Simulators. Es handelte sich jedoch immer um eine speziell für diese Untersuchungen entwickelte Simulatorumgebung. Einen frei konfigurierbaren Simulator für Forschungs- und Validierungszwecke, der auch ein Automatisierungslevel abbilden kann, das derzeit noch nicht in Serienmaschinen umgesetzt werden kann, ist bislang nicht verfügbar.

Die systematische Identifikation, Strukturierung und Entwicklung geeigneter Szenarien stellt eine zentrale Forschungslücke dar, die in dieser Arbeit adressiert wird.

Auf Basis der vorliegenden Forschungsdefizite wird folgende Forschungshypothese formuliert:

Es gibt einen Simulator, auf dem eine Optimierung der Fahrerbeanspruchung für Mähdrescher validiert und die Akzeptanz eines solchen Systems in definierten Szenarien überprüft werden kann.

Fünf Fragen wurden formuliert zur Beantwortung der Forschungshypothese:

- Forschungsfrage 1: Welche Anforderungen bestehen an einen Simulator für die Validierung eines OFA für Mähdrescher?
- Forschungsfrage 2: Welche Szenarien sind für ein OFA relevant?
- Forschungsfrage 3: Wie kann ein Simulator zur Validierung eines OFA aufgebaut sein?
- Forschungsfrage 4: Welche Studien ermöglichen die Validierung eines OFA?

- Forschungsfrage 5: Welche Studien ermöglichen die Überprüfung der Akzeptanz eines OFA?

3 Anforderungen für die Validität des Simulators

Um die Validität eines Simulators zu gewährleisten, muss der Simulator die physikalischen Eigenschaften und das Verhalten des realen Fahrzeugs für die visuelle und propriozeptive Wahrnehmung nachbilden. Ebenfalls sollten Prozess, Geometrie und Layout das Originalfahrzeug möglichst gut abbilden. Dies betrifft vor allem die Art und die Anordnung der Bedienelemente und den Einfluss der Parametervorellung. Zur Einordnung wird zunächst der Anwendungsfall des auf dem Simulator zu validierenden OFA vorgestollt.

3.1 Anwendungsfall

Das zu validierende Konzept des OFA wurde speziell für den Einsatz in einem Mähdrescher entwickelt und adressiert die spezifischen Anforderungen dieses Maschinentyps im Kontext hochautomatisierter Ernteprozesse. Dieser Anwendungsfall auf dem Mähdrescher zeichnet sich durch lange Einsatzzeiten, hohe Systemkomplexität sowie stark schwankende Beanspruchungslevel der Bediener aus. Insbesondere während der Ernte können Einsatzdauern bis in den zweistelligen Stundenbereich auftreten, wobei sich Phasen mit hoher kognitiver Beanspruchung mit längeren monotonen Phasen abwechseln. [E3]

Das Bedien- und Anzeige-konzept des zu validierenden OFA ist dabei für moderne Mähdrescher entwickelt. Das Bedienkonzept sieht multifunktionale Armlehnen vor, wodurch maschinenspezifische Funktionen klar strukturiert und getrennt von maschinenfremden Funktionen sind. Die Bedienung der maschinenbezogenen Funktionen erfolgt im Simulator teilweise über Originalteile, teilweise über neue Elemente. Die Informationsdarstellung wird über integrierte Displays und über Head-Up-Displays direkt im Sichtfeld des Fahrers konzipiert. Sämtliche Handlungsempfehlungen, Warnungen und

Hinweise werden zusätzlich zur visuellen Darstellung auch in auditiver Form in Form einer virtuellen Assistentin ausgegeben. [E2] - [E4]

Ein zentrales Merkmal des HMI-Konzepts des zu validierenden OFA ist eine anwendungsspezifische Ausrichtung des Fahrerarbeitsplatzes auf unterschiedliche Tätigkeiten im Mähdreschereinsatz. Während im Fahrmodus weiterhin die Überwachung und die direkte Eingriffsmöglichkeit in den Maschinenprozess im Vordergrund stehen, schaffen Büro- und Entspannungsmodus geeignete Rahmenbedingungen für maschinenfremde Tätigkeiten. Zugleich tragen die unterschiedlichen Modi zur gezielten Fokussierung bei, indem sie den Fahrer je nach Situation entweder auf die Maschinenführung, auf bürobezogene Aufgaben oder auf eine regenerative Entlastung ausrichten. Dadurch können Zeiten mit hohem Automatisierungsgrad genutzt werden, ohne den Fahrer durch eine ungeeignete Sitzposition, Blickrichtung oder Bedienumgebung unnötig zu beanspruchen. Die modulare Ausrichtung des Arbeitsplatzes soll eine situationsgerechte Verteilung von Aufmerksamkeit, Komfort, Bedienbereitschaft und kognitiver Beanspruchung unterstützen und ist daher ein wesentlicher Bestandteil des zu validierenden Assistenzsystems und muss im Simulator berücksichtigt werden. [E2] - [E4]

3.2 Visuelle Immersion

Um eine hinreichende visuelle Immersion des Fahrsimulators zu erzeugen, müssen Anforderungen hinsichtlich FOV, dynamischer Visualisierung und Texturen erfüllt werden. Sie ist notwendig, damit die Versuchspersonen die simulierte Arbeitsumgebung realitätsnah wahrnehmen und das Verhalten im Simulator auf die reale Maschinennutzung übertragbar bleibt.

Das FOV des Simulators sollte so gewählt werden, dass die relevanten Arbeitsbereiche des Mähdreschers in den zu betrachtenden Szenarien abgebildet werden können. Konkret bedeutet dies, dass mindestens der gesamte Bereich des Schneidwerks und der Bereich, in dem ein Abfahrer an den Mähdrescher fahren kann, visualisiert sein muss. Die schließt den gesamten Bereich ein, der auf einer realen Maschine durch die Frontscheibe sowie die

beiden Türen sichtbar ist. Der FOV soll sich deshalb über die gesamten Türen und Scheiben des Simulators erstrecken. Dies entspricht auf Basis der Kabinengeometrie einem horizontalen FOV von 180° , sowie einem vertikalen FOV von 60° . Fahrer können durch das Korntankfenster zumindest bei geringem bis mittlerem Korntankfüllstand ebenfalls Rückschlüsse auf Bruchkorn oder Nichtkornbestandteile ziehen, dafür gibt es auf aktuellen Maschinen zusätzlich Kamerabilder aus dem Gutstrom inklusive kamerabasierter Detektion dieser Verluste, die auf Displays in der Kabine angezeigt werden können. Eine Abdeckung von 360° in der Kabine ist also nicht zwingend erforderlich. [27], [28]

Hinsichtlich der dynamischen Visualisierung sind Bildwiederholraten erforderlich, die ein flüssiges und verzögerungsfreies Fahrerlebnis sicherstellen. Dies bedeutet eine Bildwiederholrate von mindestens 30 Hz, besser aber mindestens 60 Hz. Gleichzeitig muss die Latenz zwischen Fahreraktionen und visueller Reaktion im Simulator auf ein Minimum reduziert werden, idealerweise < 50 ms. Aufgrund der geringen Fahrgeschwindigkeiten eines Mähdreschers auf dem Feld von unter 10 km/h sind hohe dynamische Anforderungen zwar weniger relevant als bei schnell fahrenden Fahrzeugen, dennoch sind geringe Latenzen und hohe Bildraten essenziell um Simulatorkrankheit zu vermeiden und realistische Beanspruchungswerte zu erzielen. [30], [31]

Darüber hinaus werden realistische Grafiktexturen und Beleuchtungseffekte benötigt, die den typischen Bedingungen auf landwirtschaftlichen Flächen während der Ernte entsprechen. Dazu gehören unter anderem die realitätsgetreue Darstellung der Feldfrüchte, von Bodenbeschaffenheiten, Vegetationen, Staubentwicklung sowie Tageszeit und Witterungsbedingungen. Das Verhalten anderer Fahrzeuge, wie etwa weiterer Mähdrescher oder vor allem das Verhalten der Abfahrer ist authentisch zu modellieren, um realistische Interaktionen und Konfliktsituationen im Arbeitsablauf zu erreichen. Ist dies softwaretechnisch nicht umsetzbar, bietet sich hierbei auch der Wizard-of-Oz-Ansatz an, bei dem weitere Fahrzeuge von der Versuchsleitung aktiv gesteuert werden können [46].

Da der Arbeitsbereich des Mähdreschers sehr nah vor der Kabine liegt und bei maximal 10 km/h Arbeitsgeschwindigkeit ferne Objekte nicht zwingend in allerhöchster Detailtiefe dargestellt sein müssen, wird eine Auflösung von 1 arcmin/px nicht zwingend benötigt. 2-3 arcmin/px bieten eine ausreichend gute visuelle Immersion für Fahrsimulatoren, wobei noch keine Unschärfen oder Flimmer-Effekte auftreten. Dieser Wert darf beim zu betrachtenden Simulator nicht überschritten werden. [35]

Die zentralen Anforderungen für eine ausreichende visuelle Immersion sind in Tabelle 2 gesammelt dargestellt.

Tabelle 2: Anforderungen an die visuelle Immersion

Kategorie	Anforderung	Zielsetzung
Sichtfeld	Horizontales FOV	Min. 180°
	Vertikales FOV	Min. 60°
Visualisierung	Bildwiederholrate	30 Hz
	Systemlatenz	Max. 50 ms
	Auflösung	Max. 3 arcmin/px
Grafik	Texturen	Realistische Darstellung der Umgebung vor allem im Nahbereich

3.3 I/O-Module

Hinsichtlich Validität eines Simulators tragen die I/O-Module neben der Visualisierung ebenfalls stark zur Immersion bei. Der Fahrerarbeitsplatz soll deshalb so realitätsnah, wie möglich abgebildet werden und die Nebenaufgaben ergonomisch integriert sein, sodass keine ungewollte zusätzliche Belastung für den Fahrer entsteht.

Mit steigendem Automatisierungslevel verändert sich die Rolle eines Fahrers grundlegend von der aktiven Steuerung und Überwachung der Maschine hin zu einer heute überwachenden und eingreifenden Instanz. Höher automatisierte Maschinen mit einem Automatisierungsgrad vergleichbar zu SAE Level 3 [116] für die Fahr- und Arbeitsfunktion erlauben zukünftig voraus-

sichtlich auch, dass Fahrer sich von dieser Tätigkeit zeitweise auch von dieser Aufgabe aktiv abwenden können. Trotz dieser Verschiebung bleibt es für die Validität des Simulators unerlässlich, zentrale Bedienelemente aus dem realen Arbeitskontext beizubehalten. Eintrainierte motorische Abläufe, haptische Interaktionen und gewohnte Steuerlogiken bilden eine wichtige Grundlage für die intuitive Systemnutzung und beeinflussen damit direkt die kognitive Beanspruchung. Dies betrifft insbesondere grundlegende Eingabemöglichkeiten zur Durchführung der Fahraufgabe, die auch in hochautomatisierten Szenarien zur situativen Anpassung oder zur manuellen Übernahme in Ausnahmefällen möglich bleiben soll. Gleichzeitig eröffnet ein höheres Automatisierungslevel die Möglichkeit, gewisse Bedienelemente zu vereinfachen, neu anzuordnen oder vollständig zu ersetzen. Dies betrifft neben den Eingabemodulen für die Fahraufgabe vor allem auch die Module, die zur Steuerung der maschineninternen Dreschsysteme und des Schneidwerks benötigt werden. Auch wenn durch den steigenden Automatisierungsgrad seltener eingegriffen werden muss, ist der Zugriff auf alle relevanten Systeme im Simulator essenziell. Dies garantiert ein im Sinne der Systemvalidierung vollständiges Interaktionsmodell und eine rasche Übernahme in kritischen Situationen. Die entsprechenden Eingabemodule müssen somit funktional, ergonomisch und intuitiv integriert sein.

Zusätzlich sind auch die Interaktionen mit den Nebenaufgaben zu berücksichtigen, die einen zentralen Teil des OFA ausmachen. Dazu zählen etwa Dokumentationen, Schulungen oder Konfigurationsschnittstellen für das OFA. Diese Aufgaben können über zusätzliche Eingabemodule wie Tastatur, Maus oder Spracheingabe erfolgen. Ebenso müssen die verschiedenen Sitzmodi für Fahr-, Büro- oder Entspannungsmodus vorgesehen werden, da sie Einfluss auf die Beanspruchung und Interaktion haben.

Neben den Inputmodulen zur Steuerung von Maschine und Nebenaufgaben spielt die visuelle Informationsausgabe ebenfalls eine wichtige Rolle hinsichtlich Situationsbewusstsein im Simulator. Dazu zählt die korrekte Abbildung von Spiegeln, Fahrzeuganzeigen und Systemrückmeldungen. Anzeigen zum Maschinenstatus, sowie Warn- und Störmeldungen müssen ebenso berücksichtigt werden, wie Rückmeldungen durch das Assistenzsystem. Dies

betrifft insbesondere Hinweise zur Systemaktivität, Handlungsempfehlungen, wie auch visuelle Rückmeldungen auf Interaktionen. Für eine konsistente Wechselwirkung zwischen Fahrer und System, müssen diese Informationen in Echtzeit und in anwendungsadäquater Darstellung visualisiert werden, etwa in Form von Head-Up-Displays oder integrierten Monitoren.

Die akustischen Ausgabemodule tragen ebenfalls zur Immersion bei, um gezielte auditive Rückmeldungen geben zu können, etwa durch Warnsysteme oder durch das Assistenzsystem. [37]. Umgebungs- und Maschinengeräusche sind durch die schallgedämpften Mährescherkabinen zwar stark reduziert, liefern dennoch Rückmeldungen über den Systemzustand.

Aufgrund der geringen Fahrgeschwindigkeit von Mähreschern und der primären Zielsetzung der mentalen Entlastung durch ein OFA, wird auf eine Bewegungsplattform verzichtet. Es ist aber zu berücksichtigen, dass der Verzicht auf Bewegungseffekte potenziell zu einer verringerten Basisbeanspruchung führen kann. Dieser systematische Offset wird durch die relative Validität abgedeckt.

Tabelle 3: Anforderungen an die I/O-Module

Kategorie	Anforderung	Zielsetzung
Fahrerarbeitsplatz	Kabinenabbildung	Möglichst realitätsnah
Eingabemodule	Maschinenbedienung	Zugriff auf alle relevanten Fahr- und Arbeitsfunktionen
	OFA	Zugriff auf alle relevanten Funktionen des OFA
Sitzkonzept	Kabinenmodi	Fahr-, Büro- und Entspannungsmodus
Visuelle Ausgabe	Maschine	System und Fahrzeuganzeigen
	OFA	Anzeigen für Handlungsempfehlungen und Funktionen des OFA
Akustische Ausgabe	Maschine	Maschinenakustik
	OFA	Sprachausgabe des OFA integrieren
Bewegungssystem	Bewegungsplattform	Optional

3.4 Anbindung des Assistenzsystems

Das OFA soll für bestmögliche Ergebnisse hinsichtlich Akzeptanz, Wirkung und Nutzung sowohl funktional, also auch im Bezug auf das HMI vollständig in die Simulatorumgebung integriert werden.

Dafür läuft das Assistenzsystem zwar auf einem eigenen Rechner, wird aber über verschiedene Schnittstellen mit dem Simulator gekoppelt. Die Simulationssoftware stellt dabei sämtliche erforderlichen Fahrzeug- und Umgebungsdaten bereit. Konkret werden Fahrzustand, Positionsdaten und Dreschwerks-, sowie Schneidwerksparameter übergeben. Zusätzlich muss der Zugriff auf Interfacedaten gewährleistet sein und spezielle Trigger für die verschiedenen Studienszenarien oder für einzelne Handlungsempfehlungen müssen ausgelöst werden können.

Ebenso müssen die Outputparameter des Assistenzsystems zurück in den Simulator gegeben werden. Dies betrifft vor allem die akustische und visuelle Ausgabe von Handlungsempfehlungen, Hinweisen, sowie die Manipulation des Interface an sich. Wichtig ist hierbei auch die Umsetzung der Priorisierung verschiedener Handlungsempfehlungen im Simulator, sodass diese unmittelbar und störungsfrei angezeigt werden müssen, um die Beanspruchung und Akzeptanz erfassen zu können. Dafür ist auch eine zuverlässige Kommunikation des OFA mit verschiedenen APSs gewährleistet sein.

Auch die Integration der Messsysteme der Zustandserfassung muss berücksichtigt werden. Es wurden möglichst nichtinvasive Systeme ausgewählt, da das System in der realen Anwendung über einen langen Zeitraum aktiv sein soll und die Personen in ihrem Verhalten nicht beeinflusst oder eingeschränkt werden dürfen. Es werden ein Eye-Tracking-System mit vier Kameras zur Abdeckung des großen FOV und ein Fitnessarmband genutzt. Diese Daten der beiden Systeme müssen aufgenommen und verarbeitet werden, um den Beanspruchungszustand zu schätzen und an das OFA zu übergeben.

Um die Auswirkungen von Störungen oder Verzögerungen auf die Studienergebnisse zu minimieren, soll im Simulator eine stabile Echtzeitkommunikation erreicht werden. Zusätzlich sollen Fallback-Lösungen, wie manuelle

Trigger für die Versuchsleitung, implementiert werden. Auch der Wizard-of-Oz-Ansatz kann eingesetzt werden, wodurch Teilnehmer in bestimmten Szenarien den Eindruck haben, mit autonomen Systemen zu interagieren, während im Hintergrund eine menschliche Steuerung erfolgt, um Reaktionen der Versuchspersonen unter kontrollierten Bedingungen zu beobachten.

Gesammelt sind die wichtigsten Anforderungen in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Anforderungen an die Anbindung des Assistenzsystems

Kategorie	Anforderung	Zielsetzung
Systemintegration	OFA-Integration	Vollständige HMI-Integration
	Beanspruchungs-messung	Zustandserfassung als separates Modul
Schnittstellen	Simulator und OFA	Austausch von Maschinendaten und Daten des OFA
HMI	Interface	Dynamische Anpassung des Interfaces durch das OFA
	Priorisierung	Priorisierung im HMI ermöglichen
Kommunikation	Echtzeit-kommunikation	Stabile und verzögerungsarme Kommunikation
Robustheit	Fallback Lösungen	Trigger für Versuchsleitung

3.5 Erforderliche Fahrscenarien und Handlungsempfehlungen

Relevante Persona und funktionale Anforderungen werden identifiziert und die für ein OFA relevanten notwendigen Handlungsempfehlungen und Fahrscenarien daraus abgeleitet. Diese Auswahl bildet die Grundlage für die nachfolgende Entwicklung der Validierungs- und Akzeptanzstudien.

3.5.1 Umfragen zu Funktionalitäten eines OFA

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Fahrerkabine 4.0“ wurden Interviews und Videoanalysen mit Fahrern und Betriebsleitern geführt mit dem Ziel, die Bedürfnisse und den jeweiligen Nutzungskontext für das geplante Assistenzsystem zu identifizieren und einzugrenzen. Darauf aufbauend wurde eine Onlineumfrage über eine landwirtschaftliche Zeitung verbreitet. An dieser Umfrage nahmen neben angestellten Fahrern, Betriebsleitern und Lohnunternehmern auch Entwickler, Testfahrer und Produktmanager mit Erfahrung im Bereich Erntetechnik teil. [E1]

Im Rahmen der Interviews beschrieben die Befragten ihre typischen Arbeitstage mit Fokus auf das Beanspruchungsniveau und mögliche Zusatzaufgaben. Dabei korreliert das Beanspruchungsniveau über den langen Erntetag stark mit den Feldbedingungen und dem Automatisierungsgrad der Maschine. [E5], [E6]

Bezüglich der Zusatzaufgaben waren sich die Befragten weitestgehend einig, dass es heute schon begrenzte Möglichkeiten für Zusatzaufgaben neben dem Dreschen gibt. Besonders Fahrer zeigten Bereitschaft, Tätigkeiten wie das Einsehen von Anleitungen oder Dokumentieren der Erntedaten zu übernehmen, sofern dies die Hauptaufgabe nicht beeinträchtigt. Diese Zusatzaufgaben wären nach Ansicht der Befragten aber nur mit einer neuen, überarbeiteten Nutzerschnittstelle möglich, da die aktuelle Schnittstelle als unübersichtlich und wenig intuitiv dargestellt wird und die Sicht auf den Arbeitsbereich nicht noch stärker einschränkt werden darf. [E5], [E6]

In der anschließenden Onlineumfrage vom Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim mit 312 Teilnehmenden bewerteten zwei Drittel die Möglichkeit, Nebentätigkeiten während des Dreschvorgangs erledigen zu können, als positiv oder sehr positiv. Als Nebentätigkeiten wurden hauptsächlich die Überprüfung des Wetters, Zugriff auf das Farmmanagementsystem und Kommunikation zur Organisation von Betrieb, Logistik und den kommenden Erntetagen genannt. Aber auch private Tätigkeiten und Angebote aus dem Bereich der Unterhaltung konnten sich bereits 2021 ein Fünftel der Befragten vorstellen. [117]

3.5.2 Entwicklung von relevanten Persona

In einem Team, bestehend aus mehreren Wissenschaftlern und Experten aus der Industrie, wurden auf Basis der oben genannten Befragungen drei Persona erstellt. Diese Persona stellen repräsentative Nutzerprofile und relevante Akteure sowie deren Bedürfnisse im Kontext eines OFA für Mähdrescher dar. [118]

Das Team sammelte umfangreiche Daten aus verschiedenen Quellen, darunter Interviews und Videoanalysen, die während der Ernteperiode auf verschiedenen Betrieben und Maschinen durchgeführt wurden. Zudem wurden die Ergebnisse der Umfragen aus 3.5.1 und weitere Literatur mit einbezogen. Diese Daten lieferten Einblicke in die Bedürfnisse, Herausforderungen und Verhaltensweisen der potenziellen Nutzer des Systems. Die gesammelten Daten wurden analysiert und in relevante Kategorien eingeteilt. Als Grundlage für die Erstellung der Personas dienten identifizierte Muster und Gemeinsamkeiten. Jede Persona steht für einen spezifischen Nutzertyp mit eigenen Zielen, Bedürfnissen und Herausforderungen. Um sie greifbarer und anschaulicher zu machen, wurden sie mit fiktiven Namen, Bildern und Hintergrundgeschichten versehen.

Als Beispiel beschreibt Abbildung 3 die erste Persona, Stefan Huber, einen selbstständiger Landwirt in der dritten Generation, der einen 100 Hektar großen Ackerbaubetrieb in Norddeutschland führt. Neben der landwirtschaftlichen Arbeit ist er für das gesamte betriebliche Management verantwortlich, einschließlich Terminabsprachen, Anbauplanung, Einkauf und Logistik. Unterstützt wird er von einem Angestellten und übernimmt etwa fünf Stunden täglich administrative Aufgaben. Stefan Huber legt großen Wert darauf, die Ernte möglichst effizient und verlustfrei einzubringen. Gleichzeitig ist ihm wichtig, seinem Angestellten gute Arbeitsbedingungen zu ermöglichen. Dennoch muss er seinen Betrieb effizient organisieren und gleichzeitig sicherstellen, dass die Arbeitsbelastung für ihn und seinen Angestellten tragbar bleibt. Er befürchtet, dass zusätzliche Aufgaben den Fahrer während der Ernte ablenken könnten.

Landwirt



Stefan Huber
Landwirt in der dritten Generation

Alter: 48 | Arbeit: Selbstständiger Landwirt | Familie: Verheiratet | Wohnort: Norddeutschland








Stefan führt seinen eigenen landwirtschaftlichen Betrieb in Norddeutschland mit 100 ha Anbaufläche.

Der Betrieb besteht vornehmlich aus Ackerbau und Feldbewirtschaftung.

Stefan hat einen Angestellten zur Unterstützung bei der Hof- und Feldarbeit, sowie zum Mährescher fahren.



Stefan fährt den Mährescher nur noch selten, er muss alle anfallenden Aufgaben managen (Terminabsprachen, Aufgabenverteilung, Anbauplanung, Einkauf, Logistik, etc.) und erledigt über den Tag verteilt etwa 5 Std. Büroarbeiten.

Die Arbeitstage können teilweise bis zu 15 Std. lang sein, besonders während der Ernte wird das Privatleben hinten angestellt.





Ziele

„Die Ernte schnell und mit geringen Verlusten einbringen“

Wünsche

„Der Fahrer soll sich an seinem Arbeitsplatz wohlfühlen“

Sorgen

„Würden zusätzliche Aufgaben den Fahrer ablenken?“








Abbildung 3: Persona Stefan Huber [118]

Alle drei erstellten Persona spiegeln unterschiedliche Perspektiven des landwirtschaftlichen Alltags wider. Während der Landwirt und der Lohnunternehmer den Betrieb und die Maschinenorganisation im Blick haben, steht

für den angestellten Fahrer die praktische Arbeit und deren Rahmenbedingungen im Vordergrund. Ihre Anforderungen und Bedenken sind essenziell für die Entwicklung neuer Technologien, um die landwirtschaftlichen Prozesse zu optimieren, ohne die Bedürfnisse der Nutzer zu vernachlässigen. Die weiteren Persona sind in Anhang A1 zu finden.

3.5.3 Relevante Fahrszenarien und Handlungsempfehlungen eines OFA

Die Validierung und Akzeptanzbewertung eines OFA erfordert das Abbilden verschiedener Beanspruchungslevel. Eine monotone Erntefahrt mit aktivem Lenksystem, Umfeldüberwachung und automatischer Ernte kann eine Unterforderung provozieren. Manuelles Lenken bei gleichzeitigem Einstellen verschiedener Dreschsysteme und einem weiteren Pool an Nebentätigkeiten stellt eine deutlich höhere Beanspruchung dar. Dazwischen liegen Fahrphasen, in denen manuelles Lenken und sporadische Drescheinstellungen oder automatisiertes Fahren mit Nebenaufgaben ein mittleres Beanspruchungsniveau ergeben.

Im Rahmen eines Expertenworkshops wurden verschiedene Szenarien für ein OFA für Mähdrescher entwickelt. Ziel dieses Workshops war es, einen Katalog praxisnaher und realistischer Teilszenarien zu entwickeln, die es ermöglichen, das OFA im Simulator unter relevanten Bedingungen zu validieren und die Akzeptanz der beteiligten Akteure für ein solches System zu überprüfen. Der Expertenworkshop gliederte sich in folgendes Vorgehen:

- 1. Einführung und Zielsetzung:** Zu Beginn des Workshops wurden die Teilnehmer über die Ziele und den Ablauf des Workshops informiert. Es wurde erläutert, welche Bedeutung die entwickelten Szenarien für das Projekt haben und welche Anforderungen an diese gestellt werden. Die Ergebnisse der in 3.5.1 beschriebenen Umfrage, sowie die in 3.5.2 erarbeiteten Persona wurden nochmals dargestellt und als Basis für die Szenarientwicklung genutzt.

2. **Zusammenstellung der Expertengruppe:** Die Teilnehmer des Workshops setzten sich aus Fachleuten verschiedener Disziplinen zusammen, um eine breite Perspektive und umfassendes Fachwissen zu gewährleisten. Die Experten kamen aus den Bereichen Landtechnik, Industriedesign, Steuerungssysteme, Arbeitswissenschaft, Landwirtschaft und Wissenschaft. Sie alle brachten ihre spezifischen Kenntnisse und Erfahrungen ein, um die Szenarien möglichst realitätsnah zu gestalten.
3. **Brainstorming und Ideensammlung:** In einer ersten Phase wurden in Gruppenarbeit verschiedene Ideen und Ansätze für mögliche Szenarien gesammelt. Dabei wurden sowohl bewährte Methoden als auch innovative Ansätze berücksichtigt. Die Teilnehmer wurden ermutigt, kreativ zu denken und auch unkonventionelle Ideen einzubringen.
4. **Diskussion und Bewertung:** Die gesammelten Ideen wurden anschließend in der gesamten Gruppe präsentiert, bewertet, priorisiert und in thematische Cluster eingeteilt. Ziel war es, die vielversprechendsten Ideen auszuwählen und weiterzuentwickeln sowie einen möglichst vollständigen Katalog an möglichen Szenarien zu erstellen.
5. **Ausarbeitung der Szenarien:** Nach dem Workshop wurden die ausgewählten Ideen detailliert ausgearbeitet. Die Experten arbeiteten in kleineren Teams zusammen, um die Szenarien zu konkretisieren und die notwendigen Details festzulegen. Dabei wurden auch mögliche Herausforderungen und Lösungsansätze berücksichtigt.
6. **Präsentation und Feedback:** Die ausgearbeiteten Szenarien wurden anschließend nochmals der gesamten Gruppe präsentiert. Die Teilnehmer hatten die Möglichkeit, Feedback zu geben und Verbesserungsvorschläge einzubringen. Dieses Feedback wurde genutzt, um die Szenarien weiter zu optimieren und an die Anforderungen des Projekts anzupassen.

Die optimierten Szenarien wurden im Expertenworkshop in sechs Themencluster strukturiert. Diese umfassen die Bereiche „Fahrszenarien“, „Betriebliche Tätigkeiten“, „Wohlbefinden“, „Medien“, „Maschine“ sowie „Assistenzsystem“. Die Clusterung bezieht sich dabei ganzheitlich auf die identifizierten Fahrszenarien und die daraus abgeleiteten Handlungsempfehlungen

Die Fahrszenarien und -umgebungen, die für ein OFA relevant sind, sind in Tabelle 5 dargestellt und umfassen sowohl Standardsituationen bei hohem, als auch niedrigem Automatisierungsgrad, sowie die Übergabe zwischen diesen Leveln. Statische Hindernisse, wie Strommasten oder Schächte, werden ebenfalls abgebildet, ebenso wie dynamische Hindernisse in Form von Personen oder anderen Fahrzeugen. Weitere Fahrzeuge können ebenfalls Aufgaben auf dem Feld übernehmen, es sind bspw. weitere Mähdrescher oder Traktoren zum Getreide abfahren oder für die Feldnachbearbeitung.

Im Bezug auf die Umgebung sind Felder mit unterschiedlichen Geometrien, Größen und Feld- und Fruchtparametern realisierbar. Dies ermöglicht es, reale Felder nachzubilden und so eine möglichst realistische Integration in ein Farmmanagementsystem. Die Straßenfahrt ist für die Validierung eines OFA nicht relevant, da dieses nur während des Dreschens aktiv ist.

Tabelle 6 listet potenzielle betriebliche Handlungsempfehlungen für Mähdrescherfahrer während hochautomatisierter Erntephasen auf. Diese umfassen Kommunikation via E-Mail, Telefon oder Kurznachrichtendiensten, sowie die Nutzung verschiedener Office Anwendungen oder agrarspezifischer Wetterdaten. Im Zentrum steht der Zugriff auf das Farmmanagementsystem, in welchem Informationen abgerufen oder eingepflegt werden können und Zugriff auf die Systeme des Betriebs und der Maschinenflotte gegeben ist. Betriebsleiter können Personal-, Tages-, Maschinen- und Betriebsplanung vornehmen.

Tabelle 5: Erforderliche Fahrsczenarien

Kategorie Fahrsczenario	Teilszenario
Dreschen	Bahnen entlang standardisierter Fahrspuren Vorgewende bei unterschiedlichen Geometrien Definierte Spur im Feld Dreschern Anpassung der Dreschsysteme Anpassen der Schneidwerksparameter
Wendevorgang	Verschiedene Wendemuster Automatisierter Wendevorgang Manueller Wendevorgang
Hindernis	Umfahren statischer Hindernisse Umfahren dynamischer Hindernisse Umgang mit Hindernissen im Feld Umgang mit Hindernissen auf dem Vorgewende
Überladevorgang	Stationär am Feldrand Dynamisch während des Dreschens Integration von Überladefahrzeugen Kommunikation mit Überladefahrer
Bestehende Assistenzsysteme	Nutzung eines Lenksystems Prozessautomatisierung zur Optimierung der Dreschparameter Umfeldüberwachung der Maschine
Übergabe automatisch/ manuell	Steuerungsübernahme Fahraufgabe Steuerungsübernahme Dreschsysteme Steuerungsübernahme Schneidwerk
Weitere Maschinen auf einem Feld	Mähdrescher Abfahrer Parallele Feldnachbearbeitung
Feld	Variable Feldgeometrie Variable Feldgrößen Variable Feldparameter Unterschiedliche Fruchtsczenarten Variable Tageszeit

Tabelle 6: Betriebliche Handlungsempfehlungen

Handlungsempfehlung	Teilaufgabe
E-Mail	Bearbeiten von E-Mails
Telefonie	Durchführung von Anrufen Durchführung von Videoanrufen
Tools	Zugriff auf Office Anwendungen Zugriff auf Notizen Zugriff auf Kalender Zugriff auf Cloud Zugriff auf Fotos
Wetter	Abruf spezifischer Wetterdaten bei verschiedenen Wetterseiten
Farmmanagement	Abrufen von Feldinformationen Digitale Pflege der Ackerschlagkartei Fahrtroutenplanung für den nächsten Schlag Planung der Feldnachbearbeitung Überprüfen der Maschinenflotte Zugriff auf Hofsysteme, -daten Planung von Wartung Planung der nächsten Erntetage Durchführen der Personalplanung Einkauf und Verkauf von Gütern oder Betriebsmitteln

Während hochautomatisierter Phasen, die auf stressige Abschnitte folgen, lassen sich gezielt aktivierende Maßnahmen zur Förderung des Wohlbefindens ausführen, die in Tabelle 7 aufgelistet sind. So sind Atemübungen, ergonomische Sitzanpassungen und akustische Entlastung während Mikropausen möglich. Aber auch körperliche Aktivierung durch verschiedene Übungen, wie auch die Erinnerung an Flüssigkeits- und Nahrungsaufnahme tragen zur Erhaltung der Konzentrationsfähigkeit und Reduktion von Ermüdung bei.

Tabelle 7: Handlungsempfehlungen zum Wohlbefinden

Handlungsempfehlung	Teilaufgabe
Körperliche Aktivierung	Durchführen von Entspannungsübungen Durchführen von Lockerungsübungen
Entspannen	Einlegen kurzer Ruhephasen Verstellen des Sitzes in bequeme Position
Entspannungsförderung	Kurze Atemübungen zur Entspannung
Akustische Umgebung	Beruhigende und konzentrationsfördernde Klänge
Essen	Zeitliche Erinnerung
Trinken	Zeitliche Erinnerung

Medienangebote zur auditiven und visuellen Unterhaltung oder kognitiven Aktivierung sind in Tabelle 8 aufgeführt. Sie umfassen neben Musik, Podcasts und verschiedenen Wissensformaten auch das Lesen von allgemeinen Nachrichten und landwirtschaftlichen Fachinformationen. Kurznachrichtendienste, sowie Soziale Netzwerke für die soziale Eingebundenheit sind in angemessenem Umfang nutzbar. Aufgelockert wird dieses Spektrum durch humorvolle Beiträge und Minispiele zur kognitiven Aktivierung.

Tabelle 8: Handlungsempfehlungen im Bereich Medien

Handlungsempfehlung	Teilaufgabe
Auditive Unterhaltung	Musik über Radio anhören Musik oder Podcast über Spotify anhören
Nachrichten	Aktuelle Nachrichten Landwirtschaftliche Fachinformationen
Kurznachrichtendienst	Kommunikation über verschiedene Dienste
Soziale Medien	Facebook Instagram Mastodon
Humor und Auflockerung	Abspielen humorvoller Witze
Wissensimpulse	Wissen in 60 Sekunden
Kognitive Aktivierung	Einfache, kognitiv anregende Minispiele
Visuelle Unterhaltung	Auswahl kurzer, unterhaltsamer Videos

Zu den Konfigurationsmöglichkeiten (Tabelle 9) des Assistenzsystems zählen die Benutzerkontensteuerung, Rollenzuweisung und die Individualisierung des Handlungsempfehlungspools entsprechend der jeweiligen Nutzerprofile. Darüber hinaus lassen sich Spracheinstellungen und generelle Systeminformationen, wie Uhrzeit oder die Sprache anpassen. Das Assistenzsystem kann bei Bedarf auch deaktiviert werden. Das Management der Studien und des Messeszenarios ist ebenfalls im System integriert.

Tabelle 9: Einstellungen für das Assistenzsystem

Handlungsempfehlung	Teilaufgabe
Benutzerprofil	Konto anlegen/ ändern Rollenzuweisung Bearbeitung Handlungsempfehlungs-Pool Favoriten Historie
Zeiteinstellungen	Uhrzeit und Zeitzone anpassen
Spracheinstellungen	Deutsch Englisch
Sleepmodus	Vorgegebene Zeit oder ohne Ende
Studien	Trigger Übung Studie X Trigger Studie X Trigger Messeszenario Pause

Tabelle 10 umfasst die maschinenbezogenen Handlungsempfehlungen, die während automatisierter, wie auch während manueller Fahrphasen auf einem Mähdrescher umgesetzt werden können. Dazu zählen der Zugriff auf digitale Bedienungsanleitungen und Schulungsinhalte, genauso wie Informationen zu technischen Fehlern und Störungen. Das Überwachen von Systemzuständen und die Interaktion mit den unterschiedlichen Automatisierungssystemen haben Priorität. Ergänzend werden kontextbezogene Handlungsempfehlungen im Zusammenhang mit den Überlade- und Wendevorgängen berücksichtigt.

Tabelle 10: Maschinenbezogene Handlungsempfehlungen

Handlungsempfehlung	Teilaufgabe
Bedienungsanleitung	Öffnen der Betriebsanleitung Durchsuchen nach spezifischen Inhalten Abruf von Schulungsinhalten
Fehlermeldungen	Zugriff auf Katalog mit Fehlercodes Informationen zur Fehlerbehebung
Verlustüberwachung	Hinweis auf erhöhte Verluste Vorschläge zur Optimierung der Parameter
Korntankfüllstand	Meldung bei Füllstand >70 % Meldung bei Füllstand >90 %
Überladevorgang	Information zu Status des Überladewagens Information zu Ankunft des Überladewagens Aktivierung des Abtankmodus
Motorauslastung	Unterschreiten eines definierten Wertes
Hinderniserkennung	Warnung bei erkannten Hindernissen Vorschlag zur Umfahrung Anpassen der Spurplanung
Feldranddetektion	Information bevorstehender Wendevorgang Überwachen des Wendevorgangs Hinweis auf Hindernisse im Vorgewende
Lenksystem	Status des Lenksystems ändern
Dreschsystemoptimierung	Veränderung einer Maschineneinstellung X auf Wert Y Vorschläge für besseres Dreschergebnis anzeigen Aktivierung der Dreschautomatisierung
Kabinenkomfort	Anpassen des Sonnenschutzes

Die aufgeführten Einsatzszenarien und daraus abgeleiteten Fahrszenarien und Handlungsempfehlungen verdeutlichen das breite Spektrum an Tätigkeiten, die während hochautomatisierter Phasen möglich sind. Dieser Testfällekatalog bildet die Basis für die in Kapitel 5.1 dargestellte Szenarienentwicklung.

4 Aufbau des Simulators

Im Folgenden wird der Aufbau des Simulators zur Validierung des OFA vorgestellt. Aus den Anforderungen, die in Kapitel 3 erarbeitet wurden, leiten sich die einzelnen Teilsysteme und daraus folgend das Gesamtsystem ab. Für eine möglichst immersive Erfahrung wird der Simulator als reale Kabine aufgebaut, in die das visuelle, auditive und I/O-Konzept integriert wird.

4.1 Teilsysteme des Simulators

Visualisierung/Immersion

Die Wahl des Anzeigeconzepts hat maßgeblichen Einfluss auf die Immersion. Die Umgebung muss über die Frontscheibe sowie die beiden Türen sichtbar sein, um den erforderlichen FOV in horizontaler und vertikaler Richtung abdecken zu können. Die Kabinengeometrie ergibt über die Frontscheibe die Frontscheibe einen horizontalen FOV von 180° und einen vertikalen FOV von 60° . Bildschirmlösungen haben dabei den Nachteil von geometrischen Verzerrungen durch die flache Darstellung außerhalb der Kabine. VR-Systeme bieten zwar ein sehr hohes Maß an Immersion, bergen jedoch auch ein hohes Risiko hinsichtlich Simulatorkrankheit. Zudem ist die Sicht auf die eigenen Hände eingeschränkt, was die Bedienung erschwert und das Eye-Tracking System zur Zustandserfassung ist nicht mit einem solchen System kompatibel. Deshalb stellt die Projektion auf die realen Scheibenflächen der Kabine die geeignetste Lösung dar. Dabei wird die Projektion gezielt auf die Bereiche begrenzt, die auch in der realen Maschine sichtbar sind und Bewegungen der Versuchspersonen im Simulator haben keinen Einfluss auf die Sichtgeometrie. Für die Projektion auf die Scheiben und Türen ist auf diesen ein projektionsfähiges Medium appliziert. Aufgrund der nicht planaren Geometrie von Frontscheibe und Türen muss ein Bildwarping stattfinden, das diese geometrischen Effekte korrigiert, sodass die Anzeigen

nicht verzerrt sind. Zusätzlich wird der Sichtbereich um die in den Spiegelsystemen sichtbaren Bereiche erweitert.

Wie in Kapitel 3.2 dargestellt ist eine Auflösung von 2-3 arcmin/px ausreichend. 3 arcmin/px entsprechen aufgrund der Kabinengeometrie bei 60°vertikalem FOV einer Auflösung von 1200 px. Aus diesem Grund werden Projektoren mit einer WUXGA Auflösung und 4k Upscaling ausgewählt, die diese 1200 px als natürliche Auflösung besitzen, durch das Upscaling Details aber besser darstellen können. Damit reicht ein Projektor pro Scheibe, bzw. Türe, wodurch es keine überlappenden Projektionsflächen gibt und kein Edge Blending benötigt wird.

Die visuelle Umgebung wird durch das Computerspiel „Landwirtschafts-Simulator 22“ des Entwicklers „Giant Software“ bereitgestellt. Im Simulationsspiel können verschiedene detailreiche Umgebungen, Maschinen, Feldfrüchte, Bodenbeschaffenheiten, Vegetationen und Tagesbedingungen dargestellt werden. Durch die Möglichkeit, eigene Modifikationen zu implementieren, können reale Felder in die virtuelle Welt implementiert werden. Eigene Fahrzeuge können ebenfalls erstellt und deren Maschinenzustände ausgelesen und verändert werden. Das virtuelle Fahrzeug wird so verändert, dass alle real im Simulator vorhandenen oder nicht benötigten Elemente im virtuellen Fahrzeug entfernt und damit nicht dargestellt werden, um Doppelungen in den Anzeigen zu vermeiden.

Die Interaktion mit weiteren Fahrzeugen, insbesondere Abfahrern soll möglichst authentisch modelliert sein, um realistische Arbeitsabläufe und potenzielle Konfliktsituationen zu simulieren. Der „Landwirtschafts-Simulator 22“ verfügt dabei über eigene computergesteuerte Helfer, die einfache Situationen und Aufgaben bewältigen können. Für komplexe Situationen kann der Wizard-of-Oz-Ansatz verwendet werden, indem weitere Fahrzeuge von der Versuchsleitung gesteuert werden.

Die wichtigsten Punkte in der Umsetzung sind zusammen mit den Zielwerten der Anforderungen in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Umsetzung der visuellen Anforderungen

Anforderung	Zielwert	Umsetzung
Horizontales FOV	Min. 180°	180°
Vertikales FOV	Min. 60°	60°
Bildwiederholrate	30 Hz	30 Hz
Systemlatenz	Max. 50 ms	20 – 50 ms
Auflösung	Max. 3 arcmin/px	3 arcmin/px plus Upscaling
Texturen	Realistische Darstellung der Umgebung vor allem im Nahbereich	„Landwirtschafts-Simulator 22“ mit eigenen Modifikationen als Simulationsumgebung

I/O-Module

Das Konzept zur Gestaltung der Eingabemodule des OFA orientiert sich am bestehenden Bedienkonzept aktueller Mähdrescher. Trotz eines zunehmenden Automatisierungslevels bleibt die manuelle Bedienbarkeit zentraler Funktionen unerlässlich. Die Beibehaltung vertrauter Elemente und Steuerlogiken unterstützt dabei die intuitive Nutzung. So erfolgt die Steuerung der Schneidwerksfunktionen, wie auch die Geschwindigkeitsvorgabe über den bestehenden Multifunktionsjoystick. Das in aktuellen Maschinen vorhandene Lenkrad wird durch eine Joysticklenkung ersetzt, die sich besser in das ergonomischen Bedienkonzept integriert und auch heute schon auf ersten Maschinen im Einsatz ist. Die Bedienung der Dreschsysteme und weiterer Maschinenfunktionen erfolgt über ein Touchdisplay und einen Dreh-Drück-Geber auf der rechten Seite, integriert in 3D-gedruckte Armlehnen.

Neben dem klassischen Fahrmodus bietet das Konzept des OFA zusätzlich einen Büro- und einen Entspannungsmodus. Für eine nahtlose Integration dieser Modi in das Konzept ist der Sitz elektrisch linear verstellbar und drehbar. In beiden Modi kann über ein zusätzliches Trackpad und Tastatur mit den jeweiligen Nebenaufgaben interagiert werden. Die Interaktion mit weiteren Nebenaufgaben und die Bedienung des Assistenzsystems sowie weiterer Komfortfunktionen können über ein Touchdisplay an der linken Armlehne oder den Dreh-Drück-Geber erfolgen.

Darüber hinaus wird eine Sprachsteuerung als ergänzendes Eingabemedium implementiert, um die Interaktion mit dem Assistenzsystem zu erleichtern. Die Sprachsteuerung ermöglicht eine freihändige Bedienung und reduziert die Beanspruchung in komplexen Fahrsituationen. Insbesondere in hoch automatisierten Szenarien erlaubt die Sprachsteuerung eine natürliche und kontextbezogene Kommunikation mit dem Assistenzsystem.

Die visuelle Ausgabe maschinenbezogener Parameter und Zustände des OFA erfolgt über ein eigens programmiertes Interface. Dafür stehen sowohl simulierte Head-Up-Displays in Form von Anzeigebereichen auf den Projektionsflächen, als auch reale Displays zur Verfügung. Die Projektionsflächen und die Displays sind dafür insgesamt in 34 Anzeigebereiche unterteilt. Head-Up-Displays werden für Anzeigen priorisiert, um die Sicht auf die relevanten Arbeitsbereiche am Schneidwerk nicht einzuschränken. Lediglich an Stellen, an denen Displays keine Einschränkung der Sicht nach draußen darstellen, kommen diese zum Einsatz. Maschineninformationen und Anzeigen des Lenksystems werden in die A-Säulen gelegt, ebenso wie Rückmeldungen von der Zustandserfassung. Im Dachhimmel sind Displays als Spiegelsatzsystem für eine Rundumsicht um die Maschine eingesetzt.

Wichtige Maschinenparameter sind im Head-Up-Display großflächig auf der Frontscheibe eingeblendet, wo keine relevanten Bereiche während des Betriebs verdeckt werden. Ebenfalls als Head-Up-Display ist die visuelle Ausgabe der Nebentätigkeiten ausgeführt. Diese können großflächig, je nach Modus, auf Frontscheibe oder Türe projiziert werden. Diese unterschiedlichen Anzeigebereiche sind in der Position und Größe flexibel parametrierbar und können bei Bedarf zu- oder abgeschaltet werden.

Neben der visuellen Ausgabe vervollständigt ein integriertes Soundsystem das Outputsystem. Es liefert auditive Ausgaben in Form von Umgebungs- und Maschinengeräuschen, Warnmeldungen und akustische Hinweise durch das OFA.

Tabelle 12: Umsetzung der Anforderungen an das I/O-System

Anforderung	Zielwert	Umsetzung
Kabinenabbildung	Möglichst realitätsnah	Reale Kabine
Maschinenbedienung	Zugriff auf alle relevanten Fahr- und Arbeitsfunktionen	Multifunktionsjoystick und Touchdisplays
OFA	Zugriff auf alle relevanten Funktionen des OFA	Touchdisplay, Sprachsteuerung
Kabinenmodi	Fahr-, Büro- und Entspannungsmodus	Elektrisch drehbarer Sitz
Maschine	System und Fahrzeuganzeigen	Virtuelle Head-Up Displays
OFA	Anzeigen für Handlungsempfehlungen und Funktionen des OFA	Virtuelle Head-Up und reale Displays
Maschine	Maschinenakustik	Soundsystem
OFA	Sprachausgabe des OFA integrieren	Akustische Hinweise und Warnmeldungen
Bewegungsplattform	Optional	Nicht umgesetzt

Parametersimulation

Es müssen Modellannahmen getroffen werden, die das zu simulierende System des Mähdreschers hinreichend gut abbilden und relevante Studien- und Maschinenparameter bereitstellen. Die Simulation ist dabei in die drei Hauptblöcke Input, Parametersimulation und Output unterteilt.

Im Inputblock werden alle relevanten Parameter eingelesen. Dazu zählen CAN-Bus Signale von den Interaktionen des Fahrers mit den haptischen Bedienelementen, sowie sämtliche Positions- und Maschinendaten, die aus dem „Landwirtschafts-Simulator 22“ ausgelesen werden. Auch die Daten des User Interface und Inputdaten vom Assistenzsystem werden hier eingelesen.

Im Block der Parametersimulation erfolgt zunächst die Modellierung von GPS-Daten, die für das Lenksystem und die Anbindung zum Farmmanagementsystem essenziell sind. Zusätzlich zum Maschinenmodell, das im

„Landwirtschafts-Simulator 22“ vorhanden ist, wird eine Simulation für die nicht vorhandenen Parameter in Simulink aufgesetzt. Diese nicht im „Landwirtschafts-Simulator 22“ vorhandenen Parameter betreffen die internen Dreschsysteme, die daraus resultierenden Verluste und verschiedene Schneidwerksparameter. Sie werden durch eine vereinfachte Maschinensimulation bereitgestellt. Die Verstellung der einzelnen Dreschsysteme und die daraus resultierende Maschinenauslastung werden simuliert sowie die Verluste auf Basis des Gutstroms und der Drescheinstellungen. Ein weiterer Block in der Parametersimulation ist die Generierung von Triggern und Parametern für die unterschiedlichen Szenarien. Diese Trigger aktivieren jeweils die einzelnen Phasen und Handlungsempfehlungen der in Kapitel 5 aufgeführten Studien und überprüfen die Fahrspur und einzuhaltende Maschinenparameter.

Im Output Block werden alle Parameter wieder ausgegeben. Die Positionsdaten werden an das Lenksystem AgOpenGPS geschickt und imitierte Tastendrucke werden als CAN-Bus Signale gesendet. Über verschiedene WebSockets werden die Maschinenparameter sowohl an das Interface, als auch an das Assistenzsystem geschickt. Die Trigger und Parameter, die für die Szenarien generiert werden, werden ebenfalls an das Interface und das Assistenzsystem geschickt und lösen die gewünschten Aktionen aus.

Zustandserfassungssystem

Das Herzstück des Zustandserfassungssystems bildet ein Eye-Tracking System als minimal invasive Methode zur Beanspruchungsschätzung. Für eine lückenlose Abdeckung des großen Sichtbereichs im Simulator von 180° kommen vier Kameras zum Einsatz. Eine konstante Ausleuchtung und zuverlässige Bildaufnahme werden durch mehrere Infrarotscheinwerfer im für das menschliche Auge nicht sichtbaren Bereich gewährleistet. Da die Kameras nur wenig Flexibilität bei der Positionierung haben, werden diese über ein modulares Befestigungskonzept mit Magneten angebracht um die bestmöglichen Ergebnisse zu liefern. Die Verarbeitung der Eye-Tracking Daten erfolgt auf einem separaten Rechner. Live-Daten wie Blickrichtung, Blinzelrate und Erfassungsqualität können in Echtzeit auf einem Bildschirm

hinter dem Simulator vom Versuchsleiter eingesehen und Störungen somit früh erkannt werden.

Ergänzend zum Eye-Tracking System wird ein Fitnesstracker zur Aufnahme der Herzrate eingesetzt, der via Bluetooth mit dem Simulatorrechner verbunden ist. Die Daten werden via WebSockets an den Auswertungsrechner der Zustandserfassung gesendet. Aus allen eingehenden Daten wird dann über ein Machine Learning Modell die Beanspruchung der Person abgeschätzt und der geschätzte Beanspruchungsbereich wird an das Assistenzsystem übergeben [E1].

Kommunikation

Die Kommunikation zwischen den einzelnen Teilsystemen erfolgt primär über WebSockets für die softwarebasierte und über CAN-Bus für die hardwareorientierte Kommunikation.

Über WebSockets sind die Parametersimulation, der „Landwirtschafts-Simulator 22“, die Zustandserfassung, sowie Interface und Assistenzsystem angebunden. Es werden Maschinen- und Umgebungsdaten ausgetauscht, genauso wie szenariobasierte Variablen, Trigger und Handlungsempfehlungen sowie Beanspruchungsdaten. Userinputs durch die Touchdisplays oder über die Head-Up-Displays werden ebenfalls via WebSockets kommuniziert.

Parallel findet die Kommunikation mit hardwarenahen Komponenten über CAN-Bus statt. Angebunden sind der Simulationsrechner, ein I/O-Board mit Mikrocontroller, das Lenksystem und die Armlehnen als Einheit. Insbesondere alle haptischen Bedienelemente in den Armlehnen werden über das I/O-Board eingelesen und emulieren Tastendrucke, die dem „Landwirtschafts-Simulator 22“ als Eingaben dienen. Auch das Lenksystem und der Simulationsrechner sind Teil des Netzwerkes, da sie bestimmte Tastendrucke einlesen oder Nachrichten auf den CAN-Bus schicken.

Die Umsetzung der zentralen Anforderungen an die Anbindung des Assistenzsystems und die Kommunikation sind in Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 13: Umsetzung der Anforderungen an die Anbindung des Assistenzsystems

Anforderung	Zielsetzung	Umsetzung
OFA-Integration	Vollständige HMI-Integration	Vollständige HMI-Integration
Beanspruchungsmessung	Zustandserfassung als separates Modul	Modulare Zustandserfassung
Simulator und OFA	Austausch von Maschinendaten und Daten des OFA	Datenaustausch via WebSocket
Interface	Dynamische Anpassung des Interfaces durch das OFA	Dynamische Bspie-lung unterschiedlicher Anzeigen
Priorisierung	Priorisierung im HMI ermöglichen	Priorisierung durch OFA
Echtzeit-kommunikation	Stabile und verzögerungsarme Kommunikation	Echtzeitfähige Kommunikation
Fallback Lösungen	Trigger für Versuchs-leitung	Manueller Eingriff für Versuchsleitung möglich

4.2 Gesamtaufbau Simulator

Der entwickelte Simulator, zu sehen in Abbildung 4, basiert auf einer realen Mähdrescherkabine, in die sämtliche, in Kapitel 4.1 beschriebenen, Teilsysteme integriert sind. Durch den Einsatz einer leicht modifizierten Originalkabine wird eine authentische Arbeitsumgebung geschaffen, die sowohl ergonomische, als auch funktionale Eigenschaften einer realen Maschine widerspiegelt. Die drei Projektoren, die die visuelle Umgebung und Teile des HMI auf die Scheiben projizieren, stehen jeweils senkrecht vor der zugehörigen Scheibe.



Abbildung 4: Innenansicht des Simulators

Die Innenverkleidung wurde auf das neue System angepasst und als Modellbau realisiert. Als Fahrersitz wurde ein komfortabler Sitz ausgewählt, der elektronisch linear verstellbar und drehbar ist. Zur Gewährleistung der Sicherheit im Versuchsbetrieb verfügt die Kabine einen Notaus Schalter, der die Projektionen und die Steuerung des Simulators unmittelbar deaktiviert. Für die Versuchsleitung steht hinter der Kabine ein Arbeitsplatz zur Verfügung, sodass die Versuche überwacht und bei Bedarf direkt eingegriffen werden kann.

Das zentrale Hardware Backbone ist in einem Schaltschrank untergebracht, der sich hinter der Kabine befindet und in Abbildung 5 zu sehen ist. Dieser beherbergt die Rechner für die Simulationsumgebung, das OFA und die Anzeigeeinheiten. Darüber hinaus sind Netzteile, Controller für Bussysteme, Projektionsflächen und die Elektromotoren, das E/A-Board zur Anbindung der Bedienelemente, ein Audioverstärker, sowie zusätzliche Netzwerkkomponenten integriert. Links oben auf dem Schaltschrank ist ein zusätzlicher Rechner für die Zustandserfassung platziert mit Echtzeitausgabe verschiedener Eye-Tracking-Parameter für die Versuchsleitung.



Abbildung 5: Schaltschrank und Arbeitsplatz des Versuchsleiters

Für den Einsatz auf Messen ist die Transportabilität des Simulators ein wichtiges Kriterium. Die Eingangsschnittstellen beschränken sich auf zwei 3,6 kW Stromanschlüsse und einen Netzwerkanschluss. Der Anschluss der Projektoren, die als einziges Teilsystem außerhalb der Kabine stehen, erfolgt über den Simulator mit Strom-, HDMI- und Netzkabeln. Die Zustandserfassung wurde nicht für den Transport optimiert, da auf den Messen lediglich kurze, geskriptete Szenarien zum Einsatz kommen. Dieses System wird dann komplett demontiert.

4.3 Grenzen des Simulators

Der entwickelte Aufbau besitzt eine hohe funktionale Abdeckung, die die Validierung des OFA in relevanten Arbeitsprozessen berücksichtigt und die Untersuchung der Akzeptanz ermöglicht. Die folgenden Absätze erläutern Grenzen des Simulators, die sich aus der Visualisierung, der Modelltreue, spezifischen Einsatzsituationen und der Interaktion mit weiteren Maschinen, sowie hardware- und softwareseitigen Anpassungsmöglichkeiten ergeben. Dabei wird jeweils dargestellt, inwieweit diese Grenzen die Validierung und Akzeptanzbewertung beeinflussen und warum sie als akzeptabel einzustufen sind.

Schnelle Fahrt/ Straßenfahrt

Ein wesentlicher Aspekt hinsichtlich der Einsatzgrenzen des entstandenen Simulators betrifft Szenarien mit höheren Fahrgeschwindigkeiten, also während Überführungsfahrten auf Straßen. Die Qualität der visuellen Darstellung wird durch die begrenzte Bildwiederholfrequenz von 30 Hz maßgeblich beeinträchtigt und führt zu einem verminderten Bewegungsfluss, was die Wiedergabetreue des Simulators limitiert. Für die Validierung des betrachteten Fahrassistenzsystems stellt dies jedoch keine Einschränkung dar. Das OFA ist explizit für den Feldeinsatz ausgelegt. Geschwindigkeitsbedingte Limitierungen des Simulators sind für die Bewertung von Funktionalität und Akzeptanz von untergeordneter Bedeutung.

Reale Verluste

Eine weitere Limitierung betrifft die Abbildung der Ernteverluste innerhalb des Simulators, die auf Basis eines vereinfachten Maschinenmodells simuliert werden, das die Tendenzen des Dreschprozesses grundsätzlich widerspiegelt. Da die Verluste in realen Maschinen von einer Vielzahl dynamischer Einflussgrößen abhängen, kann das Simulationsmodell nur eingeschränkt parametrisiert werden. Für den vorliegenden Anwendungsfall ist diese Einschränkung jedoch unkritisch. Die betrachtete Maschine ist so konzipiert, dass sie die wesentlichen Dreschparameter weitestgehend automatisiert anpassen kann, was funktional einem hohen Automatisierungsgrad

entspricht und sich mit Klassifikationen wie SAE-Level 3 [116] für die Fahr- und Arbeitsaufgabe vergleichen lässt. Die simulierten Einstellungen müssen also nicht den optimalen Einstellungen bei den jeweiligen Erntebedingungen entsprechen. Die generierten Verluste können jederzeit gezielt beeinflusst und in ihrer Größenordnung konsistent gehalten werden.

Darüber hinaus ist der Simulator nicht für Schulungszwecke oder die exakte Nachbildung realer Prozesssteuerungsstrategien ausgelegt, sondern soll primär für die Validierung eines OFA sowie die Untersuchung der Nutzerakzeptanz eines solchen Systems unter Einbezug maschinenfremder Aufgaben eingesetzt werden. Für diesen Zweck können relevante Maschinenzustände, Verlustniveaus und Interaktionen kontrolliert abgebildet werden ohne eine vollständige physikalische Abbildung des Dreschprozesses.

Spezifische Feldsituationen

Spezifische Feldsituationen, wie beispielsweise Lagergetreide, können im Simulator derzeit nicht realitätsgetreu nachgebildet werden, da diese Funktion in der Software „Landwirtschafts-Simulator 22“ nicht dargestellt ist. In der Praxis ist eine solche Situation eine besondere Herausforderung in der möglichst verlust- und schadensfreien Bedienung des Schneidwerks. Für die Validierung des OFA stellt diese Einschränkung jedoch keine wesentliche Beeinträchtigung dar. Beim hohen Automatisierungsgrad der betrachteten Maschine spielt die manuelle Prozessführung eine untergeordnete Rolle, solange solche Situationen zuverlässig durch die Maschine detektiert werden. Es ist vor allem die Reproduzierbarkeit relevanter Beanspruchungslevel der Versuchsperson entscheidend. Der Simulator ermöglicht es durch parallele maschinenbezogene und maschinenfremde Aufgaben, die Person gezielt in hoch beanspruchte Phasen zu versetzen ohne solch spezifische Feldsituationen als Ursache.

Weitere Maschinen in der Simulation

Die Interaktion mit weiteren Maschinen innerhalb der Simulationsumgebung ist ein zusätzlicher Aspekt. Der verwendete „Landwirtschafts-Simulator 22“ stellt sogenannte „Helfer“-Funktionen bereit, die es ermöglichen, bestimmte

Maschinen und Arbeitsvorgänge durch die Software auszuführen. Diese Funktionen sind dabei aber nur rudimentär ausgeprägt und orientieren sich an einfachen, vordefinierten Arbeitsabläufen. Für komplexere logistische Prozesse, insbesondere dem Abfahren des Mähdreschers und weitere Teile der Feldlogistik, gib es Erweiterungen, die von der Nutzercommunity erstellt wurden. Diese Erweiterung der Funktionalität ist allerdings auch begrenzt, sodass es in der Praxis regelmäßig zu Funktionsstörungen oder ineffizienten Fahrmanövern kommen kann. Für die Durchführung der Validierungs- und Akzeptanzstudien ist diese Einschränkung jedoch gering, da die Möglichkeit besteht, kritische Maschinen und Prozesse durch die Versuchsleitung manuell zu steuern. Bei 13 zusätzlich möglichen menschlichen Akteuren in der aktuellen Ausführung ist ausreichend Kapazität für menschliche Operatoren.

Umbau des Simulators auf eine andere Maschine

Die Möglichkeit, den bestehenden Simulator auf weitere landwirtschaftliche Maschinen zu adaptieren, ist grundsätzlich gegeben, jedoch mit einem gewissen Anpassungsaufwand verbunden. Die physische Kabinenstruktur entspricht aktuell der eines Mähdreschers. Da verschiedene Maschinenklassen, wie beispielsweise Feldhäcksler, eine gleiche Standardkabine nutzen, ist eine Übertragung vergleichsweise unkompliziert. Die Umstellung auf eine andere Maschine innerhalb des „Landwirtschafts-Simulator 22“ ist ebenfalls problemlos realisierbar. Aufwendiger ist die Adaption auf Maschinen, deren Kabinenlayout sich signifikant von dem eines Mähdreschers unterscheidet, wie beispielsweise Traktoren. Während Mähdrescher primär einen front- und seitengerichteten Sichtbereich benötigen, erfordert der Betrieb eines Traktors häufig die Überwachung von gezogenen oder im Heckbereich angebauten Geräten. Die vorhandenen Visualisierungsflächen, einschließlich des relativ kleinen Korntankfensters, sind für diese Anforderungen nicht ausgelegt und erfordern eine Erweiterung der Rückraumdarstellung.

Neben einer neuen Maschinensimulation müsste auch im Bereich der Bedienelemente eine Anpassung vorgenommen werden. Die derzeit eingesetzten 3D-gedruckten Armlehnen wurden speziell für den Mähdrescher entwickelt, sind jedoch über standardisierte Schnittstellen angebunden, sodass ein Austausch und eine Re-Konfiguration mit vergleichsweise geringem Aufwand

möglich wären. Das Interface, das auf einer modularen, webbasierten Bedienoberfläche beruht, unterstützt eine flexible Anpassung und die einfache Integration neuer Elemente.

Personalisierung der Anzeigen

Der modulare Aufbau des Interfaces ermöglicht eine hohe Flexibilität bei der Gestaltung und Anordnung maschinen- und aufgabenspezifischer Informationsdarstellungen. Aktuell können Anpassungen jedoch nur durch die Versuchsleitung vorgenommen werden. Zwar wäre es technisch möglich, diese Konfigurationsoptionen auch für Versuchspersonen zugänglich zu machen, ein solcher Fokus auf die Nutzerpersonalisierung ist jedoch nicht Gegenstand der Systemkonzeption. Eine selbstständige Anpassung der HMI-Struktur würde zudem umfassende Kenntnisse der Maschinenparameter und Systemfunktionen voraussetzen. In Anbetracht der relativ kurzen Zeit der Versuchspersonen auf dem Simulator wurde bewusst darauf verzichtet, eine Nutzerpersonalisierung zu implementieren. Eine ausreichende Flexibilität ermöglicht die Anpassung der Elemente durch die Versuchsleitung zwischen den Studien auf Basis von Rückmeldungen, während die Versuchspersonen eine standardisierte, konsistente HMI-Konfiguration vorfinden, die die Vergleichbarkeit der Ergebnisse unterstützt.

5 Validierungsprozess

Die technischen Voraussetzungen für die Validität des Simulators wurden bei der Umsetzung erfüllt. Nun soll gezeigt werden, dass für die Validierung und Akzeptanzbewertung benötigten Szenarien abgebildet werden können und die entsprechende Spannweite im Beanspruchungsniveau der Probanden erreicht werden kann. Zu Beginn wird die Szenarientwicklung vorgestellt. Darauf aufbauend werden die entwickelten Szenarien für die einzelnen Studien sowie ausgewählte Ergebnisse kurz vorgestellt. Zum Schluss des Kapitels folgt dann noch die Vorstellung einer Feldstudie mit dem OFA sowie eine kurze Einordnung der Validierungsergebnisse auf dem Simulator.

5.1 Szenarioentwicklung

Aus den in Kapitel 3.5 erstellten Fahrscenarien und Handlungsempfehlungen sollen strukturierte, simulatortaugliche Ablaufmodelle aufgebaut werden. Spezifische Szenarien für die Validierung und Akzeptanzbewertung werden modular aus den einzelnen Fahrscenarien und Handlungsempfehlungen zusammengesetzt. Zur Gewährleistung einer klaren Struktur und Übersichtlichkeit, erfolgt eine Darstellung auf unterschiedlichen Detaillierungsgraden. Die detaillierteste Ebene umfasst die einzelnen Handlungsempfehlungen und Fahrscenarien. Auf der mittleren Ebene werden die verschiedenen Trigger dargestellt und die Handlungsempfehlungen, die beim Wechsel in einen Modus als Vorauswahl zur Verfügung stehen. Die oberste Ebene zeigt den generellen Ablauf und wo und in welcher Anzahl verschiedene Trigger zum Einsatz kommen.

In Abbildung 6 ist exemplarisch für die detaillierteste Ebene der schematische Ablauf der Handlungsempfehlung „Verstellung der Dreschsysteme“ dargestellt. Diese kann durch den Fahrer jederzeit aktiv aufgerufen werden oder passiv durch einen externen Trigger gestartet werden, wie aufgrund

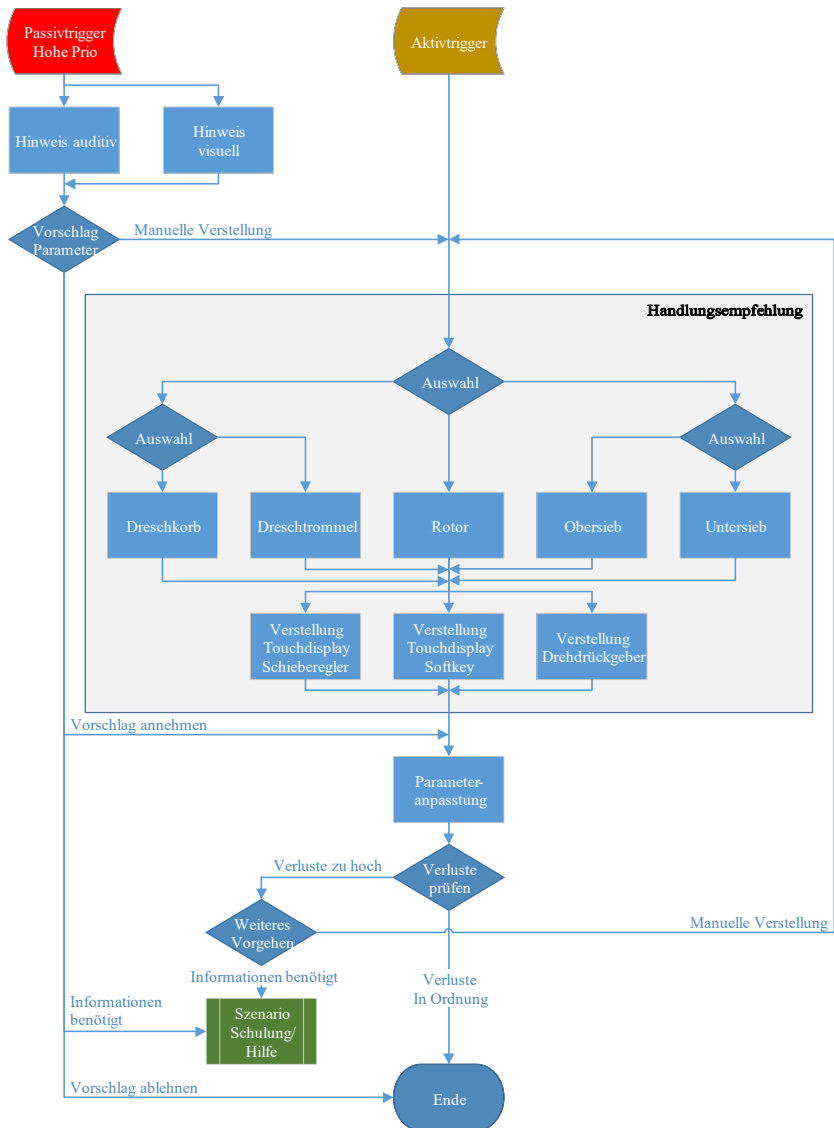


Abbildung 6: Ablaufplan für die Handlungsempfehlung "Verstellung der Dreschsysteme"

erhöhter Verluste oder einer wetterbedingten Anpassung der Dreschstrategie. Im Falle eines Passivtriggers erhält der Fahrer sowohl einen auditiven als auch einen visuellen Hinweis über den Auslöser, sowie einen Vorschlag für eine sinnvolle Anpassung der Dreschparameter. Diese Empfehlung kann er akzeptieren, dann werden die vorgeschlagenen Werte direkt an die Maschinensimulation übermittelt, oder alternativ eine manuelle Parameterveränderung vornehmen. Die Handlungsempfehlung kann auch abgelehnt werden, was die Handlungsempfehlung direkt beendet. Bei weitergehendem Informationsbedarf, kann direkt die neue Handlungsempfehlung „Schulung/Hilfe“ aufgerufen werden, die kontextbezogen das Fahrertraining an der entsprechenden Stelle öffnet.

Eine manuelle Verstellung der Dreschsysteme erfolgt durch die gezielte Auswahl der zu verändernden Systemkomponente im User-Interface, gefolgt von der Anpassung mittels verschiedener Verstellmöglichkeiten. Der neue definierte Soll-Wert wird anschließend an die Maschinensimulation übermittelt, wodurch die Dreschsysteme verstellt werden und die neuen Werte für Dreschsysteme, Maschinenzustand und Verluste generiert und an das UI zurückgespielt werden. Diese veränderten Verluste müssen dann durch den Fahrer geprüft werden. Sind die Werte außerhalb des Zielbereichs, muss eine weitere Verstellung erfolgen oder es kann bei Informationsbedarf die Handlungsempfehlung „Schulung/Hilfe“ gestartet werden. Entsprechen die Werte den Vorgaben, kann der Fahrer die Handlungsempfehlung beenden.

Aus dem Katalog aller in Kapitel 3.5.3 definierten Handlungsempfehlungen und Fahrscenarien einschließlich der individuellen Trigger kann eine Vielzahl an möglichen Szenarien generiert werden. Diese unterschiedlichen Triggermechanismen werden auf einer mittleren Detaillierungsebene dargestellt. Aktive Trigger ermöglichen dem Fahrer die unmittelbare Auswahl und Ausführung von Handlungsempfehlungen (HE), passive Trigger hingegen lösen diese direkt aus. Diese passiven Trigger haben unterschiedliche Priorisierungen. Abbildung 7 zeigt am Beispiel den Ablauf bei Auslösung eines Passivtriggers mit hoher Priorität.

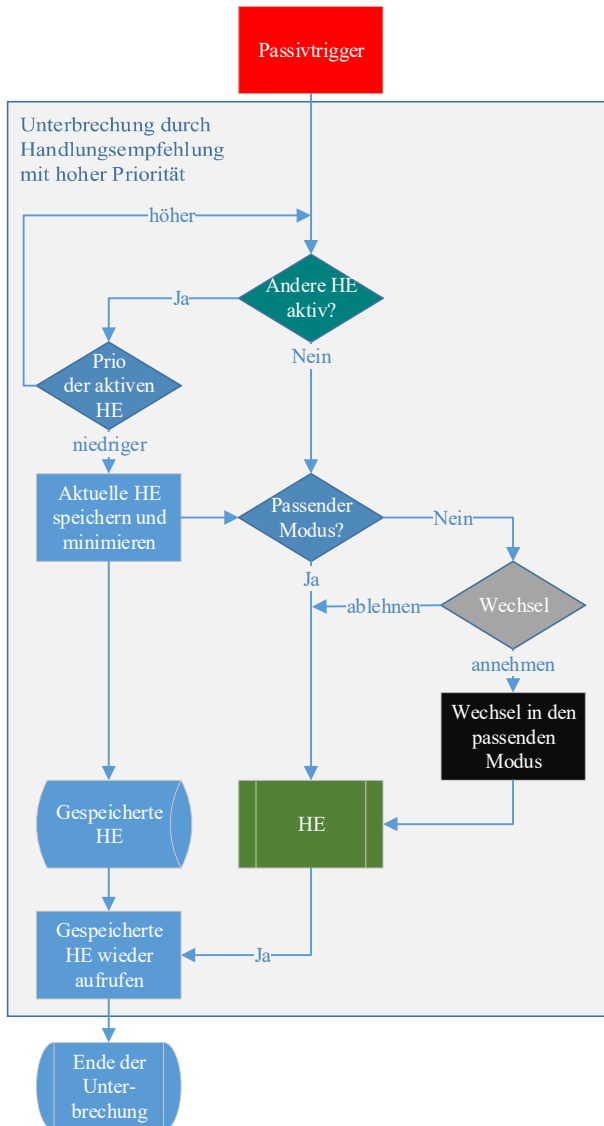


Abbildung 7: Passivtrigger mit hoher Priorität

Nach der Auslösung des Triggers für die entsprechende Handlungsempfehlung, beispielsweise erhöhte Dreschverluste, erfolgt eine Prüfung, ob aktuell eine andere Handlungsempfehlung aktiv ist. Ist dies der Fall, erfolgt eine Überprüfung, welche Priorität diese aktive Handlungsempfehlung hat und ob sie unterbrochen werden kann. Eine unterbrochene Handlungsempfehlung wird dann in den Speicher gelegt und kann später erneut aufgerufen werden. Bei Annahme der neuen Handlungsempfehlung erfolgt ein Abgleich zwischen dem aktuellen und empfohlenen Modus. Bei einer Abweichung wird die Empfehlung zum Wechsel in den empfohlenen Modus ausgegeben. Anschließend wird die Handlungsempfehlung an sich bearbeitet, deren Ablauf wieder auf der detailliertesten Ebene liegt. Wird die Handlungsempfehlung beendet, kann die vorher bearbeitete und gespeicherte Handlungsempfehlung wieder aufgenommen werden und die Unterbrechung ist beendet. Bei einer Unterbrechung durch eine Handlungsempfehlung mit mittlerer Priorität, beispielsweise durch das Eintreffen einer E-Mail, erfolgt zusätzlich noch der Abgleich mit dem Nutzerzustand. Das Ablaufschema eines solchen Triggers mit mittlerer Priorität ist im Anhang A2 zu finden.

Auf derselben Detaillierungsebene werden auch die Handlungsempfehlungen definiert, die standardmäßig beim Wechsel in einen bestimmten Modus vorgeschlagen und direkt aktiv gestartet werden können. Abbildung 8 zeigt als Beispiel den Zugriff auf die Handlungsempfehlungen „Wetter“, „Nachrichten“ und „Farmmanagement“, da diese für den Büromodus der Produktakzeptanzstudie von besonderer Relevanz sind. Der Zugriff auf alle anderen Handlungsempfehlungen erfolgt über die strukturierte Menüführung. Die Auswahl der vorgeschlagenen Handlungsempfehlungen kann je nach Studie und Nutzerprofil individuell angepasst werden.

Aus der Kombination aller verfügbaren Handlungsempfehlungen, Triggermechanismen und Betriebsmodi lassen sich vielfältige Szenarien für Studien oder Workshops aufbauen. Abbildung 9 zeigt den Ablauf der Produktakzeptanzstudie, auf die in Kapitel 5.2.2 genauer eingegangen wird.

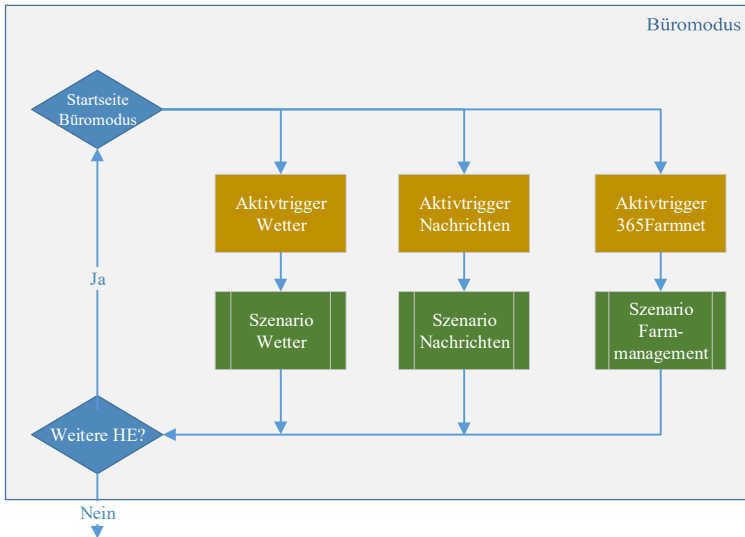


Abbildung 8: Startseite Büromodus

Für ein reproduzierbares Szenario werden sowohl Positions-, als auch Korn-tankdaten als Triggerpunkte für Handlungsempfehlungen und für die Empfehlungen basierend auf der Zustandserfassung genutzt, die in diesem Szenario nicht aktiv ist. In der ersten Phase, in der sich die Versuchspersonen im Fahrmodus befinden, erfolgen regelmäßige Unterbrechungen durch das Assistenzsystem. Handlungsempfehlungen mittlerer Priorität umfassen beispielsweise die Begrüßung, die Empfehlung das Automatisierungslevel zu erhöhen und einen eingehenden Videoanruf. Unterbrechungen mit hoher Priorität betreffen den Dreschprozess oder die Interaktion mit anderen Fahrzeugen. Haben sich die Versuchspersonen mit der Maschinensteuerung vertraut gemacht und das Automatisierungslevel der Maschine erlebt, folgen offenere Studienabschnitte im Büro- und Entspannungsmodus. Im Büromodus sind spezifische betriebsbezogene Aufgaben zu erledigen, während im Entspannungsmodus eine freie Auswahl an Aktivitäten möglich ist.

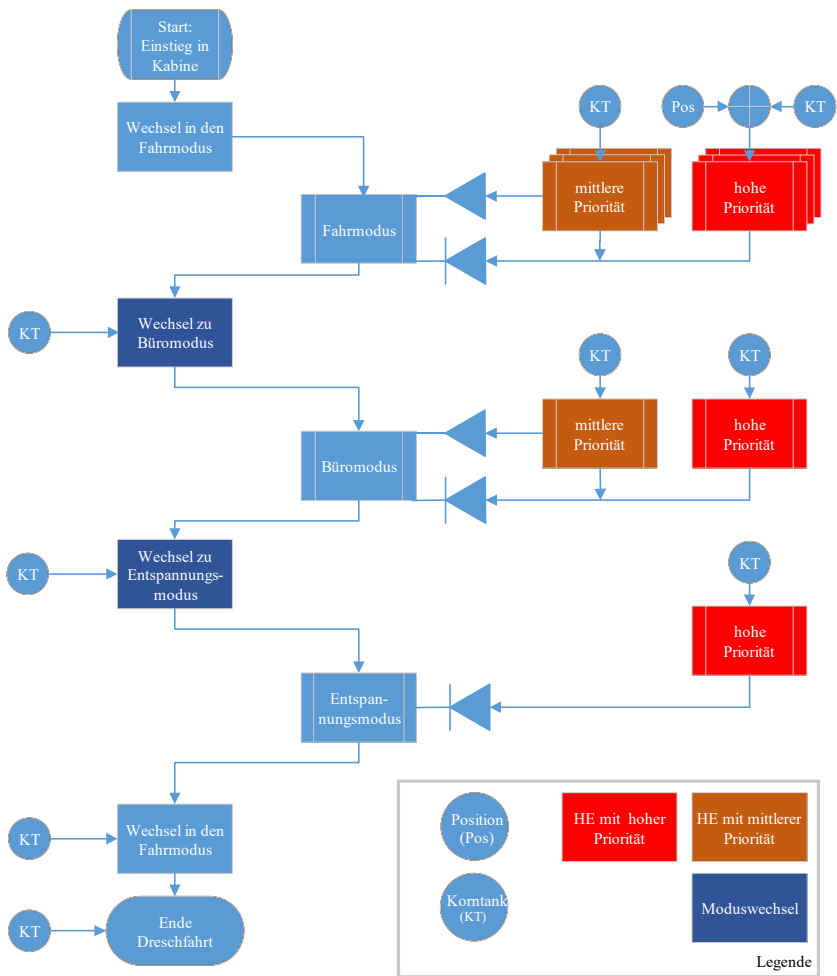


Abbildung 9: Top Level Ablauf der Produktakzeptanzstudie

5.2 Studienszenarien

Die einzelnen Komponenten und das Gesamtsystem können durch verschiedene Studien validiert, ebenso wie die Akzeptanz überprüft werden. Es folgen in diesem Abschnitt die für die Studien entwickelten Szenarien, sowie das Vorgehen vor und nach den Abläufen im Simulator.

Nach [85] benötigen sowohl jüngere, als auch ältere Personen etwa 240 Sekunden, um sich an einen Fahrsimulator zu gewöhnen, nachdem das Fahrscenario gestartet war. Deshalb fand vor jeder Validierungsstudie eine 300-sekündige Übungsfahrt mit unterschiedlichen, für die jeweilige Studie relevanten Handlungsempfehlungen statt, bei der die Versuchspersonen auch jederzeit Fragen an die Versuchsleitung stellen konnten. Dies gewährleistete, dass die Versuchspersonen sich ausreichend an Simulator, System und Bedienung gewöhnen konnten.

5.2.1 Szenarien für die Validierungsstudien

Im Validierungsprozess wird das OFA beginnend bei den Komponenten bis hin zum Gesamtsystem stufenweise validiert. Als zentrale Komponenten werden hierbei zuerst die Zustandserfassung und die gezielte Beeinflussung durch ein Assistenzsystem validiert, bevor das Gesamtsystem in einer Gesamtsystemstudie validiert und dessen Akzeptanz bewertet wird. Zu Beginn wird eine Experimentalaufgabe entwickelt, um die unterschiedlichen Beanspruchungslevel bei den Versuchspersonen einzustellen. Die mit der Zustandserfassung aufgenommenen Daten dieser Studie konnten anschließend für die Validierung des Zustandserfassungssystems genutzt werden.

Entwicklung der Experimentalaufgabe und Validierung der Zustandserfassung

Ziel der Studie war die Entwicklung und Validierung einer Experimentalaufgabe zur Induktion verschiedener Level an psychischer Beanspruchung im Simulator. Im Rahmen einer Studienreihe wurden zunächst geeignete Experimentalaufgaben konzipiert, die innerhalb des Simulators die unterschiedli-

chen mentalen Beanspruchungslevel gezielt hervorrufen können. Die Umgebung im Simulator weist eine deutlich höhere Immersion im Vergleich zum Labor auf, was eine differenzierte Anpassung der Beanspruchung ermöglicht. Ebenfalls musste auf andere, im Simulator umgesetzte Handlungsempfehlungen als Experimentalaufgabe zurückgegriffen werden, um die mentale Beanspruchung systematisch zu induzieren.

Das zweite Ziel der Studie war es, mithilfe der erhobenen Daten die Übertragbarkeit des im Labor validierten Modells zur Beanspruchungsschätzung [119] auf komplexeren, realitätsnäheren Bedingungen zu prüfen. Damit soll die Grundlage für eine robuste, generalisierbare Vorhersage mentaler Beanspruchung geschaffen werden.

Der Ablauf der etwa 45-minütigen Erntefahrt ist in Abbildung 10 dargestellt und umfasst insgesamt 2 Szenarien für die Übung und 17 Szenarien für die Hauptstudie. Jedes dieser Szenarien dauert zwei Minuten um sicherzustellen, dass sich das gewünschte Beanspruchungslevel stabil einstellen konnte, gefolgt von einer RSME-Abfrage.

Im Rahmen der Studie führten die Versuchspersonen Fahraufgaben unter variierenden Beanspruchungsbedingungen durch. Die Fahrzeugführung erfolgte dabei manuell (manuelle Fahrt, MF) oder autonom (Autonome Fahrt, AF). In den manuellen Fahrabsechnitten mussten die Versuchspersonen einem vorgegebenen Kurs entlang einer kurvenreichen Bestandskante folgen. Abweichungen von bis zu einem Meter wurden toleriert, bei größeren Abweichungen wurde durch das Assistenzsystem eine Warnung ausgegeben. Neben den reinen Fahrszenarien umfasste ein Großteil der Szenarien zusätzliche Handlungsempfehlungen in Form von Parameteranpassungen der Dreschsysteme (Dreschsysteme verstellen, DS), die aktiv umgesetzt werden mussten. Die Anpassungen erfolgten über unterschiedlich lange Pausen zwischen den Handlungsempfehlungen, die im Versuchsdesign systematisch variiert wurden, wobei die Pausendauer nach einer erfolgreich bearbeiteten Handlungsempfehlung abhängig vom Szenario auf einen der vier festen Werte von 10, 5, 2 oder 0 Sekunden festgelegt wurde.

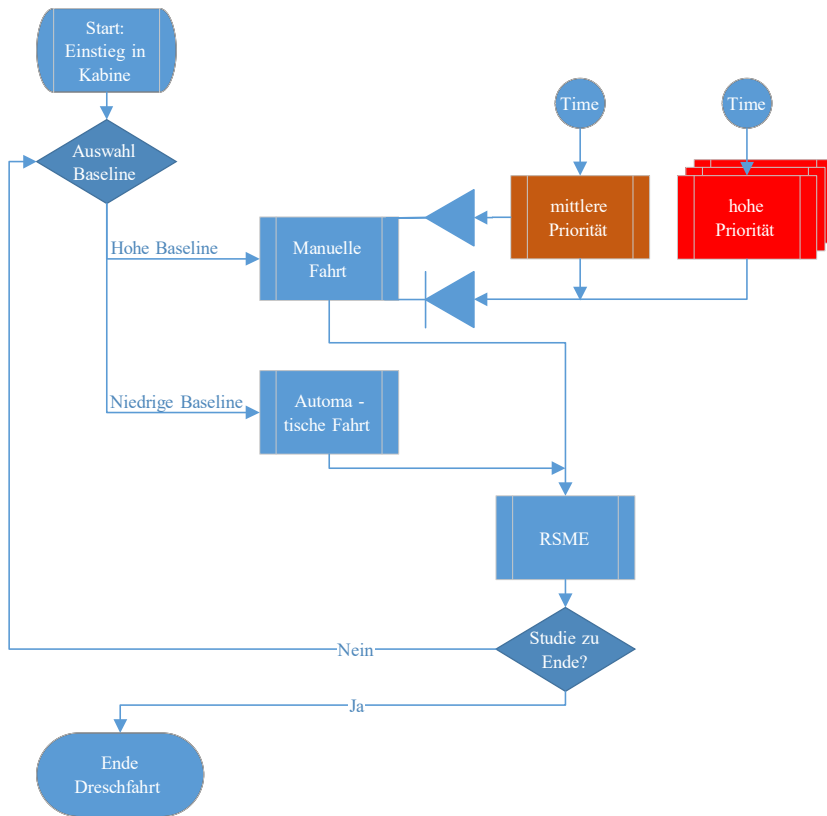


Abbildung 10: Ablauf der Experimentalaufgabe

Für eine zusätzliche Erhöhung der mentalen Beanspruchung wurde eine zweite Nebenaufgabe in Form eines Minispiels mit Rechenaufgaben in eine eigene Kategorie integriert (Dreschsysteme verstellen + Minispiel, DSMS), das in Szenarien hoher mentaler Beanspruchung parallel zur Fahraufgabe und der Verstellung der Dreschsysteme erledigt werden musste. Die Priorisierung lag dabei zuerst auf der Fahraufgabe, dann der Parameteranpassung der Dreschsysteme, gefolgt vom Erledigen des Minispiels. Die zeitliche Abfolge der einzelnen Szenarien ist in Abbildung 11 abgebildet.

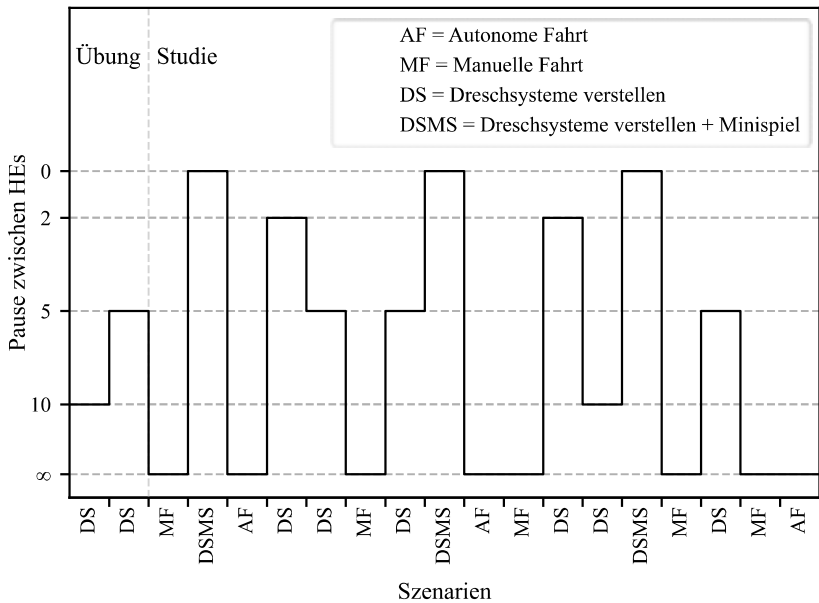


Abbildung 11: Reihenfolge der Szenarien für die Experimentalaufgabe

Studie zur gezielten Beeinflussung

Ziel der Studie war die Untersuchung, ob ein Assistenzsystem durch das Einspielen von Handlungsempfehlungen die kognitive Beanspruchung von Versuchspersonen gezielt beeinflussen kann. Hierfür wurden im Simulator umgesetzte Handlungsempfehlungen ausgewählt, die verschiedene Kategorien, wie beispielsweise Bürotätigkeiten oder Entertainment, abdeckten und sowohl eine Erhöhung, als auch eine Verminderung der Beanspruchung hervorrufen sollten. Die eingebrachten Handlungsempfehlungen aus unterschiedlichen Kategorien sprachen dabei unterschiedliche Ebenen der Informationsverarbeitung bei den Versuchspersonen an. Im Rahmen eines Versuchsdesigns mit Zufallszuteilung mehrerer Kontrollgruppen wurde

analysiert, welche konkreten Handlungsempfehlungen sich bei verschiedenen Baselines in welcher Intensität auf die Beanspruchung auswirken.

Die Versuchspersonen wurden zufallsbasiert in zwei Gruppen eingeteilt, die sich hinsichtlich der Handlungsempfehlungen unterschieden, wobei in beiden Gruppen alle Kategorien vertreten waren. Dadurch sollte untersucht werden, inwiefern sich die Art der Aufgabe auf die Beanspruchung auswirkt. Nach einer Übungsphase, bei der alle Einstellmöglichkeiten der Dreschparameter sowie die Bedienung von Handlungsempfehlungen anhand der Bedienung einer Nachrichtenseite getestet wurden, startete die Studie mit dem in Abbildung 12 dargestellten Ablauf, der für beide Gruppen identisch war. Nach dem Einstellen der Baseline erfolgte eine RSME-Abfrage zur subjektiven Beanspruchung, gefolgt von einer Handlungsempfehlung und einer weiteren RSME-Abfrage.

Für die unterschiedlichen Ausgangsniveaus der Beanspruchung wurden zwei Baselines implementiert. Die niedrige Baseline bestand aus einer autonomen Fahrt ohne zusätzliche Aufgaben. Die hohe Baseline umfasste manuelles Abfahren eines festgelegten Kurses im Feld bei gleichzeitigem Verstellen von Maschinenparametern mit jeweils zweisekündiger Pause nach korrekter Einstellung sowie parallel auszuführende Rechenaufgaben. Ob zuerst der Block mit niedriger oder mit hoher Baseline angefahren wurde, war dabei zufallsbasiert.

Für die Handlungsempfehlungen stand die in Tabelle 14 dargestellte Auswahl zur Verfügung, aus der je nach Gruppe alle Handlungsempfehlungen sowohl aus der niedrigen, als auch aus der hohen Baseline heraus eingesetzt wurden. Dabei war die Reihenfolge der Handlungsempfehlungen zufallsgeneriert. Gab es für eine Handlungsempfehlung mehrere Varianten, wie beispielsweise mehrere Übungen in der Kategorie Entspannung, wurde zufällig eine dieser Varianten ausgewählt. Zusätzlich wurde eine Kontrollbedingung implementiert, bei der im Anschluss an eine hohe Baseline nochmals die hohe Baseline als Handlungsempfehlung umgesetzt war. Jeweils vor und nach der Handlungsempfehlung wurde die subjektive Beanspruchung über eine RSME-Abfrage erfasst. Insgesamt dauerte die Studie etwa eine Stunde.

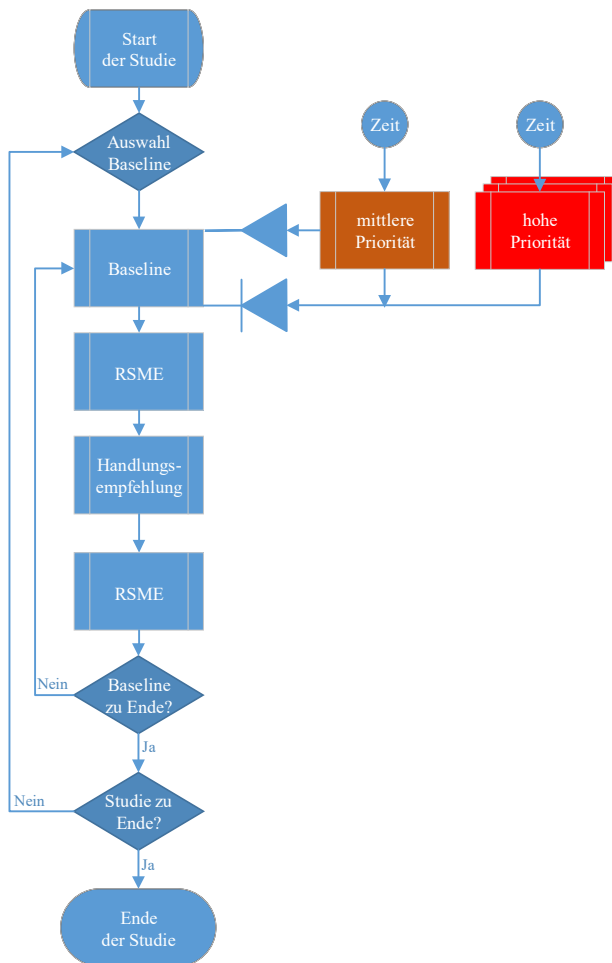


Abbildung 12: Ablauf der Studie zur gezielten Beeinflussung durch das Assistenzsystem

Tabelle 14: Pool an Handlungsempfehlungen

Gruppe	Anzahl Varianten	Handlungsempfehlung	Kategorie	Art der Aufgabe
1	1	Autonome Fahrt	Dreschen	Passiv
	3	Wikipedia Artikel lesen	Infotainment	Aktiv
	2	Entspannungsübung	Entspannung	Aktiv
	3	Minispiel	Entertainment	Aktiv
	3	Wetterabfrage:	Büro	Aktiv
2	1	Autonome Fahrt	Dreschen	Passiv
	3	Audiobeitrag anhören	Infotainment	Passiv
	2	Atemübung	Entspannung	Aktiv
	3	Lustiges Video ansehen	Entertainment	Passiv
	3	Soziale Medien	Büro	Aktiv

Studie zum Gesamtsystem

Im Anschluss an die vorangegangenen Studien wurde eine umfassende Validierung des Gesamtsystems vorgenommen, die insbesondere die Interaktion zwischen Versuchspersonen, Zustandserfassung und Handlungsempfehlungen untersuchte. Das Ziel bestand darin, die Beanspruchungslevel von Versuchspersonen aus verschiedenen Baselines heraus auf ein ideales Niveau zu optimieren. Dabei sollte die Zuverlässigkeit der Zustandserfassung bewertet werden sowie die daraus abgeleitete Reaktion des Assistenzsystems und deren Auswirkung auf die Versuchspersonen. Die Auswahl und Frequenz der Handlungsempfehlungen wurde untersucht, um eine ausgewogene und bedarfsgerechte Unterstützung durch das OFA sicherzustellen. Aufgrund der zu erwartenden Ungenauigkeit in der Zustandserfassung musste zusätzlich die Möglichkeit der Aufnahme des subjektiven Beanspruchungslevels über RSME möglich sein.

Die Validierung diente der Beurteilung der Funktionalität des Gesamtsystems unter realitätsnahen Bedingungen. Dabei wurde untersucht, ob die Zustandserfassung ausreichend präzise arbeitet und in welchem Maß die vorgeschlagenen Handlungsempfehlungen zur gezielten Beeinflussung der kognitiven Beanspruchung beitragen. Es wurde ebenfalls analysiert, ob und in welchem

Umfang das Beanspruchungsniveau auf Basis der Zustandserfassung gezielt optimiert werden kann.

Nach einer Übung, um alle Einstellmöglichkeiten der Dreschparameter und die Bedienung einer Nachrichtenseite als Beispiel zu testen, startete die Studie mit dem in Abbildung 13 schematisch dargestellten Ablauf. Zunächst erfolgte das Einfahren einer Baseline (niedrig, mittel, hoch) als das durch das Assistenzsystem zu manipulierende Ausgangsniveau der Beanspruchung. Die Reihenfolge der Baselines wurde dabei randomisiert zugeordnet um systematische Reihenfolgeeffekte zu vermeiden.

Direkt im Anschluss an das Einfahren der Baseline, was durch die Experimentalaufgabe realisiert wurde, erfolgte die Beanspruchungsschätzung mittels RSME und durch die Zustandserfassung. Auf dessen Grundlage wurden anschließend Handlungsempfehlungen generiert und ausgegeben mit dem Ziel, die Beanspruchung zu optimieren und in den mittleren Bereich zu verschieben. Diese Handlungsempfehlungen konnten das bestehende Szenario modifizieren, indem weitere Aufgaben gegeben oder bestehende Aufgaben beendet wurden. Nach dem Ende der Handlungsempfehlung erfolgte eine weitere Schätzung der Beanspruchung, um die Veränderung zu erfassen. Wurde die Beanspruchung nicht in den optimalen Bereich eingestuft, erfolgte eine zweite Modifikation des Szenarios durch eine Handlungsempfehlung und im Anschluss wieder die Schätzung der Beanspruchung. Wenn nach der ersten Handlungsempfehlung die Beanspruchung optimal war, oder die Beanspruchungsschätzung nach der zweiten Handlungsempfehlung erfolgte, startete eine neue Baseline.

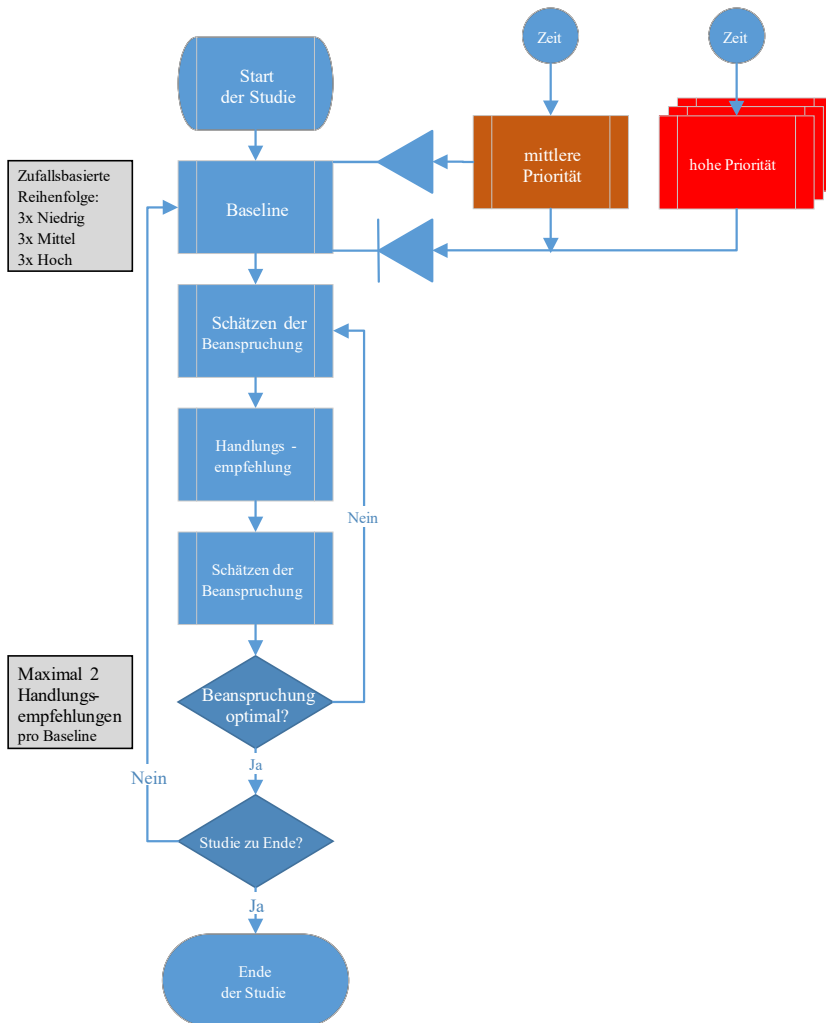


Abbildung 13: Ablauf der Studie zum Gesamtsystem

5.2.2 Szenarien für die Akzeptanzbewertung

Neben der Validierung technischer Funktionen ist auch die Erfassung von wahrgenommener Relevanz, Verständlichkeit und Akzeptanz in relevanten Anwendungsszenarien essenziell für ein Assistenzsystem. Zusätzlich sollte das System nicht allein nur bewertet werden, vielmehr sollten relevante Nutzergruppen durch gezielte Informationsvermittlung frühzeitig aktiv in die nutzerzentrierte Entwicklung des OFA einbezogen werden. Hierfür werden spezielle Ablaufszenarien erstellt, die thematisch alle Schwerpunkte des Systems einführen und abdecken.

Quantitative Studien auf Messen

Ziel der Befragungen auf Messen war es, Rückmeldungen zum Assistenzsystem aus einer breiten Zielgruppe zu erhalten. Mittels Durchführung von Erhebungen auf verschiedenen Fachmessen konnte eine große Anzahl an Personen aus den potenziellen Anwendungsgebieten erreicht werden. Der Fokus lag dabei hauptsächlich auf der quantitativen Erfassung von Einschätzungen und Bewertungen, da im Messeszenario aufgrund des begrenzten Zeitrahmens und der hohen Besucherfrequenz keine vertiefenden qualitativen Interviews möglich waren.

Um unterschiedliche Aspekte des Systems gezielt zu beleuchten, wurde der inhaltliche Schwerpunkt der Befragungen auf die jeweiligen Messen und den aktuellen Entwicklungsstand angepasst. Auf den DLG-Feldtagen der Deutschen Landwirtschafts-Gesellschaft (DLG) im Juni 2022 lag der Schwerpunkt auf der Bewertung der grundlegenden Idee des Assistenzsystems, sowie der Wahrnehmung seiner Chancen und Risiken. Es sollte also ein erstes Meinungsbild zur Akzeptanz und zur Relevanz des Konzepts innerhalb der Fachöffentlichkeit gewonnen werden. Im Rahmen der Deutschen Lohnunternehmertage (DeLuTa) im Dezember 2022, auf der fast ausschließlich Lohnunternehmer vor Ort waren, standen die praktische Umsetzung, verschiedene Systemkomponenten und die Bedienbarkeit im Fokus. Auf der Agritechnica im November 2023 sollte schließlich das Gesamtsystem mit umgesetzten Verbesserungen aus den Rückmeldungen der vorherigen Messeerhebungen sowie der Produktakzeptanzstudie bewertet werden.

Im ersten Schritt der Erhebungen wurden die Versuchspersonen eingehend über die Hintergründe der Entwicklung, die technische Umsetzung und den aktuellen Stand des Assistenzsystems informiert. Anschließend nahmen die Versuchspersonen in der Demonstratorkabine Platz, wo sie von der Versuchsleitung mit der Bedienung der Kabine vertraut gemacht wurden. Während einer anschließenden, etwa achtminütigen Erntefahrt, deren Ablauf in Abbildung 14 zu sehen ist, wurden die Teilnehmer durch die verschiedenen Aspekte und Funktionen der Kabine geleitet.

Nach dem Einstieg in den Simulator, startete die Projektion und die Maschine stand auf dem Vorgewende. Das Szenario startete mit einer Begrüßung durch das Assistenzsystem, der nächste Schritt legte den Fokus auf das Vertraut machen mit der Steuerung des Dreschers, indem manuell gelenkt, Dreschsysteme verstellt und die verschiedenen Anzeigen genutzt wurden.

Bei einem Korntankfüllstand von 20 %, wurde eine simulierte Unterforderung erreicht und die Möglichkeiten des Büromodus samt einigen Beispielen aus dem Bereich betrieblicher Tätigkeiten erklärt. Bei einem Korntankfüllstand von 35 % traf eine E-Mail ein, die die Versuchsperson zu einem kurzen Feedback aufforderte. Diese E-Mail konnte entweder bearbeitet oder ignoriert werden und unterbrach die aktuelle Handlungsempfehlung nicht. Dadurch wurde die Möglichkeit der Priorisierung und Unterbrechung verschiedener Handlungsempfehlungen eingeführt. Aufgrund erhöhter Dreschverluste, die beim Erreichen von 55 % Korntankfüllstand getriggert wurden, wurde die Maschine und das Dreschergebnis als oberste Priorität in den Handlungsempfehlungen dargestellt. Diese Handlungsempfehlung konnte nicht ignoriert werden.

Ab einem Korntankfüllstand von 65 % waren alle kritischen Situationen überwunden und es waren keine Eingriffe in den Dreschprozess mehr nötig. Aufgrund der Vergangenheit mit geskripteter hoher Belastung wechselte die Versuchsperson in den Entspannungsmodus und bekam durch die Versuchsleitung die Möglichkeiten dieses Modus erklärt und konnte als Beispiele lockernde und entspannende Übungen machen, soziale Medien bedienen oder eine private ToDo-Liste erstellen.

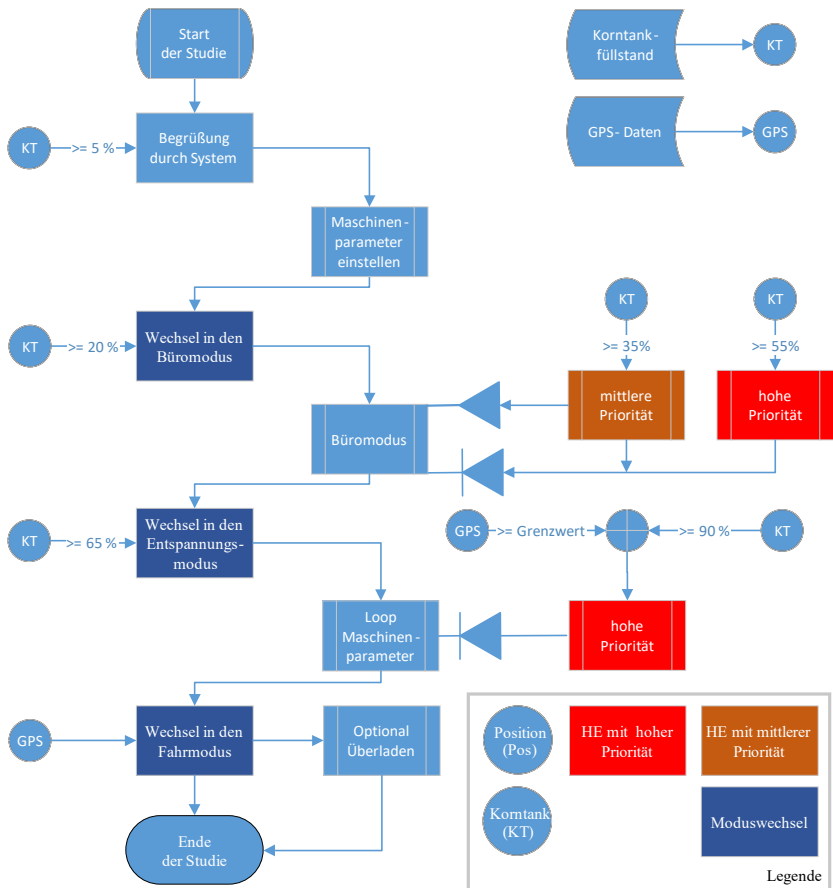


Abbildung 14: Ablauf des Messeszenarios

Kurz vor dem Ende der Bahn musste die Versuchsperson zurück in die Fahrposition wechseln, um ein mögliches Wendemanöver zu überwachen. Beim Ausfahren aus der Bahn erfolgte eine Verabschiedung durch das Assistenzsystem und damit das Ende des Szenarios.

Nach Abschluss der Dreschfahrt wurden die Versuchspersonen gebeten, einen Fragebogen auszufüllen. Der auszufüllende Fragebogen variierte je nach Messe und dem zu evaluierenden Ziel. Die Gesamtdauer der Studie belief sich auf ca. 15 Minuten

Qualitative Studie zur Produktakzeptanz

Die Entwicklung des OFA erfolgte auf Basis umfassender Anforderungsanalysen und unter Einbezug von Personen aus der Landwirtschaft und -technik. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurde die erste vollumfängliche und voll funktionsfähige Version dieses Assistenzsystems im Simulator implementiert und im Rahmen einer Produktakzeptanzstudie evaluiert.

Ziel dieser Evaluation war es, die Akzeptanz des Systems durch die potenzielle zukünftige Zielgruppe in einer realitätsnahen Simulationsumgebung zu untersuchen. Dabei stand die Einschätzung zentraler Aspekte der Akzeptanz, wie Gebrauchstauglichkeit, Verständlichkeit und Nützlichkeit des Systems im Vordergrund. Die Durchführung der Studie im Simulator ermöglichte ein kontrolliertes und praxisnahes Testumfeld zur systematischen Erfassung der Nutzerreaktionen.

Die Ergebnisse dienten dabei einerseits der Identifikation von Optimierungspotenzialen im bestehenden Systemkonzept und der Anpassung einzelner Bedienfunktionen, andererseits trugen sie dazu bei, frühzeitig Akzeptanzbarrieren zu erkennen. Ziel der Studie war es deshalb, Akzeptanz eines solchen Systems nicht allein zu messen, sondern mittels transparenter Information über die Systemfunktionen und den Einbezug relevanter Zielgruppen aktiv zu fördern.

Im ersten Schritt der Studie fand das Vertraut machen mit der Bedienung des Simulators und des Assistenzsystems. Während einer anschließenden, etwa 35-minütigen Erntefahrt wurden die Versuchspersonen durch die verschiedenen Aspekte und Funktionen der Kabine geleitet. Der Ablauf der Studie ist in Abbildung 15 dargestellt. Er stellt verschiedene Phasen und Situationen dar, die während eines Erntetages auftreten. Die Versuchsleitung leitete diese Handlungsempfehlungen jeweils ein, um den Rahmen klar zu definieren. Es

wurden wiederkehrende Abläufe integriert, wie das Heranfahren eines Abfahrsers, das Erscheinen von Hindernissen auf dem Feld oder Personen auf dem Vorgewende, genauso wie monotone Phasen des Dreschens unter guten Bedingungen. Diese Konstellation führt sowohl zu Phasen mit hoher, als auch mit niedriger Beanspruchung, die dann durch das OFA mit Handlungsempfehlungen beeinflusst wurde.

So konnte in Phasen mit hoher Beanspruchung der Automatisierungsgrad erhöht werden, sodass sich die Versuchspersonen auf priorisierte Aufgaben fokussierten, in Phasen niedriger Beanspruchung wurden maschinenfremde Aufgaben erledigt. Diese kamen im Rahmen der Studie sowohl aus dem betrieblichen, als auch aus dem privaten Aufgabenpool. Betriebliche Handlungsempfehlungen umfassten Schlagdokumentation oder Planung des nächsten Schlages oder des nächsten Erntetages in Abhängigkeit des Wetters. Der private Aufgabenpool umfasste hingegen Anrufe, Soziale Medien und verschiedene Übungen zur Entspannung und Lockerung. Ausreichende Zeitanteile für alle wichtigen Phasen ermöglichten es, sämtliche Aspekte des OFA im Kontext einer realistischen Arbeitsumgebung vollständig zu erproben.

Nach Abschluss der Demonstrationsfahrt wurden die Versuchspersonen gebeten, in einem Interview mit der Versuchsleitung die Kabine anhand verschiedener Komponenten des HMI und des Assistenzsystems zu bewerten. Die zu bewertenden Komponenten umfassten das Head-up-Display, die Displays in den A-Säulen, die Touchdisplays rechts und links, die Sitzdrehung, den Büromodus, den Entspannungsmodus, die Ausgabe durch die virtuelle Assistentin, die Joysticklenkung sowie das Gesamtkonzept der Kabine. Nach jeder Bewertung wurden die Versuchspersonen dazu aufgefordert, ihre Gründe für die Bewertung anzugeben. Zusätzlich wurden sie gefragt, welche Komponenten ihnen besonders gut gefallen haben und welche unbedingt in der finalen Version umgesetzt werden sollten sowie wo und welches Verbesserungspotenzial gesehen wurde.

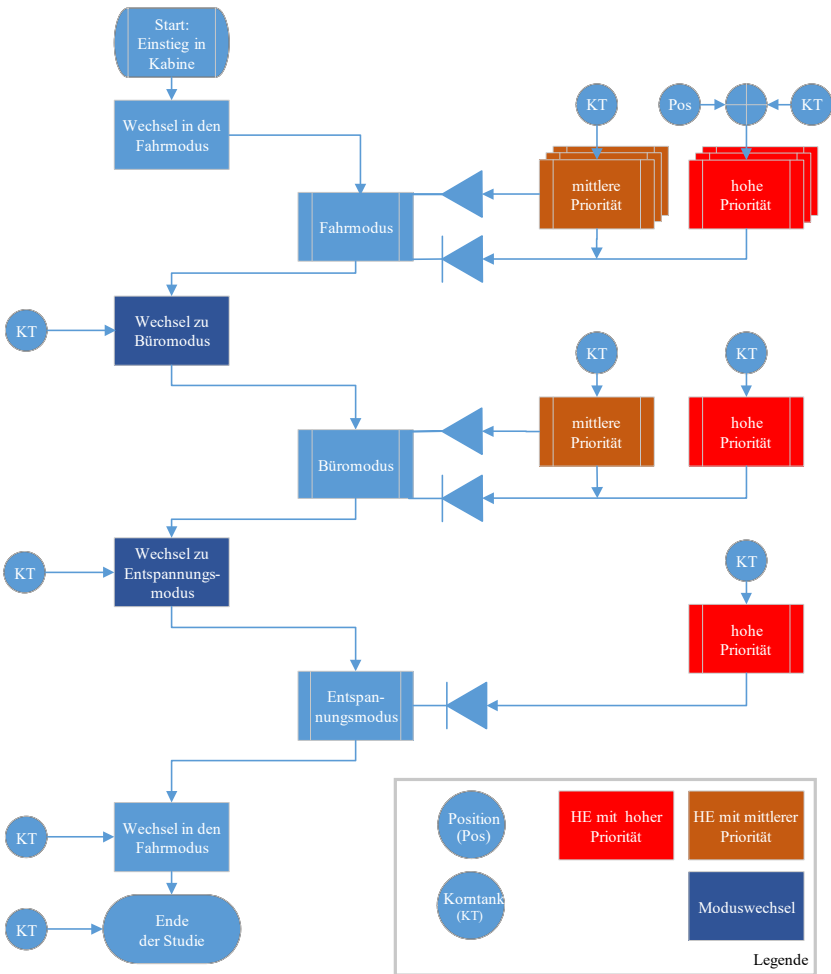


Abbildung 15: Ablauf der Produktakzeptanzstudie

Nach dem Interview vervollständigten die Versuchspersonen die deutsche Version des User Experience Questionnaires [92] und den Technikaffinitätsfragebogen TA-EG [102]. Die Studie wurde abgeschlossen mit dem Ausfüll-

len eines demografischen Fragebogens. Die Gesamtdauer der Studie belief sich auf etwas über eine Stunde.

5.3 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden kurz die Ergebnisse der Studien vorgestellt, die zur Validierung des OFA durchgeführt wurden. Zuerst wird die Validierung der Experimentalaufgabe für die Erstellung der einzelnen Baselines und die darauffolgende Studie zur Validierung der Zustandserfassung im Simulator vorgestellt. Im Anschluss wird kurz auf die Ergebnisse der Studie zur gezielten Beeinflussung durch das OFA sowie die erfolgte Validierung des Gesamtsystems. Dabei wird nur oberflächlich auf die Studien und zentrale Ergebnisse eingegangen, um zu zeigen, dass die Validierung auf dem Simulator realisierbar war. Eine detaillierte Analyse der Ergebnisse, vor allem zu den Studien zur gezielten Beeinflussung und zum Gesamtsystem, sind in der Dissertation von Steffen Metzger [120] zu finden.

Ethische Erklärung

Die nachfolgenden Validierungsstudien sowie die Produktakzeptanzstudie wurden durch die Ethikkommission des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) genehmigt. Vor jeder Studie wurde jeder Versuchsperson ein Dokument mit allen relevanten Daten zum Zweck der Studie, zu den Maßnahmen zum Schutz der Daten und zu einer Kontaktperson für den Fall von Fragen ausgehändigt. Die Versuchspersonen hatten dann die Möglichkeit, das Dokument vor dem Beginn der Studie mit der Versuchsleitung zu besprechen und gaben anschließend ihre schriftliche Einwilligung. Die Versuchspersonen wurden auch darüber informiert, dass sie jederzeit während oder nach der Studie zurücktreten konnten. Keine Versuchsperson entschied sich dafür, die Teilnahme zurückzuziehen.

5.3.1 Validierung der Experimentalaufgabe

Für die Durchführung der Validierungsstudien werden die unterschiedlichen Beanspruchungslevel niedrige, mittlere und hohe Beanspruchung benötigt, die im Rahmen einer Experimentalaufgabe zuverlässig eingestellt werden sollen. An dieser Studie zur Entwicklung der Experimentalaufgabe nahmen insgesamt 40 Personen teil. Der Altersdurchschnitt betrug 25,8 Jahre bei einer Standardabweichung (SD) von 3,7 Jahren. Dabei waren 31 Versuchspersonen männlich, 9 Versuchspersonen weiblich. Die Stichprobe setzte sich zusammen aus Studierenden und Angestellten des KIT.

Abbildung 16 zeigt die Verteilung der RSME-Werte für die eingestellten Beanspruchungsniveaus für die für den Simulator entwickelte Experimentalaufgabe. Da die Stichprobengröße ausreichend groß ist, kann nach der zentralen Grenzwertannahme eine Normalverteilung der Daten angenommen werden [121]. Damit sind alle Voraussetzungen für eine Varianzanalyse mit Messwiederholung grundsätzlich erfüllt.

Als nächstes muss die Sphärizitätsannahme geprüft werden. Diese besagt, dass die Varianzen der Differenzen zwischen den Messwiederholungen gleich sind. Der Mauchly-Test auf Sphärizität war dabei hoch signifikant und die Sphärizitätsannahme damit verletzt. Es muss also die Greenhouse-Geisser-Korrektur herangezogen werden ($\epsilon = 0,281$).

Unter Anwendung dieser Korrektur ergab die Varianzanalyse mit Messwiederholung einen hoch signifikanten Unterschied zwischen den Szenarien ($F(5,05, 197,97) = 106,56$; $p < 0.001$). Die Effektstärke beträgt $\eta^2p = 0,737$, die Szenarien erklären die Varianz in den RSME-Werten also mit einem sehr starken Effekt [122]. Die standardisierte Effektstärke nach Cohen liegt mit $f = 1,67 \geq 0,4$ weit über dem Schwellenwert für einen großen Effekt [122], es gibt also signifikante Unterschiede in der RSME zwischen den Szenarien. Die Ergebnisse eines Bonferroni-korrigierten post-hoc Tests zeigen, die Einteilung der Szenarien für die Beanspruchung in niedrige, mittlere und hohe Beanspruchung ist plausibel. Im Simulator können also mit den integrierten Handlungsempfehlungen und der entwickelten Experimentalaufgabe

die benötigten Beanspruchungslevel als Baselines zuverlässig eingestellt werden.

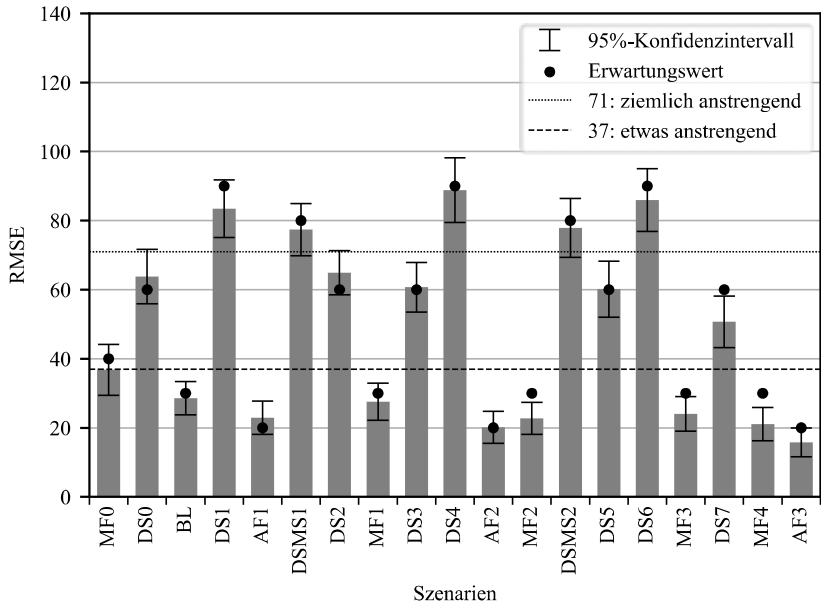


Abbildung 16: Ergebnisse der RSME-Werte für die Hauptstudie, (n = 40)

5.3.2 Ergebnisse der Validierung

Es werden kurz ausgewählte Ergebnisse der Validierungsstudien zur Zustandserfassung, zur Beeinflussung durch das Assistenzsystem und dem Gesamtsystem vorgestellt.

Zustandserfassung

Für die objektive Beanspruchungsschätzung durch die Zustandserfassung wurde, wie in der Laborstudie, eine Multiclass Support Vector Machine eingesetzt. Die Datengrundlage bildeten dabei die Daten des Eye-Tracking-Systems und des Fitnesstrackers. Als Referenzmaß diente die

subjektive Beanspruchungseinschätzung der Versuchspersonen mittels RSME. Im Labor erreichte das Modell eine Vorhersagegenauigkeit von 61 % bei drei Beanspruchungszuständen. Die Spannweite der Genauigkeit betrug 38 % und deutet auf eine hohe individuelle Varianz hin. Werden ausschließlich die vorher im Labor erhobenen Daten zum Training herangezogen, so sinkt die mittlere Vorhersagegenauigkeit für die Beanspruchung im Simulator auf 51 %. Die deutliche Zunahme der Spannweite bei gleichzeitiger Abnahme der Genauigkeit zeigt, dass ein unter Laborbedingungen trainiertes Netz nur eingeschränkt auf die komplexen und dynamischeren Simulationsbedingungen übertragbar ist. [E1]

Da ein anderes Fitnessarmband als in der Laborstudie verwendet wurde und der Eye-Tracking-Aufbau aus vier Kameras anstatt aus zwei, wie im Labor, bestand, wurde das Modell mit Daten aus der Studie neu trainiert. Die Vorhersagegenauigkeit stieg dadurch auf 63 % bei drei Beanspruchungszuständen. Damit konnte die Genauigkeit deutlich gesteigert und die Ergebnisse aus dem Labor im Simulator reproduziert werden. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass eine prädiktive Schätzung der Beanspruchung auf Basis von Eye-Tracking und Fitnesstracker möglich ist und deutlich oberhalb des Zufallsniveaus von 33 % bei drei Zuständen liegt. [E1]

Gezielte Beeinflussung

Insgesamt zeigte sich, dass die kognitive Beanspruchung durch das Einbringen von Handlungsempfehlungen durch ein Assistenzsystem gezielt beeinflusst werden kann. Während bei niedriger Ausgangsbeanspruchung entspannende und passive Tätigkeiten nur zu kleinen Veränderungen führen, ergeben aktive Entertainment- und Bürotätigkeiten eine höhere Differenz der Beanspruchung. Umgekehrtes ist aus der hohen Baseline heraus der Fall, bei der vor allem die passiveren und entspannenden Handlungsempfehlungen zu einer höheren und konsistenteren Reduktion der Beanspruchung führen. Die Wirkung der Handlungsempfehlungen und damit die Auswahl dieser durch ein Assistenzsystem muss also immer die aktuelle Beanspruchung als wichtigen Faktor mit einbeziehen. Auf Basis dieser Studie wurde der vorhandene Pool der Handlungsempfehlungen hinsichtlich der Ebene der Informationsverarbeitung parametrisiert für die zielgerichtete Auswahl. [E1]

Gesamtsystem

Die Ergebnisse zeigen, dass das Gesamtsystem grundsätzlich in der Lage war, die Beanspruchung der Versuchspersonen gezielt zu beeinflussen. In 49 % der Szenarien konnte eine Verschiebung der Beanspruchung in den idealen Bereich erzielt werden. Diese Zahl verdeutlicht jedoch zugleich die Grenzen des aktuellen Systemzustands. [E1]

Ein zentraler Befund ist, dass das System maßgeblich von der Genauigkeit der Zustandserfassung abhängt, da die Handlungsempfehlungen zu einem großen Teil darauf basieren. Besonders der mittlere Beanspruchungsbereich wurde von der Zustandserfassung nur unzureichend erkannt und führte so zu Handlungsempfehlungen, die nicht zielführend waren. Diese Ungenauigkeit der Zustandserfassung erklärt ebenfalls die erhöhte Streuung nach den Handlungsempfehlungen. Anstatt zu einer klaren Nivellierung des Beanspruchungsniveaus zu führen, sorgte die fehlerhafte Klassifikation dafür, dass sich die Beanspruchung teils in entgegengesetzte Richtung entwickelte. [E1]

Für die Weiterentwicklung des Systems sollte die Zustandserfassung gezielt mit weiteren Daten trainiert werden, insbesondere mit Datensätzen unter dem Einfluss aller einbezogenen Handlungsempfehlungen. Darüber hinaus sollten vor allem auch weitere Daten aus dem idealen Beanspruchungsbereich gesammelt werden, da die Erkennung in diesem Beanspruchungsbereich verbessert werden muss. Eine hohe Genauigkeit in diesem Bereich ist aber essenziell um die Klassifikationsgenauigkeit zu erhöhen und die Grundlage für ein präzises und individuelles Assistenzsystem bereitzustellen.

5.3.3 Ergebnisse der Akzeptanzevaluierung

Die Ergebnisse der Quantitativen Studien der verschiedenen Messen und die Ergebnisse der Produktakzeptanz werden nachfolgend dargelegt.

DLG-Feldtage

Auf den DLG-Feldtagen 2022 wurde das Kabinenkonzept bei 44 Rückmeldungen mit einem Mittelwert von 7,8 ($SD = 1,5$) auf einer zehnstufigen Skala überwiegend positiv bewertet. Angestellte beurteilten das Konzept dabei etwas positiver und hoben vor allem die verbesserten Bedien- und Arbeitsbedingungen hervor, während die Betriebsleiter Aspekte der Umsetzbarkeit und Kosten in den Vordergrund stellten. Als zentrale Potenziale wurden Effizienzsteigerungen, Arbeitsentlastung und ein verbessertes Arbeitsumfeld durch höheren Komfort genannt. Gleichzeitig wurden Risiken in möglichen Systemausfällen, einer erhöhten Ablenkung und komplexer Bedienung gesehen. Auch hohe Anschaffungs- und Reparaturkosten wurden kritisch gesehen. Die Visualisierungssysteme wurden dabei sehr positiv beurteilt, Verbesserungsvorschläge bezogen sich in diesem Bereich auf eine Personalisierung der Positionen und Inhalte. Insgesamt wurde das OFA auf den DLG-Feldtagen als zukunftsfähiges und akzeptiertes Konzept eingeschätzt. Die Ergebnisse verdeutlichen jedoch, dass die Akzeptanz neuer Systeme in der Landwirtschaft nicht allein von Leistungsfähigkeit, Ergonomie und Benutzerfreundlichkeit abhängen, sondern maßgeblich auch von einer hohen Systemzuverlässigkeit.

DeLuTa

Im Rahmen der DeLuTa 2022 wurde das System von den 37 Versuchspersonen hinsichtlich seiner technischen Umsetzung und Bedienbarkeit bewertet. Die Ergebnisse zeigen insgesamt eine sehr positive Resonanz, da alle Komponenten deutlich oberhalb des Skalenmittelwerts lagen. Besonders das Gesamtkonzept, sowie zentrale Bedien- und Anzeigeelemente wurden hoch bewertet. Hervorgehoben wurden vor allem die Übersichtlichkeit der Anzeigen und die effiziente Nutzung der verfügbaren Anzeigeflächen ohne Einschränkung wichtiger Sichtbereiche. Die virtuelle Assistentin als zentraler Bestandteil des Interaktionsmodells mit dem OFA wurde grundsätzlich positiv beurteilt, wobei eine hohe Hinweisfrequenz im kompakten Messeszenario teilweise als überfordernd wahrgenommen wurde.

Die Varianz der Einschätzungen ist über alle Komponenten und Funktionen hinweg relativ gering, was darauf hinweist, dass die Bewertungen der Befragten insgesamt konsistent ausfielen und keine stark polarisierenden Meinun-

gen vorlagen. Die Rückmeldungen der Personen auf der DeLuTa spiegeln also eine hohe Akzeptanz und ein insgesamt positives Nutzungsbild des Systems wider. Insbesondere die Bewertung der Bedien- und Darstellungskomponenten zeigt eine gute Verständlichkeit und Benutzerfreundlichkeit des Systems.

Agritechnica

Im Rahmen der Agritechnica 2023 wurde das System mit dem Simulator einem breiten Fachpublikum vorgestellt, um ein umfassendes Meinungsbild zum Gesamtsystem und ethischen, rechtlichen und sozialen Aspekten (Ethical, Legal, and Social Implications, ELSI) zu gewinnen. Die in Abbildung 17 dargestellte Gesamtbewertung fiel bei 202 Rückmeldungen sehr positiv aus. Über alle Befragtengruppen hinweg zeigte die klare Mehrheit mit Bewertungen im oberen Bereich der Skala eine grundsätzlich hohe Akzeptanz des Gesamtkonzepts. Betriebsleiter bewerteten das System dabei tendenziell etwas zurückhaltender als Angestellte der Betriebe. Dieses Ergebnis steht auch im Einklang mit den vorherigen Messeerhebungen und verdeutlicht erneut, dass insbesondere die direkte Zielgruppe die ergonomischen und funktionalen Vorteile des Assistenzsystems positiv wahrnimmt.

Die Mehrheit der Befragten befürwortete, in hoch automatisierten Phasen vorrangig betriebliche anstatt privater Nebentätigkeiten auszuführen, erwartete dafür aber auch einen persönlichen Ausgleich in Form von zeitlicher oder finanzieller Kompensation, wobei die Akzeptanz solcher Tätigkeiten eng mit Fragen zur Leistungsgerechtigkeit verknüpft ist. Hinsichtlich eines Fachkräftemangels wurde eine erhöhte Bereitschaft zur Einstellung weniger erfahrener Personen bejaht, da das OFA als geeignetes Instrument zur sicheren Durchführung der anspruchsvollen Erntetätigkeit wahrgenommen wurde. Insgesamt zeigten die Ergebnisse der Agritechnica, ebenso wie die Ergebnisse der DLG-Feldtage und der DeLuTa, dass der Erfolg eines OFA nicht allein von der technischen Leistungsfähigkeit abhängt, sondern maßgeblich durch soziale, ethische und rechtliche Implikationen beeinflusst wird und ELSI-Kriterien für die Entwicklung mit einbezogen werden sollten.

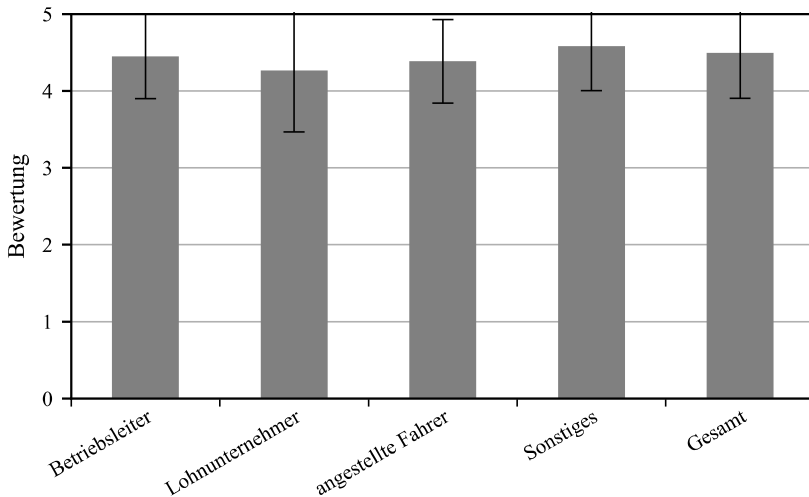


Abbildung 17: Ergebnisse der Befragung zur Gesamtbewertung auf der Agritechnica 2023 mit Standardabweichung, Skala: 1 = überhaupt nicht gut, 5 = sehr gut; n = 202

Produktakzeptanzstudie

An der Produktakzeptanzstudie nahmen insgesamt 54 Versuchspersonen teil, von denen 52 Personen männlich waren. Der Altersdurchschnitt betrug 41,2 Jahre ($SD = 11,4$). Die Stichprobe setzte sich zusammen aus Mitarbeitenden der Firma Class ($n = 26$), angestellten Fahrern ($n = 19$), Betriebsleitern ($n = 6$), Lohnunternehmern ($n = 4$) und sonstigen ($n = 1$). 31 % der Versuchspersonen gaben an, durchschnittlich mehr als sechs Wochen pro Jahr zu dreschen, für 33 % betrug dieser Zeitraum drei bis fünf Wochen im Jahr.

Beim User Experience Questionnaire zeigte sich Cronbachs Alpha als statistisches Maß für Kohärenz für die sechs Skalen wie folgt: $\alpha_{\text{Attraktivität}} = 0,81$; $\alpha_{\text{Durchschaubarkeit}} = 0,74$; $\alpha_{\text{Effizienz}} = 0,43$; $\alpha_{\text{Steuerbarkeit}} = 0,64$; $\alpha_{\text{Stimulation}} = 0,76$; $\alpha_{\text{Originalität}} = 0,58$. Wie Abbildung 18 zeigt, wurden alle sechs Skalen positiv bewertet. Besonders hervorzuheben sind dabei die Skalen Attraktivität, Stimulation und Originalität, die im Vergleich mit dem für den UEQ angege-

benen Benchmark [93], mit „exzellent“ (in den 10 % der besten Resultate des Benchmark) bewertet wurden. Die Skalen Effizienz und Steuerbarkeit wurden im Vergleich mit dem Benchmark „gut“ eingestuft (10 % der Ergebnisse sind besser, 75 % der Ergebnisse schlechter), die Skala Durchschaubarkeit über dem Durchschnitt (25 % der Ergebnisse sind besser, 50 % sind schlechter).

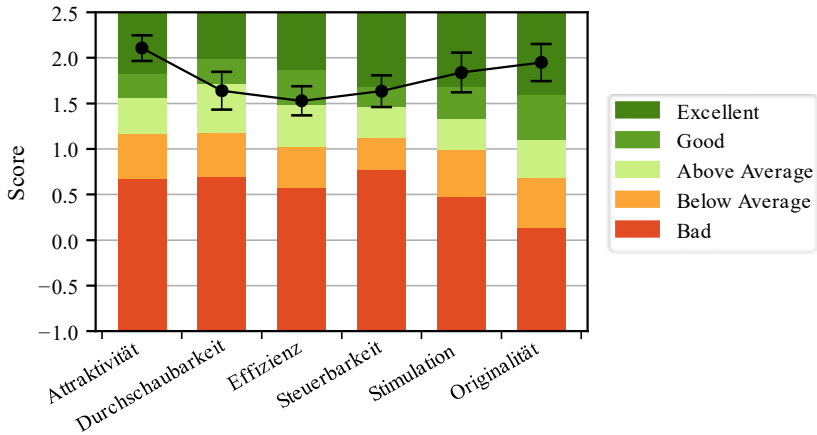


Abbildung 18: Ergebnisse UEQ mit Standardabweichung im Benchmark, n = 54

Die Interviews wurden transkribiert und inhaltlich ausgewertet, indem Antworten zu Komponenten zugeordnet und thematisch kategorisiert wurden. Insgesamt wurden alle abgefragten Komponenten überwiegend positiv beurteilt.

Die virtuelle Assistentin als zentraler Teil des OFA zur Ausgabe von Warnungen, Hinweisen und Handlungsempfehlungen wurde überwiegend sehr positiv bewertet. Besonders geschätzt wurden hilfreiche Warnmeldungen, die Unterstützung bei nachlassender Konzentration sowie die Sprachausgabe bei fehlender visueller Aufmerksamkeit. Es wurde dabei mehrmals der Wunsch nach Personalisierbarkeit geäußert.

In den unterschiedlichen Fahrmodi wurden vor allem die erhöhte Beinfreiheit hervorgehoben, ergänzt durch den erhöhten Komfort im Entspannungsmodus. Der Büromodus mit Tastatur wurde vor allem als produktiv für administrative Tätigkeiten bewertet, wobei von manchen Personen ein Tablet als ausreichende Alternative angesehen wurde. Gleichzeitig äußerten Befragte Zweifel an der Notwendigkeit der Sitzdrehung und der Modi an sich, insbesondere aufgrund begrenzter Einsatzmöglichkeiten bei kleinen Schlaggrößen.

Als zentrale Voraussetzung für einen wirtschaftlich sinnvollen Kauf eines solchen Assistenzsystems wurde eine ausreichende Schlaggröße genannt. Zudem wurde eine modulare Bereitstellung der Funktionen vorgeschlagen, um eine bedarfsgerechte Ausstattung zu ermöglichen.

Die in Abbildung 19 dargestellten Ergebnisse des TA-EG weisen insgesamt auf eine technologieoffene und technikaffine Stichprobe hin. Cronbachs Alpha der vier Skalen zeigte sich wie folgt: $\alpha_{\text{Begeisterung}} = 0,86$; $\alpha_{\text{Kompetenz}} = 0,62$; $\alpha_{\text{negativeEinstellung}} = 0,74$; $\alpha_{\text{positiveEinstellung}} = 0,59$. Die Skala „Begeisterung“ mit der sehr hohen internen Konsistenz unterstreicht, dass die Versuchspersonen neuen technischen Lösungen mit Interesse und Neugier begegnen. Die Skala „Kompetenz“ mit moderater interner Konsistenz zeigt, dass sich die Versuchspersonen grundsätzlich als technikkompetent einschätzen, innerhalb der Gruppe jedoch Unterschiede im subjektiven Sicherheitsempfinden bestehen.

Im Gesamtbild bestätigen die Ergebnisse des TA-EG die in den Interviews beobachtete Offenheit gegenüber neuen Funktionen des OFA. Die sehr positive Bewertung der virtuellen Assistentin, des Anzeige- und Bedienkonzepts, sowie die erweiterten Nutzungsmöglichkeiten durch die zusätzlichen Modi ist mit der ausgeprägten Technikbegeisterung und dem hohen Technikinteresse konsistent. Ebenso ist nachvollziehbar, dass geäußerte Kritikpunkte bezüglich Displaygröße, Reaktivität, ergonomischer Gestaltung oder möglicher Ablenkung weniger auf grundsätzliche Technikskepsis zurückzuführen sind, sondern primär auf wahrgenommene Funktionsaspekte und Robustheit des Systems. Die Zielgruppe steht dem System grundsätzlich aufgeschlossen gegenüber, die Optimierungsbedarfe resultieren hauptsächlich aus der praktischen Ausgestaltung und ergonomischen Umsetzung.

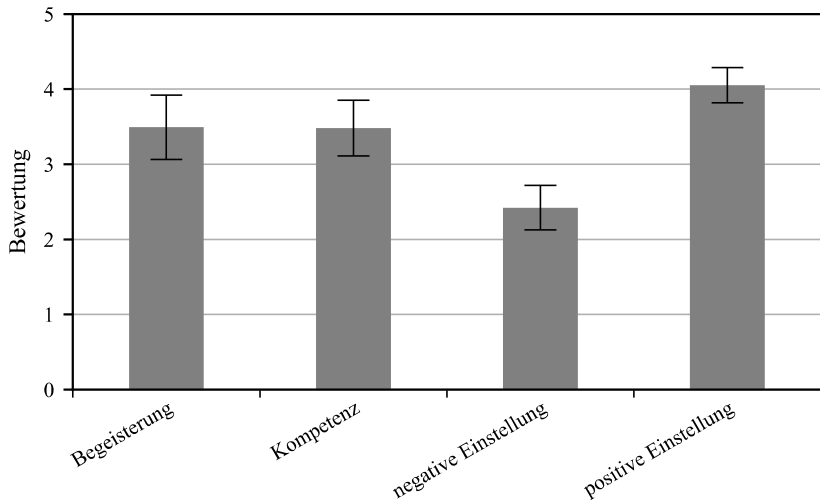


Abbildung 19: Ergebnisse TA-EG mit Standardabweichung.

Skala: 1 = trifft überhaupt nicht zu, 5 = trifft voll zu, n = 54

Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse wurden mehrere Elemente des OFA unmittelbar nach der Studie überarbeitet. Die Größe und Positionierung der Anzeigeelemente des HUD und der A-Säulen Displays wurde angepasst. Das Interface wurde insgesamt weiterentwickelt, insbesondere durch eine Überarbeitung der Menüführung mit einer klareren Trennung von Maschinenfunktionen auf der rechten und Assistenzfunktionen auf der linken Armlehne. Das Thema der Personalisierung wurde als wichtiges Feld für zukünftige Forschung und Entwicklung identifiziert, eine unmittelbare Umsetzung war jedoch, wie in Kapitel 4.3 dargestellt, aufwandstechnisch nicht realisierbar.

5.4 Feldstudie

Eine Feldstudie hatte das Ziel, die im Simulator erzielten Validierungsergebnisse des Assistenzsystems auf die Übertragbarkeit in realen Einsatzbedingungen zu analysieren. Da der Simulator eine kontrollierte und reproduzierbare Versuchsumgebung bietet, ist es notwendig zu überprüfen, ob diese im Simulator erzeugten Ergebnisse und Reaktionen des Assistenzsystems auch auf reale Nutzungssituationen übertragbar sind. Diese Feldtests fanden 2023 und 2024 während der Ernte auf verschiedenen landwirtschaftlichen Betrieben in Süddeutschland statt. Ein weiteres Ziel war dabei die Untersuchung der User Experience und Usability des Systems auf einer aktuellen Maschine mit der subjektiv wahrgenommenen Einschätzung von Benutzerfreundlichkeit, Nutzen und Akzeptanz eines solchen Systems.

Für diese Feldstudien wurde das Assistenzsystem mit der Möglichkeit zur RSME-Erfassung über einen Schieberegler auf einen Mähdrescher appliziert, es war keine Beanspruchungsschätzung über Eye-Tracker oder Herzrate implementiert. Das Beanspruchungslevel wurde so in regelmäßigen Zeitintervallen an das Assistenzsystem übergeben. Aufgrund des Serienstands des Versuchsträgers musste das Bedienkonzept in vereinfachter Version umgesetzt werden. Der gesamte Systemaufbau ist in Abbildung 20 zu sehen. [123]

Wichtige Anzeigeelemente, wie die Head-Up-Displays konnten dabei nicht direkt übertragen werden, die Anzeigen wurden durch eine Versetzung bestehender I/O-Module und die Integration verschiedener mobiler Geräte umgesetzt. Die Anbindung an die Versuchsmaschine ist über einen CAN-Logger und einen Laptop umgesetzt, auf dem gleichzeitig das Assistenzsystem läuft. [123]



Abbildung 20: Aufbau des HMI in der Versuchsmaschine [123]

Zusätzlich zu den Handlungsempfehlungen, die im Simulator umgesetzt waren, wurden weitere Trigger aktiviert, die den Korntankfüllstand und die Verluste betreffen. Bei einer Überschreitung verschiedener Grenzwerte wurde ebenfalls eine Handlungsempfehlung getriggert, um sowohl auditive, als auch visuelle Hinweise an den Fahrer zu übermitteln. [123]

Ergebnisse der RSME-Verteilung

Abbildung 21 zeigt die Zeitanteile der subjektiven Beanspruchung während aktiver Dreschphasen an einem der Studientage. Die Eingaben der RSME erfolgten manuell über den Fahrer, wobei eine Verzögerung zwischen tatsächlicher und gemeldeter Beanspruchung auftreten kann. Insgesamt überwog ein mittleres, als optimal einzustufendes Beanspruchungsniveau mit leichter Tendenz zur Überforderung. Phasen der Unterforderung traten kaum auf und wurden teils gezielt provoziert, um die Reaktion des Assistenzsystems zu testen. [123]

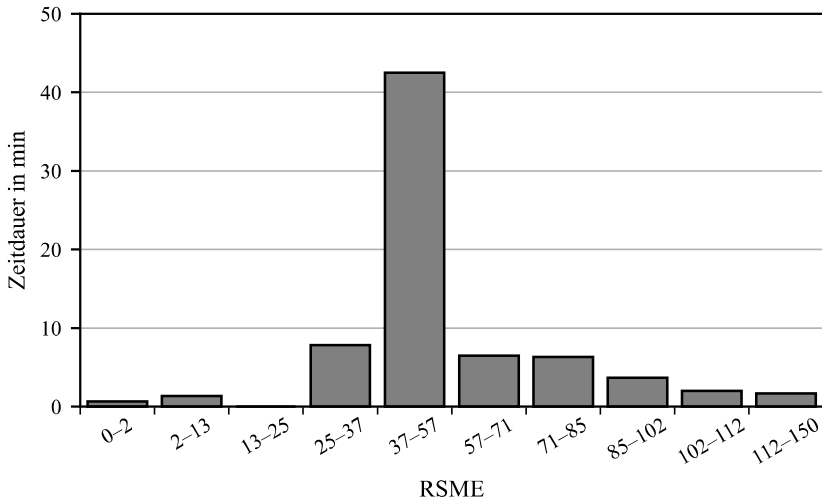


Abbildung 21: Zeitbereiche der RSME-Werte in der Feldstudie

Ergebnisse aus subjektiven Erkenntnissen

Die akustischen und visuellen Hinweise durch das Assistenzsystem wurden als deutliche Entlastung wahrgenommen, da sie eine Informationsaufnahme teilweise auch ohne Blickabwendung ermöglichten. Die Anzeige aller maschinenrelevanten Parameter im oberen Frontscheibenbereich verbesserte die Übersicht insbesondere für unerfahrene Fahrer. [123]

Das Assistenzsystem reagierte im Wesentlichen angemessen auf die unterschiedlichen Beanspruchungszustände. In Phasen erhöhter Beanspruchung wurden keine zusätzlichen Handlungsempfehlungen oder Hinweise generiert. Eine Entlastung konnte aufgrund eines zu niedrigen Automatisierungsgrades nicht von der Versuchsmaschine direkt erzielt werden. Bei gezielt provozierter niedriger Beanspruchung reagierte das Assistenzsystem mit Aktivierungsempfehlungen, sofern die Maschinensteuerung keine aktiven Eingriffe erforderte und der Mähdrescher selbstständig arbeitete. [123]

In den überwiegenden Zeitphasen befand sich die subjektive Beanspruchung im mittleren Bereich, was aus einem ausgewogenen Verhältnis zwischen Automatisierungsgrad und manueller Bedien- und Überwachungstätigkeit resultierte [123]. Insgesamt bestätigten die Ergebnisse der Feldstudie die Ergebnisse der Gesamtstudie im Simulator, dass das Assistenzsystem den Beanspruchungszustand auf Basis der RSME-Werte zutreffend interpretiert und mit situationsgerechten Maßnahmen reagiert.

5.5 Einordnung der Validierung auf dem Simulator

Die Ergebnisse der Simulatorstudien zeigen zunächst, dass der eingesetzte Simulator grundsätzlich geeignet ist, die benötigten unterschiedlichen Beanspruchungsniveaus zuverlässig zu erzeugen und voneinander zu differenzieren. Die sehr großen Effektstärken bei der experimentellen Variation der Beanspruchung belegen, dass die gewählten Szenarien eine valide Grundlage für die Untersuchung beanspruchungsadaptiver Assistenzsysteme darstellen. Damit ist eine zentrale Voraussetzung erfüllt, um in definierten Szenarien systematisch zu analysieren, wie ein Assistenzsystem auf unterschiedliche kognitive Zustände reagieren und diese beeinflussen kann.

Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass eine Zustandserfassung im Simulator einer Mähdrescherkabine mit hoher visueller Immersion und sehr großem Blickfeld grundsätzlich möglich ist und eine Detektion der Beanspruchung mit ähnlicher Genauigkeit wie im Labor möglich ist. Gleichzeitig machen die Ergebnisse deutlich, dass die Genauigkeit der Zustandsschätzung eine zentrale Limitierung des aktuellen Systemzustands darstellt. Das Aufzeigen dieser Limitierung bestätigt die Eignung eines Simulators als Entwicklungs- und Validierungsumgebung, da solche Schwächen dort identifiziert, analysiert und gezielt adressiert werden können.

Trotz eines deutlich reduzierten Systemumfangs, einer vereinfachten HMI-Implementierung und der Reduzierung der Zustandserfassung auf die RSME-Werte zeigen die Ergebnisse der Feldstudie, dass das grundlegende Konzept

des Assistenzsystems auch unter realen Bedingungen plausibel und nachvollziehbar funktioniert. Insbesondere das situationsangemessene Verhalten des Systems entspricht der im Simulator validierten Systemlogik und konnte die Versuchsperson auch im Feld über die meisten Zeitbereiche auf einem mittleren Beanspruchungsniveau halten. Die im Simulator abgeleiteten Reaktionsstrategien sind somit nicht simulationsspezifisch, sondern werden auch im Feld als sinnvoll wahrgenommen.

Auch im Hinblick auf die Akzeptanzbewertung ergibt sich ein konsistentes Gesamtbild. Die mit dem Simulator auf Messen und der Produktakzeptanzstudie erhobenen Akzeptanz- und User-Experience-Daten zeigen eine hohe Zustimmung zum Gesamtkonzept, zur Assistenzlogik und zum Anzeige- und Bedienkonzept. Die subjektiven Einschätzungen aus der Feldstudie stützen diese durch das Hervorheben insbesondere der Hinweise und Anzeigen auch im Bezug auf weniger erfahrene Fahrer.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass der Simulator ein geeignetes Instrument ist, um in klar definierten Szenarien die Funktionsfähigkeit, Wirklogik und Akzeptanz eines beanspruchungsadaptiven Assistenzsystems systematisch zu untersuchen. Die Feldstudie bestätigt dies, indem sie zeigt, dass die im Simulator gewonnen Ergebnisse grundsätzlich auf reale Einsatzbedingungen übertragbar sind.

6 Zusammenfassung

6.1 Wissenschaftlicher Beitrag

Zur Beurteilung des wissenschaftlichen Beitrages werden die in Kapitel 2.6 aufgestellten Forschungsfragen beantwortet.

Welche Anforderungen bestehen an einen Simulator für die Validierung eines OFA für Mähdrescher?

Für die Validierung und Akzeptanzbewertung des OFA wird ein Simulator mit mittlerer Wiedergabetreue eingesetzt, der auf Grundlage der definierten technischen Anforderungen an die visuelle Immersion, die funktionale Abbildung der I/O-Module und die Anbindung des Assistenzsystems ausgelegt wird. Hierzu zählen insbesondere eine realitätsnahe Darstellung der Erntebedingungen und die funktionale Authentizität des Fahrerplatzes einschließlich aller relevanten I/O-Module für Fahr- und Nebenaufgaben auf Basis des Konzepts des OFA sowie die Vernetzung des OFA über geeignete Schnittstellen mit allen relevanten Fahrzeug-, Prozess- und Assistenzdaten. Zudem werden eine Anbindung für die Zustandserfassung, sowie methodische Fallbacks für eine robuste und kontrollierbare Validierungsumgebung sichergestellt.

Welche Szenarien sind für ein OFA relevant?

Für ein OFA sind Szenarien relevant, die neben den Fahr- und Arbeitsaufgaben eines Mähdreschers auch mögliche Nebentätigkeiten umfassen. Dazu zählen die in Kapitel 3.5 aufgezählten Szenarien in den Bereichen betriebliche und maschinenbezogene Handlungsempfehlungen, Wohlbefinden, Medien und Einstellungen zum OFA, die auf Basis von Befragungen in einem Expertenworkshop erarbeitet wurden. Diese Fahr- und Teilszenarien ermöglichen eine modulare Kombination zu vollständigen Validierungsszenarien für einzelne Teilsysteme sowie Gesamtsystemtests. Auf ebensolcher

Kombination von Teilszenarien lassen sich zudem quantitative und qualitative Akzeptanzstudien erstellen und durchführen. Es ist für den Simulator also mindestens die Auswahl relevant, aus denen sich benötigte Studienszenarien zusammensetzen lassen, eine größere Auswahl umgesetzter Szenarien im Simulator geben bei der Szenarienentwicklung aber mehr Flexibilität in der Szenariengestaltung und eine höhere Abdeckung der Anwendungsfälle.

Wie kann ein Simulator zur Validierung eines OFA aufgebaut sein?

Für die Validierung eines OFA benötigt ein Simulator eine realitätsnahe, echtzeitfähige Nachbildung der Mähdrescherumgebung mit großem Sichtbereich mit 330° horizontalem und 80° vertikalem FOV. Die visuelle Immersion wird durch projizierte Inhalte mit einer Auflösung von 3 arcmin/px und niedriger Latenz von maximal 50 ms gewährleistet und der „Landwirtschafts-Simulator 22“ kann als erweiterbare Umgebung dienen. Flexible HMI-Ausgaben über parametrierbare Anzeigebereiche sowie ein integriertes Soundsystem stellen maschinen- und assistenzsystembezogene Informationen bereit. Zentrale Eingabemodule bilden das Bedienkonzept nach und ermöglichen die drei verschiedenen Modi. Ein Zustandserfassungssystem mit Eye-Tracking und Fitnesstracker liefert Echtzeitindikatoren für das Beanspruchungsniveau, das direkt in das OFA rückgeführt werden, eine Möglichkeit zur subjektiven Beanspruchungseinschätzung über RSME kann dabei als Basis für die Validierung dienen.

Welche Studien ermöglichen die Validierung eines OFA?

Die Validierung eines OFA kann über mehrere Studien erfolgen, um die Systemkomponenten und deren Zusammenspiel zu prüfen. Es ist eine Validierung der Zustandserfassung nötig, bei der die im Simulator induzierten Beanspruchungslevel variiert und die Übertragbarkeit des zuvor im Labor validierten Modells überprüft werden. Weiterhin findet eine Validierung statt, ob und in welchem Ausmaß Handlungsempfehlungen aus verschiedenen Kategorien die kognitive Beanspruchung der Versuchspersonen verändern. In einer Gesamtsystemstudie kann das OFA validiert werden um zu zeigen, ob durch Handlungsempfehlungen das Beanspruchungsniveau optimiert werden kann.

Welche Studien ermöglichen die Überprüfung der Akzeptanz eines OFA?

Für die Überprüfung der Akzeptanz eines OFA können Studien durchgeführt werden, die sowohl die breite Wahrnehmung, als auch detaillierte Bewertungen erfassen. Quantitativ orientierte Befragungen auf Fachmessen liefern dabei eine sehr positive Bewertung des Gesamtsystems und eine Einschätzung über potenzielle Chancen und Risiken des OFA aus einer großen Zielgruppe aus Landwirtschaft, Landtechnik und Lohnunternehmen. Eine Produktakzeptanzstudie ermöglicht die Evaluation einer voll funktionsfähigen Version des OFA unter kontrollierten und praxisnahen Bedingungen. Es werden zentrale Akzeptanzdimensionen erhoben, Optimierungspotenziale und Akzeptanzbarrieren sichtbar gemacht und eine nutzerzentrierte Weiterentwicklung des Systems ermöglicht.

Durch die positive Beantwortung der Forschungsfragen kann folglich die Forschungshypothese

Es gibt einen Simulator, das eine Optimierung der Fahrerbeanspruchung für Mährescher validiert und die Überprüfung der Akzeptanz eines solchen Systems in definierten Szenarien ermöglicht.

bestätigt werden.

Es wurde gezeigt, dass sowohl die technische Validierung, als auch die nutzerzentrierte Bewertung eines OFA unter kontrollierten, aber realitätsnahen Bedingungen auf einem Simulator möglich ist. Die entwickelten Methoden und Studien liefern eine belastbare Grundlage für die Weiterentwicklung des adaptiven Assistenzsystems, das gezielt auf die Beanspruchung des Fahrers reagiert. Zugleich entsteht ein reproduzierbares Vorgehen, das auch für zukünftige Assistenzsysteme im landtechnischen Kontext übertragbar ist.

Durch die Verlagerung realer Fahrstunden auf großen Landmaschinen in einen Simulator sowie die Möglichkeit einer nutzerzentrierten Entwicklung von Assistenzsystemen für Landmaschinen berücksichtigt die vorliegende Arbeit ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Aspekte leistet damit auch einen wirtschaftlichen Beitrag.

6.2 Weiterführende Betrachtungen

Simulatoren bieten Potenzial für zukünftige Forschung. Durch Augmented oder Virtual Reality können neue Interaktionsformen und ein höherer Immersionsgrad bereitgestellt werden. Fortschritte in der Spieleentwicklung ermöglichen fotorealistische Darstellung und steigende Rechenleistung ermöglicht komplexe Physikmodelle, die landwirtschaftliche Prozesse noch präziser reproduzieren können. Zudem entwickeln sich KI-basierte Systeme weiter, sodass weitere simulierte Teilnehmer realitätsnäher und adaptiv reagieren können. Dies erweitert Validierungsumgebungen, in denen nicht rein technische Funktionen getestet werden, sondern auch das Zusammenspiel zwischen Mensch, Maschine und digitalisiertem Umfeld.

Für das OFA selbst zeigt sich, dass die grundlegende Akzeptanz für die adaptive Unterstützung und die Art der Umsetzung vorhanden ist. Dennoch müssen zentrale Herausforderungen bewältigt werden. Das Automatisierungslevel einer Maschine muss mindestens SAE-Level 3 [116] sowohl für Fahr- als auch für die Arbeitsfunktion entsprechen und die Zustandserfassung muss in ihrer Genauigkeit und Robustheit deutlich verbessert werden für eine zuverlässige Detektion des Beanspruchungslevels. Mit dem Fortschreiten der Digitalisierung kann ein solches Assistenzsystem auf weitere Tätigkeitsfelder innerhalb und außerhalb der Landtechnik erweitert werden.

Die vorgestellte Simulatorumgebung eröffnet weiterführende Perspektiven, die über die unmittelbare Validierung eines Assistenzsystems hinausgehen. Insbesondere eine Entkopplung von Mensch und Maschine aufgrund zunehmender Automatisierung zeigt die Wichtigkeit nach zukünftigen Bedien- und Maschinenüberwachungssystemen. Ein Simulator, der Kamerabilder und Sensordaten aus realen Maschinen in Echtzeit auf die Projektionsflächen einer virtuellen Maschine überträgt, kann als Testumgebung für Teleoperation dienen, in einer noch weitergehenden Perspektive, lässt sich die Steuerung und Überwachung ganzer Maschinenflotten und einer Vielzahl an Hofsystemen aus einem Leitstand denken. So ist es denkbar, dass nur noch eine Person für einen Arbeitsprozess zuständig ist und mehrere autonome und halbautonome Systeme überwacht. Dafür ist ein immersives und robustes

Simulationssystem unerlässlich, das sowohl das situative Verständnis, als auch die kognitive Beanspruchung abbilden kann.

Literaturverzeichnis

- [1] Deutscher Bauernverband e.V. und AMI Agrarmarkt-Informations-GmbH, „Situationsbericht 2025/26: Trends und Fakten zur Landwirtschaft“, Berlin, Dez. 2025.
- [2] D. L. Fisher, M. Rizzo, J. K. Caird, und J. D. Lee, Hrsg., *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017.
- [3] D. H. Weir und A. J. Clark, „A Survey of Mid-Level Driving Simulators“, gehalten auf der International Congress & Exposition, Feb. 1995, S. 950172. doi: 10.4271/950172.
- [4] A. H. Jamson, „Cross-Platform Validation Issues“, in *Handbook of Driving Simulation for Engineering, Medicine, and Psychology*, D. Fisher, M. Rizzo, J. K. Caird, und J. D. Lee, Hrsg., Boca Raton, FL: CRC Press, 2011, S. 157-168 (12).
- [5] „NADS-1 Simulator | University of Iowa Driving Safety Research Institute“. Zugegriffen: 6. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://dsri.uiowa.edu/nads-1>
- [6] G. Fuchslocher, „BMW baut modernsten Fahrsimulator in München“, Automobil Produktion Online. Zugegriffen: 8. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.automobilproduktion.de/technologie/bmw-baut-modernsten-fahrsimulator-in-muenchen-235.html>
- [7] „Dresden Driving Simulator (DDS)“, TU Dresden. Zugegriffen: 8. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://tu-dresden.de/bu/verkehr/kft/die-professur/ausstattung/fahrsimulator-1>
- [8] T. Daun, „FTM-Fahrsimulator“. 1. März 2012. [Online]. Verfügbar unter: https://www.mos.ed.tum.de/fileadmin/w00ccp/ftm/content_uploads/Pruefstandsbeschreibung_Fahrsimulator.pdf
- [9] N. T. Richardson, C. Lehmer, M. Lienkamp, und B. Michel, „Conceptual design and evaluation of a human machine interface for highly automated truck driving“, in *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Juni 2018, S. 2072–2077. doi: 10.1109/IVS.2018.8500520.
- [10] „AB Dynamics launches class-leading static driving simulator“, AB Dynamics. Zugegriffen: 31. März 2025. [Online]. Verfügbar unter:

- <https://www.abdynamics.com/news/ab-dynamics-launches-class-leading-static-driving-simulator/>
- [11] E. Smid, J. Dowd, und V. Bhise, „Design and Implementation of a Driving Simulation Facility for the Optimization of Human-Machine Interfaces“, 2003.
- [12] J. Fank, M. Lienkamp, M. Vollrath, und M. Lienkamp, „Fahrer-Fahrzeug Interaktion für kooperative Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen“, Universitätsbibliothek der TU München, München, 2023. Zugegriffen: 31. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://mediatum.ub.tum.de/1693607>
- [13] S. K. Lohan, C. Prakash, N. Lohan, S. Kansal, und M. Karkee, „State-of-the-art in real-time virtual interfaces for tractors and farm machines: A systematic review“, *Comput. Electron. Agric.*, Bd. 231, S. 109947, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.compag.2025.109947.
- [14] F. Vahdatikhaki, K. El Ammari, A. K. Langroodi, S. Miller, A. Hammad, und A. Doree, „Beyond data visualization: A context-realistic construction equipment training simulators“, *Autom. Constr.*, Bd. 106, S. 102853, Okt. 2019, doi: 10.1016/j.autcon.2019.102853.
- [15] Feiffer, Andrea, „Threshing Simulator as a Training- and Development Tool (Grain Harvesting Simulator for Training and Combine Automation Developments)“, in *International Conference on Crop Harvesting and Processing*, American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2003. doi: 10.13031/2013.15665.
- [16] Scott, Jessie, „Agritechnica: John Deere Combine Simulator Coming to a Dealer Near You“, *Successful Farming*, 9. November 2015. Zugegriffen: 9. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.agriculture.com/machinery/harvest-equipment/combines/agritechnica-john-deere-combine-simulat_204-ar51068
- [17] Tenstar simulation, „Simulator Prospekt: Prepare for reality“, Nr. 13.01.2020. Tenstar, Tanumshede, Schweden, 1. Januar 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://tenstarsimulation.com/#tenstar>
- [18] „Hydrive Schulungssimulatoren - echtes Maschinenerlebnis mit KI“, Hydrive Engineering. Zugegriffen: 9. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://hydrive-engineering.de/portfolio/schulungssimulatoren/>
- [19] M. Cutini u. a., „A Co-Simulation Virtual Reality Machinery Simulator for Advanced Precision Agriculture Applications“, *Agriculture*, Bd. 13, S. 1603, Aug. 2023, doi: 10.3390/agriculture13081603.
- [20] Liebherr-International Deutschland GmbH, „Simulator - Liebherr“. Zugegriffen: 19. Mai 2026. [Online]. Verfügbar unter:

- <https://www.liebherr.com/de-de/erdbewegung/services/fahrertraining-simulator/simulator-7994546>
- [21] „Volvo Simulators | Enhance Operator Training | Volvo CE“. Zugegriffen: 19. Mai 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.volvoce.com/europe/en/volvo-services/volvo-simulators/>
- [22] N. Ochoa Lleras, S. Brennan, D. Murphy, M. Klena, P. Garvey, und H. Sommer, „Development of an Open-Source Tractor Driving Simulator for Tractor Stability Tests“, *J. Agric. Saf. Health*, Bd. 22, S. 227–246, Okt. 2016, doi: 10.13031/jash.22.11774.
- [23] D. Ojados Gonzalez, B. Martin-Gorritz, I. Ibarra Berrocal, A. Macian Morales, G. Adolfo Salcedo, und B. Miguel Hernandez, „Development and assessment of a tractor driving simulator with immersive virtual reality for training to avoid occupational hazards“, *Comput. Electron. Agric.*, Bd. 143, S. 111–118, Dez. 2017, doi: 10.1016/j.compag.2017.10.008.
- [24] Technische Universität Dresden, Fakultät für Maschinenwesen, Institut für Mechatronischen Maschinenbau, Stiftungsprofessur für Baumaschinen, „Interaktiver Simulator“. TU Dresden, 2020. Zugegriffen: 18. Mai 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/imd/bm/ressourcen/dateien/20200117_interaktiver-Simulator.pdf?lang=de
- [25] B. Bashiri und D. D. Mann, „Automation and the situation awareness of drivers in agricultural semi-autonomous vehicles“, *Biosyst. Eng.*, Bd. 124, S. 8–15, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2014.06.002.
- [26] C. Meusel u. a., „Evaluating operator harvest technology within a high-fidelity combine simulator“, *Comput. Electron. Agric.*, Bd. 148, S. 309–321, Mai 2018, doi: 10.1016/j.compag.2018.03.024.
- [27] G. Hiesgen, „Effiziente Entwicklung eines menschzentrierten Querführungsassistenzsystems mit einem Fahrsimulator“, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, 2012.
- [28] P. Padmos und M. V. Milders, „Quality Criteria for Simulator Images: A Literature Review“, *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.*, Bd. 34, Nr. 6, S. 727–748, Dez. 1992, doi: 10.1177/001872089203400606.
- [29] J. Davis, Y.-H. Hsieh, und H.-C. Lee, „Humans perceive flicker artifacts at 500 Hz“, *Sci. Rep.*, Bd. 5, Nr. 1, S. 7861, Feb. 2015, doi: 10.1038/srep07861.
- [30] G. Burnett, A. Irune, und A. Mowforth, „Driving simulator sickness and validity: How important is it to use real car cabins?“, *Adv. Transp. Stud.*, S. 33–42, Jan. 2007.

- [31] A. Kemeny, F. Colombet, und T. Denoual, „How to avoid simulation sickness in virtual environments during user displacement“, in *The Engineering Reality of Virtual Reality 2015*, SPIE, März 2015, S. 40–48. doi: 10.1117/12.2077080.
- [32] D. R. Large, S. M. Pampel, S. E. Merriman, und G. Burnett, „A validation study of a fixed-based, medium fidelity driving simulator for human–machine interfaces visual distraction testing“, *IET Intell. Transp. Syst.*, Bd. 17, Nr. 6, S. 1104–1117, Juni 2023, doi: 10.1049/itr2.12362.
- [33] D. Reich, C. Buchholz, und R. Stark, „Methods to Validate Automotive User Interfaces Within Immersive Driving Environments“, in *Automotive User Interfaces: Creating Interactive Experiences in the Car*, G. Meixner und C. Müller, Hrsg., Cham: Springer International Publishing, 2017, S. 429–454. doi: 10.1007/978-3-319-49448-7_16.
- [34] K. Cha, K. Horch, und R. A. Normann, „Simulation of a phosphene-based visual field: Visual acuity in a pixelized vision system“, *Ann. Biomed. Eng.*, Bd. 20, Nr. 4, S. 439–449, Juli 1992, doi: 10.1007/BF02368135.
- [35] H. J. Negele, „Anwendungsgerechte Konzipierung von Fahrsimulatoren für die Fahrzeugentwicklung“, Dissertation, Technische Universität München, München, 2007.
- [36] J. C. Gil-Carvajal, E. Soo Jo, D. Chul Park, W. Song, und C.-H. Jeong, „Driving simulator using virtual reality tools combining sound, vision, vibration, and motion“, *Appl. Acoust.*, Bd. 224, S. 110137, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.apacoust.2024.110137.
- [37] D. Singh, „Hybrid Auditory Based Interaction Framework for Driver Assistance System“, *J. Comput. Sci.*, Bd. 6, Nr. 12, S. 1499–1504, Nov. 2010, doi: 10.3844/jcssp.2010.1499.1504.
- [38] J. Greenberg und M. Blommer, „Physical fidelity of driving simulators“, in *Handbook of Driving Simulation for Engineering, Medicine, and Psychology*, 2011, S. 7–1.
- [39] K. N. De Winkel, T. M. W. Talsma, und R. Happee, „A meta-analysis of simulator sickness as a function of simulator fidelity“, *Exp. Brain Res.*, Bd. 240, Nr. 12, S. 3089–3105, Dez. 2022, doi: 10.1007/s00221-022-06485-6.
- [40] T. McWilliams, B. Mehler, B. Seppelt, und B. Reimer, „Driving Simulator Validation for In-Vehicle Human Machine Interface Assessment“, *Proc. Hum. Factors Ergon. Soc. Annu. Meet.*, Bd. 63, Nr. 1, S. 2104–2108, Nov. 2019, doi: 10.1177/1071181319631438.
- [41] S. Moten, F. Celiberti, M. Grotoli, A. van der Heide, und Y. Lemmens, „X-in-the-loop advanced driving simulation platform for the

- design, development, testing and validation of ADAS“, in *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Juni 2018, S. 1–6. doi: 10.1109/IVS.2018.8500409.
- [42] R. Bhadani, J. Sprinkle, und M. Bunting, „The CAT Vehicle Testbed: A Simulator with Hardware in the Loop for Autonomous Vehicle Applications“, *Electron. Proc. Theor. Comput. Sci.*, Bd. 269, S. 32–47, Apr. 2018, doi: 10.4204/EPTCS.269.4.
- [43] H. Li, N. Bamminger, L. Wan, und A. Eichberger, „Multi-level and Metrics Evaluation Approach for Data-Driven Based Sensor Models“, *Automot. Innov.*, Bd. 7, März 2024, doi: 10.1007/s42154-023-00275-8.
- [44] M. Jasinski, „A Generic Validation Scheme for real-time capable Automotive Radar Sensor Models integrated into an Autonomous Driving Simulator“, in *2019 24th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, Międzyzdroje, Poland: IEEE, Aug. 2019, S. 612–617. doi: 10.1109/MMAR.2019.8864669.
- [45] J. Kearney und T. F. Grechkin, „Scenario authoring“, in *Handbook of Driving Simulation for Engineering, Medicine, and Psychology*, 2011, S. 6–1.
- [46] S. Hinzmann, „Methodik – Wizard-of-Oz LKW“, in Projekt Tango - Abschlussevent. 18. September 2020.
- [47] Y.-C. Lee und F. K. Winston, „Stress induction techniques in a driving simulator and reactions from newly licensed drivers“, *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.*, Bd. 42, S. 44–55, Okt. 2016, doi: 10.1016/j.trf.2016.06.019.
- [48] R. Kneuper, „Die geschichtliche Entwicklung des V-Modells“, IUBH Discussion Papers - IT & Engineering, Working Paper 1/2018, 2018.
- [49] J. Schäuuffele und T. Zurawka, *Automotive Software Engineering: Grundlagen, Prozesse, Methoden und Werkzeuge*, 7. Auflage 2024. in ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2024. doi: 10.1007/978-3-658-43543-1.
- [50] G. J. Blaauw, „Driving Experience and Task Demands in Simulator and Instrumented Car: A Validation Study“, *Hum. Factors*, Bd. 24, Nr. 4, S. 473–486, Aug. 1982, doi: 10.1177/001872088202400408.
- [51] C. Himmels, A. Parduzi, M. Fischer, und A. Riener, „Towards a Common Understanding of Driving Simulator Validity“, in *Adjunct Proceedings of the 15th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, Ingolstadt Germany: ACM, Sep. 2023, S. 191–196. doi: 10.1145/3581961.3609895.

- [52] I. Zöller, N. Mautes, W. Ren, und B. Abendroth, „Wissenssammlung für valide Fahrsimulation“, *ATZ - Automob. Z.*, Bd. 117, Nr. 3, S. 70–73, März 2015, doi: 10.1007/s35148-015-0406-x.
- [53] J. Mueller, „Driving in a simulator versus on-road : the effect of increased mental effort while driving on real roads and a driving simulator“, Montana State University, Bozeman, 2015.
- [54] R. Lobjois, V. Faure, L. Désiré, und N. Benguigui, „Behavioral and workload measures in real and simulated driving: Do they tell us the same thing about the validity of driving simulation?“, *Saf. Sci.*, Bd. 134, S. 105046, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.ssci.2020.105046.
- [55] D. R. Large, S. M. Pampel, S. E. Merriman, und G. Burnett, „A validation study of a fixed-based, medium fidelity driving simulator for human–machine interfaces visual distraction testing“, *IET Intell. Transp. Syst.*, Bd. 17, Nr. 6, S. 1104–1117, Juni 2023, doi: 10.1049/itr2.12362.
- [56] N. Kaptein, J. Theeuwes, und R. van der horst, „Driving Simulator Validity: Some Considerations“, *Transp. Res. Rec.*, Bd. 1550, S. 30–36, Nov. 1996, doi: 10.3141/1550-05.
- [57] W. M. Trochim und J. P. Donnelly, *Research methods knowledge base*, Bd. 2. Atomic dog publishing Cincinnati, OH, 2001.
- [58] F. Walker u. a., „Trust in automated vehicles: constructs, psychological processes, and assessment“, *Front. Psychol.*, Bd. 14, S. 1279271, Nov. 2023, doi: 10.3389/fpsyg.2023.1279271.
- [59] R. Allen, T. Rosenthal, und M. L. Cook, „A short history of driving simulation“, in *Handbook of Driving Simulation for Engineering, Medicine, and Psychology*, 2011, S. 2–1.
- [60] R. Allen, T. Rosenthal, B. Aponso, und G. Park, „SCENARIOS PRODUCED BY PROCEDURAL METHODS FOR DRIVING RESEARCH, ASSESSMENT AND TRAINING APPLICATIONS“, *DCS N. Am. 2003 Proc.*, Okt. 2003.
- [61] V. Charissis, S. Arafat, M. Patera, C. Christomanos, und W. Chan, „AI for driving simulator vehicles and accident events: 25th IASTED International Multi-Conference on Applied Informatics“, *Artif. Intell. Appl.*, S. 133–138, 2007.
- [62] K. Gąsiorek, E. Odachowska, A. Matysiak, und M. Pędzierska, „Virtual Reality Technologies in the Training of Professional Drivers. Comparison of the 2D and 3D Simulation Application“, in *Research Methods and Solutions to Current Transport Problems*, M. Siergiejczyk und K. Krzykowska, Hrsg., Cham: Springer International Publishing, 2020, S. 133–142. doi: 10.1007/978-3-030-27687-4_14.

- [63] D. Datcu und L. Rothkrantz, „AFFECTIVE COMPUTING AND AUGMENTED REALITY FOR CAR DRIVING SIMULATORS“, *Acta Polytech. CTU Proc.*, Bd. 12, S. 13–23, Dez. 2017, doi: 10.14311/APP.2017.12.0013.
- [64] T. Oksanen u. a., „Environment simulator for studying automatic crop farming“, *Agric. Eng. Int. CIGR J.*, Bd. 16, Nr. 1, Art. Nr. 1, März 2014.
- [65] M. J. Hakojärvi u. a., „Platform for simulation of automated crop production“, *Agron. Res.*, Bd. 8, Nr. 1, S. 797–806, 2010.
- [66] M. Liebherr, S. M. Mueller, S. Schweig, N. Maas, D. Schramm, und M. Brand, „Stress and Simulated Environments: Insights From Physiological Marker“, *Front. Virtual Real.*, Bd. 2, S. 618855, Apr. 2021, doi: 10.3389/frvir.2021.618855.
- [67] F. Klimmer, J. Rutenfranz, und W. Rohmert, „Untersuchungen über physiologische und biochemische indikatoren zur differenzierung zwischen mentaler und emotionaler beanspruchung bei psychischen leistungen“, *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, Bd. 44, Nr. 3, S. 149–163, 1979, doi: 10.1007/BF00381130.
- [68] I. Böckelmann, „Analyse der Herzfrequenzvariabilität (HRV) — praktische Relevanz“, *Zentralblatt Für Arbeitsmedizin Arbeitsschutz Ergon.*, Bd. 62, Nr. 5, S. 275–279, Sep. 2012, doi: 10.1007/BF03346164.
- [69] S. Immanuel, M. N. Teferra, M. Baumert, und N. Bidargaddi, „Heart Rate Variability for Evaluating Psychological Stress Changes in Healthy Adults: A Scoping Review“, *Neuropsychobiology*, Bd. 82, Nr. 4, S. 187–202, 2023, doi: 10.1159/000530376.
- [70] L. Kerautret, S. Dabic, und J. Navarro, „Detecting driver stress and hazard anticipation using real-time cardiac measurement: A simulator study“, *Brain Behav.*, Bd. 12, Nr. 2, S. e2424, Jan. 2022, doi: 10.1002/brb3.2424.
- [71] J. Engström, E. Johansson, und J. Östlund, „Effects of visual and cognitive load in real and simulated motorway driving“, *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.*, Bd. 8, Nr. 2, S. 97–120, März 2005, doi: 10.1016/j.trf.2005.04.012.
- [72] M. J. Johnson, T. Chahal, A. Stinchcombe, N. Mullen, B. Weaver, und M. Bédard, „Physiological responses to simulated and on-road driving“, *Int. J. Psychophysiol.*, Bd. 81, Nr. 3, S. 203–208, Sep. 2011, doi: 10.1016/j.ijpsycho.2011.06.012.
- [73] B. Reimer und B. Mehler, „The impact of cognitive workload on physiological arousal in young adult drivers: a field study and simulation

- validation“, *Ergonomics*, Bd. 54, Nr. 10, S. 932–942, Okt. 2011, doi: 10.1080/00140139.2011.604431.
- [74] E. Gemonet, C. Bougard, S. Masfrand, V. Honnet, und D. R. Mestre, „Car drivers coping with hazardous events in real versus simulated situations: Declarative, behavioral and physiological data used to assess drivers’ feeling of presence“, *PLOS ONE*, Bd. 16, Nr. 2, S. e0247373, Feb. 2021, doi: 10.1371/journal.pone.0247373.
- [75] G. Marquart, C. Cabrall, und J. de Winter, „Review of Eye-related Measures of Drivers’ Mental Workload“, *Procedia Manuf.*, Bd. 3, S. 2854–2861, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.promfg.2015.07.783.
- [76] F. Volden, V. De Alwis Edirisinghe, und K.-I. Fostervold, „Human Gaze-Parameters as an Indicator of Mental Workload“, in *Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2018)*, Bd. 827, S. Bagnara, R. Tartaglia, S. Albolino, T. Alexander, und Y. Fujita, Hrsg., in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 827. , Cham: Springer International Publishing, 2019, S. 209–215. doi: 10.1007/978-3-319-96059-3_23.
- [77] S. P. Marshall, „Method and apparatus for eye tracking and monitoring pupil dilation to evaluate cognitive activity“, US6090051A, 18. Juli 2000
- [78] G. Underwood, D. Crundall, und P. Chapman, „Driving simulator validation with hazard perception“, *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.*, Bd. 14, Nr. 6, S. 435–446, Nov. 2011, doi: 10.1016/j.trf.2011.04.008.
- [79] S. G. Hart und L. E. Staveland, „Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research“, in *Advances in Psychology*, Bd. 52, Elsevier, 1988, S. 139–183. doi: 10.1016/S0166-4115(08)62386-9.
- [80] A. Pauzić, „A method to assess the driver mental workload: The driving activity load index (DALI)“, *IET Intell. Transp. Syst.*, Bd. 2, Nr. 4, S. 315–322, Dez. 2008, doi: 10.1049/iet-its:20080023.
- [81] F. Zijlstra und L. Doorn, „The Construction of a Scale to Measure Perceived Effort“, *Dep. Philos. Soc. Sci.*, Jan. 1985.
- [82] M. M. Bradley und P. J. Lang, „Measuring emotion: The self-assessment manikin and the semantic differential“, *J. Behav. Ther. Exp. Psychiatry*, Bd. 25, Nr. 1, S. 49–59, März 1994, doi: 10.1016/0005-7916(94)90063-9.
- [83] B.-C. Min, S.-C. Chung, Y.-K. Min, und K. Sakamoto, „Psychophysiological evaluation of simulator sickness evoked by a

- graphic simulator“, *Appl. Ergon.*, Bd. 35, Nr. 6, S. 549–556, Nov. 2004, doi: 10.1016/j.apergo.2004.06.002.
- [84] I. Mackrous, M. Lavallière, und N. Teasdale, „Adaptation to simulator sickness in older drivers following multiple sessions in a driving simulator“, *Gerontechnology*, Bd. 12, S. 101–111, Mai 2014, doi: 10.4017/gt.2013.12.2.004.00.
- [85] D. V. McGehee, J. D. Lee, M. Rizzo, J. Dawson, und K. Bateman, „Quantitative analysis of steering adaptation on a high performance fixed-base driving simulator“, *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.*, Bd. 7, Nr. 3, S. 181–196, Mai 2004, doi: 10.1016/j.trf.2004.08.001.
- [86] R. A. Wynne, V. Beanland, und P. M. Salmon, „Systematic review of driving simulator validation studies“, *Saf. Sci.*, Bd. 117, S. 138–151, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.ssci.2019.04.004.
- [87] S. Schwindt-Drews, K. Storms, S. Peters, und B. Abendroth, „Acceptance and Trust: Drivers’ First Contact With Released Automated Vehicles in Naturalistic Traffic“, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, Bd. 25, Nr. 11, S. 18601–18610, Nov. 2024, doi: 10.1109/TITS.2024.3443927.
- [88] F. Walker u. a., „Trust in automated vehicles: constructs, psychological processes, and assessment“, *Front. Psychol.*, Bd. 14, S. 1279271, Nov. 2023, doi: 10.3389/fpsyg.2023.1279271.
- [89] M. Yan, L. Rampino, und G. Caruso, „Fostering User Acceptance in Shared Autonomous Vehicles: A Framework for HMI Design“, *Multimodal Technol. Interact.*, Bd. 8, Nr. 11, S. 94, Okt. 2024, doi: 10.3390/mti8110094.
- [90] F. D. Davis, „A technology acceptance model for empirically testing new end-user information systems : theory and results“, Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1985. Zugegriffen: 28. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/15192>
- [91] *DIN EN ISO 9241-11:2018-11, Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 11: Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte (ISO 9241-11:2018); Deutsche Fassung EN ISO 9241-11:2018*. doi: 10.31030/2757945.
- [92] B. Laugwitz, T. Held, und M. Schrepp, „Construction and Evaluation of a User Experience Questionnaire“, in *HCI and Usability for Education and Work*, Bd. 5298, A. Holzinger, Hrsg., in Lecture Notes in Computer Science, vol. 5298. , Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, S. 63–76. doi: 10.1007/978-3-540-89350-9_6.

- [93] M. Schrepp, A. Hinderks, und J. Thomaschewski, „Construction of a Benchmark for the User Experience Questionnaire (UEQ)“, *Int. J. Interact. Multimed. Artif. Intell.*, Bd. 4, Nr. 4, S. 40, 2017, doi: 10.9781/ijimai.2017.445.
- [94] S. Lorenz, J. R. Helmert, R. Anders, C. Wölfel, und J. Krzywinski, „UUX Evaluation of a Digitally Advanced Human–Machine Interface for Excavators“, *Multimodal Technol. Interact.*, Bd. 4, Nr. 3, S. 57, Aug. 2020, doi: 10.3390/mti4030057.
- [95] D. Hai Le, K. Ihme, und F. Köster, „Involving users in Automotive HMI design: Design evaluation of an interactive simulation based on participatory design“, gehalten auf der Intelligent Human Systems Integration (IHSI 2023) Integrating People and Intelligent Systems, 2023. doi: 10.54941/ahfe1002818.
- [96] J. Brooke, „SUS: A quick and dirty usability scale“, *Usability Eval Ind*, Bd. 189, Nov. 1995.
- [97] J. Sauro, *Quantifying the user experience: practical statistics for user research*. Place of publication not identified: Morgan Kaufmann, 2016.
- [98] M. Hassenzahl, Marc, M. Burmester, Michael, F. Koller, und Franz, *AttrakDiff: Ein Fragebogen zur Messung wahrgenommener hedonischer und pragmatischer Qualität*. 2003.
- [99] W. T. Nakamura u. a., „Are UX Evaluation Methods Providing the Same Big Picture?“, *Sensors*, Bd. 21, Nr. 10, S. 3480, Mai 2021, doi: 10.3390/s21103480.
- [100] C. V. L. T. Brennand, C. A. R. L. Brennand, E. F. Duarte, und M. C. C. Baranauskas, „Evaluating the user experience in interactive installations: a case study“, in *Proceedings of the 18th Brazilian Symposium on Human Factors in Computing Systems*, in IHC '19. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, Okt. 2019, S. 1–10. doi: 10.1145/3357155.3358484.
- [101] D. E. Ströckl, E. Oberrauner, D. E. Krainer, L. Wohofsky, und J. Oberzaucher, „Hedonic and Pragmatic Qualities of AAL Pilot Region Technologies: Evaluation with the AttrakDiff Survey“, gehalten auf der 6th International Conference on Information and Communication Technologies for Ageing Well and e-Health, Mai 2025, S. 187–193. doi: 10.5220/0009575701870193.
- [102] K. Karrer, C. Glaser, C. Clemens, und C. Bruder, „Technikaffinität erfassen – der Fragebogen TA-EG“, Jan. 2009.
- [103] V. Venkatesh und F. D. Davis, „A Theoretical Extension of the Technology Acceptance Model: Four Longitudinal Field Studies“,

- Manag. Sci.*, Bd. 46, Nr. 2, S. 186–204, Feb. 2000, doi: 10.1287/mnsc.46.2.186.11926.
- [104] V. Venkatesh und H. Bala, „Technology Acceptance Model 3 and a Research Agenda on Interventions“, *Decis. Sci.*, Bd. 39, Nr. 2, S. 273–315, Mai 2008, doi: 10.1111/j.1540-5915.2008.00192.x.
- [105] Venkatesh, Morris, Davis, und Davis, „User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View“, *MIS Q.*, Bd. 27, Nr. 3, S. 425, 2003, doi: 10.2307/30036540.
- [106] A. Sutarto u. a., *Driving the Future: Using TAM and UTAUT to Understand Public Acceptance of Fully Autonomous Vehicles*. 2023. doi: 10.1109/ICISS59129.2023.10291794.
- [107] D. Marikyan und S. Papagiannidis, „Technologie Acceptance Model: A review“, in S. Papagiannidis (Ed), *TheoryHub Book*. [Online]. Verfügbar unter: <https://open.ncl.ac.uk>
- [108] V. Sukacké, „TOWARDS EXTENDING THE ORIGINAL TECHNOLOGY ACCEPTANCE MODEL (TAM) FOR A BETTER UNDERSTANDING OF EDUCATIONAL TECHNOLOGY ADOPTION“, *Soc. Integr. Educ. Proc. Int. Sci. Conf.*, Bd. 5, S. 525–549, Mai 2019, doi: 10.17770/sie2019vol5.3798.
- [109] F. Rondan-Cataluña, J. Arenas-Gaitán, und P. Ramírez-Correa, „A comparison of the different versions of popular technology acceptance models: A non-linear perspective“, *Kybernetes*, Bd. 44, Juli 2015, doi: 10.1108/K-09-2014-0184.
- [110] M. Yan, L. Rampino, und G. Caruso, „Comparing User Acceptance in Human–Machine Interfaces Assessments of Shared Autonomous Vehicles: A Standardized Test Procedure“, *Appl. Sci.*, Bd. 15, S. 45, Dez. 2024, doi: 10.3390/app15010045.
- [111] F. Biondi, Alvarez, Ignacio, und K.-A. and Jeong, „Human - System Cooperation in Automated Driving“, *Int. J. Human–Computer Interact.*, Bd. 35, Nr. 11, S. 917–918, Juli 2019, doi: 10.1080/10447318.2018.1561793.
- [112] P. Clement u. a., „Enhancing Acceptance and Trust in Automated Driving through Virtual Experience on a Driving Simulator“, *Energies*, Bd. 15, Nr. 3, Art. Nr. 3, Jan. 2022, doi: 10.3390/en15030781.
- [113] P. Prüfer und M. Rexroth, *Verfahren zur Evaluation von Survey-Fragen: ein Überblick*. ZUMA, 1996.
- [114] H. Beyer und K. Holtzblatt, „Contextual design“, *Interactions*, Bd. 6, Nr. 1, S. 32–42, Jan. 1999, doi: 10.1145/291224.291229.

- [115] M. Häder, *Empirische Sozialforschung: Eine Einführung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2019. doi: 10.1007/978-3-658-26986-9.
- [116] On-Road Automated Driving (ORAD) Committee, *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*. doi: 10.4271/J3016_202104.
- [117] H. Wilmer, „Kabine 4.0: Umfrage der Uni Hohenheim: Arbeitsplatz Mähdrescherkabine“, *Profi*, Bd. 4, S. 100–103, Jan. 2021.
- [118] M. Budde und L. Budde, „Agrarsysteme der Zukunft: Fahrerkabine 4.0 - Entwicklung einer beanspruchungsadaptiven Nutzerschnittstelle für Landmaschinenbetreiber - Teilprojekt B: Sachbericht zum Verwendungsnachweis“, Hannover : Technische Informationsbibliothek, 2024. doi: 10.34657/18860.
- [119] Y. A. Funk, H. Haase, J. Remmers, N. Nussli, und B. Deml, „Entwicklung und Validierung einer computerbasierten Aufgabe zur Induktion eines psychischen Beanspruchungsspektrums“, *Z. Arbeitswissenschaft*, S. 1–17, 2022, doi: 10.1007/s41449-022-00304-y.
- [120] S. Metzger, „Development of an assistant system for regulating the mental strain state of agricultural machinery operators“, 2026, *Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*. doi: 10.5445/IR/1000191573.
- [121] W.-M. Kähler, *Statistische Datenanalyse: Verfahren verstehen und mit SPSS gekonnt einsetzen*, 3., Völlig neubearb. Aufl. in Vieweg Studium. Braunschweig [u.a.]: Vieweg, 2004.
- [122] J. Cohen, *Statistical power analysis for the behavioral sciences*, 2. ed., Reprint. New York, NY: Psychology Press, 1988.
- [123] S. Böttinger, „Agrarsysteme der Zukunft: Fahrerkabine 4.0 - Entwicklung einer beanspruchungsadaptiven Nutzerschnittstelle für Landmaschinenbetreiber - Teilprojekt F“, Abschlussbericht, 2025. doi: 10.34657/22622.

Eigene Veröffentlichungen

- [E1] M. Geimer, S. Metzger, P. Lehr, B. Deml, und N.-R. Strelau, „Agrarsysteme der Zukunft: Fahrerkabine 4.0 - Entwicklung einer beanspruchungsadaptiven Nutzerschnittstelle für Landmaschinenbetreiber - Teilprojekt A: Abschlussbericht“, Hannover : Technische Informationsbibliothek, Nov. 2024. doi: 10.34657/23443.

- [E2] P. Lehr, S. Metzger, M. Geimer, und L. Budde, „Validation Environment for a New Cab Concept Using the Example of a Combine Harvester“, ATZheavy Duty Worldw., Bd. 16, Nr. 1, S. 34–37, Mai 2023, doi: 10.1007/s41321-023-1013-5.
- [E3] S. Metzger, P. Lehr, V. Ernst, und M. Geimer, „Entwicklung einer adaptiven Benutzerschnittstelle zur Optimierung des kognitiven Benutzerzustands“, in Arbeit unter einem DA-CH: Der Landwirt im 4.0-Modus, Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V., Hrsg., 2022, S. 79–90.
- [E4] P. Lehr, S. Metzger, M. Geimer, und L. Budde, „Validierungsumgebung für ein neues Kabinenkonzept am Beispiel eines Mähdreschers“, ATZheavy Duty, Bd. 16, Nr. 1, S. 34–37, Mai 2023, doi: 10.1007/s35746-023-1015-3.
- [E5] S. Metzger, P. Lehr, und M. Geimer, „Beanspruchungsadaptive Nutzerschnittstelle für die vernetzte Landwirtschaft“, ATZheavy Duty, Bd. 15, Nr. 1, S. 48–52, Jan. 2022, doi: 10.1007/s35746-021-0475-6.
- [E6] S. Metzger, P. Lehr, und M. Geimer, „Stress-adaptive User Interface for the Networked Agriculture“, ATZheavy Duty Worldw., Bd. 15, Nr. 1, S. 48–51, Jan. 2022, doi: 10.1007/s41321-021-0468-5.

Anhang

A1. Weitere Persona

Persona Johannes Anger [118]

Angestellter



Johannis Anger

Angestellter bei einem landwirtschaftlichen Betrieb

Alter: 28 | Arbeit: Angestellter Fahrer | Familie: Ledig | Wohnort: Ostdeutschland



Johannis ist angestellter Fahrer in einem landwirtschaftlichen Betrieb in Ostdeutschland.

Während der Erntezeit bedient Johannes hauptsächlich den Mähdrescher.

Johannis' Arbeitstag geht dann bis spät abends und ist oft 16 Std. lang, da er auch Reparaturen und die Wartung an der Maschine durchführt.

Die Zeit auf dem Mähdrescher kann bis zu 12 Std. betragen und ist meist recht entspannt, aufkommende Langeweile gehört dann auch mit dazu.

Während solchen Fahrzeiten könnte Johannes sich grundsätzlich eine zusätzliche Beschäftigung wie Telefonieren, oder die Datenüberprüfung von Wetter und Ernte vorstellen.



Ziele

„Ich will meine Arbeit gut machen und nicht abgelenkt werden“



Wünsche

„Nicht noch mehr Monitore, die Sicht auf die Schneidwerke soll frei bleiben“



Sorgen

„Ich will mich nicht von der Fahrerkabine 4.0 total kontrollieren lassen.“



Persona Thomas Geinert [118]

Lohnunternehmer



Thomas Geinert
Lohnunternehmer

Alter: 53 | Arbeit: Lohnunternehmer | Familie: Verheiratet | Wohnort: Süddeutschland



Thomas ist Lohnunternehmer und hat eine Flotte mit mehreren Maschinen in Süddeutschland.

Thomas hat mehrere angestellte Fahrer.

Seine Fahrer werden von ihm zu den verschiedenen Betrieben zum Dreschen geschickt.



Thomas selber fährt keinen Mähdrescher mehr.

Er kümmert sich stattdessen um das Management und Aufgaben wie Marketing, Einsatzplanung oder Buchhaltung.

Thomas ist es wichtig, dass die Maschinen gut laufen, seine Fahrer sich bei der Arbeit wohlfühlen und zufrieden sind und dass keine Schäden entstehen.



Ziele

„Die Maschinen sollen durchgehend gut ausgelastet sein“



Wünsche

„Lehrvideos für Anfänger, sie könnten helfen die Maschine schneller zu verstehen.“



Sorgen

„Wenn der Mähdrescher den Fahrer kontrolliert und ihm Aufgaben vorgibt, fange ich an mir Sorgen zu machen.“



A2. Weitere Teilszenarien

Ablaufschema einer Unterbrechung mit hoher Priorität

