Egling, Datum: 25.02.2026

Autoren: Dr. Roland Spies, Martin Wohlfarter

Schlussbericht zum Teilprojekt

„BEAUTIFUL – Teilprojekt Ergoneers – Teil I: Kurzbericht“

„Ergoneers GmbH“

im Projekt

„BEAUTIFUL: Belastungsoptimierte Arbeitsgestaltung für Netzleitstellen kritischer Infrastrukturen – Kognitive Ergonomie, Assistenzsysteme und Leitwarten-Simulatoren“

Förderkennzeichen: 03SF0694G

Projektlaufzeit: 01.01.2023 bis 31.12.2025

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

1.Zielsetzung des Teilvorhabens

Das Ergoneers-Teilvorhaben hatte das Ziel, eine modulare Softwareplattform zur zeitsynchronen Erfassung, Speicherung und Bereitstellung heterogener Datenströme aus unterschiedlichen Sensorsystemen, Leitwartensimulatoren und Assistenzsystemen zu konzipieren und prototypisch umzusetzen. Die Plattform sollte die Integration unterschiedlicher Sensortechnologien, die Synchronisation der Daten und die flexible Weiterverwendung für Analysezwecke ermöglichen. Damit sollte ein Beitrag zur objektiven Erfassung menschlicher Belastung sowie zur technologischen Grundlage für adaptive Assistenzsysteme im Leitwartenkontext geleistet werden.

2.Durchführung und methodisches Vorgehen

Im Projektverlauf wurden die Anforderungen an die Plattform iterativ aus den Arbeitspaketen 1 bis 3 abgeleitet. AP 1 und AP 2 dienten der Auswahl und Bewertung geeigneter Sensoren, insbesondere Eye-Tracking-Systeme, sowie der Festlegung relevanter Messgrößen für die spätere Entwicklung der Belastungsmetrik. AP 3 fokussierte die Schnittstellenkoordination zwischen Sensoren, Leitwartensimulatoren und Assistenzsystemen. In AP5 wurde die Softwareplattform als modulare, skalierbare Lösung entwickelt, einschließlich eines Agenten-Systems zur verteilten Datenerfassung, Synchronisation und Speicherung hochfrequenter Mess- und Videodaten. Anpassungen im Verlauf des Projekts, insbesondere die Implementierung eines Offline-Importmechanismus für Datenquellen ohne Echtzeitfähigkeit, wurden erfolgreich umgesetzt. AP6 umfasste die prototypische Validierung der Plattform, wobei die finale Integration der Teilsysteme aufgrund von Entwicklungsständen der einzelnen Systemkomponenten im Projektzeitrahmen nicht realisiert werden konnte.

3.Ergebnisse des Teilvorhabens

Das Teilvorhaben lieferte folgende zentrale Ergebnisse:

- Entwicklung einer skalierbaren Softwarearchitektur nach Clean-Architecture- und Domain-Driven-Design-Prinzipien
- Konzept und Umsetzung eines Agenten-Systems für Datenerfassung in verteilten Rechnersystemen für große Datenmengen und hohe Frequenzen
- Zeitsynchrone Integration heterogener Datenquellen, inklusive Offline-Import für nicht-Echtzeitdaten
- Flexibles Schnittstellen-Konzept zur Anbindung verschiedener Eye-Tracking-Systeme und Sensorshirts
- Prototypische Implementierung und Validierung der Plattform hinsichtlich Funktionalität, Synchronität und Datenintegrität

Damit wurde eine belastbare technologische Grundlage für die zukünftige Zusammenführung der im Verbundprojekt entwickelten Systeme geschaffen. Die Plattform ermöglicht die prototypische Durchführung von Messungen und Datensynchronisierung zur Belastungsanalyse und bildet die Basis für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.

4. Beitrag zum Gesamterfolg des Verbundprojekts

Das Teilvorhaben leistete einen wichtigen Beitrag zum Gesamterfolg des Verbundprojekts, indem es eine technische Infrastruktur für die Integration und Synchronisation von heterogenen Teilsysteme bereitstellt. Die von Ergoneers untersuchten und prototypisch umgesetzten Mechanismen zur flexiblen und verteilten Datenerfassung, Synchronisierung, Speicherung und Bereitstellung und die Umsetzung dieser in einer Datenplattform bilden die Grundlage für eine Zusammenführung der entwickelten Teilkompenenten Simulator, Assistenzsysteme sowie Messsensorik. Die erzielten Teilergebnisse hinsichtlich Analyse und Bewertung geeigneter Messverfahren insbesondere hinsichtlich Eye Tracking trugen zur Entwicklung einer Belastungsmetrik bei.

5. Verwertungsperspektiven

Die prototypische Softwareplattform kann in Folgeprojekten oder firmenintern weiterentwickelt und anwendungsreif gemacht werden. Technisch ist die Plattform für unterschiedliche Trainings- und Forschungsszenarien einsetzbar. Die modulare Architektur, die Unterstützung heterogener Sensoren und die Synchronisationsmechanismen bieten eine Grundlage für die Integration weiterer Analysefunktionen, KI-gestützter Analyse-Verfahren und die Echtzeit-Steuerung adaptiver Assistenzsysteme. Wirtschaftliche Verwertungen sind in der Direktanbindung an Leitstellen, Simulatorumgebungen und Trainingssystemen denkbar.

Egling, Datum: 25.02.2026

Autoren: Dr. Roland Spies, Martin Wohlfarter

Schlussbericht zum Teilprojekt

„BEAUTIFUL – Teilprojekt Ergoneers – Teil II: Eingehende Darstellung“

„Ergoneers GmbH“

im Projekt

„BEAUTIFUL: Belastungsoptimierte Arbeitsgestaltung für Netzleitstellen kritischer Infrastrukturen – Kognitive Ergonomie, Assistenzsysteme und Leitwarten-Simulatoren“

Förderkennzeichen: 03SF0694G

Projektlaufzeit: 01.01.2023 bis 31.12.2025

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1. Einordnung des Teilvorhabens in das Verbundprojekt 6
   - *1.1. Gesamtziel des Verbundprojekts 6*
   - *1.2. Rolle und Zielsetzung des Ergoneers Teilvorhabens 6*
   - *1.3. Einbindung in die Verbundstruktur 6*
2. Ausgangssituation und Stand der Technik 7
3. Arbeitsplanung des Teilvorhabens 7
   - *3.1. Arbeitspakete mit Ergoneers Beteiligung 8*
   - *3.2. Zusammenarbeit mit Verbundpartnern 8*
   - *3.3. Abweichungen vom Arbeitsplan 9*
4. Durchführung und Ergebnisse des Ergoneers Teilvorhabens 10
   - *4.1. Arbeitspaket 1 ..... 10*
   - *4.2. Arbeitspaket 2 ..... 11*
   - *4.3. Arbeitspaket 3 ..... 12*
   - *4.4. Arbeitspaket 5 ..... 13*
   - *4.5. Arbeitspaket 6 ..... 19*
5. Beitrag des Ergoneers Teilvorhabens zum Gesamtergebnis des Verbundprojekts 20
6. Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern 20
7. Verwertungsperspektiven 20
   - *7.1. Technische Verwertung 21*
   - *7.2. Wirtschaftliche Verwertung 21*
8. Erkenntnisse und Erfahrungen aus dem Teilvorhaben 21
9. Verbleib der Ergebnisse des Teilvorhabens 22
10. Zusammenfassung des Teilvorhabens 22

1. Einordnung des Teilvorhabens in das Verbundprojekt

Das Ergoneers-Teilvorhaben ist Bestandteil des Verbundvorhabens „BEAUTIFUL: Belastungsoptimierte Arbeitsgestaltung für Netzleitstellen kritischer Infrastrukturen – Kognitive Ergonomie, Assistenzsysteme und Leitwarten-Simulatoren“ (Förderkennzeichen 03SF0694G; Laufzeit 01.01.2023–31.12.2025).
Im Folgenden wird kurz beschrieben, wie sich das Ergoneers-Teilvorhaben im Gesamtverbund abgrenzt und wie es ins Gesamtprojekt integriert ist.

1.1. Gesamtziel des Verbundprojekts

Ziel des Verbundprojekts ist die Entwicklung und Validierung von Konzepten, Methoden und Systemen zur belastungsoptimierten Arbeitsgestaltung in Netzleitstellen kritischer Infrastrukturen. Dazu werden kognitions-ergonomische Gestaltungsansätze, Assistenzsysteme sowie Leitwarten-Simulatoren adressiert. Ein zentraler Bestandteil ist die objektive und situationsbezogene Erfassung relevanter Belastungs- und Kontextinformationen, um die Wirksamkeit und den Nutzen der entwickelten Maßnahmen nachvollziehbar bewerten zu können.

1.2. Rolle und Zielsetzung des Ergoneers Teilvorhabens

Ergoneers trägt im Verbundvorhaben durch die Entwicklung einer Software-Datenplattform zur Systemintegration und Datengrundlage bei. Die Zielsetzung besteht in der Bereitstellung eines flexiblen und skalierbaren Systems zur Aufnahme, Synchronisation, Speicherung und Bereitstellung von Messdaten (z. B. Eye-Tracking und Physiodaten) sowie von Ereignis- und Kontextinformationen (z.B. Systemzustand Leitwarte und Umgebungsinformationen wie Licht, Temperatur, etc.).
Ergoneers wirkt dabei begleitend bei der Auswahl und Bewertung von geeigneten Messsensoren und Messgrößen mit und trägt vor allem zur Bewertung und Auswahl der richtigen Eye-Tracking-Methodik bei.

1.3. Einbindung in die Verbundstruktur

Die Einbindung des Teilvorhabens in die Verbundstruktur erfolgt über die Schnittstellen zwischen der gewählten Messsensorik zur Erfassung der menschlichen Beanspruchung im Gesamtkontext (Simulator-/Infrastrukturkomponenten) sowie den im Verbund entwickelten Assistenzsystemen.
Im Rahmen weitere Teilprojekte sollen Belastungskennwerte zu einer aussagekräftigen Metrik fusioniert werden, ein Simulator für die Nachstellung realistischer Situationen in einer Leitwarte entwickelt werden und Assistenzsysteme angedacht werden, um das Leitstellenpersonal zu unterstützen und die Belastung im Arbeitsalltag zu reduzieren. Durch die angedachte Integration einer echtzeitfähigen Datenplattform soll als möglicher Projektausblick ermöglicht werden, ggf. online erfasste menschliche Performanceparameter in Echtzeit zur adaptiven Steuerung von Assistenzsystemen nutzbar machen zu können, um

in einem interaktiven System die menschliche Arbeitsbelastung in Abhängigkeit des System- und Umgebungszustandes zu minimieren.

2. Ausgangssituation und Stand der Technik

Ausgangssituation und Stand der Technik ist die multimodale Eye-Tracking-Analyseumgebung D-Lab von Ergoneers. Mit diesem System kann das Ergoneers Eye-Tracking- System Dikablis aufgenommen und analysiert werden und zusätzlich Videodaten, und Netzwerkströme synchron erfasst und gespeichert werden. Dieses System ist auf einen PC beschränkt und kann somit nicht beliebig flexibel mit weiteren Sensoren ergänzt werden. Außerdem ist nur eine sehr eingeschränkte Konnektivität, Synchronisierung und Echtzeitfähigkeit gegeben. Andere am Markt befindliche Systeme sind entweder herstellerspezifisch auf deren Sensoren beschränkt und nicht flexibel erweiterbar oder haben nur die Möglichkeit eines nachträglichen Imports der Daten und sind somit nicht echtzeitfähig.
Somit sind für die Zielanwendung im Verbundvorhaben drei Einschränkungen wesentlich:

- die Skalierung auf eine verteilte Labor- bzw. Simulator Umgebung mit mehreren Rechnern ist nicht gegeben
- die flexible Einbindung externer Sensoren oder Geräte über standardisierte APIs ist nicht vorhanden.
- Die Möglichkeit der Datenverteilung und Nutzung in Echtzeit ist nicht vorhanden

Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, eine skalierbare und systemoffene Plattform zu entwickeln, die heterogene Datenquellen über eine einheitliche Zeitbasis konsistent zusammenführt und sowohl für nachgelagerte Analysen als auch perspektivisch für echtzeitnahe Anwendungen geeignet ist.

3. Arbeitsplanung des Teilvorhabens

Die Arbeitsplanung des Teilvorhabens sah eine schrittweise Entwicklung der Datenplattform vor. Dabei flossen die Bewertungs- und Analyseergebnisse aus den parallelen Arbeitspaketen zur Auswahl einer geeigneten Messsensorik und geeigneter Messgrößen für das Verbundvorhaben mit in die Konzeptionsphase der Datenplattform mit ein.
Inhaltlich lag der Schwerpunkt des Ergoneers-Teilvorhabens auf Arbeitspaket 5 einschließlich Datenmodell, Persistenz, Zeitsynchronisation sowie der Anbindung der priorisierten Sensorik.
Zunächst wurden zentrale technische Risiken (Synchronisation, Speicherung, Datenhandling und Echtzeitzugriff) prototypisch untersucht. Parallel wurden die Schnittstellenbedarfe aus den verbundseitigen Datenquellen erhoben und in ein Integrationskonzept überführt, das zunächst nur Live-Anbindungen, im späteren Projektverlauf aufgrund von Zwischenergebnissen in anderen Arbeitspaketen auch Importpfade für nachträglich bereitgestellte Daten vorsieht. Darauf aufbauend erfolgte die schrittweise prototypische Umsetzung des Gesamtsystems.

3.1. Arbeitspakete mit Ergoneers Beteiligung

Ergoneers war im Verbundvorhaben in mehreren Arbeitspaketen beteiligt. Der Schwerpunkt lag inhaltlich und aufwandseitig auf der Systemintegration und der damit verbundenen Entwicklung der Datenplattform (AP 5). Ergänzende Beiträge erfolgten in den Bereichen Messtechnik und Eye-Tracking (AP 2), Infrastruktur/Schnittstellen im Simulatorumfeld (AP 3) sowie in der technischen Unterstützung der Datenerhebung bei den Messreihen (AP 6).
Die für das Teilvorhaben relevanten Beteiligungen lassen sich in der nachstehenden Tabelle zusammenfassen.

Arbeitspaket	*Unterarbeitspaket*	*Beschreibung*	*Ergoneers PM*	*Ergoneers - Beitrag*
AP 1	AP 1.1	Bewertung und Auswahl von Messverfahren	5	Bewertung der Messverfahren und Sensorik für den Anwendungskontext Abstimmung und Bewertung von Schnittstellen
	AP 2.1	Auswahl Messparameter und Entwicklung von Konzepten zur Erfassung mentaler Beanspruchung	6	Analyse und Bewertung von Sensordaten und Sensoren Konzeptionelle Anbindung Prototyoische Anbindung und Synchronisierung
	AP 2.2	Entwicklung eines Konzepts zur Verwendung von Eye Tracking zur Messung mentaler Beanspruchung und für evtl. Interaktionsmethoden	10	Analyse und Bewertung untersch. Eye Trackingkonzepte und deren Verwendbarkeit im Leitwartenkontext Prototypsiche Anbindung
AP 2	AP 2.4	Experimentalumgebung zur Validierung der Metrik	6	Technische Unterstützung bei der Datenerhebung
AP 3	AP 3.1	Betriebsfähige Infrastruktur der Leitwartensimulatoren	6	Inbetriebnahme Sensorik Integration der Hardware Datenhandling zwischen Sensoren und Simulator
	AP 5.1	Recordersoftware mit abgestimmten Schnittstellen Plattform zur zeitsynchronen Datenspeicherung Schnittstellen zu Leitwartensimulatoren	28	Auswahl von Technologien zur Synchronisierung und Speicherung Erstellen von POCs Geigenete Architekru entwickeln Schnittstellen implementieren
	AP 5.2	Anbindung von Sensoren zur Erfassung der Umgebungssituation	12	Implementierung von Schnittstellen Umsetzung der Zeitsynchronen Speicherung und Datenzugriff
AP 5	AP 5.3	Schnittsellen zu den Assistenzsystemen	2	Schnittstellenabstimmung
AP 6	AP 6.1	Referenzmessungen	2	Technischer Support beim Einsatz der Plattform

3.2. Zusammenarbeit mit Verbundpartnern

Die Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern war zunächst gegeben durch die gemeinsame Auswahl, Analyse und Bewertung möglicher Messsensorik und Kenngrößen zur Erfassung mentaler Belastung im Anwendungskontext in den Arbeitspaketen 1 und 2.
Insbesondere die Abstimmung von Datenanforderungen und Datenformaten sowie nutzbare Schnittstellen sowie die Einbettung der Datenplattform in das Gesamtsystem aus Sensorik, Simulator und Assistenzsysteme fand in enger Kooperation mit den Verbundpartnern in den jeweiligen Arbeitspaket-Besprechungen statt.
Insbesondere durch das Mitwirken und die gemeinsamen Ergebnisse in AP 2 ergab sich zu Projektmitte eine notwendige Änderung bzw. Ergänzung im Ergoneers-Teilvorhaben hinsichtlich möglicher Integrationsvarianten (Live-Anbindung gegenüber nachträglichem Import) der ausgewählten Sensorik. Die Zusammenarbeit mit den anderen Verbundpartnern beinhaltete auch die operative und technische Unterstützung bei der Datenerhebung mit Eye-Tracking-Systemen in den durchgeführten Experimenten.
Die Zusammenarbeit erfolgten je nach Bedarf in den Arbeitspaketen durch regelmäßige Abstimmungsmeetings. Die Frequenz der Abstimmung wurde den Abstimmungsthemen angepasst. Für spezielle Themenaspekte, wie z.B. die Abstimmung eines Importfiles zum

nachträglichen Import von Daten in die Datenplattform, wurden außerordentliche AP-Workshops organisiert.

3.3. Abweichungen vom Arbeitsplan

Im Projektverlauf ergaben sich gegenüber der ursprünglichen Arbeitsplanung zwei wesentliche Abweichungen, die auf das Ergoneers Teilvorhaben sowohl zeitlich als auch aufwandsseitig Einfluss hatten:

- Für mehrere Datenquellen, die gemeinsam mit Eye-Tracking-Daten synchronisiert werden sollten, war kein Echtzeitzugriff verfügbar. Deshalb musste zu Projekthalbzeit zusätzlich eine Importfunktionalität zur nachträglichen Integration solcher Daten konzipiert und prototypisch umgesetzt werden, obwohl dies im ursprünglichen Konzept nicht angedacht war.
- Bei der Entwicklung der Assistenzsysteme kam es zu Verzögerungen. Dadurch konnte eine vollständige technische Integration dieser Assistenzsysteme in die Datenplattform innerhalb des Projektzeitraums nicht realisiert werden.

Die Abweichungen und Auswirkungen werden in den jeweiligen Arbeitspaketen in Kapitel 4 detailliert erläutert. Die zusätzlich entstandenen Aufwände konnten innerhalb des Projektvolumens durch Umwidmungen abgedeckt werde.

4. Durchführung und Ergebnisse des Ergoneers Teilvorhabens

Der Kern des Ergoneers-Teilvorhabens war die Entwicklung einer Softwareplattform zur zeitsynchronen Erfassung, Speicherung und Bereitstellung heterogener Datenströme um sämtliche Teilkomponenten wie biometrische Verhaltenssensoren, den Leitwartensimulator, die Assistenzsysteme und Sensoren zur Erfassung der Umgebungssituation in ein interaktives Gesamtsystem zu integrieren.

Hierfür wurden im Projektverlauf Konzepte zur Synchronisierung, Speicherung und Datenbereitstellung analysiert und prototypisch umgesetzt. Die Umsetzung erfolgte in AP 5 als modulare und skalierbare Softwarelösung mit aufnahmeseitig verteilbaren Daten-Agenten sowie getrennten Funktionsrollen für Aufnahme und Analyse. Der Beitrag von Ergoneers in den Arbeitspaketen AP 1 bis AP 3 konzentrierte sich auf das Mitwirken bei der Analyse und Auswahl der Sensoren zur Erfassung des mentalen Beanspruchungszustandes, Erfassung von Kontext- und Umweltdaten und Systemzuständen unter Berücksichtigung der arbeitswissenschaftlichen, technischen und systemischen Randbedingungen im Projektkontext. Dies wurde seitens Ergoneers in konkrete Integrationsanforderungen an die Softwareplattform überführt und in AP 5 realisiert. In AP 6 beschränkte sich der Beitrag auf technische Unterstützung beim Einsatz der zur Verfügung gestellten Technik in den Versuchsreihen.

Im Folgenden werden die Vorgehensweise, Ergebnisse und mögliche Abweichungen vom ursprünglichen Plan je Arbeitspaket mit Ergoneers- Beteiligung vorgestellt.

4.1. Arbeitspaket 1

Für das Ergoneers-Teilvorhaben hatte AP 1 die Funktion einer inhaltlichen Grundlage für die spätere Auswahl von Sensoren und Messgrößen zur Erfassung des menschlichen Belastungszustands sowie des aktuellen Umgebungszustands. Dies war Grundlage für eine weitere Konkretisierung und Spezifizierung der Anforderungen an Sensorik, Datenströme, Schnittstellen und technische Mechanismen für die Softwareplattform.

In der Durchführung erfolgte eine gemeinsame Sammlung von Bewertungsmethoden und Messverfahren sowie die Erstellung einer theoretischen Matrix von Sensoren und Messgrößen.

Als Ergebnis lag für das Ergoneers-Teilvorhaben eine theoretische Bewertungsmatrix möglicher Sensoren und Messgrößen zur objektiven Erfassung mentaler Belastung vor. Diese wurde in AP 2 konkretisiert und mit ersten Probandentests evaluiert und dienten parallel als Rahmenanforderung und zum Brainstorming und zur Konzeptentwicklung der softwaretechnischen Grundlagen in AP 5 als Input.

4.2. Arbeitspaket 2

Der Ergoneers-Anteil in AP 2 adressierte die Unterstützung bei der arbeitswissenschaftlichen Analyse der kognitiven Belastung sowie die Begleitung der schrittweisen Eingrenzung der Messverfahren und Kenngrößen zur objektiven Erfassung dieser. Ein Schwerpunkt seitens Ergoneers lag auf der Beleuchtung der Messmethode Eye Tracking und deren Anwendbarkeit im vorliegenden Forschungskontext. Zusätzlich war Ergoneers als technische Unterstützung bei Validierungsmessungen und -auswertungen insbesondere bei der Verwendung von Eye Tracking Equipment vorgesehen.

Die Vorliegenden Sensoren und Messgrößen aus AP 1 wurden im Rahmen von AP 2 in einer Bewertungsmatrix hinsichtlich zuvor gefundener Kriterien bezüglich ihrer Anwendbarkeit im Kontext der Leitwarten und ihrer Eignung zur objektiven Erfassung menschlicher Belastung analysiert. Ein großer Beitrag seitens Ergoneers konzentrierte sich auf die Beleuchtung der Methode Eye-Tracking. Hierfür wurden die zwei grundlegenden Konzepte Remote-Eye-Tracking, bei der die Probanden keinerlei Equipment tragen müssen und von der Distanz die Augenbewegung mittels Kameras erfasst werden und die kopfgetragenen Eye Tracker, bei denen die Probanden eine Brille tragen müssen, gegenübergestellt.

Beide Konzepte weisen Vor- und Nachteile auf. Vor dem Hintergrund, dass in Leitwarten eine uneingeschränkte Bewegungsfreiheit erforderlich ist und Blickdaten auch bei der Nutzung von Zusatzgeräten sowie während der Kommunikation mit Kolleginnen und Kollegen im Raum auswertbar sein müssen, fiel die Entscheidung zugunsten der kopfgetragenen Variante. Bei dieser Variante gibt es ebenfalls Konzeptunterschiede unter den einzelnen Herstellern. Verglichen wurden hier das Ergoneers – eigene Konzept der Dikablis Glasses mit dem Konzept der Glasses 3 von Tobii. Während die Ergoneers Brille über normalen Brillen getragen werden kann und somit das Probandenkollektiv nicht einschränkt, ist die Tobii Glasses 3 aufgrund der fest verbauten Kameras in einem natürlichen Brillengestellt durch ihre damit eingeschränkten Freiheitsgrade etwas einfacher in der technischen Handhabung. Beide Konzepte wurden für den weiteren Projektverlauf verfolgt und die Verwendung in der Plattform wurde derart flexibel konzipiert, dass eine Anbindung beider Konzepte möglich ist.

Zur Messung physiologischer Größen wurde sich im Rahmen von AP 2 für die eigens von Interactive Wear konzipierten Sensorshirts entschieden, welche als Messgrößen Atmung, Hautleitwert und Herzratenvariabilität liefern sollen. Zur Erfassung der Umgebungssituation wurde eine eigens von Interactive Wear entwickelte Umweltbox, welche die Raumtemperatur und den CO2 Gehalt als Messgröße liefert ausgewählt. Zusätzlich wurde entschieden, dass als Indikator für die aktuellen Systemzustände und für die Einschätzung kritischer Systemzustände das Ereignisprotokoll aus der Leitwartensoftware von PSI dienen soll. Vom Einsatz von zusätzlichen Kameras zur Überwachung der Leitwartenumgebung wurde ab einem gewissen Zeitpunkt während des Projekts aus Datenschutzgründen im Konsortium abgesehen, da der administrative Genehmigungsaufwand für weitere Versuchsreihen in der Realumgebung zu groß gewesen wäre.

Zur Validierung der Sensitivität angedachter Messgrößen wurden in AP 2 Validierungsuntersuchungen mittels MATB-Tests durchgeführt. Ergoneers leistete technische und operative Unterstützung mit dem Dikablis Eye Tracking System und der Software D-Lab bei der Durchführung der MATB-Tests bei Interactive Wear.

Seitens Ergoneers erfolgte parallel eine technische Bewertung und Abstimmung möglicher Datenflüsse und Schnittstellen mit den Herstellern der ausgewählten Sensoren, um die Integration in die Softwareplattform zu prüfen und zu konzipieren.
Ein zentrales Ergebnis der technischen Abstimmungen mit den Sensor- und Datenlieferanten Interactive Wear und PSI war, dass eine direkte Anbindung und somit echtzeitfähige Aufnahme unmittelbar mit der von Ergoneers konzipiert Softwareplattform nicht möglich ist, da keine geeignete umsetzbare Schnittstelle welche Datenströme in Echtzeit zur Verfügung stellt angeboten werden kann.
Ein aus Ergoneers-Sicht weiteres relevantes Ergebnis aus den MATB-Tests war, dass als Eye-Tracking-Messgrößen die Veränderung der Pupillengröße sowie die Häufigkeit von Sakkaden und Fixationen in einem gewissen Zeitabschnitt sensitiv gegenüber Belastung reagieren können.
Somit lassen sich aus Sicht des Ergoneers-Teilprojekts folgende relevante Ergebnisse aus AP 2 festhalten:

- Die für die weitere Projektfortführung ausgewählten Sensoren und Datenströme, mit Ausnahme der Eye-Tracking-Daten, können keine Echtzeitdaten über gängige Schnittstellen oder Standardprotokolle bereitstellen.
- Als Eye Tracking Messgrößen sind nicht nur in Echtzeit verfügbare Rohdaten sondern auch Metriken sinnvoll, welche offline berechnet werden müssen.

Diese Befunde ca. zu Projektmitte führten zu einer für das Ergoneers-Teilvorhaben wesentlichen Konsequenz und Abweichung vom initialen Plan des Vorhabens:
Eine reine Online-Aufnahme der Daten durch die Softwareplattform war nicht für alle ausgewählten Datenquellen möglich, sodass eine konzeptionelle Erweiterung um eine Offline-Importfunktionalität erforderlich wurde, um weiterhin das Ziel verfolgen zu können, die Messdaten in einer Datenquelle zusammenzuführen, zu synchronisieren und zur Weiterverarbeitung zur Verfügung zu stellen. Diese Erweiterung stand im Konflikt zur ursprünglich vorgesehenen Echtzeitinteraktion und stellt damit eine Planabweichung dar.
Zusätzlich wurde aus der MATB-Datenanalyse abgeleitet, dass neben Eye-Tracking-Rohdaten (insbesondere Pupillengröße) berechnete Eye-Tracking-Metriken (Sakkaden/Fixationen) auf Zeitbasis als synchronisierte Daten sinnvoll sind. Da diese Metriken nicht online ausgegeben werden können, müssen sie als nachgelagerte Offline-Analysefunktion zusätzlich berechnet werden.
Die Abweichungen hinsichtlich Anforderungen und Anwendbarkeit und somit Konzeption und Umsetzung der Plattform gegenüber der ursprünglichen Vorhabensbeschreibung haben Auswirkungen auf die ursprünglichen geplanten Aufwände und deren Verteilung und betreffen maßgeblich das Arbeitspaket 5 sowie die Ergoneers Beiträge im Arbeitspaket 6. Diese werden in den dafür vorgesehenen Kapiteln näher erläutert.

4.3. Arbeitspaket 3

AP 3 umfasste die Realisierung der Leitwartensimulatoren und das Datenhandling zwischen Sensorkomponenten und Simulatorumgebungen. Ergoneers hatte in diesem Arbeitspaket überwiegend eine Schnittstellenrolle. Es erfolgte die Abstimmung der Datentypen und Schnittstellen mit den jeweiligen Projektpartnern sowie die Erstellung einer

Schnittstellenbeschreibung, einschließlich der Beschreibung der Datenströme zur Softwareplattform.
Als Ergebnis liegt eine dokumentierte Schnittstellenbeschreibung mit Beschreibung der Datenströme der Softwareplattform vor. Als Beitrag des Ergoneers-Teilvorhabens ist darüber hinaus die flexible Konzeption der Softwareplattform zu nennen, die grundsätzlich die Zusammenführung heterogener Systeme unterstützt.
Eine vollständige Zusammenführung von Softwareplattform, Simulator und Assistenzsystemen wurde im Projektzeitraum nicht realisiert. Ursache dafür sind Verzögerungen und Richtungsänderungen in allen drei Systemen im Projektverlauf. Aus Ergoneers-Sicht ist die Zusammenführung der Einzelsysteme daher als Gegenstand von Folgearbeiten zu betrachten.

4.4. Arbeitspaket 5

Arbeitspaket 5 bildet den Schwerpunkt des Ergoneers-Teilvorhabens und beinhaltet die Entwicklung der Datenplattform sowie Anbindung der ausgewählten Sensoren und Datenströme aus Leitwartensimulator und Assistenzsystemen.
Zunächst wurden die Anforderungen aus der Vorhabensbeschreibung und den ersten Ergebnissen aus den Arbeitspaketen 1 und 2 zusammengetragen. Diese bildeten die verbindliche Grundlage für die Konzeption und Implementierung der Softwareplattform in diesem Arbeitspaket. Die Auslegung hatte projektspezifische Randbedingungen zu berücksichtigen, die zu Projektbeginn eine hohe Flexibilität erforderten. Als zentrale Anforderungen galten eine Echtzeitfähigkeit für Zeitsynchronisierung und Datenzugriff, die Unterstützung mehrerer Sensoren einschließlich möglicher Mehrpersonen-Szenarien sowie die Einbindung von Sensoren zur Bewertung der Umgebungssituation und zur Erfassung menschlicher Belastung. Da Frequenzen, Schnittstellen und Datentypen initial nicht festgelegt waren, musste die Plattform so gestaltet sein, dass Sensoren und Datentypen ohne strukturelle Einschränkungen integrierbar bleiben. Diese Flexibilität wurde durch die Prinzipien Frequenzunabhängigkeit, Datenunabhängigkeit und Schnittstellenoffenheit konkretisiert. Zusätzlich war eine geeignete Methode zur Zeitsynchronisierung erforderlich, um Daten aus unterschiedlichen Quellen konsistent zusammenführen zu können. Für die Datenspeicherung war festgelegt, dass auch sehr große Datenmengen pro Aufnahme zuverlässig abgelegt werden können und dass ein synchrones Playback mit der hierfür notwendigen Zugriffsgeschwindigkeit möglich ist. Für die technische Integration externer Sensoren wurde angestrebt, Sensoren nach Möglichkeit über ihre herstellerspezifischen Programmierschnittstellen anzusprechen und nicht ausschließlich über eine standardisierte Schnittstelle zu abstrahieren, um Funktionsumfänge ohne künstliche Einschränkungen nutzbar zu machen. Für die Benutzungsoberfläche war ein UI-Konzept gefordert, das hohen Datendurchsatz unterstützt und sowohl die parallele Darstellung mehrerer Videoströme (vgl. Eye Tracking) als auch die Visualisierung von Diagrammen und geeigneten Auswertedaten ermöglicht. Als technische Randbedingung galt eine moderne, flexible und performante Entwicklungsumgebung für Windows-Systeme als erforderlich.
Die Softwareplattform ließ sich zunächst unabhängig von der vollständigen zeitlichen Verfügbarkeit aller Ergebnisse aus Arbeitspaket 2 konzipieren und entwickeln, während

Anforderungen und Zwischenergebnisse aus Arbeitspaket 2 parallel iterativ in die Ausarbeitung einflossen. Dadurch konnte ein inkrementelles Vorgehen umgesetzt werden, das Plattformentwicklung und Messkonzeptarbeit simultan vorantrieb. Im weiteren Projektverlauf ergab sich zusätzlicher Anpassungsbedarf, weil in Arbeitspaket 2 Datenströme als fachlich relevant identifiziert wurden, die technisch nicht in Echtzeit über Standardprotokolle bereitgestellt werden konnten. Daraus folgte als ergänzende Anforderung, dass die Softwareplattform auch einen nachträglichen Offline-Datenimport solcher Datenströme sowie deren Synchronisierung mit bereits aufgezeichneten Daten unterstützen muss. Diese Erweiterung war in der ursprünglichen Anforderungsliste nicht enthalten und wirkte sich auf mehrere Arbeitspakete zeitlich und inhaltlich aus.
Die architektonische Ausgestaltung basierte auf einer systematischen Anforderungsanalyse. Domain Driven Design diente als methodischer Rahmen und wurde durch einen strukturierten Prozess zur Erhebung und Präzisierung der Anforderungen ergänzt. Auf Grundlage von ISO/IEC 25010 ließen sich für die relevanten Use Cases drei zentrale Qualitätsszenarien bestimmen, nämlich Zeitverhalten in Form der Synchronität, funktionale Korrektheit in Form der Datenintegrität sowie Ressourceneffizienz bezogen auf Rechenhardware und Netzwerktechnik. Diese Qualitätsmerkmale dienten dazu, Technologieentscheidungen einzugrenzen und Kennzahlen für die Bewertung geeigneter Lösungsalternativen abzuleiten. Sie flossen insbesondere in die Grundüberlegungen zum Datenaustausch und in die daraus abgeleitete Spezifizierung des Datenprotokolls ein, wobei Videoübertragung, Datenübertragung und synchrone Übertragung anhand der definierten Kriterien bewertet wurden. Für die Zusammenführung von Daten aus unterschiedlichen Systemen galt eine konsistente Zeit-Synchronität als zwingende Voraussetzung. Darauf aufbauend wurden die erwartbaren Schnittstellen zu Partnersystemen umgesetzt und erste Übertragungstests durchgeführt, sodass eine initiale Leistungskontrolle des Zeitverhaltens und des Datenvolumens im Verhältnis zu den Qualitätsszenarien möglich war. Das festgelegte Datenformat und die Qualitätsattribute beeinflussten anschließend die Auswahl der Datenbanktechnologie, deren Eignung für die vorgesehenen Lastfälle durch Proof-of-Concept-Untersuchungen abgesichert wurde. Die daraus abgeleitete Lösung sowie deren detaillierte Beschreibung werden in den folgenden Abschnitten dargestellt.
Im Rahmen der technischen Konzeption erfolgte eine Bewertung geeigneter Programmiersprachen und eine Festlegung für die Zielanwendung. Als Zieltechnologie fiel die Wahl auf C# in Verbindung mit .NET 8.0. Für besonders performancekritische Programmteile ist eine Umsetzung in C++ vorgesehen, um die Anforderungen an Ausführungsgeschwindigkeit und Ressourceneffizienz in ausgewählten Komponenten abzusichern. Im Vergleich zu Java und JVM-basierten Alternativen erwies sich diese Kombination als besser geeignet, weil sie eine engere Integration in den Windows-UI- und Medien-Stack sowie ein konsistentes Deployment innerhalb des Zielsystems ermöglicht. Im Vergleich zu Python, das primär als interpretierte Sprache für Scripting und Datenanalyse eingesetzt wird (und sehr weit verbreitet ist), bieten .NET und ergänzende C++-Komponenten bessere Voraussetzungen für kontinuierliche, hochfrequente Datenverarbeitung und niedrige Latenzen bei gleichzeitiger Videodarstellung. Für die Benutzeroberfläche kam WPF in Kombination mit dem MVVM-Muster zum Einsatz, da damit aktives Rendering und eine

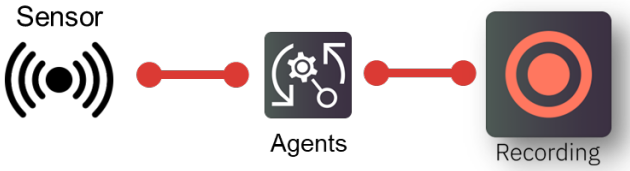
robuste Integration der Videodarstellung in einer Windows-Desktop-Anwendung zuverlässig unterstützt werden. WinUI ist das moderne UI-Framework der Windows App SDK Plattform für native Windows-Anwendungen, befand sich zum Entscheidungszeitpunkt jedoch noch nicht in einem Reifegrad, der die Anforderungen an die Videodarstellung ohne Einschränkungen abdeckte. Blazor ist ein komponentenbasiertes UI-Framework für Webanwendungen in C#, das im Browser oder serverseitig betrieben werden kann und für die vorgesehene Live-Videodarstellung im Desktop-Kontext ebenfalls nicht als ausreichend reif bewertet wurde.

Die Softwareplattform folgt einer modularen Struktur nach den Prinzipien der Clean Architecture und trennt fachliche Domäne, Anwendungslogik, technische Anbindungen und Persistenz konsequent voneinander. Diese Aufteilung passt inhaltlich sehr gut zu Domain Driven Design, weil fachliche Modelle und Regeln in der Domain-Schicht unabhängig von technischen Details bleiben und damit als stabile Grundlage für die weitere Entwicklung dienen. Die Orchestrierung der Anwendungsfälle erfolgt über MediatR als Vermittlungsschicht, wobei der CQRS-Ansatz eine klare Trennung zwischen Schreiboperationen über Commands und Leseoperationen über Queries unterstützt. Die Benutzeroberfläche ist als eigenes Modul angebunden, sodass Entscheidungen der Darstellungsschicht die fachliche Logik nicht beeinflussen und die Austauschbarkeit der Oberfläche erhalten bleibt. Eine zusätzliche Entkopplung entsteht durch den Einsatz von Dependency Injection, da Abhängigkeiten nicht innerhalb von Klassen erzeugt werden, sondern über definierte Schnittstellen von außen bereitgestellt werden und dadurch gezielt austauschbar bleiben.

Als alternative Architekturansätze wären beispielsweise eine klassische, schichtenorientierte Anwendung mit direkter Kopplung an die Datenbank oder eine UI-zentrierte Architektur mit eng verzahnter Geschäftslogik denkbar gewesen. Diese Ansätze hätten jedoch die fachliche Domäne stärker an Infrastruktur und Darstellung gebunden und damit Wartbarkeit, Testbarkeit und Erweiterbarkeit erschwert. Die gewählte Architektur gilt als modern, weil sie klare Verantwortlichkeiten etabliert, technische Adapter isoliert austauschbar macht und eine systematische Qualitätssicherung durch automatisierte Tests begünstigt, ohne die fachlichen Modelle von der konkreten technischen Umsetzung abhängig zu machen.

Die Auslegung des Speicherkonzepts orientierte sich an der Anforderung, hochfrequente Videoströme (vgl. Eye Tracking) und parallel anfallende Messdaten zuverlässig und ohne Aussetzer auf SSD-Speichermedien schreiben zu können und diese Daten anschließend für eine zeitsynchrone Wiedergabe mit ausreichender Geschwindigkeit wieder bereitzustellen. Diese Aufgabenstellung ist technisch anspruchsvoll, weil Videoaufzeichnung und Messdatenerfassung kontinuierliche Schreiblast erzeugen und bereits kurze Verzögerungen beim Schreiben oder bei der Aufbereitung zu Frameverlusten oder zu unsauberen Zeitbezügen führen können. Zusätzlich ist auch das spätere Lesen nicht trivial, wenn komprimierte Standardformate eingesetzt werden, da Formate wie MP4 typischerweise mit Schlüsselbildern arbeiten und der Zugriff auf einem beliebigen Einzel-Frame häufig erst nach dem Auffinden eines passenden Keyframes und dem anschließenden Dekodieren der folgenden Bildsequenz möglich ist. Vor diesem Hintergrund wurden unterschiedliche

Speicheransätze systematisch verglichen, darunter Datenbanklösungen, verschiedene Dateiformate und Komprimierungsstrategien, wobei Motion-JPEG und MPEG als Referenzpunkte für typische Video-Speicherstrategien dienten. Ergänzend wurden technische Verfahren wie Memory-mapped files (MMF) sowie ein eigenes Speicherkonzept bewertet und durch prototypische Tests abgesichert, um die theoretischen Annahmen zum Schreibdurchsatz, zum Lesezugriff und zur synchronen Wiedergabe unter realistischen Lastfällen zu überprüfen. Auf Basis dieser Abwägung und der prototypischen Ergebnisse wurde ein eigenes Speicher- und Datenhaltungskonzept festgelegt, bei dem Videodaten in einer Rohfassung auf dem Speichermedium abgelegt werden und ein direkter Einzelbildzugriff möglich ist. Dadurch steht die Videoinformation im Playback unmittelbar framegenau zur Verfügung, und auch die Messdaten können in einer vergleichbaren Form bereitgestellt werden. Metadaten zur Projektorganisation sowie Informationen aus der Benutzeroberfläche werden getrennt davon über den Standardweg in einer Datenbank mittels SQL und EF Core gespeichert, sodass Strukturinformationen konsistent verwaltet und zuverlässig referenziert werden können.
Erste Systemtests auf einem einzelnen Rechner zeigten, dass die verfügbare Rechenleistung von CPU und GPU bei paralleler Datenaufnahme, Verarbeitung und Darstellung schnell an Grenzen stößt. Zusätzlich erwiesen sich die beteiligten Ein- und Ausgabeschnittstellen als limitierend, da sowohl USB-Verbindungen als auch Netzwerkverbindungen über Ethernet oder WLAN bei hohen Datenraten und mehreren gleichzeitigen Datenströmen rasch überlastet sein können. Aus diesen Beobachtungen ergab sich die Anforderung, die Last nicht auf einem System zu bündeln, sondern technisch verteilen zu können.
Als Lösung wurde ein skalierbares Aufnahmekonzept festgelegt, bei dem Sensoren über ein separates Programmmodul als Agenten-System angebunden werden. Der Agent kann auf demselben Rechner wie die Softwareplattform betrieben werden oder auf einem separaten System laufen. Die Softwareplattform übernimmt die Steuerung des Agenten-Systems, während der Agent die eigentliche Aufnahme und das unmittelbare Datenhandling ausführt.

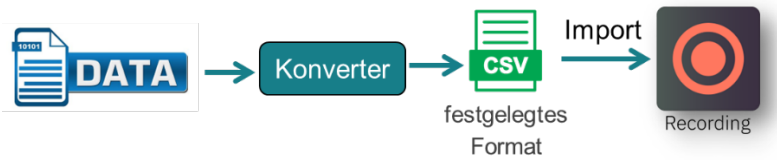


Dazu zählt insbesondere die sensorspezifische Anbindung über die jeweilige Herstellerschnittstelle sowie die lokale Speicherung der entstehenden Daten. Die Kopplung zwischen Agenten und Softwareplattform ist so ausgelegt, dass während der Aufnahme vorrangig Steuerinformationen und Live-Ansichten übertragen werden und keine vollständigen hochfrequenten Messdatenströme über das Netzwerk laufen. Nach Abschluss eines Recordings stellt der Agent die aufgezeichneten Daten der Softwareplattform zur Verfügung und überführt sie in den Projektcontainer. Ergänzend sind Maßnahmen vorgesehen, die Netzwerklast bei mehreren Live-Streams zu begrenzen und eine stabile Bilddarstellung in der Benutzeroberfläche sicherzustellen.
Für die interne Kopplung zwischen den Agenten-Systemen und der Softwareplattform erfolgte eine Bewertung mehrerer Kommunikationsansätze, die anschließend prototypisch

umgesetzt und in ersten Tests überprüft wurden. Im Zentrum stand der Vergleich von ROS2 und TCP/IP, ergänzt um MQTT und gRPC sowie weitere grundsätzlich videostreamingtaugliche Protokollansätze. Die Betrachtung zeigte, dass es für Daten- und Videoübertragung eine große Bandbreite an Protokollen gibt, die jedoch jeweils spezifische Nachteile mit sich bringen können, etwa eine erhöhte Komplexität der Anwendung, zusätzliche Serverkomponenten oder einen organisatorischen und technischen Overhead, der im Verhältnis zum Nutzen nicht mehr sinnvoll ist. ROS2 bietet ein leistungsfähiges Publish-Subscribe-Modell mit automatischer Discovery, bringt in der Praxis jedoch eine komplexere Laufzeitumgebung und einen erhöhten Integrationsaufwand mit sich. MQTT ist als leichtgewichtiges Publish-Subscribe-Protokoll gut für Sensordaten geeignet, setzt jedoch typischerweise einen Broker als zusätzliche Infrastruktur voraus. gRPC ermöglicht klar definierte Schnittstellen und effiziente Remote-Aufrufe, erhöht jedoch je nach Einsatzfall den Aufwand durch Serialisierung, Schnittstellenmanagement und Laufzeitkomponenten und ist für kontinuierliche Videoströme nicht in jedem Szenario der naheliegendste Ansatz. Für Videoströme existieren darüber hinaus spezialisierte Streamingprotokolle wie RTSP, RTP, SRT oder WebRTC, die häufig zusätzliche Pipeline-Anforderungen, Konfigurationsaufwand oder weitere Infrastrukturbausteine nach sich ziehen können. Vor diesem Hintergrund fiel die Entscheidung für TCP/IP als internes Kommunikationsprotokoll, weil sich dieser Ansatz in der Zielumgebung ohne zusätzliche Middleware betreiben lässt, keine separate Broker- oder Serverinfrastruktur erfordert und sich gleichzeitig gut überwachen und diagnostizieren lässt. TCP/IP trägt in dieser Architektur die Steuerung der Agenten-Systeme und stellt bei Bedarf die Live-View-Verbindung bereit, über die Videoströme vom Agenten zur Softwareplattform übertragen werden. Sicherheitsanforderungen lassen sich dabei über etablierte Mechanismen wie Transportverschlüsselung mittels TLS und Zugriffskontrollen umsetzen, ohne die Betriebsarchitektur unnötig zu verkomplizieren.

Synchronisierungsmechanismen wurden analysiert und mittels prototypischer Tests bewertet. Im Fokus stand die Minimierung von Latenzzeiten sowie die Fähigkeit, Synchronisierung nicht nur zwischen Datenströmen, sondern auch zwischen unterschiedlichen Systemen herzustellen. Für die zeitsynchrone Aufnahme wurde eine Spezifikation erarbeitet, die festlegt, wie Videoframes und Datenpunkte mit Zeitstempeln versehen werden, sodass sie auf einer gemeinsamen Zeitachse zusammengeführt werden können. Als Grundlage wurde eine absolute Referenzzeit definiert, die auf dem aufnehmenden System als synchronisierte Basiszeit, inklusive Datum, Uhrzeit und Zeitzone Europe Berlin verfügbar ist. Sobald ein Frame einer WebCam oder eines Eye Tracking Systems im aufnehmenden System eintrifft, wurde vorgesehen, dass dieser sofort einen Zeitstempel erhält und damit unmittelbar auf der gemeinsamen Zeitachse eingeordnet ist. Für Geräte, die eine eigene Gerätezeit verwenden, wurde festgelegt, dass während der Aufnahme in regelmäßigen Abständen Zeitmarker erzeugt werden. Jeder Marker verbindet einen bekannten Zeitpunkt der Referenzzeit mit dem dazugehörigen, am Gerät protokollierten Zeitpunkt. Optional wurde eine Round Trip Messung erfasst, um Netzwerklaufzeiten näherungsweise zu berücksichtigen. Nach Abschluss der Aufnahme wurde vorgesehen, aus den Markern eine Umrechnungsfunktion zur Korrektur von Startversatz und Drift zu bestimmen und auf alle Zeitstempel anzuwenden. Zur

Nachvollziehbarkeit wurde festgelegt, Qualitätskennzahlen zu protokollieren, um die Güte der Synchronisierung bewerten zu können.
Die Analyse der Daten wurde vom Recording und Streaming konzeptionell getrennt, sodass zwei Anwendungen aufgebaut wurden. Der Schwerpunkt dieses Projekts lag im Aufnahmebereich. Die Analyse der so aufgenommenen Rohdaten kann außerhalb des Forschungsumfangs separat weiterverfolgt werden.
Aus Sicht des Ergoneers-Teilvorhabens liegen als wesentliche Ergebnisse ein skalierbares Agenten-Konzept für die Datenaufnahme (sichere Aufnahme und Lastkontrolle), ein Synchronisierungs-Konzept der aufgenommenen Daten, eine modulare Struktur zur Integration unterschiedlicher Sensoren (am Beispiel Tobi Glasses 3 und Webcam) sowie eine modulare Softwarearchitektur nach Clean-Architecture-Prinzipien vor. Die Architektur orientiert sich an Domain Driven Design und trennt fachliche Domäne, Anwendungslogik, technische Adapter und Persistenz konsequent voneinander. Das bietet für die Plattform eine leichte Erweiterbarkeit und eine gute Wartbarkeit. Ein durchgängiger Prozess für kontinuierliche Integration unterstützt die qualitätsgesicherte Weiterentwicklung der Softwareplattform.
Für die Datenhaltung ist ein Speicherkonzept definiert, das Metadaten zur Projektorganisation in einer Projektdatenbank verwaltet und hochfrequente Mess- und Videodaten auf Seite des Agenten in einem eigenen Datenhaltungs-Konzept speichert. Nach Abschluss eines Recordings erfolgt die Überführung dieser Daten in den Projektcontainer der Softwareplattform, sodass Aufnahme und Datentransfer entkoppelt bleiben. Für den Datenaustausch stehen Export- und Importbausteine zur Verfügung, darunter ein zeitsynchroner Export von Rohdaten in einem CSV-Format sowie ein Importpfad zur nachträglichen Integration und Synchronisierung externer Datensätze. Speziell für Eye-Tracking wurden aufgrund der Anforderungen aus AP 2 zusätzlich die Berechnung zeitbasierter Metriken Sakkaden und Fixationen umgesetzt.
Die interne Kopplung zwischen Agenten-Systemen und Softwareplattform erfolgt über TCP/IP und trägt sowohl die Steuerung als auch Live-Ansichten. Eine verschlüsselte Übertragung ist implementiert. Im Projektverlauf wurde das ursprüngliche Grundkonzept um einen Offline-Import mit nachgelagerter Synchronisierung erweitert, da einzelne Datenströme nicht in Echtzeit über geeignete Standardschnittstellen bereitgestellt werden konnten. Dies betraf im Wesentlichen die Sensorshirts von Interactive Wear sowie die für AP 5.2 vorgesehene Umweltbox von Interactive Wear zur Erfassung der Umgebungsinformationen. Außerdem konnten die Ereignisse aus dem Leitwartensimulator welche aus der Leitwartensimulationssoftware von PSI kommen, nur über diesen Weg integriert werden.



Diese Erweiterung erhöhte den Umsetzungsumfang und führte zu zusätzlichem Personalaufwand, der durch Umwidmung nicht benötigter Mittel für geplante Investitionen

kompensiert wurde. Bezogen auf das Architekturgrundkonzept ergaben sich keine Abweichungen. Die wesentliche Plananpassung betraf den ergänzenden Hybridansatz aus Live-Erfassung und Offline-Import. Für einzelne Datenströme mit systembedingten Verzögerungen wurde als Integrationsweg der direkte Abruf am Quellsystem vorgesehen, anstatt eine Echtzeitweiterleitung über die Softwareplattform zu erzwingen.
Die in Arbeitspaket 5.3 vorgesehene Anbindung der entwickelten Assistenzsysteme konnte aufgrund von Verzögerungen in der technischen Umsetzung dieser nicht durchgeführt werden.

4.5. Arbeitspaket 6

AP6 adressierte Untersuchungen zur Datengenerierung unter Normalbedingungen in der Leitwarte und zur abschließenden Validierung aller zusammengeführter Teilprojektergebnisse in dem dafür entwickelten Leitwartensimulator. Ergoneers war primär als technischer Support für die Untersuchungen unter Normalbedingungen sowie für die Betreuung der entwickelten Softwareplattform im finalen Validierungsversuch vorgesehen.
In der Durchführung der Untersuchungen unter Normalbedingungen wurde entschieden alle verwendeten Teilsysteme autark mit deren eigenen Aufnahmesoftware zu betreiben, da eine zeitsynchrone Aufzeichnung aller Daten mit der Softwareplattform infolge der in AP2 beschriebenen notwendigen Konzeptänderung technisch nicht möglich war. Um die Daten mit dem neu angedachten Importer für die Datenplattform im Nachgang synchron zusammenführen zu können, wurde seitens Ergoneers ein Tool entwickelt, um mit den übrigen beteiligten Techniklieferanten ein gemeinsames Sync-Signal in den jeweiligen Datensätzen zu generieren. Dies ermöglichte eine nachträgliche Offline- Synchronisierung in der Datenplattform.
Als Ergebnis konnte nach prototypischer Fertigstellung des Importers ein Sync-File mit allen Daten der autark aufgenommenen Messgrößen erstellt werden.
Der Anforderung aus AP 2, berechnete Eye-Tracking-Metriken auf Zeitbasis bereitzustellen konnte in diesem Zuge ebenfalls realisiert werden. Das Ergebnis konnte aber in den weiteren Prozess der Metrik-Entwicklung in AP 2 aufgrund der Arbeitspaket internen Zeitplanung nicht verwendet werden. Aus Sicht des Ergoneers – Teilvorhabens kann jedoch für weiterführende Forschungen das entwickelte Verfahren zur Verfügung gestellt werden.
Abweichend zur ursprünglichen Planung in der Vorhabensbeschreibung wurde im Rahmen eines Projektworkshops unter den Konsortialpartnern (Juni 2025) entschieden, für die in AP 6 geplanten Validierungsversuche im Leitwartensimulator aufgrund des Entwicklungsstandes und der fehlenden direkten Aufnahmemöglichkeit für die meisten Sensoren, die Softwareplattform in den finalen Validierungsversuchen nicht zu verwenden und sich auf die Validierung der in AP 2 entwickelten Metrik zu fokussieren. Dies ist eine Konsequenz aus der in AP 2 beschriebenen Projektabweichung.

5. Beitrag des Ergoneers Teilvorhabens zum Gesamtergebnis des Verbundprojekts

Im Rahmen des Verbundprojekts konnte die Ergoneers GmbH wesentliche Beiträge insbesondere in den Arbeitspaketen 1 und 2 leisten, die sich mit der Auswahl und Bewertung geeigneter Sensorik sowie der Ableitung relevanter Kenngrößen für die Entwicklung der angestrebten Belastungsmetrik befassten. Ein zentraler Schwerpunkt lag hierbei auf der Identifikation und Bewertung geeigneter Eye-Tracking-Parameter, die als Grundlage für die spätere Modellierung und Bewertung kognitiver und physiologischer Beanspruchung dienen können. Durch diese systematische Analyse konnten wichtige Voraussetzungen für die Entwicklung der übergeordneten Belastungsmetrik geschaffen werden.

Ein weiterer Bestandteil des Teilvorhabens war die Entwicklung einer flexiblen Datenplattform zur synchronen Erfassung und Zusammenführung von Sensordaten. Aufgrund von Planabweichungen konnte die ursprünglich vorgesehene vollständige Integration der Plattform in das Gesamtsystem innerhalb der Projektlaufzeit nicht vollständig umgesetzt werden. Ungeachtet dessen konnte die Funktionsfähigkeit der Plattform erfolgreich demonstriert werden. Die zentrale, synchrone Datensammlung wurde prototypisch realisiert und bildet eine geeignete Basis für zukünftige Integrations- und Entwicklungsarbeiten.

Die Ergebnisse des Teilvorhabens leisten somit einen wichtigen Beitrag zur methodischen und technischen Grundlage des Gesamtvorhabens und bieten eine belastbare Ausgangsbasis für die Weiterentwicklung der im Verbund erarbeiteten Systeme.

6. Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern

Die Zusammenarbeit der Ergoneers GmbH mit den Verbundpartnern erfolgte während der gesamten Projektlaufzeit in einem konstruktiven und zielgerichteten Austausch. Schwerpunkt war die Abstimmung technischer Anforderungen, insbesondere im Hinblick auf Sensorkennwerte, Datenformate und Schnittstellen der entwickelten Plattform. Diese Abstimmungen ermöglichten es, die prototypischen Ergebnisse auf die Anforderungen des Verbundprojekts auszurichten und die technischen Rahmenbedingungen für die spätere Integration in das Gesamtsystem zu schaffen.

Aufgrund von Planabweichungen konnte die vollständige Zusammenführung aller Teilsysteme während der Projektlaufzeit nicht umgesetzt werden. Der regelmäßige fachliche Austausch trug jedoch dazu bei, die Voraussetzungen für eine zukünftige Integration der entwickelten Komponenten zu sichern und ein gemeinsames Verständnis der technischen Anforderungen im Verbund zu fördern.

7. Verwertungsperspektiven

Die im Teilvorhaben entwickelten prototypischen Ergebnisse bilden eine belastbare Grundlage für weiterführende Entwicklungsarbeiten. Eine wirtschaftliche Nutzung der Projektergebnisse im Rahmen des geförderten Vorhabens fand nicht statt. Die Plattform

dient primär der Validierung technischer Konzepte und kann über den Förderzeitraum hinaus weiterentwickelt werden.

7.1. Technische Verwertung

Perspektivisch bestehen insbesondere folgende Möglichkeiten:

- Erweiterung der Schnittstellen- und Protokollunterstützung zur Integration zusätzlicher Sensordatenquellen
- Anbindung weiterer Sensorik, z. B. Motion-Capture-Systeme
- Echtzeitnahe Analysefunktionen zur Anbindung adaptiver Assistenz- und Trainingssysteme
- Integration datengetriebener Analyseverfahren, z. B. KI-basierte Mustererkennung
- Aufnahme der im Verbund entwickelten Beanspruchungs-Metriken, sobald diese stabil vorliegen

Die Plattform bildet eine geeignete Grundlage für die weitere technische Entwicklung und Nutzung in Trainings-, Simulations- und Forschungsumgebungen.

7.2. Wirtschaftliche Verwertung

Potenzielle Anwendungen bestehen insbesondere in Trainings- und Simulationsumgebungen sowie in Kontroll- oder Leitstellenanwendungen. Mögliche Anwendergruppen umfassen darüber hinaus Betreiber von Fahrzeug-, Flug-, Schiffs- und Zugsimulatoren sowie Trainingszentren. Die wirtschaftliche Relevanz ergibt sich aus der zentralisierten Zusammenführung unterschiedlicher Sensordatenquellen und der Skalierbarkeit der Plattform. Weiterführende Entwicklungen zur Marktreife erfolgen unabhängig vom geförderten Vorhaben.

8. Erkenntnisse und Erfahrungen aus dem Teilvorhaben

Wesentliche Erkenntnisse des Teilvorhabens umfassen:

1. **Sensorik- und Kenngrößenbewertung:** Belastbare Identifikation von Eye-Tracking-Kenngrößen zur Entwicklung der Beanspruchungs-Metriken.
2. **Prototypische Plattformentwicklung:** Validierung einer zentralisierten, zeitsynchronen Datenerfassung und -zusammenführung.
3. **Flexibilität und Schnittstellen:** Notwendigkeit einer modularen Plattformarchitektur für spätere Integration zusätzlicher Sensoren.
4. **Lessons Learned zur Projektkoordination:** Frühe Abstimmung von Schnittstellenanforderungen und iterative Entwicklungsstrategie sind entscheidend für die erfolgreiche prototypische Integration.
5. **Grundlagen für Folgearbeiten:** Prototypische Umsetzung der Datensammlung bietet eine belastbare Basis für die zukünftige Zusammenführung von Teilsystemen.

Insgesamt konnte das Teilvorhaben die definierten Ziele hinsichtlich technischer Validierung und methodischer Grundlagen erreichen.

9.Verbleib der Ergebnisse des Teilvorhabens

Die im Teilvorhaben erzielten Ergebnisse verbleiben beim Unternehmen, und werden weiterhin als Forschungs- und Entwicklungsgrundlage genutzt. Die prototypische Plattform dient der Validierung technischer Konzepte und der Demonstration der Machbarkeit einer zentralisierten Datensynchronisation. Sie bildet eine belastbare Basis für Folgearbeiten und die Integration der im Verbund entwickelten Teilsysteme. Die im Teilvorhaben durchgeführten Arbeiten umfassten die Konzeption und prototypische Umsetzung der Softwareplattform sowie die Entwicklung der hierfür erforderlichen Integrations- und Synchronisationsmechanismen. Weiterführende Entwicklungen erfolgen unabhängig vom geförderten Teilvorhaben und bauen auf den im Projekt erarbeiteten technologischen Grundlagen auf.

10. Zusammenfassung des Teilvorhabens

Das Teilvorhaben der Ergoneers GmbH hat die im Projektplan definierten Ziele erfolgreich erreicht und wesentliche Grundlagen für das Gesamtverbundprojekt geschaffen. Kernpunkte des Teilvorhabens waren:

1. **Technische Beiträge:**
    - Auswahl und Bewertung geeigneter Sensorik, insbesondere Eye-Tracking-Kenngrößen, als Grundlage für die Entwicklung der Beanspruchungs-Metriken.
    - Entwicklung einer prototypischen bzw. Beta-Version einer Mess- und Analyseplattform zur zeitsynchronen Erfassung und Zusammenführung heterogener Sensordaten.
2. **Prototypische Umsetzung und Validierung:**
    - Demonstration der Funktionsfähigkeit der zentralen Datenplattform.
    - Nachweis der technischen Machbarkeit einer synchronisierten Datensammlung und -integration, die als Basis für Folgearbeiten dient.
3. **Zusammenarbeit im Verbund:**
    - Konstruktiver und zielgerichteter Austausch mit den Verbundpartnern, insbesondere in Bezug auf Schnittstellen, Datenformate und technische Anforderungen.
    - Sicherstellung einer gemeinsamen Basis für die zukünftige Integration der im Verbund entwickelten Teilsysteme.
4. **Verwertungsperspektiven:**
    - Technische Weiterentwicklung der Plattform zur Integration zusätzlicher Sensorik, datengetriebener Analyseverfahren und Beanspruchungs-Metriken.
    - Potenzielle Nutzung in Trainings-, Simulations- und Leitstellenumgebungen sowie Grundlage für Weiterentwicklung künftiger marktfähiger Anwendungen.
5. **Erkenntnisse und Lessons Learned:**
    - Notwendigkeit modularer und flexibler Plattformarchitekturen.
    - Bedeutung früher Abstimmung technischer Schnittstellen und iterativer Entwicklungsstrategien.

- Prototypische Ergebnisse bilden eine solide Basis für Folgearbeiten und zukünftige Entwicklungsaktivitäten.

6. **Verbleib der Ergebnisse:**
   - Die Ergebnisse verbleiben beim Unternehmen, und werden weiterhin für Forschungs- und Entwicklungszwecke genutzt.

Insgesamt hat das Teilvorhaben damit einen wertvollen Beitrag zum Gesamterfolg des Verbundprojekts geleistet. Die erzielten prototypischen Ergebnisse und methodischen Erkenntnisse bieten eine belastbare Grundlage für die weitere Integration, Weiterentwicklung und spätere Anwendung der im Verbund entwickelten Systeme.