

Informatorische Assistenzsysteme in der variantenreichen manuellen Montage

6

Ein Beitrag zur Steigerung von Montageproduktivität bei gleichzeitiger Reduktion von kognitiver Beanspruchung

Dominic Bläsing, Manfred Bornewasser, Sven Bendzioch, Sven Hinrichsen, Alexander Nikolenko und Philip Sehr

Zusammenfassung

Die zunehmende Komplexität von manuellen Montageprozessen wirft in Unternehmen die Frage auf, wie die damit verbundenen Anforderungen an die Verarbeitung größerer Informationsmengen und die damit einhergehenden Zuwächse an kognitiven Beanspruchungen infolge zunehmender Unsicherheit seitens der Beschäftigten zu bewältigen sind. Eine Antwort hierauf liegt in der Integration von informatorischen Assistenzsystemen in bestehende Montagesysteme. Erklärtes Ziel solcher Assistenzsysteme ist die informatorische Unterstützung der Beschäftigten in der Form, dass in der Summe eine kognitive Entlastung erfolgt, die zu weniger Zeitverlusten und Montagefehlern und damit zu einer höheren Produktqualität führt. Dies setzt voraus, dass informatorische Assistenzsysteme nach kognitiv-ergonomischen Gesichtspunkten gestaltet sind und ihr Einsatz durch eine möglichst objektive Erfassung von kognitiven Beanspruchungen vor Ort am konkreten Arbeitsplatz begleitet wird.

D. Bläsing (✉) · M. Bornewasser
Institut für Psychologie, Universität Greifswald, Greifswald, Deutschland
E-Mail: dominic.blaesing@uni-greifswald.de; bornewas@uni-greifswald.de

S. Bendzioch · S. Hinrichsen · A. Nikolenko
Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe,
Lemgo, Deutschland
E-Mail: sven.bendzioch@th-owl.de; sven.hinrichsen@th-owl.de;
alexander.nikolenko@th-owl.de

P. Sehr
Institut für industrielle Informationstechnik,
Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Lemgo, Deutschland
E-Mail: philip.sehr@th-owl.de

6.1 Ausgangssituation

Je größer die Komplexität der manuellen Montageaufgabe aus Sicht der Beschäftigten ist, desto stärker ist der Fokus auf die informatorische Gestaltung des Montagesystems zu legen. Komplexität resultiert dabei aus einer hohen Anzahl an Produkt- bzw. Teilevarianten, aus kleinen Losgrößen und aus einer hohen Dynamik von Produktänderungen und -weiterentwicklungen [44]. Neben dem Trend zur Mehrproduktmontage [10] lassen sich weitere Entwicklungen beobachten, die zu einer steigenden Komplexität führen. Zu diesen zählt die Integration zusätzlicher Funktionen in Produkte, wodurch die Anzahl zu montierender Komponenten ansteigt [7]. Zudem werden mehr und mehr mechatronische Produkte entwickelt, sodass in der Montage zusätzliche Vorschriften, etwa zum ESD-Schutz, zu beachten sind. Zusätzlich sind diese Produkte vielfach mit einer Firmware zu versehen oder umfangreichen Funktionsprüfungen zu unterziehen [5].

Empirische Untersuchungen zur Informationsbereitstellung in der manuellen Montage zeigen, dass – in Ergänzung zu Hollnagel [26] – fünf Defizitkategorien unterschieden werden können [24]: 1) Benötigte Informationen fehlen im Montagesystem. 2) Es werden unnötige Informationen dargestellt. 3) Informationen werden zum falschen Zeitpunkt und in der falschen Menge bereitgestellt. 4) Informationen sind nicht aktuell und/oder 5) nicht so aufbereitet, dass diese einfach vom Beschäftigten aufgenommen und verarbeitet werden können. Konsequenzen sind beispielsweise Aufgabenunterbrechungen, Suchvorgänge, Rücksprachen mit Konstrukteuren oder Nacharbeiten, die zu einer geringen Akzeptanz des Informationsmanagements führen. Diese Defizite in Verbindung mit neuen technologischen Möglichkeiten haben dazu geführt, dass in den letzten Jahren unterschiedliche Assistenzsystemtechnologien für die Montage entwickelt und implementiert wurden.

Die informatorische Gestaltung eines manuellen Montagesystems ist gemäß Abb. 6.1 ein Teilgebiet der ergonomischen Montagesystemgestaltung [32]. In diesem Teilgebiet wird der Frage nachgegangen, wie Informationen darzustellen sind, damit die sensorische Aufnahme und Verarbeitung dieser Informationen effektiv und effizient erfolgen können. Effizienz bedeutet, dass der Prozess der Informationsaufnahme und -verarbeitung durch den Menschen eine möglichst kurze Zeit in Anspruch nehmen soll. Unter Effektivität wird verstanden, dass die aus der Informationsverarbeitung folgenden Montagehandlungen zu dem gewünschten Ergebnis, dem fehlerfrei montierten Produkt, führen. Zugleich soll die mentale Beanspruchung der Mitarbeiter, die infolge des Trends zu einer steigenden Komplexität zugenommen hat, auf ein angemessenes Maß reduziert werden [25].

Die informatorische Montagesystemgestaltung kann gemäß Abb. 6.1 explizit über Arbeitsanweisungen oder implizit über die Gestaltung von Montagesystemelementen erfolgen [25]. Eine implizite Gestaltung liegt etwa vor, wenn Teilebehälter, Werkzeuge

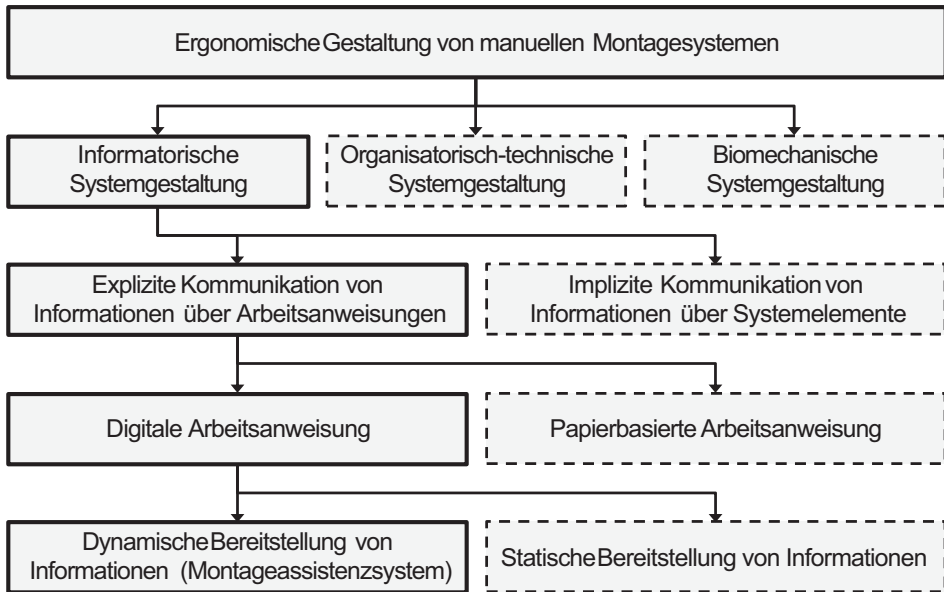


Abb. 6.1 Einordnung von Assistenzsystemen in die ergonomische Montagesystemgestaltung [25]

und Vorrichtungen mit Farbcodes versehen werden [45]. Diese Farbcodes signalisieren dem Beschäftigten beispielsweise, dass die mit einer Farbe gekennzeichneten Objekte einem Bausatz oder Produkttyp zuzuordnen sind. Auch können über die Produktgestaltung informatrische Aspekte Berücksichtigung finden. Zum Beispiel kann das Risiko einer Verwechslung von Teilen, die in ihrer Geometrie sehr ähnlich sind, während der Montage reduziert werden, indem bei der Produktgestaltung besondere taktile oder optische Merkmale berücksichtigt werden [32].

Die explizite Informationsübermittlung kann über Arbeitspapiere [46] oder in digitaler Form vorgenommen werden. Die digitale Informationsbereitstellung wiederum kann im Hinblick auf die Menge an Informationen und den Zeitpunkt der Bereitstellung einzelner Informationen statisch oder dynamisch erfolgen [25]. Eine statische Informationsbereitstellung liegt vor, wenn zu einem Produkt eine Montageanleitung – zum Beispiel in Form eines PDF-Dokuments – existiert und diese in ihrer Gesamtheit – zum Beispiel an einem Bildschirm – ausgegeben wird. Eine dynamische Informationsbereitstellung liegt vor, wenn Informationen bedarfs- und situationsgerecht dem Beschäftigten übermittelt werden. Ein technisches System zur dynamischen Bereitstellung von Informationen wird als Assistenzsystem bezeichnet. Assistenzsysteme nehmen Daten über Sensoren und Eingaben auf und verarbeiten diese, um den

Beschäftigten die richtigen Informationen („what“) zur richtigen Zeit („when“) in der gewünschten Form („how“) bereitzustellen [10, 22, 26].

Während die Automation darauf abzielt, menschliche Tätigkeiten durch Maschinen vollständig zu substituieren, kombinieren Assistenzsysteme die besonderen Fähigkeiten des Menschen mit den positiven Eigenschaften von technischen Systemen. Montageassistenzsysteme können dabei helfen, funktionale Einschränkungen des Menschen auszugleichen (Kompensation), die Gesundheit des Menschen zu erhalten (Prävention) und Lernprozesse des Menschen zu unterstützen (Befähigung) [1]. Darüber hinaus tragen informatorische Assistenzsysteme dazu bei, die Anlernzeiten von neuen Beschäftigten zu verkürzen, die Arbeitsproduktivität zu steigern, Montagefehler zu vermeiden und damit die Produktqualität zu sichern [47]. Zudem leisten informatorische Assistenzsysteme einen entscheidenden Beitrag zur Schaffung durchgängiger digitaler Wertschöpfungsketten in Betrieben. Sie steigern daher auch die Produktivität in administrativen Bereichen, da die Gestaltung und Verwaltung von Montageanleitungen vereinfacht wird [23].

Das in diesem Beitrag dargestellte Fallbeispiel beinhaltet die Montage von LKW-Aufbauten. Diese erfolgt sequenziell an einer Reihe von Arbeitsstationen. An einer Arbeitsstation sind zumeist jeweils ein oder zwei Beschäftigte tätig, die vielfach mehr als eine Stunde benötigen, um die Montageverrichtungen für ein Fahrzeug an der Station durchzuführen. Nachfolgend werden die Ergebnisse von Labor- und Felduntersuchungen zur Arbeitsstation Rahmenmontage dargestellt. Ein Rahmen besteht aus zwei Längsträgern und zumeist mehr als zehn Querträgern. Auf diesem Rahmen erfolgt an nachfolgenden Arbeitsstationen die Montage des LKW-Aufbaus.

6.2 Vorgehensweise zur Zielerreichung

Dieser Beitrag beinhaltet die Ergebnisse von Feld- und Laborstudien zur Arbeitsstation der Rahmenmontage eines Herstellers von LKW-Aufbauten. Eine Übersicht zur Struktur des Kapitels wird in Abb. 6.2 dargestellt. Im Rahmen der Feldstudie wird der Einführungs- und Gestaltungsprozess eines Montageassistenzsystems anhand des Fallbeispiels der Rahmenmontage aufgezeigt (Abschn. 6.3.1). Dieser Prozess orientiert sich dabei am REFA Standardprogramm Arbeitssystemgestaltung [38]. In einer ersten Phase wird die Ausgangssituation analysiert (Abschn. 6.3.1.1). Aufbauend auf dieser Analyse werden in einer zweiten Phase Anforderungen an das Assistenzsystem formuliert (Abschn. 6.3.1.2). In einer dritten Phase erfolgen die Grob- und Detailkonzeptionierung des Assistenzsystems (Abschn. 6.3.1.3). In einer vierten Phase wird das entwickelte Assistenzsystem testweise implementiert und evaluiert (Abschn. 6.3.1.4). In dieser Phase werden in einem iterativen Prozess Probleme identifiziert und anschließend eliminiert, sodass am Ende der Phase ein anforderungsgerecht gestaltetes Assistenzsystem vorliegt.

Ein weiteres Ziel dieses Beitrages ist es, zu dem Fallbeispiel der Montage von Fahrzeugaufbauten Laborergebnisse zur mentalen Beanspruchung darzustellen und

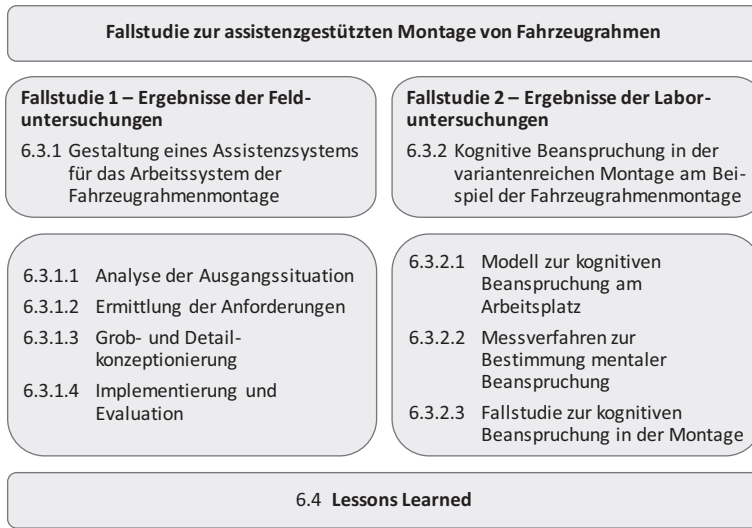


Abb. 6.2 Struktur dieses Beitrages

zu erörtern (Abschn. 6.3.2). Dabei geht es um die Frage, wie sich die informatrische Gestaltung der manuellen Montage auf die Beanspruchung der Beschäftigten auswirkt. Dazu wird zunächst kurz ein kognitionstheoretisch basiertes Modell zur mentalen Beanspruchung vorgestellt, bevor objektive Messverfahren erörtert werden. Aus den beiden Studien (Abschn. 6.3.1 und Abschn. 6.3.2) werden abschließend Gestaltungsempfehlungen für informatrische Assistenzsysteme abgeleitet (Abschn. 6.4).

6.3 Ergebnisse

6.3.1 Gestaltung eines Assistenzsystems für das Arbeitssystem der Fahrzeugrahmenmontage

6.3.1.1 Analyse der Ausgangssituation

Um die Einsatzpotenziale eines Assistenzsystems zu ermitteln, wurden Arbeits- und Zeitstudien in dem Pilotbereich des Unternehmens durchgeführt [24]. Die Montage der Fahrzeugaufbauten erfolgt in dem Unternehmen sequenziell an mehreren Arbeitsstationen. In der Regel arbeiten ein oder zwei Mitarbeiter an einer Arbeitsstation, wobei die Montagearbeiten für ein Fahrzeug an einer Station oft mehr als eine Stunde dauern. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Arbeitsstudien zu der Arbeitsstation der Rahmenmontage vorgestellt. Abb. 6.3 zeigt einen montierten Rahmen in der Draufsicht. Dieser besteht aus zwei Längsträgern und zumeist mehr als zehn Querträgern. Der Rahmen wird in einer sehr großen Anzahl an Varianten montiert. Auf Basis des montierten Rahmens erfolgt die Montage des LKW-Aufbaus an den weiteren Arbeitsstationen.

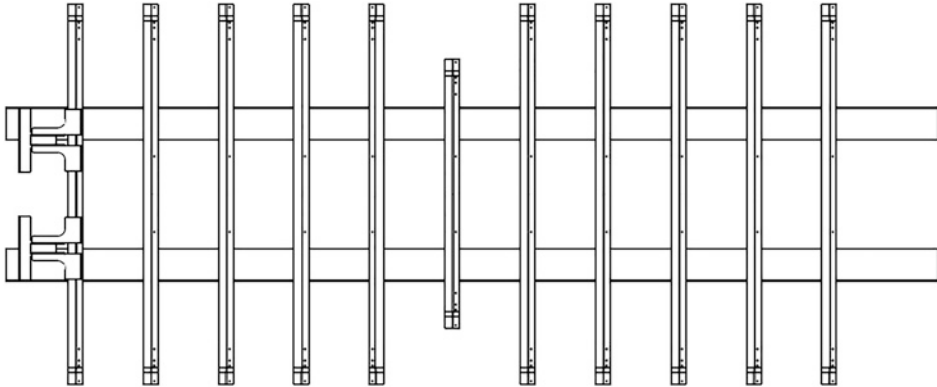


Abb. 6.3 Beispiel eines Rahmens in der Draufsicht, bestehend aus zwei Längsträgern und elf Querträgern [36]

Der Arbeitsprozess der Rahmenmontage lässt sich grob in sechs Arbeitsschritte unterteilen [24]. Der erste Schritt ist die Auftragsvorbereitung. Zunächst erkundigt sich der Mitarbeiter bei seinen Kollegen von der nachfolgenden Arbeitsstation, welcher Fertigungsauftrag als nächstes bearbeitet werden soll. Anschließend sucht er die entsprechenden Auftragspapiere heraus. Der Auftrag wird im ERP-System registriert, indem der auf den Auftragspapieren aufgedruckte Barcode gescannt wird. Der Mitarbeiter erhält dann einen Überblick über den Auftrag, indem er sich die Stücklisteninformationen auf den Auftragspapieren ansieht. Zusätzlich sucht der Mitarbeiter die entsprechende Konstruktionszeichnung aus dem Dokumentenverzeichnis auf dem Server. Er öffnet das entsprechende Dokument mit der Zeichnung, um die Abstände der einzelnen Querträger sowie weitere Auftragsinformationen (z. B. Anzahl und Lage der Befestigungswinkel, Anzahl und Position der Bohrungen) zu erhalten. Der Mitarbeiter notiert zunächst einzelne Informationen auf einem Blatt Papier. Im zweiten Schritt werden die Längsträger mit einem Plasmaschneider auf die vorgegebenen Längen gekürzt und nachbearbeitet. In einem dritten Schritt stellt der Mitarbeiter die Längsträger auf dem Montagetisch bereit und fixiert diese. In einem vierten Schritt werden mit einem Maßband und einem Stift die Befestigungspositionen der Querträger sowie die Positionen der Verstärkungsplatten und -winkel markiert. In einem fünften Schritt erfolgt die Montage durch Bereitstellen der Querträger und anderer Elemente. Die Querträger werden anhand der Markierungen ausgerichtet und mit den Längsträgern verschraubt. Im sechsten und letzten Schritt wird der fertige Rahmen zur nächsten Arbeitsstation bewegt und der Auftrag im ERP-System als „abgeschlossen“ gekennzeichnet.

Um das Potenzial für die Implementierung eines Assistenzsystems quantifizieren zu können, wurde eine Zeitstudie durchgeführt. Dazu wurde der gesamte Arbeitsablauf

in Ablaufabschnitte unterteilt. Die Ablaufabschnitte wurden dabei unterschiedlichen Ablaufarten zugeordnet. Im Ergebnis konnte festgestellt werden, dass die Grundzeit durch eine Verbesserung des Informationsmanagements um bis zu 7 min (13 %) reduziert werden kann. Verbesserungspotenziale im Hinblick auf die Bereitstellung von Informationen bestehen vor allem zu den Arbeitsschritten 1 (Auftragsvorbereitung), 4 (Ermitteln und Markieren der Befestigungspositionen) und 6 (Fertigmelden des Auftrags am Terminal). In Schritt 1 besteht das Problem darin, dass nicht sofort ersichtlich ist, welcher Auftrag als nächstes zu bearbeiten ist, da die Aufträge nicht nach Priorität oder Fälligkeit sortiert sind. Ein weiteres Problem ist, dass die Konstruktionszeichnung Daten für die gesamte Konstruktion des LKW-Aufbaus enthält, sodass der Mitarbeiter aus dieser komplexen Gesamtkonstruktionszeichnung die relevanten Daten für seine Arbeitsstation auswählen muss. Weiterhin sind einige Längsträger zu kürzen, die Längenangaben sind aus der Zeichnung zu entnehmen. Die bereitgestellte Stückliste enthält zudem auch Teilepositionen, die an der nachfolgenden Arbeitsstation montiert werden, sodass an diesem Arbeitsplatz insgesamt deutlich mehr Informationen zur Verfügung stehen als benötigt werden. Die Darstellung von unnötigen Informationen führt zu Suchaufwand und einem erhöhten Fehlerrisiko. Darüber hinaus werden die benötigten Informationen vom Beschäftigten in der Regel auf einem Blatt Papier notiert, um ein wiederholtes Sichten der Zeichnung und der Stückliste während des Montageprozesses zu vermeiden. Bei Schritt 4 besteht das Problem, dass die Informationen aus dem Modell (CAD-Zeichnung) auf das reale Arbeitsobjekt übertragen werden müssen, indem Abstände gemessen und Markierungen per Stift vorgenommen werden. Schritt 6 beinhaltet Verbesserungspotenziale, da der Beschäftigte sich erneut am Terminal anmelden muss, um über mehrere Schritte im ERP-System den Auftrag fertig zu melden.

6.3.1.2 Ermittlung der Anforderungen

Auf Basis einer umfangreichen Analyse und Bewertung der Ausgangssituation mittels Arbeits- und Zeitstudien [24] wurden Anforderungen an das Assistenzsystem ermittelt [36]. Im Hinblick auf den Arbeitsschritt 1 (Auftragsvorbereitung) soll das Assistenzsystem die Aufträge automatisch nach ihrer Priorität sortieren. Darüber hinaus ist automatisch die passende Konstruktionszeichnung aufzurufen. Dabei sollen dem Montagemitarbeiter im Hinblick auf die nachfolgenden Arbeitsschritte nur noch die relevanten Informationen so angezeigt werden, dass er diese schnell erfassen kann. In diesem Zusammenhang soll auch der Bildschirm des Computer-Terminals durch einen deutlich größeren ersetzt werden, damit alle Informationen auch aus größerer Entfernung sichtbar sind. Dadurch ist es z. B. für den Beschäftigten möglich, Abmessungen direkt vom Bildschirm abzulesen und auf den Längsträger zu übertragen. Insgesamt soll das zu entwickelnde Assistenzsystem die wahrgenommene informatrische Komplexität der Montageaufgabe senken, sodass

- die daraus resultierende kognitive Beanspruchung des Beschäftigten reduziert wird,
- die Anlernzeiten für neue Beschäftigte verkürzt werden,
- die Anzahl der Montagefehler verringert wird,
- die Arbeitsproduktivität durch Verringerung der Anzahl der Entscheidungen und Verkürzung der Such- und Orientierungszeiten gesteigert wird.

Ferner soll eine durchgängige digitale Prozesskette realisiert werden, indem die benötigten Informationen automatisch aus den CAD-Zeichnungen ausgelesen und dem Beschäftigten angezeigt werden. Darüber hinaus soll den Bedürfnissen der Beschäftigten dahingehend Rechnung getragen werden, dass die Benutzeroberfläche der Software des Assistenzsystems individuell angepasst werden kann.

6.3.1.3 Grob- und Detailkonzeptionierung

Die Gestaltung des Assistenzsystems erfolgte unter Berücksichtigung eines benutzergerichten Entwicklungsprozesses, in dem die Bedürfnisse der Mitarbeiter der Rahmenmontage im Mittelpunkt stehen [36]. Das Konzept des Assistenzsystems besteht aus drei Ebenen, die in Abb. 6.4 dargestellt sind. Die Ebene, die in direktem Kontakt mit dem Benutzer steht, ist die Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS). Über eine Benutzeroberfläche werden dem Beschäftigten alle relevanten Informationen zum Arbeitsauf-

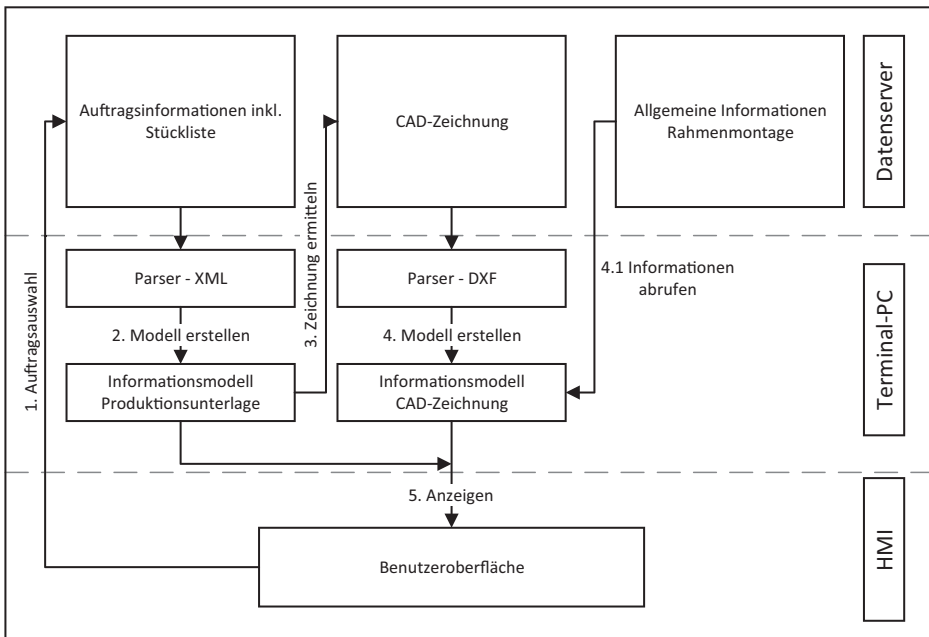


Abb. 6.4 Konzept des Assistenzsystems [36]

trag angezeigt. Auch kann der Benutzer spezielle Informationen abrufen. Die nächste Ebene ist das Back-End, in diesem Fall der Terminal-PC am Arbeitsplatz. Diese Ebene beinhaltet die eigentliche Umsetzung der Systemfunktionen. Dazu gehören alle Prozesse, die der Nutzer nicht direkt wahrnimmt, wie z. B. Netzwerkkommunikation oder Datenverarbeitung. Die dritte Ebene des Konzeptes wird als Datenebene bezeichnet. Dieses Ebene beinhaltet alle Daten, die für die Funktion des Assistenzsystems notwendig sind.

Die nummerierten Pfeile stellen die Reihenfolge der einzelnen Arbeitsschritte dar. Zunächst wählt der Mitarbeiter aus dem Dokumentenverzeichnis einen noch nicht bearbeiteten Auftrag aus (1. Auftragsauswahl). Die Informationen zu diesem Auftrag werden dann aus dem ERP-System heruntergeladen. Im ERP-System sind die Auftragsinformationen in einer XML-Datei hinterlegt, was die algorithmische Verarbeitung vereinfacht. Im zweiten Schritt wird ein Parser verwendet, um aus der XML-Datei ein Informationsmodell zu erstellen, das alle wichtigen Daten enthält. Ein Parser ist ein Programm, welches Daten analysiert, verarbeitet und in ein für die weitere Verwendung geeignetes Format umwandelt. Die Konstruktionszeichnung eines Auftrags kann aus den Daten der Auftragsinformation ermittelt und dann ebenfalls aus dem ERP-System heruntergeladen werden (3. Zeichnung ermitteln). Die Konstruktionszeichnung wird im DXF-Format bereitgestellt. Dieses Format ermöglicht den Austausch von Zeichnungsdaten zwischen verschiedenen Plattformen. Für das Informationsmodell der Konstruktionszeichnung sind zusätzliche allgemeine Informationen über die Montage des Rahmens erforderlich. Um alle relevanten Teile aus der Zeichnung filtern zu können, muss bekannt sein, welche Teile für die Rahmenmontage relevant sind. Diese Zusatzinformationen werden in Schritt 4.1 abgerufen. Aus den Zusatzinformationen und der Konstruktionszeichnung wird anschließend mittels eines Parsers ein weiteres Informationsmodell erstellt (4. Modell erstellen). Sobald beide Informationsmodelle verfügbar sind, werden sie in der Benutzeroberfläche angezeigt.

Die Benutzeroberfläche ist in zwei Bereiche gegliedert: Auftragsinformationen (A) und Konstruktionsinformationen (B). Beide Bereiche sind für verschiedene Arbeitsschritte im Montageprozess ausgelegt. Teil A ermöglicht es, die Auftragsinformationen einzusehen und den nächsten Auftrag auszuwählen. Bei diesem Schritt befindet sich der Mitarbeiter direkt am Bildschirm. Teil B besteht aus zwei Teilen und zeigt eine Ansicht des Rahmens von der Seite und von oben, mit entsprechenden Informationen, wie in Abb. 6.5 dargestellt. Im Original der Konstruktionszeichnung ist ein Rahmen immer in der Seiten- und Draufsicht dargestellt. Diese Darstellung ist den Mitarbeitern vertraut und wird daher übernommen.

Bei der Markierung der Abmessungen am Längsträger muss sich der Mitarbeiter vom Bildschirm entfernen. Für diesen Fall wird dem Mitarbeiter ein erweitertes Menü angezeigt, in dem er unter anderem den in der Konstruktionszeichnung angezeigten Detaillierungsgrad und/oder die Schriftgröße der Abmessungen individuell anpassen kann. Um den Informationsdarstellungsbereich zu vergrößern, kann das Menü nach der Konfiguration ausgeblendet werden. Darüber hinaus wurde der bisherige 15"-Bildschirm durch einen 40"-Bildschirm ersetzt.

6.3.1.4 Implementierung und Evaluation

Nach der Einführung des Assistenzsystems zu Testzwecken wurde erneut eine Zeitstudie durchgeführt [36]. Gegenstand der Zeitstudie war wiederum die Montage von zehn Rahmen. Die Ergebnisse der Zeitstudien sind in Abb. 6.6 im Vergleich zu den Daten der Ausgangssituation dargestellt. Der Prototyp des Assistenzsystems wirkt sich bisher besonders positiv auf die Arbeitsschritte 1 und 4 aus. So entfallen mit der Einführung des Assistenzsystems beispielsweise die Zeiten für den ersten Schritt weitgehend. Es ist u. a. nicht mehr erforderlich, die Auftragsdaten und Zeichnungen manuell im System zu suchen sowie Maße auf einem Blatt Papier zu notieren. Die im sechsten Schritt bestehenden Probleme konnten bisher noch nicht mit dem Assistenzsystem gelöst werden. Deshalb wird der Schritt 6 im Folgenden nicht betrachtet. Mit Einsatz des Assistenzsystems konnte die durchschnittliche Montagezeit für den ersten und vierten Schritt von 7:32 min auf 2:26 min reduziert werden. Darüber hinaus konnte auch die Streuung der Zeiten verringert werden (Abb. 6.6). Das Beispiel zeigt, dass durch den Einsatz von Assistenzsystemen die Arbeitsproduktivität deutlich gesteigert werden kann.

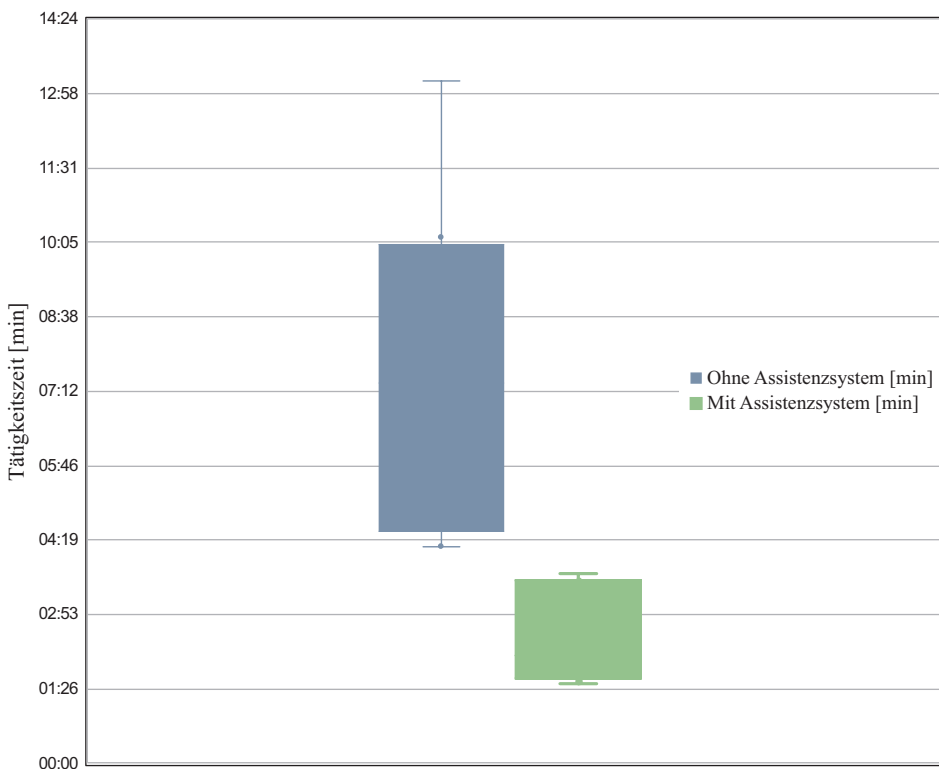


Abb. 6.6 Vergleich der Tätigkeitszeiten ohne Assistenzsystem (vorher) und mit Assistenzsystem (nachher) für die Arbeitsschritte 1 und 4 [36]

Allerdings ist kritisch anzumerken, dass der Aufwand zur Gestaltung und programmtechnischen Umsetzung des Assistenzsystems recht hoch war. In Zukunft bedarf es Lösungen, die sich einfach an die Anforderungen eines Arbeitssystems anpassen lassen, um ein besseres Verhältnis von Aufwand und Nutzen realisieren zu können.

Zur Evaluation der Benutzeroberfläche wurde die System Usability Scale (SUS) verwendet. Der Fragebogen besteht aus zehn Items, die Likert-skaliert sind. Die Skala gibt einen Überblick über subjektive Beurteilungen der Benutzerfreundlichkeit. Der SUS-Fragebogen wurde von den drei Mitarbeitern der Rahmenmontage ausgefüllt. Nach den Ergebnissen des Fragebogens ergab sich eine Usability von 77,5. Ein Richtwert für eine gute Gebrauchstauglichkeit liegt bei 68 oder höher. Somit ist die Usability der Benutzeroberfläche dieses ersten Prototyps als gut einzustufen. Daher kann festgestellt werden, dass mit dem realisierten Assistenzsystem aus Sicht der Beschäftigten bereits positive Effekte im Hinblick auf die Arbeitsgestaltung umgesetzt werden konnten. Im weiteren Verlauf des Projektes ist die Lösung weiter zu verbessern. Als Zwischenfazit des Projektes kann festgehalten werden, dass Assistenzsysteme einen wichtigen Baustein zur Digitalisierung der Produktion darstellen und sich bei richtiger Gestaltung der Systeme sowohl positive Effekte für die Beschäftigten als auch für den Betrieb ergeben.

6.3.2 Kognitive Beanspruchung in der variantenreichen Montage am Beispiel der Fahrzeugrahmenmontage

6.3.2.1 Modell zur kognitiven Beanspruchung am Arbeitsplatz

Durch die immer höhere Anzahl an Bauteilen und Produktvarianten erhöht sich die Komplexität in der Montage und damit auch die zu bewältigenden Herausforderungen bei der Arbeitssystemgestaltung (Abschn. 6.1). In diesem Zusammenhang werden die Montagetätigkeiten trotz der fortschrittlichen Automatisierungslösungen zunehmend in kleinen Losen oder kundenindividuell unter Ausnutzung der motorischen und kognitiven Ressourcen der Beschäftigten montiert [52]. Für das Unternehmen kann dies Einbußen an Produktivität bedeuten, wenn in zunehmendem Ausmaß Zeit benötigt, Fehler erzeugt und mehr Kosten für die Fehlerbeseitigung eingeplant werden müssen. Für den einzelnen Beschäftigten führt diese Entwicklung in Summe zu einer höheren kognitiven Beanspruchung, die es unter dem Aspekt der Humanorientierung von Arbeit hinsichtlich gesundheitlicher Aspekte zu beachten gilt [6]. Als Reaktion auf die zunehmende kognitive Beanspruchung, die durch verschiedene Messverfahren aufzuzeigen ist, wird die Einführung von informatorischen Assistenzsystemen empfohlen. Sie können zur Entlastung der Werker beitragen, sofern sie auf den Bedarf der Werker zugeschnitten sind. Es wird kurz ein kognitionstheoretisch basiertes Modell zur mentalen Beanspruchung vorgestellt, bevor objektive Messverfahren erörtert werden. Vor diesem Hintergrund wird eine Einzelfallstudie zur Fahrzeugrahmenmontage unter Einsatz eines Assistenzsystems präsentiert und diskutiert. Aus dieser Diskussion werden abschließend Gestaltungsempfehlungen für informatorische Assistenzsysteme abgeleitet.

Arbeitssysteme in der Montage dienen der Bearbeitung von Montageaufträgen und stellen somit Anforderungen an Beschäftigte. Diese müssen sich auf der Grundlage ihrer eigenen Ressourcen mit diesen Anforderungen auseinandersetzen. Dadurch ist ein Wechselverhältnis von externen Belastungen und internen Beanspruchungen thematisiert, welches ausführlich im Auftrags-Auseinandersetzungskonzept [20] behandelt wird und auch der revidierten Fassung der DIN EN ISO 10075-1:2018 [14] zugrunde liegt. Diese Fassung berücksichtigt stärker als die ältere Fassung aus dem Jahr 2000 insbesondere die psychischen und damit auch die mentalen Belastungen und Beanspruchungen.

Anforderungen rufen Orientierung und Beanspruchungen körperlicher und kognitiver Art seitens der Beschäftigten hervor, die diese über verschiedene Stufen der Perception, der Kognition und der Performanz hinweg verarbeiten, um sie letztlich in wertschöpfende Arbeitsleistung umzusetzen. In der angelsächsischen Literatur wird dabei auf sog. Demands und Resources verwiesen, die je nach Ausmaß der Nachfrage und der Nutzung von Ressourcen die sog. Workload oder die Inanspruchnahme der körperlichen, vor allem aber der kognitiven Ressourcen bestimmen, der ein Beschäftigter ausgesetzt ist [49, 51]. Die resultierende Workload nimmt zu, d. h. der Zugriff auf mentale Ressourcen wird stärker, wenn die Nachfrage steigt, wenn z. B. in festgelegter Zeit der zu verarbeitende Informationsumfang zunimmt, der im Arbeitsgedächtnis gespeichert und dann in performatives Handeln umgesetzt werden muss. In diesem Sinne muss sich etwa der Montagewerker merken, dass er Typ A (und nicht B oder C) montieren soll, dass bei Typ A die spezifischen Teile X, Y und Z an spezifischen Orten K, L und M des Montageobjekts mithilfe der Werkzeuge F und G anzubringen sind. Die Workload könnte weiter gesteigert werden, wenn z. B. die eingebauten Teile auch noch speziellen Einbauregeln unterworfen wären (z. B. wenn Teile in unterschiedlichen Winkeln anzubringen sind oder die Körperhaltung von Teil zu Teil variiert werden muss, um das Teil anforderungsgerecht anbringen zu können). Zudem wird jede Beanspruchung auch vom Umfang der eigenen Kompetenzen und Erfahrungen geprägt.

Umgekehrt kann die Workload gesenkt werden, wenn zusätzliche Information vermittelt wird, die die Ressourcen des Arbeitsspeichers entlasten. Das ist der Fall, wenn informatrische Assistenzsysteme etwa bei Auswahlentscheidungen zwischen verschiedenen Teilen oder Werkzeugen durch Lichtsignale (pick-by-light) Unterstützung leisten [5]. Die Anforderung an den Werker nimmt hier ab, weil er ganz gezielt z. B. die Information (durch Licht, durch Text, durch Bild mit Symbolen, durch verbale Ansprache) erhält, dass er die Teile X, Y und Z aus Behältern entnehmen muss und sie an den angezeigten Orten K, L und M montieren soll. In diesem Fall braucht der Werker kein komplexes operatives Abbild des Montageprozesses, das er dann abarbeitet, sondern er erhält zur rechten Zeit in dosierter Form die jeweilig erforderlichen Montageinstruktionen. Die bewusste Planung entfällt. So entsteht eine Entlastung des Arbeitsgedächtnisses und der einbezogenen Informationskanäle (visuell oder auditiv), zudem kann auch die Zahl der Fehler infolge von falschen Vorstellungen, Vergessen oder Irrtum reduziert werden.

Wickens [49] hat viele dieser Überlegungen in einem umfassenden theoretischen Modell zusammengefasst. Dieses Modell postuliert zunächst, dass die Informationsaufnahme und -weiterbearbeitung kapazitativ limitiert sind, was über kurz oder lang zu einem Flaschenhals in der Informationsverarbeitung führt. Hohe Workload heißt dann, dass die vorhandene Ressourcenkapazität weitgehend ausgelastet ist, was zu längerer Verarbeitungszeit und zunehmenden Reaktionszeiten führt. Jede solche mentale Beanspruchung könnte damit als Folge eines aktuellen Mehr- oder gar Überangebots an zu verarbeitender Information betrachtet werden, wodurch die kognitiven Ressourcen (z. B. zum Erkennen und Differenzieren von Reizen, zum Nachdenken darüber, wie vorzugehen ist oder zur Entscheidungsfindung) zunehmend beansprucht oder sogar überbeansprucht werden. Als gut belegt gilt die Annahme, dass mit zunehmender Komplexität von Anforderungen zunächst der kognitive Ressourcenverbrauch dynamisch ansteigt, um dann in ein gestrecktes Plateau überzugehen, welches bei weiterem Anstieg rasch mit deutlichen Leistungsabfällen einhergeht [51].

In diesem Kapazitätsmodell der Informationsverarbeitung – genauer im 4-D Multiple Resources Model – unterscheidet Wickens vier Dimensionen der Informationsverarbeitung. Differenziert wird zwischen Ressourcen und Reaktionen auf der Ebene der Verarbeitung von Information (Wahrnehmung, Verarbeitung, Reaktion), auf den Dimensionen der Art der Informationspräsentation (räumlich, verbal/linguistisch) und hinsichtlich von Wahrnehmungskanälen (auditiv, visuell). Eine letzte Dimension betrifft die visuelle Wahrnehmung, die noch einmal in fokales und ambientes oder peripheres Wahrnehmen gegliedert wird. Dabei geht Wickens davon aus, dass es nicht eine Gesamtressourcenkapazität, sondern multiple Kapazitäten je nach Art der einfließenden und genutzten Wege der zu verarbeiteten Information gibt. Bildlich gesehen bedeutet dies, dass mehrere, weitgehend unabhängige Wege in die kognitive Verarbeitung und die Performanz führen und z. B. eine Kapazitätsüberlastung im Bereich des räumlichen Wahrnehmens umgangen werden kann, wenn ein Teil der Information auf dem Weg des Sprechens und Hörens vermittelt wird. Abb. 6.7 gibt die Zusammenhänge von Anforderungen, Ressourcen und Performanz wieder: Die Workload nimmt stetig zu. Dort wo die Anforderungen die Ressourcen übersteigen, wird die Grenze der Beanspruchbarkeit überschritten und es kommt zum Abfall der Leistung. Dieser Punkt ist durch eine sog. Redline gekennzeichnet, also eine Linie, die nicht überschritten werden sollte. Eine parallel verlaufende Redline zeigt den Punkt der zu vermeidenden Unterauslastung der vorhandenen Ressourcenkapazitäten an.

Basierend auf diesem Modell können Ansätze zur Verbesserung der Informationsgestaltung am Arbeitsplatz abgeleitet werden, um die mentale Beanspruchung möglichst gering zu halten. So kann beispielsweise das Anforderungsniveau durch Variantenreduzierung, durch den Import von montagerelevanten Informationen über digitale Endgeräte oder durch die situationsgerechte Präsentation von Informationen über verschiedene Informationskanäle reduziert werden, um so eine bessere Verteilung auf unterschiedliche Ressourcen zu gewährleisten und eine Überschreitung der Kapazitätsgrenzen im Sinne einer Überauslastung zu vermeiden. Dabei sollte jedoch auch ein

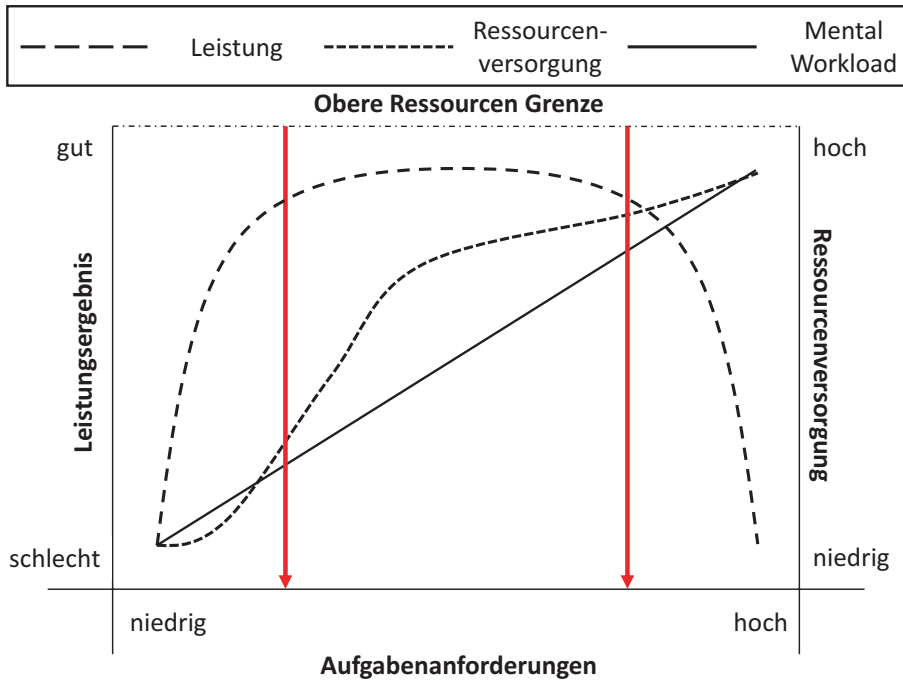


Abb. 6.7 Redlines-Modell nach Young et al. [51]

Unterschreiten im Sinne einer Unterforderung oder Unterauslastung vermieden werden. Bei Überforderung werden die Gründe oftmals in Ablenkung, geteilter Aufmerksamkeit und mangelnder Zeit für adäquate Informationsverarbeitung gesehen, bei Unterforderung hingegen liegen die Ursachen eher in zu geringer Aufmerksamkeit und mangelnder Wachsamkeit [8].

Die Komplexität der variantenreichen Montage äußert sich auf der Seite des Systems vor allem in einer höheren Informationsdichte, d. h. jedes ankommende Montageobjekt in einem Mixed-Model Assembly System [10] stellt ganz unterschiedliche Anforderungen an den Werker. Sie wirkt sich für den Beschäftigten somit in mehr Unsicherheit über die auf ihn zukommenden Anforderungen, damit verbunden in einer stärkeren Aufmerksamkeit und sodann in zahlreichen Auswahlentscheidungen und korrespondierenden Tätigkeitsdifferenzierungen aus [41, 53]. Der Werker muss somit immer wieder mit unterschiedlichen Mustern an Anforderungen rechnen und dann diverse Auswahlentscheidungen treffen, angefangen beim Entnehmen von Teilen aus verschiedenen Behältern bis hin zur Befestigung eines Teils oder einer Komponente an unterschiedlichen Orten des Montageobjekts. Jegliches Greifen, Handhaben und Fügen ist folglich immer ein Auswählen aus gegebenen Alternativen (Montagetyp A ist mit acht Teilen von 22 möglichen Teilen zu bestücken, die mit vier von sechs möglichen Werkzeugen zu verbauen sind). Entlastende kognitive Automatismen im Sinne von stereo-

typen Verarbeitungen (ohne dass neue Information zu verarbeiten oder Konzentration auf einzelne Schritte erforderlich wäre) entfallen zunehmend und werden durch bewusst kontrollierte Denk- und Entscheidungsprozesse sowie Ergebnisüberprüfungen ersetzt.

Die komplexe Variantenmontage fordert von daher mehr kognitive Ressourcen ab. Dies impliziert, dass dieser Montagetypp einmal im quantitativen Sinn stärker beanspruchend ist als die traditionelle Einproduktmontage und dass es zum Zweiten im qualitativen Sinn eine Verschiebung weg von mehr energetischen hin zu mehr informatorischen Belastungen und entsprechenden Beanspruchungen gibt. Der Mehrprodukt-Montagearbeitsplatz kann damit wie jeder Arbeitsplatz zwar als Konglomerat verschiedener Belastungsformen gelten [29], jedoch gehen die physisch-energetischen Anforderungen in der Tendenz zurück, während mental-informatorische Anteile zunehmen. Dabei gilt für beide Formen, dass je nach verfügbaren Ressourcen – als kognitive Ressourcen gelten vor allen Dingen Wissen, Intelligenz, Kompetenzen, Erfahrungen, Bewältigungsstrategien – die resultierenden Beanspruchungen ganz unterschiedlich hoch ausfallen. Wer über viel Ressourcen, Kompetenzen und Erfahrung verfügt, kann auch die zunehmende informatorische Belastung besser bewältigen und ist weniger beansprucht [34]. Die Bewältigung von Informationen kann aber auch durch organisatorische Faktoren wie Zeitdruck, Arbeitsunterbrechungen, ungünstige Arbeitsplatzgestaltungen wie große Distanzen zu Behältern oder viele Fehlteile, häufige Wechsel und Änderungen an den zu montierenden Produkten oder geringe Unterscheidbarkeit von Teilen oder Werkzeugen erschwert werden [30].

6.3.2.2 Messverfahren zur Bestimmung mentaler Beanspruchung

Die kognitive Workload beschreibt den inneren Zustand eines humanen Systems, das durch die Aufnahme von Information, die Verarbeitung dieser Information und die Initiierung von kontrollierten Handlungen geprägt ist. In diesem Sinne stehen Workload oder Cognitive Load für ein multidimensionales Konstrukt, „representing the load imposed on the working memory during performance of a cognitive task“ [9]. Diese knappe Beschreibung verdeutlicht drei Aspekte: Es ist ein Konstrukt, es hat verschiedene Dimensionen und es entsteht durch eine Inanspruchnahme der kognitiven Ressourcen bei der Durchführung einer Aufgabe.

- **Konstrukt:** Konstrukte sind gedankliche, modellhafte Vorstellungen von nicht beobachtbaren Prozessen oder Mechanismen z. B. im Inneren eines Systems. Man kann sie nicht als eine konkrete Substanz z. B. im Gehirn identifizieren oder als konkreten Prozess empirisch beobachten, man kann auch nicht exakt feststellen, was in einen solchen Verarbeitungsmechanismus hineinfließt und nach interner Bearbeitung wieder hinauskommt.
- **Multidimensional:** Workload stellt keine in sich abgeschlossene Einheit dar. Workload gilt vielmehr als multidimensionales Konstrukt oder ein Komplex von verschiedenen Aspekten, die einzeln oder im Verbund betrachtet werden können. So könnte man Workload als die Summe aller kognitiven Anstrengungen und Leistungen von der

sensorischen Rezeption bis hin zur Auslösung von motorischen Reaktionen der Muskeln bezogen auf eine spezifische Anforderung beschreiben.

- Kognitive Ressourcen bei der Durchführung kognitiver Aufgaben: Ressourcen gelten in der Regel als knappe und nur begrenzt verfügbare Mittel, um Ziele zu erreichen oder Aufgaben zu bewältigen. Dies gilt auch für kognitive Ressourcen: Wissen, Intelligenz und Kompetenz sind begrenzt, die Aufnahme von Information und die Verarbeitung im Arbeitsgedächtnis gelten als begrenzt. Leichte Aufgaben binden wenig Ressourcen, komplexe Aufgaben viele Ressourcen. Es gilt, die Workload im Kontext von Arbeit so zu gestalten, dass die Ressourcen eingebracht werden können, dabei aber Underload und Overload vermieden werden.

Damit ist auch klar, dass mentale Leistung und Beanspruchung, die zu einem Zustand kognitiver Beanspruchung oder Load führt, nicht direkt beobachtbar und messbar ist. Wir können diesen Zustand nicht mit einem einfach zu handhabenden Instrument messen und ihn mit einer einfachen Zahl kennzeichnen, sondern müssen uns auf die Suche nach verschiedenen geeigneten Indikatoren machen. Die kognitive Beanspruchung muss ähnlich wie die Kompetenz aus beobachtbaren Indikatoren erschlossen werden [9, 37]. Dabei reicht oftmals auch nicht nur ein Indikator [18, 33].

Operationalisiert und gemessen werden Indikatoren der mentalen Beanspruchung meist über leistungsbezogene Indizes (z. B. über die Reaktionsgeschwindigkeit, die totale oder partielle Montagezeit und verschiedene Qualitätsparameter wie die Genauigkeit der Verarbeitung), über physiologische Parameter (z. B. Herzfrequenzvariabilität), über subjektive Einschätzungen (z. B. mittels Fragebögen zum selbst erlebten Maß an Beanspruchung) oder über verhaltensbezogene Parameter (z. B. Anzahl von Interaktionen mit Assistenzsystemen, die Kopf- und Augenbewegungen oder das Maus- und Tastaturtracking).

Experimentelle Untersuchungen zeigen, dass leistungsbezogene Maße eine hohe Validität für sich beanspruchen können. Mit zunehmender Anzahl an Handlungsalternativen (und damit der Erhöhung des Informationsgehalts eines Stimulus) steigen die Reaktionszeiten und die Montagezeiten, was bedeutet, dass mehr Informationen verarbeitet werden müssen und mehr Ressourcen benötigt werden. Vergleichbare Befunde berichtet Liu [31] für die Informationsverarbeitung in Netzwerken. Parallel dazu nehmen aber auch Verhaltensmaße wie die Fehlerzahl und damit zusammenhängend die Qualitätskosten zu [41]. Kritisch zu sehen sind bei diesen Verfahren, dass gerade vor Ort in Betrieben solche Daten nicht unmittelbar vorliegen, dass sie zumeist aus einer spezifischen Strategie heraus erfasst und auch wieder von Personen ausgewertet werden, die spezifische Interessen verfolgen.

Fragebogenverfahren wie der NASA-TLX mit seinen sechs Beanspruchungsdimensionen [21] erfreuen sich aufgrund der einfachen Erfassungsmöglichkeit großer Beliebtheit. Mit ihnen erzielte Befunde korrelieren in der Regel auch mit leistungsbezogenen Maßen und sind in der Lage, zwischen unterschiedlichen Ausprägungen mentaler Beanspruchung zu differenzieren [4]. Je nach Fragestellung bietet es sich an,

mehrere Verfahren gleichzeitig anzuwenden [40]. Belastbare Richtwerte für Unter- oder Überlastung existieren dabei in der Regel nicht, sodass eine gewisse Subjektivität bei der Bewertung nicht auszuschließen ist. Colle und Reid [11] konnten so für den SWAT (Subjective Workload Assessment Technique) in Labor und Feld einen Grenzwert in Höhe von 40 (± 10) Punkten für Überlastung auf einer Skala mit maximal 100 Punkten bestimmen. Auch aufwendige Verfahren wie das European Assembly Workload Sheet [42] liefern letztlich eher subjektiv geprägte Werte. Kritisch hinsichtlich subjektiver Verfahren wird auch immer wieder die relativ geringe Interrater-Übereinstimmung, die Gefahr der sozial erwünschten Darstellung der Beanspruchung durch die Betroffenen selbst sowie die Verzerrung durch eine nur nachträgliche Erfassung diskutiert [6].

Objektive physiologische Messverfahren bieten die Möglichkeit der non-invasiven Messung verschiedener Beanspruchungsparameter direkt am Individuum und am konkreten Arbeitsplatz während der Arbeit. Vorrangig wird hierbei versucht, die Aktivität des autonomen und zentralen Nervensystems zu quantifizieren, um Zustände hoher Workload zu identifizieren. Dabei eröffnen gerade die physiologischen Messverfahren die Möglichkeit der kontinuierlichen Messwerterfassung auch am Arbeitsort, wobei es eine Utopie wäre zu glauben, dass man Beanspruchung umfassend und situationübergreifend nur über einen Indikator erfassen kann. Nur Kombinationen liefern plausible Ausprägungsmuster von Beanspruchung [9, 33]. Die Möglichkeiten zur Messung vor Ort reichen über verschiedene mobile Verfahren wie EKG, EEG oder EMG, über die Messung der Augenaktivität bis hin zu bildgebenden Verfahren durch fNIRS-Instrumente (funktionelle Nahinfrarotspektroskopie) [39]. Kritisch zu sehen ist bei der Messung objektiver physiologischer Daten, dass es zu Überlagerungseffekten der mentalen Beanspruchung durch physische bzw. motorische Beanspruchung kommen kann [12]. Als problematisch gilt zudem, dass durch Arbeitsbewegungen der stabile Sitz der Messinstrumente gefährdet ist.

Die Messung mentaler Beanspruchung infolge zunehmender Komplexität erweist sich gerade in der Praxis generell als problematisch, zumal Komplexität etwa im Sinne der von Samy und ElMaraghy [41] betonten Kriterien z. B. in der Gemeinsamen Deutschen Arbeitsschutzstrategie [17] keine Erwähnung findet. Komplexität ist damit noch gar nicht als eigenständiger Belastungsfaktor erkannt. Dies dürfte seinen zentralen Grund darin haben, dass Arbeit immer noch vornehmlich im Kontext energetischer Belastung konzipiert wird. So wird etwa von Metz und Rothe [35] der Belastungsfaktor „Arbeitsinhalt“ mit den Merkmalen der Vollständigkeit, der Variabilität oder des Handlungsspielraums immer nur danach bewertet, ob neben der körperlichen Arbeit auch z. B. planende, denkende oder selbstbestimmende Elemente gegeben sind. Diese Elemente implizieren dann sehr wohl mentale Leistungen oder „Arbeitsbelastungen des Gehirns oder Geistes“ [39], es werden aber keine Aussagen zu Form und Umfang dieser Leistung oder gar zur Überschreitung von möglichen Leistungsgrenzen gemacht. Grenzen zur informatorischen Überbeanspruchung etwa in der Variantenmontage existieren noch nicht. Betriebliche Gefährdungsbeurteilungen reichen von daher oftmals auch nicht an mentale Beanspruchungen bei komplexer inhaltlicher Tätigkeit heran. Vielmehr sind

sie allein auf die bekannten, aus der Logistik stammenden Aspekte des Informationsmanagements beschränkt (so erwähnt die GDA nur Merkmale wie vollständig, zeitgerecht, sicher wahrnehmbar und relevant, liefert aber keine expliziten Hinweise auf zu verarbeitende Informationsmengen oder die Anzahl der zu treffenden Entscheidungen zwischen unterschiedlichen Varianten).

6.3.2.3 Fallstudie zur kognitiven Beanspruchung in der Fahrzeugrahmen

Komplexität als Belastungsfaktor wird in der Praxis vornehmlich über subjektive Einschätzungen mittels Fragebogen erfasst. Erst in jüngster Zeit wird vermehrt der Versuch unternommen, physiologische Indikatoren der Beanspruchung – etwa die Herzfrequenzvariabilität (HRV) oder die Pupillendilatation – auch in Unternehmen näher ins Auge zu fassen [9]. Das hat vornehmlich mit dem Aufkommen mobiler und tragbarer Messarrangements zu tun, die auch kontinuierlich am konkreten Arbeitsplatz zum Einsatz kommen können. Auf diese Weise lassen sich z. B. anforderungsbezogene Beanspruchungsspitzen in Montageprozessen erfassen, Verteilungen der Beanspruchung über unterschiedliche Varianten ermitteln oder die Häufigkeit der Orientierung an Informationsvorgaben aufzeichnen. Durch die Messung z. B. neurophysiologischer oder kardiovaskulärer Prozesse lassen sich Wahrnehmung und Informationsverarbeitung relativ direkt erfassen, wodurch Verzerrungen infolge von subjektiven Einschätzungen oder erst nachträglichen Beurteilungen vermieden werden. Im Forschungsprojekt Montexas4.0 werden neben physiologischen (HRV) und okulomotorischen Maßen (Pupillendilatation) zusätzlich auch Skalen zur subjektiven Einschätzung von Beanspruchungen eingesetzt (NASA-TLX).

In einem ersten Schritt wurden in einer Feldstudie – sie wurde in Abschn. 6.3.2 hinsichtlich der Einführung von Assistenzsystem näher beschrieben – auf der Basis der dargestellten Annahmen zur variantenreichen Montage die mentalen Beanspruchungen im Bereich der sog. Rahmenmontage analysiert und ein Aktivitätenprofil erstellt. Parallel dazu erfolgte eine Erfassung physiologischer Parameter der Herzaktivität – speziell der HRV, also der Abstände zwischen einzelnen Schlägen, die durch die sog. R-Zacken symbolisiert werden – mittels dreier Elektroden mit einer Abtastrate von 256 Hz. Ferner wurden Bewegungsparameter über Inertialsensoren erfasst. Die Auswertung der aufgezeigten Herzaktivitäten erfolgte mittels des sog. rrHRV-Maßes, welches die prozentualen zeitlichen Unterschiede aufeinander folgender RR-Intervalle beschreibt [2, 48]. Im Ergebnis deuteten sich auffällige Differenzen in den physiologischen Parametern hinsichtlich einzelner Montageaktivitäten an.

Die konkreten Durchführungsbedingungen im Feld erwiesen sich jedoch als unzureichend, um verallgemeinerbare Aussagen machen und entsprechende Annahmen prüfen zu können. Dies lag vor allem an einer zu geringen Stichprobengröße, internen Abläufen, die eine Manipulation unterschiedlicher Komplexitätsarten unmöglich machten und an vielfältigen Problemen bei der Vermeidung von Störgrößen wie Lärm, Unterbrechungen durch Kollegen und fehlenden Instruktionen vor Ort. Von daher wurde

im Labor eine Rekonstruktion der Montageaufbauten im Maßstab von ca. 1:4 installiert. In einer ersten Laborstudie wurden Probanden mit vergleichbaren Montageaufgaben konfrontiert (Anordnen von Querträgern, Vermessen von Abständen, Auswahl von Werkzeugen, Auswahl von Schrauben, etc.), bei denen je nach aufsteigendem Komplexitätsgrad unterschiedlich viele Auswahlentscheidungen hinsichtlich verschiedener Merkmale der zu montierenden Träger, ihrer Anordnung und ihrer Befestigung an einem vorgegebenen Rahmen unter Zeitdruck zu treffen sind. Angenommen wird, dass die Workload entsprechend des Komplexitätsgrades zunimmt, dass die Herzfrequenzvariabilität abnimmt – dies gilt als Zeichen zunehmender Beanspruchung – und die Zeitdauer der Montage ansteigt. Die Workload wurde zusätzlich mittels des Parameters der Pupillendilatation erfasst. Dieser Parameter bringt zum Ausdruck, wie sehr sich die Pupille angesichts schwerer und damit beanspruchender kognitiver Aufgaben erweitert.

Zudem wurden am Arbeitsplatz drei verschiedene informatorische Assistenzsysteme zum Einsatz gebracht, die inhaltlich vergleichbare Instruktionen an die Probanden in der Rahmenmontage vermittelten: Als Instruktionsmedien kamen dabei Papier, Tablet-Computer und eine AR-Brille (Vuzix M300 mit Software der AMA Xpert Eye GmbH) zum Einsatz. Es wurde erwartet, dass zwischen den Assistenzsystemen Unterschiede bei der Reduktion der Workload auftreten, dass sich diese aber insbesondere bei hochkomplexen Anforderungen zeigen.

Laboruntersuchungen eignen sich zwar perfekt dazu, Störgrößen auszuschließen und systematisch verschiedene Variablen wie Komplexität des zu montierenden Produktes oder das verwendete Assistenzsystem variieren zu lassen, allerdings steht man gerade im Bereich der Montage vor dem Problem, dass man in der Regel mit ungelerten studentischen Probanden arbeitet, die eine solche Aufgabe zum ersten Mal erledigen. Für diese stellt eine Rahmenmontage „völliges Neuland“ dar. Angesichts dieses Umstands erfolgte eine deutliche Umgestaltung der Arbeitsinstruktionen, die diesem Umstand Rechnung trug. Dabei wurden alle für die Montage relevanten Informationen nicht länger nur in einer Abbildung angezeigt, sondern über vier Instruktionsschritte verteilt. Im ersten Schritt wurden die unterschiedlichen Farben der Querträger, im zweiten Schritt die beiden Ausrichtungsarten der Querträger, im dritten Schritt die möglichen Abstände der Querträger zueinander und im vierten Schritt die Farbe der zu verbauenden Schrauben expliziert (siehe Abb. 6.8 rechts). Insgesamt mussten die Probanden sechs Modelle in aufsteigender Komplexität montieren. Der Anstieg der Komplexität wurde durch eine systematische Steigerung der bei der Montage zu verarbeitenden Informationen erreicht. Operationalisiert wurde dies durch die Erhöhung der zu beachtenden Varianten- und Farbvielfalt bei Ausrichtung und Gestaltung von Abständen der Querträgern und der zu berücksichtigenden Farbgebung der Schrauben.

Um ein Gefühl von Arbeitsdruck zu erzeugen, wurde zeitgleich versucht, eine zusätzliche Belastungsquelle zu eröffnen. Zu diesem Zweck wurde jedem Probanden seine aktuelle Bauzeit eingeblendet und die damit verbundene Position in einer fiktiven Rangordnung auf einem sog. Leaderboard angezeigt. Für die ersten zehn Plätze wurden Lose in Aussicht gestellt, mit denen der Proband an einer Tombola zum Gewinn von Gutscheinen

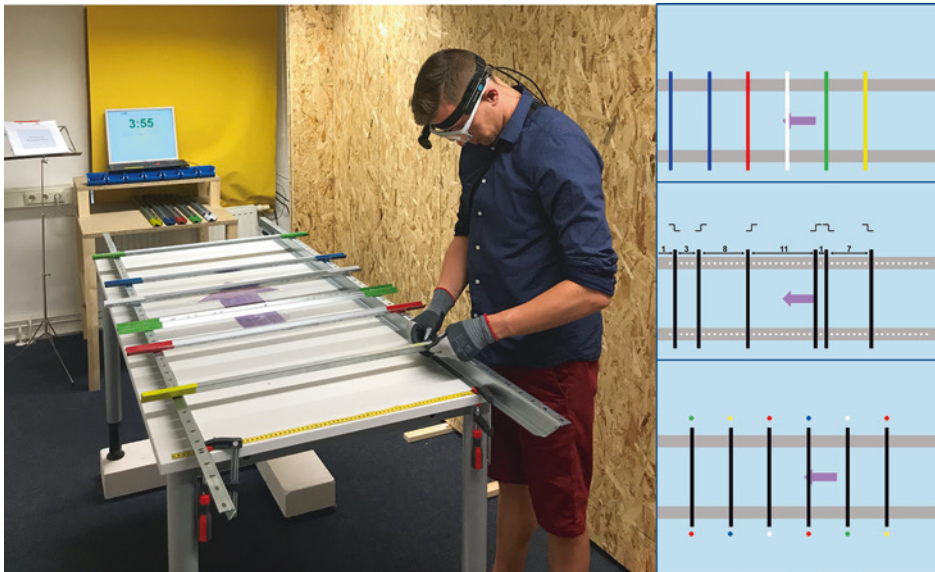


Abb. 6.8 Blick ins Labor und Darstellung der bildlichen Anleitung zur Montage eines Hilfsrahmens mit Querträgern in unterschiedlichen Farben, Ausrichtungen, Abständen und zugeordneten Schrauben

in verschiedener Höhe teilnehmen konnte. Das Absinken innerhalb des Leaderboards wurde durch ein akkustisches Signal angezeigt. In Vorversuchen zeigte sich, dass diese Manipulation tatsächlich zu mehr Motivation bei der Montagearbeit beitrug.

Im Zentrum der Messung von objektiven physiologischen Indikatoren zur Feststellung körperlicher und kognitiver Beanspruchung stand die Messung mittels EKG und Eye Tracking mit den daraus abgeleiteten Maßen der Herzfrequenz (HR) und der Herzfrequenzvariabilität (HRV) sowie der Pupillendilatation und der Fixationsdauer. Beanspruchungen führen zu einer Steigerung der Herzfrequenz und zu einem Absinken der Herzfrequenzvariabilität. Im Eye-Tracking zeigen sich deutliche Erweiterungen der Pupille sowie in der Regel auch längere Fixationsdauern. Ergänzend dazu zeichnete das verwendete Holter-EKG System (eMotion Faros 180°) Bewegungsaktivitäten der Probanden auf, welche ebenfalls in die Analyse mit einbezogen wurden. Abb. 6.9 zeigt typische Rohdatenverläufe: EKG-Signale mit deutlich zu identifizierenden R-Zacken und variierenden Abständen zwischen den R-Zacken, einen Kurvenverlauf mit den Pupillendurchmessern über einen Zeitverlauf, wobei größere Werte höhere kognitive Beanspruchungen anzeigen, sowie Bewegungsdaten, die körperliche Veränderungen im Raum wiedergeben. Die Bewegungsdaten können wichtige Hinweise liefern, ob Veränderungen im EKG-Signal eher auf mentale oder auf körperliche Beanspruchungen zurückgehen. Zwischen beiden besteht häufig ein Maskierungsverhältnis, d. h. die auf-

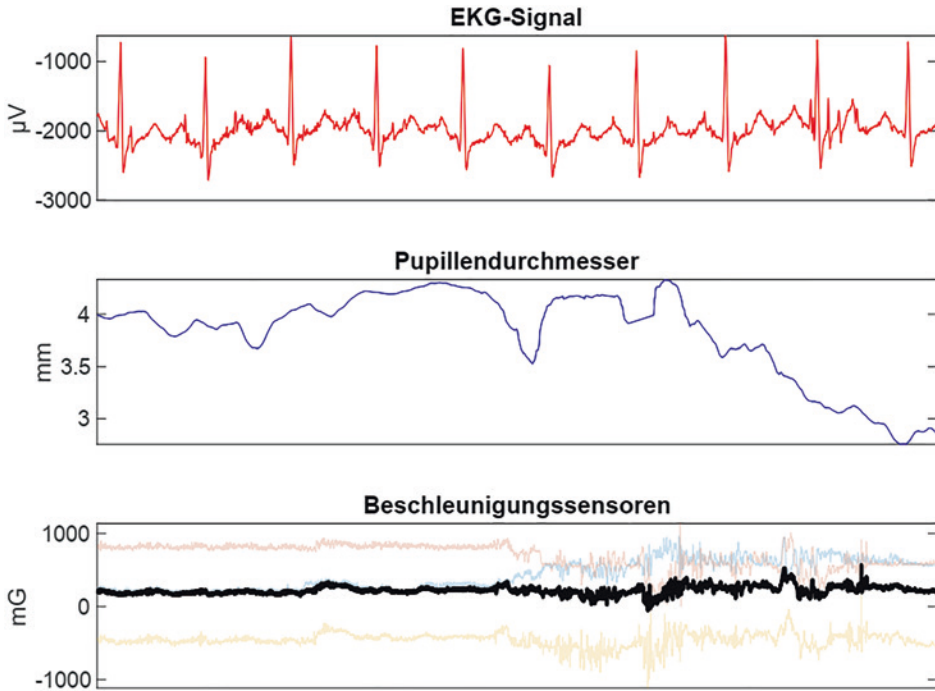


Abb. 6.9 Rohdaten der verwendeten Messinstrumente

gezeigten körperlichen Beanspruchungen verdecken die eingebetteten kognitiven Beanspruchungen [12]. Dies hängt auch damit zusammen, dass beide einbezogenen organischen Systeme, Auge und Herz, durch das autonome Nervensystem gesteuert werden.

Die Entscheidung für die Erfassung der Beanspruchung als Kombination von EKG, Eye Tracking und Bewegung erfolgte dabei unter Berücksichtigung der zu erwartenden Abläufe im Versuch. Die Montagedurchführung verlangte von den Probanden eine hohe Dynamik. Daher war eine Veränderung der Herzschlagfrequenz allein auf Grundlage physischer Bewegung nicht zu vermeiden. Durch die parallele Erfassung der Bewegungsintensität auf allen drei Raumachsen (in Abb. 6.9 bunt im Hintergrund und als gemittelter Wert im Vordergrund) kann zumindest versucht werden, solche Maskierungen besser zu entdecken. Schwankungen des Pupillendurchmessers und der Fixationszeiten hingegen können eindeutiger dem Bereich der kognitiven Beanspruchung zugeordnet werden.

Während bei steigender Beanspruchung eine vermehrte Aktivierung des sympathischen bei gleichzeitiger Unterdrückung des parasympathischen Parts des autonomen Nervensystems zu beobachten ist, erfolgt bei sinkender Beanspruchung ein gegenteiliger Effekt.

Durch Veränderungen der Balance von Sympathikus und Parasympathikus kommt es schließlich zu einem Anstieg der Herzschlagfrequenz und einem zeitgleichen Absinken der HRV, d. h. die Abstände zwischen den R-Zacken werden immer ähnlicher, wodurch statistisch gesehen die Varianz der Abstände abnimmt. Der von uns verwendete Indikator $rrHRV$ [48] zählt zur Kategorie der zeitbasierten HRV-Indikatoren und nimmt den mittleren euklidischen Abstand aufeinanderfolgender RR-Intervalle zum gemeinsamen Zentrum als Berechnungsgrundlage. Je größere dieser Wert wird, desto geringer ist die Gesamtbeanspruchung des Probanden.

Für die kognitiven Bestandteile der Beanspruchung ist die Vermessung des Blickverhaltens ein immer wieder eingesetzter Indikator. Zwar können auch mit Positionswechseln verbundene Änderungen des Lichtes eine Veränderung des Pupillendurchmessers auslösen, weshalb eine gleichmäßig helle Beleuchtung des Arbeitsplatzes sichergestellt wurde. Bei steigender kognitiver Beanspruchung dehnt sich die Pupille stärker aus. Die Fixationsdauer kann unterschiedlich interpretiert werden. Eine verlängerte Fixationsdauer wird i. d. R. mit einer erhöhten Beanspruchung durch ein mehr an Informationsaufnahme assoziiert (man schaut länger hin), eine verkürzte Fixationsdauer gilt als ein Zeichen von akutem Stress verbunden mit einer Steigerung des Orientierungsverhaltens (man schaut kurz hin und verschafft sich einen Überblick).



Abb. 6.10 Zeitlicher Verlauf des Blickverhaltens für die Modelle 1, 2 und 6: blau = Assistenzsystem, rot = Zeitangabe auf Monitor, grün = Werkbank, gelb = Werkstück

Einige exemplarische Ergebnisse und Auffälligkeiten aus den Laboruntersuchungen sollen im Folgenden am Beispiel eines Probanden beschrieben werden, der die Aufgaben mittels einer AR-Brille bestreiten musste. Betrachtet man die Bauzeiten des Probanden, so fällt auf, dass es einen signifikanten Abfall von Modell 1 zu Modell 2 gibt (10:25 zu 07:12). Bis hin zu Modell 6 bleiben die Zeiten dann jedoch recht konstant zwischen 7:20 und 7:40 min. Das mag dem Umstand geschuldet sein, dass die Probanden bereits nach dem ersten Modell dazu neigten, sich Strategien zur schnelleren Montage zu überlegen und diese mit der Zeit zu verfeinern. Der Anstieg der in die Aufgaben eingebauten Komplexität konnte diese zeitliche Verbesserung offensichtlich nicht aufhalten.

Nimmt man das Blickverhalten des Probanden als Grundlage für eine Analyse seines Arbeitsverhaltens (Abb. 6.10), so fällt auf, dass bereits von Modell 1 zu Modell 2 eine steigende Systematisierung des Verhaltens zu erkennen ist. Die Wechsel zwischen entfernter Werkbank als Teilereservoir (grün) und vor sich befindlichem Werkstück (gelb) werden geringer und einzelne Arbeitsphasen dauern länger an. Die Phase der finalen Befestigung der Querträger findet in den Modellen 2 und 6 fast ausschließlich mit Blick auf das Werkstück statt und benötigt keine weiteren Aktivitäten etwa zur Heranführung weiterer Teile von der Werkbank. Auf der Montageplatte werden schon frühzeitig sämtliche für die Montage benötigten Teile gelagert (Querträger, Unterlegscheiben, Steck-



Abb. 6.11 Verteilung der Fixationen über die sog. Areas of Interest während der Montage der Modelle 1, 2 und 6

muttern, Schrauben) und der Blick allein auf das Werkstück als relevanter „Area of Interest“ gerichtet. Zusätzlich fällt auf, dass die Zeitanzeige (rot) bei den Modellen 2 und 6 weniger relevant war und wenig genutzt wurde. Erst gegen Ende erfolgten vereinzelte Blicke auf den Monitor, höchstwahrscheinlich um sich zu orientieren, wie viel Zeit noch verbleibt oder unmittelbar nach Erklängen des akustischen Signales. Bei der Nutzung des Assistenzsystems (blau) fällt auf, dass bei der Montage des ersten Modells das System noch recht intensiv genutzt wurde, bei der Montage des zweiten Modells das System aber nur noch zu Beginn des Montagevorgangs länger ins Auge gefasst wurde. Erst bei steigender Informationsvielfalt und Komplexität (Modell 6) wurde das Assistenzsystem wieder häufiger in den Blick genommen. Die Informationen zur Befestigung der Querträger mit farbigen Schrauben wurden am intensivsten fixiert. Auch fällt auf, dass der Proband sich bei Modell 6 wiederholt durch Blicke auf das Assistenzsystem vergewisserte, ob alle Querträger mit den entsprechenden Schrauben richtig montiert wurden.

Anhand des Blickverhaltens kann sowohl der Anlernprozess (Vergleich 1 mit 2) als auch der Anstieg der Komplexität (Vergleich 2 mit 6) recht deutlich sichtbar gemacht werden. Während für Modell 1 die Anzahl der Fixationen auf dem Assistenzsystem noch bei $n=91$ lag, so ging sie für Modell 2 bereits auf $n=54$ zurück. Eine Erklärung dafür könnte darin liegen, dass der Proband bereits hinreichendes Wissen darüber hatte, wie die Informationen umzusetzen sind (und ihrer eigenen Strategie folgten). Ergänzend dazu ergab sich ein Rückgang der durchschnittlichen Fixationsdauer von 199,7 Millisekunden (ms) auf 179,2ms. Zum komplexeren Modell 6 hin stieg die Zahl der Fixationen wieder auf $n=109$ an, wobei jede einzelne Fixation auch wieder länger andauerte (197,9ms). Abb. 6.11 gibt die Verhältnisse wieder.

Die Verwendung physiologischer Instrumente zur Messung von Beanspruchung bietet im Vergleich zur Nutzung von subjektiven Befragungsinstrumente den Vorteil, eine kontinuierliche Aufzeichnung und eine parallele Auswertung vornehmen zu können. Zur besser nachvollziehbaren Visualisierung der darzustellenden Verläufe wurde für die Bauzeit aller sechs Modelle ein Ampelschema, wie es aus der Ergonomie bestens bekannt ist [13], über alle Parameter gelegt. Rote Bereiche markieren Phasen mit vorab festgelegter, relativ hoher, gelbe mit mittlerer und grüne mit relativ geringer Beanspruchung (Abb. 6.12). Die blauen Trennlinien markieren Ende und Anfang und somit den Übergang zwischen den Modellen. Dargestellt sind die Herzfrequenz, die $rrHRV$, der Pupillendurchmesser und die Bewegungsintensität.

Der Ablauf des Montageprozesses blieb über alle Modelle gleich. Es wurden zunächst die farbigen Querträger ausgewählt und in entsprechende Ausrichtung und in Abstand zueinander gebracht, um dann am Ende mittels einer vorher erlernten Stecktechnik mit den entsprechend farbigen Schrauben mit den vorbereiteten Längsträgern verbunden zu werden. Dabei war zu beachten, dass die zu verwendenden Unterlegscheiben mit der helleren Seite zum Metall zeigen sollten. In der Anleitung erfolgte eine genaue Beschreibung der Handlungsschritte mit den Schwerpunkten Farbe der Querträger, Ausrichtung, Abstände und Farbe der Schrauben. Der Großteil der informatrischen Arbeits-

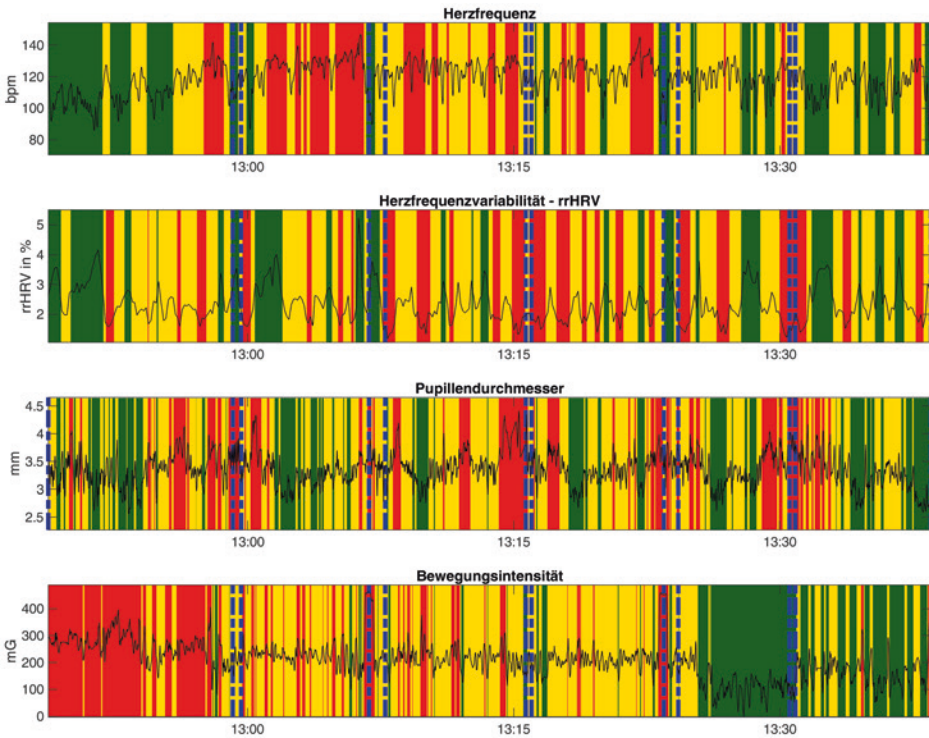


Abb. 6.12 Verlauf über den Bau von sechs Modellen (getrennt durch blaue Linien)

anteile lag dabei am Anfang eines jeden Modells (Bestimmung der entsprechenden Querträger und deren Ausrichtung/Abstände). Im Verlauf der Montage gab es in jedem Fall eine Verschiebung hin zu eher motorisch-mechanisch Arbeitsschritten.

In den Verläufen der physiologischen Messreihen des Beispielprobanden können einige zentrale Tendenzen aufgezeigt werden. So fällt etwa auf, dass die Arbeitsanteile, die mit erhöhter Bewegung einhergehen, in den ersten drei Modellen deutlich höher sind als in den letzten drei Modellen. Diese Entwicklung spiegelt vermutlich die Kompetenzentwicklung des Probanden während der Arbeit wider: Unnötige Laufwege und Körperbewegungen werden zunehmend vermieden, Arbeitsschritte zusammengefasst und das eigene Montageverhalten im Prozess optimiert. So kann trotz steigender Komplexität und Zeitdruck die Arbeit effizienter erledigt werden. Dies fällt auch im Bereich der Herzfrequenz und der HRV auf, die relativ hoch bzw. erwartungsgemäß relativ gering ausfällt und Beanspruchung über alle Modelle hinweg anzeigt. Im Vergleich zur Ruhemessung des Probanden (86 bpm und rrHRV von 5,9) erfolgt ein deutlicher Anstieg (bzw. Abfall), der von starken Schwankungen begleitet wird. Diese Schwankungen sind sowohl natürlicher, hauptsächlich durch Bewegung innervierter Art, aber auch durch kognitive tätigkeitsbedingte Beanspruchungsdifferenzen ausgelöst. Eine genaue Differenzierung beider

Effekte ist hierbei nicht immer eindeutig möglich. Die Verläufe sind im Vergleich zur Bewegung weniger eindeutig, dennoch fällt auf, dass es immer zum Ende eines Modells einen Anstieg in der Herzfrequenz und einen Abfall der Herzratenvariabilität gibt. Auffällig ist, dass Modell 1 wenig beanspruchend im Bereich der EKG-Maße ausfällt, während das Bewegungsmaß einen hohen Grad an Aktionismus signalisiert. Zudem fällt auf, dass die Modelle 2, 3 und 4 beanspruchender zu sein scheinen als die Modelle 5 und 6. Auch dies könnte wiederum ein Zeichen des stetigen Kompetenzzuwachses des Probanden sein, der die Zunahme an Komplexität nicht nur kompensiert, sondern sogar überkompensiert (letztlich bleibt die Aufgabe doch relativ leicht). Dieser Befund zeigt die Bedeutsamkeit von Kompetenz und Erfahrung im Wechselspiel mit allen körperlichen und geistigen Belastungen auf.

Betrachtet man den Pupillendurchmesser im Verlauf, so zeigt sich, dass es für die meisten Modelle zwei Phasen zu geben scheint, in denen der Proband besonders weite Pupillen hatte, demnach vermehrt kognitiv gearbeitet hat. Zum einen sind die Anfangsbereiche eines jeden Modells mit mehreren kurzen roten Bereichen durchzogen. Hierbei sollte es sich um die Aufnahme der benötigten Montageinformationen handeln. Der Proband bereitete z. T. auch schon Schrauben vor und ließ sich alle Informationen innerhalb kurzer Zeit anzeigen. Im Folgenden waren dann nur vereinzelt Blicke auf das Assistenzsystem notwendig (siehe auch Abb. 6.10). Der zweite Zeitpunkt, der von eher geweiteten Pupillen geprägt ist, liegt am Ende der jeweiligen Modelle. Hier liegt eine Verschiebung in Richtung Stress durch Zeitdruck vor. Der Schwerpunkt der kognitiven Beanspruchung verschiebt sich dabei weg von der Informationsaufnahme hin zu durch das akustische Signal und dem Absinken im Leaderboard verbundener Anspannung mit dem Ziel, das Modell noch rechtzeitig abzuschließen, um ein weiteres Absinken zu vermeiden.

Betrachtet man einmal vergleichend die den Modellen 1 und 6 zuzuordnenden Parameterverläufe (Abb. 6.13), so fällt auf, dass beide Modelle im Mittel recht ähnliche Verläufe aufzeigen. Die senkrechten Linien verdeutlichen Zeitpunkte der Interaktion mit dem Assistenzsystem, hier der AR-Brille. Die Mittelwerte für Herzfrequenz ($M_1 = 112,05$, $M_6 = 114,07$), $rrHRV$ ($M_1 = 2,39$, $M_6 = 2,30$) und Pupillenausdehnung ($M_1 = 3,33$ mm $M_6 = 3,23$ mm) unterschieden sich nicht gravierend. Auffallend sind aber die sich verändernden Verläufe für den Pupillendurchmesser. Während bei Modell 1 auch im verschraubenden Teil der Montage noch leicht geweitete Pupillen zu verzeichnen sind, sinkt der Durchmesser bei Modell 6 stetig ab. Dies kann dadurch bedingt sein, dass der Proband zu Anfang noch mehr kognitive Ressourcen auch für die Optimierung der Schraubvorgänge benötigte (alle Probanden mussten mit einer ihnen vorher nicht vertrauten Technik arbeiten), die dann bei Modell 6 nicht mehr erforderlich waren. Je vertrauter die Werker mit den Abläufen sind, desto weniger Information benötigen sie für die Bewältigung der Aufgabe.

Ebenso auffallend sind Anstiege der HR und Absinken der $rrHRV$ nach den Interaktionen mit dem AR-Assistenzsystem. Hierbei handelt es sich jedoch vermutlich um einen kombinierten Effekt der mentalen Verarbeitung der neu gewonnenen Informationen und der körperlichen Beanspruchung durch den Beginn der Umsetzung

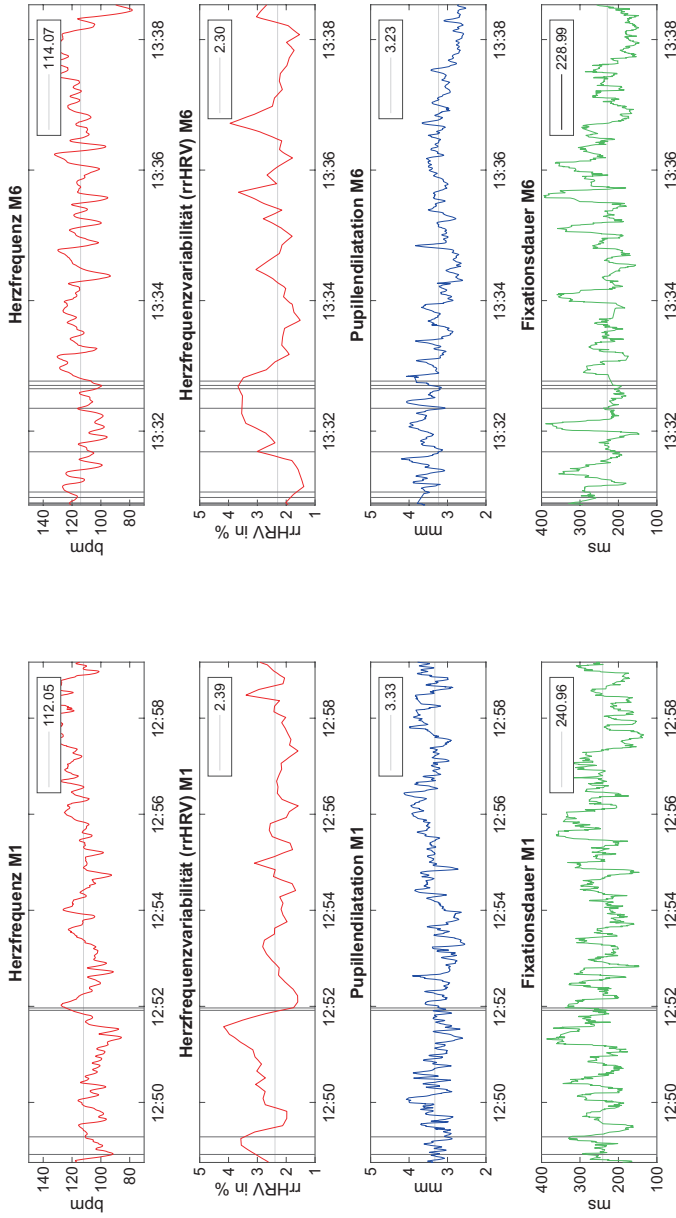


Abb. 6.13 Vergleich von Modell 1 (10:25 min) und Modell 6 (7:40 min) – in senkrechte Linien markieren Interaktionen mit dem Assistenzsystem, horizontal in den Kästen sind die entsprechenden Mittelwerte vermerkt

der gewonnenen Informationen. Hier zeigt sich ein zentrales Problem der kontinuierlichen physiologischen Messung: Die Pupillendilatation erfolgt in kürzester Zeit, während das EKG erst mit erheblicher Latenz Veränderungen signalisiert.

Werden in diese Betrachtungen zusätzlich die aus Abb. 6.10 aufgezeigten Befunde einbezogen, so fällt einmal auf, dass die Zeiträume der Informationsverarbeitung in Verbindung mit den Instruktionen relativ kurz ausfallen. Sodann zeigt sich, dass die kognitiven Beanspruchungen bei der motorisch geprägten Umsetzung der Instruktionen weniger deutlich aus den Daten zu extrahieren sind. Das könnte seinen Grund darin haben, dass das EKG generell wesentlich stärker durch körperliche als durch mentale Aktivität geprägt ist. Erwartungskonform ist zudem, dass sinkende HRV-Werte häufig auch mit einem Anstieg der Fixationsdauer einhergehen, was für eine erhöhte informatrische Beanspruchung spricht.

In der Gesamtbetrachtung der aufgezeigten Daten ergeben sich zwei zentrale Tendenzen, die beide eine Verschiebung der Beanspruchung andeuten und mit der Kompetenzentwicklung des Probanden im Verlauf der Untersuchung in Beziehung stehen. Zum einen erfolgt eine Verlagerung der Beanspruchung vom rein motorischen Anlernen der Aufgabe hin zur gesteigerten Wahrnehmung des Zeitdruckes, was wiederum die Beanspruchung bzw. die Anstrengung des Probanden beeinflussen kann, die Aufgabe innerhalb einer möglichst guten Zeit zu beenden. Zum zweiten ist eine auf Beanspruchungsebene entgegengesetzte Wirkung der Komplexitätssteigerung und der Kompetenzentwicklung festzustellen. Rein aus Komplexitätssicht wäre eine Erhöhung der Beanspruchung zu erwarten. Die Probanden wurden nach jeweils zwei fertiggestellten Modellen befragt, wie komplex und schwer sie das letzte Modell im Vergleich zu vorangegangenen Modellen empfunden haben. Dabei zeigte sich ein deutlicher Anstieg in der wahrgenommenen Komplexität. Dieser spiegelt sich jedoch nicht in den physiologischen Daten wider. Auf kognitiv, informatrischer Ebene hat scheinbar eine Verschiebung vom Kompetenzerwerb hin zur gesteigerten Komplexität stattgefunden, der dazu führte, dass in der Summe die wahrgenommene und messbare Beanspruchung des Probanden nahezu gleichbleibt.

Im Verlauf von nur wenigen Montagevorgängen scheint es bereits zur Ausprägung kognitiver Automatismen [44] gekommen zu sein. Das Assistenzsystem wurde nur noch in den Momenten genutzt, in denen zusätzliche Informationen zu beachten waren, oder es darauf ankam, sich noch einmal rückzuversichern, dass die montierten Teile korrekt angebracht wurden. Dabei schien die Art des Assistenzsystems weniger eine Rolle zu spielen als vielmehr die Art und Weise der Aufbereitung der Informationen. Sind diese klar strukturiert und werden sie in der richtigen Granularität dargeboten, so kann der Kompetenzerwerb zügig erfolgen. Unzureichende Instruktionen erschweren den Kompetenzerwerb, führen aber nicht zu einer stärkeren Nutzung des Assistenzsystems. Generell ergibt sich daraus, dass Assistenzsysteme den vorgegebenen Arbeitsablauf nicht stören sollten und nur so viel Information liefern, wie angesichts bestehender Ressourcen erforderlich ist. Zunehmende Kompetenz bedeutet dabei, dass Redundanzen frühzeitig erkannt und entsprechend umgesetzt werden. Der erfahrene Werker verlässt damit vor-

zeitig den Monitor des Assistenzsystems, wo unerfahrene Werker sich noch länger mit der Instruktion auseinandersetzen müssen. Dabei haben AR-Brillen den Vorteil, dass Informationsaufnahme und körperliche Umsetzung parallel erfolgen können. Die Werker können in der Regel hands-free weiterarbeiten und die Informationen sind immer in unmittelbarer Reichweite, allerdings werden diese auch i. d. R. kleiner dargeboten, was wiederum anfänglich zusätzliche Anstrengungen erfordert. Zielführend könnte es längerfristig sein, stärker auf individualisierte, kompetenz- und/oder beanspruchungsgesteuerte Assistenzsysteme zu setzen [3].

6.4 Lessons Learned

Die in Abschn. 6.3.2 kurz dargestellten Befunde sind zwar lediglich Ergebnis einer Einzelfallstudie, sie geben jedoch bereits erste Einblicke in die Problematik informatorischer Assistenzsysteme in der variantenreichen Montage. Wie gezeigt werden konnte, spielen informatorische Assistenzsysteme eine Rolle bei der Bewältigung informationsreicher Montagevorgänge – als informationsreich gilt dabei generell die Mehrproduktmontage – jedoch geben die Untersuchungen auch zu erkennen, dass dies nicht durchgängig über alle Modelle hinweg der Fall ist. Nur etwa 30s (von 7:40min, das entspricht etwa 7 % der Zeit) wandte sich der Proband dem Assistenzsystem zu, um daraus alle relevanten Informationen zur Montage des Rahmens zu erhalten. Die kognitive Beanspruchung war von daher nicht sehr groß, zumal auch der wiederholte Blick in die AR-Brille weitgehend ausblieb. Der Proband war offensichtlich aufgrund der Instruktion in der Lage, den gesamten Montageprozess bereits zu antizipieren, ohne sich informatorisch vergewissern zu müssen. Wenn dennoch eine höhere Beanspruchung zu registrieren war, so resultierte sie – abweichend gegenüber einer ursprünglich gemessenen Baseline – aus dem Hin- und Herlaufen entlang des Montagetisches, aus ruckartigen Bewegungen oder suboptimalem Montageverhalten, was sich im Verlauf der Zeit wieder verliert.

Zu Beginn der Untersuchung hatten die eingesetzten Assistenzsysteme und mit ihnen die vermittelte Bauinstruktion eine bedeutsame Funktion, um dem individuellen Montagehandeln Ausrichtung und Struktur zu geben, diese Funktion büßte das Assistenzsystem jedoch bereits nach kurzer Zeit und mit zunehmender Anzahl der Modelle ein. Die externe Information verlor an Bedeutung, die internen Informationen spielten von da an eine größere Bedeutung. Interne Information steht dabei für Wissen oder für den „gesunden Menschenverstand“, für Erfahrung und auch einen gewissen Grad an Kompetenz, selbst komplexere Modelle in relativ kurzer Zeit (etwa 8min) und mit wenigen Fehlern (etwa 1,5 Fehler pro Modell) zu bearbeiten. Diese Verschiebung hängt – so die Annahme – vor allem mit der ausgefeilten Instruktion zusammen, die den Probanden zu Beginn der Untersuchung erteilt wurde. Diese führte bereits sehr detailliert vor Augen, wie der Montageprozess zu gestalten ist. Solch ausgefeilte Instruktionen liegen in der Praxis oftmals nicht vor. Ohne sie wäre es jedoch im Experiment nicht möglich gewesen, die montageunerfahrenen Probanden die Aufgabe bewältigen zu

lassen. Diese ausführliche Instruktion und die Ähnlichkeit der Modelle schuf vermutlich ein hohes Maß an Redundanz, sodass trotz aller mehr oder weniger kniffligen Varianten die Aufgabe letztlich doch informationsärmer blieb als gedacht. Dies bedeutet gleichzeitig, dass der Komplexitätsgrad der Aufgabe geringer war als ursprünglich angenommen. D. h. die Komplexität wurde durch die ausführlichen Instruktionen vorab wieder reduziert. Dies lässt sich auch dahingehend interpretieren, dass dort, wo gute Instruktionen gegeben sind, die Komplexität schon sehr hoch sein muss, damit sie sich stark beanspruchend auswirken kann. Gute Instruktionen im Experiment – sie stehen für eine gute Arbeitseinweisung im Betrieb – erscheinen wie ein Gegenmittel zur Komplexität. Damit stellen sich die Fragen,

- a) unter welchen organisatorischen Arbeitsbedingungen informatrische Assistenzsysteme nützlich sein können (viel Komplexität, schlechte Instruktion, gute Datenbasis und systemtechnische Integration),
- b) unter welchen personenbezogenen Ressourcenbedingungen informatrische Assistenzsysteme hilfreich sein können (wenig Kompetenz/Erfahrung/Vertrautheit, wenig Routine, wenig kognitive Automatismen, hohe Beanspruchung),
- c) wie informatrische Assistenzsysteme gestaltet sein müssen, damit sie akzeptiert und genutzt werden (auf den Bedarf angepasst, konfigurierbar).

Auf der Basis des Modells von Wickens [49] liegt der zentrale Zweck der Einführung von informatrischen Assistenzsystemen darin, ein überbordendes Informationsangebot bewältigbar zu machen und so kognitive Überforderungen zu vermeiden. Es soll dadurch erreicht werden, die Komplexität des Gesamtvorgangs wieder ein Stück weit zu reduzieren, Unsicherheiten und hohe Aufmerksamkeit über längere Zeiträume hinweg zu vermeiden und dadurch den Ressourcenverbrauch bzw. die Beanspruchung des Arbeitsgedächtnisses wieder zu verringern [16]. Wer ständig visuell und fokal konzentriert sein muss, steht unter hoher Anspannung und erlebt eine starke kognitive Beanspruchung. Um Entlastung zu erreichen, müssen – so paradox es klingen mag – zusätzliche externe Informationen in das Montagesystem eingespielt werden, die in jedem einzelnen Fall aber zu einem relativ stärkeren Abbau an Unsicherheit und einem Aufbau von Redundanz beitragen, ähnlich wie beim Erlass eines zusätzlichen Gesetzes, welches aber zur Abschaffung von zwei anderen Gesetzen führt. Diese externen Informationen betreffen drei zentrale Aspekte [10, 26, 43]:

- Der Aspekt „Was“ betrifft den Inhalt der Information: So soll dem Werker angezeigt werden, in welchem Behälter sich ein einzubauendes Teil befindet oder ihm soll anhand einer Konstruktionszeichnung der Einbauort einer Komponente vermittelt werden. Generell gilt für die Gestaltung von Displays: Aktuelle und möglichst keine irrelevanten Informationen sollten gegeben werden. Ferner sollte beachtet werden, dass Informationen nicht falsche Assoziationen z. B. über Farbgebungen hervorrufen (blauer Träger verleitet zur Nutzung des blauen Werkzeugs).

- Der Aspekt „Wie“ betrifft die Präsentation der Information: Es stellt sich die Frage, ob eine Einbauinstruktion in schriftlicher oder bildlicher Form gegeben werden soll oder ob sie für anzulernende Personen in bildlicher und für Experten z. B. in Form einer Konstruktionszeichnung gegeben werden soll. Generell gilt für die Gestaltung von Displays: Information sollte möglichst auf einen Blick erfassbar sein.
- Der Aspekt „Wann“ betrifft das Timing der Präsentation: Hier stellt sich einmal die Frage, wann der rechte Zeitpunkt für eine Information gegeben ist und ob dieser Zeitpunkt automatisch voreingestellt oder vom Werker in Eigenregie bestimmt werden kann. Generell gilt: Information sollte möglichst kurz gehalten werden müssen.

Aus diesen drei Aspekten ist abzuleiten, dass möglichst jedem Montagewerker in der komplexen variantenreichen Montage eine spezifische Konstellation von externen Informationen durch ein informatorisches Assistenzsystem zur Verfügung gestellt werden sollte. Ein Beispiel für eine solche Konstellation externer Information liefert das sog. OPDM (operational process dashboard of manufacturing) von Gröger et al. [19], welches auf unterschiedliche Weise auf Displays verschiedenster Assistenzsysteme realisiert werden kann. Das in Abschn. 6.3.1 erläuterte Fallbeispiel verdeutlicht, dass insbesondere das Eliminieren überflüssiger Informationen („Was“) und eine übersichtliche Darstellung der benötigten Informationen in bildlicher und textlicher Form („Wie“) bereits zu einer deutlichen Reduzierung der Tätigkeitszeiten führt. In Bezug auf den Aspekt „Wann“ war die Nutzeranforderung, möglichst alle relevanten Informationen für einen Montageauftrag über ein großes Display auf einmal – ohne ein Weiterschalten durch den Nutzer – zu erhalten. Der Vorteil dieser Art der Informationsausgabe ist, dass unterschiedliche Arbeitsmethoden bzw. Arbeitsweisen zur Anwendung kommen können, der Gesamtarbeitsablauf also nicht durch die sequenzielle Informationsausgabe (Schritt-für-Schritt-Anleitung) vorgegeben wird. Dafür muss der Nachteil in Kauf genommen werden, dass eine umfassende Informationsausgabe zwangsläufig zu kurzen, nicht-wertschöpfenden Orientierungszeiten führt.

Mit Überlegungen und Gestaltungsoptionen dieser Art befasst sich die sogenannte kognitive Ergonomie, die als Reaktion auf die Zunahme der Informationsmenge, auf veränderte Informationsstrukturen und die Menge und Geschwindigkeit von darauf basierenden Entscheidungen begründet wurde [28]. Sie bildet eine Teildisziplin der herkömmlichen Ergonomie, die sich vornehmlich auf körperliche Beanspruchungen und Gegenmaßnahmen konzentriert hat. Die kognitive Ergonomie zielt darauf ab, die Leistungsfähigkeit und Belastbarkeit mentaler Informationsverarbeitungsprozesse genauer zu analysieren und diese möglichst resilient zu gestalten. Ergonomische Gefährdungen resultieren dabei z. B. aus unklaren Handlungsanweisungen oder Arbeitsinstruktionen, unzureichender Anordnung von Anzeigemonitoren und Schaltbildern, zu starken Konzentrationserfordernissen auf selten auftretende Signale, schlechter visueller oder akustischer Gestaltung von Signalen oder unzureichender farblicher Differenzierung von Bauteilen. Hier sollen Assistenzsysteme helfen.

Dabei kann unterschieden werden zwischen solchen Assistenzsystemen, die automatisch Entscheidungen übernehmen und solchen Systemen, die lediglich Informationen

bereitstellen, aber Entscheidungen überwiegend bei den Beschäftigten belassen. Fast-Berglund et al. [15] stellen aufgrund betrieblicher Studien generell in Aussicht, dass längerfristig durch technische Unterstützung im Sinne einer „cognitive automation“ ein „decrease of workload“ zu erreichen ist, sofern – und hier kommt wieder das Ausgangsthema ins Spiel – die Dosierung der Information auf die Beschäftigten hinreichend abgestimmt ist. Damit ist jedoch nicht allein ein logistisches Problem angesprochen, sondern auch ein differentiell-psychologisches Problem: Wer braucht eigentlich welche Information? Da reicht es nicht aus, nur auf die Komplexität zu verweisen, sondern man muss auch wissen, welche Erfahrung bzw. Kompetenz ein Werker einbringt und vor allem wie stark er kognitiv beansprucht ist. Assistenzsysteme können Sicherheit und Zutrauen vermitteln und die Performanz und Erfahrungsbildung unterstützen. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass die Assistenzsysteme benutzerzentriert und kontextsensitiv gestaltet sind [50], indem sich die Systeme z. B. über eine Benutzerverwaltung individuell konfigurieren lassen, möglichst eine multimodale Interaktion unterstützen und Informationen anforderungsgerecht – z. B. unter Berücksichtigung des Übungsgrades – darstellen [27]. So ist es z. B. unter Einsatz von AR-Brillen möglich, dass der Beschäftigte durch Gesten oder ein akustisches Signal („Weiter“) selbst die Geschwindigkeit der Informationspräsentation steuert. Auf vergleichbare Art kann er auch zusätzliche Information in einem markierten Bild oder gar einem kurzen Video eingespielt bekommen, wenn eine Variante eine besondere Montagemethode erforderlich macht oder die Ausführung als besonders fehleranfällig und damit qualitätskritisch gilt. Umgekehrt kann ein erfahrener Beschäftigter auch bei einzelnen ausgewählten Varianten gänzlich auf eine Unterstützung verzichten (das unterstützt Befunde von Fast-Berglund et al. [15], wonach in 60 % der Fälle auf Unterstützung durch Assistenzsysteme verzichtet und allein auf der Basis von Erfahrung montiert wurde). Die individuelle Konfiguration kann dann in der Benutzerverwaltung der Software vorgenommen oder automatisch erfolgen, sie kann aber auch je nach Lernfortschritt oder aktuellem Befinden ad hoc vom Beschäftigten selbst erledigt werden. Langfristig wird dabei zu prüfen sein, ob zwischen der individuellen Auswahl der Konstellation und den objektiven Ausgängen eine hohe oder geringe Übereinstimmung besteht. Später könnten diese Erfahrungen in ein automatisches Machine Learning übergehen, welches dann Empfehlungen abgibt, wie die jeweilige Konstellation an externen Informationen ausfallen sollte.

Mit Blick auf die Gestaltung von informatrischen Assistenzsystemen seien abschließend sechs zentrale Empfehlungen für die Gestaltung von informatrischen Assistenzsystemen gegeben [5]:

1. Das Assistenzsystem muss entlasten, es darf nicht zusätzlich belasten. Dies bedarf einer systematischen Überprüfung, denn jedes einmal eingerichtete Assistenzsystem verliert mit der Zeit – infolge einer Internalisierung von Wissen – an Funktionalität und kann damit zur Belastung werden. Bei einer hohen Dynamik am Arbeitsplatz (z. B. durch häufige Produktänderungen) kann dieser Effekt kompensiert werden, d. h. die Komplexität und damit die Funktionalität bleiben infolge der Dynamik erhalten.

2. Das Assistenzsystem muss stets auf die Strukturen interner Information der einzelnen Werker oder Werkertypen zugeschnitten sein. Einstellungen an der Assistenzsystemsoftware sollten vom Nutzer vorgenommen werden können, auch damit die Funktionalität des Systems im Zeitverlauf – also mit einer zunehmenden Internalisierung von Wissen – erhalten bleibt.
3. Jedes Assistenzsystem mit seinen unterschiedlichen Ausgabegeräten (z. B. Tablet, Projektion, Datenbrille) hat spezifische Vor- und Nachteile. Es gilt, ein Assistenzsystem so auszuwählen bzw. zu konfigurieren, dass es den Anforderungen des Arbeitsplatzes bzw. seiner Nutzer am besten entspricht.
4. Assistenzsysteme müssen die Grundsätze der Dialoggestaltung berücksichtigen und insbesondere Rückmeldung und Korrektur ermöglichen.
5. Assistenzsysteme dürfen keine Stand-Alone-Lösung sein. Die Assistenzsystemsoftware sollte in die bestehende IT-Infrastruktur integriert sein, sodass Auftragsdaten aus einem ERP-System oder Produktdaten aus einem PLM-System automatisch übermittelt werden können. Damit wird die Aktualität der Informationen gewährleistet und der administrative Aufwand in der Arbeitsvorbereitung reduziert.
6. Der Gestaltung eines Assistenzsystems sollten Phasen der Analyse der Ausgangssituation und der Anforderungsermittlung vorausgehen. Test- und Evaluationsphasen sollten mit der Gestaltungsphase einhergehen Abschn. 6.3.1

Literatur

1. Apt W, Bovenschulte M, Priesack K, Weiß C, Hartmann EA (2018) Einsatz von digitalen Assistenzsystemen im Betrieb. Forschungsbericht 502 des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales. Berlin
2. Bläsing D (2017) Erfassung von individuellem Beanspruchungserleben am Arbeitsplatz über Herzratenvariabilität im Pflegebereich. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 71(4): 269–278 <https://doi.org/10.1007/s41449-017-0082-7>
3. Bläsing D, Bornewasser M (2019) A Strain Based Model for Adaptive Regulation of Cognitive Assistance Systems – Theoretical Framework and Practical Limitations. In Karwowski W, Ahram T (Hrsg.), Intelligent Human Systems Integration 2019. Springer, Cham, S. 10–16 https://doi.org/10.1007/978-3-030-11051-2_2
4. Bommer S C, Fendley M (2018) A theoretical framework for evaluating mental workload resources in human systems design for manufacturing operations. International Journal of Industrial Ergonomics, 63: 7–17 <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2016.10.007>
5. Bornewasser M, Bläsing D, Hinrichsen S (2018) Informativische Montageassistenzsysteme in der manuellen Montage: Ein Werkzeug zur Reduktion mentaler Beanspruchung. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 72(4): 264–275 <https://doi.org/10.1007/s41449-018-0123-x>
6. Bornewasser M, Wegge J (2018) Moderne Stressdiagnostik am Arbeitsplatz – theoretische und methodische Fortschritte. Wirtschaftspsychologie 20(1): 3–11
7. Brecher C, Kolster D, Herfs W (2011) Innovative Benutzerschnittstellen für die Bedienpanels von Werkzeugmaschinen. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 106(7–8): 553–556

8. Brookhuis K A, de Waard D (2010) Monitoring drivers' mental workload in driving simulators using physiological measures. *Accident Analysis & Prevention*, 42(3): 898–903 <https://doi.org/10.1016/j.aap.2009.06.001>
9. Chen F, Zhou J, Wang Y, Yu K, Arshad SZ, Khawaji A, Conway D (Hrsg) (2016). *Robust Multimodal Cognitive Load Measurement*. Springer International Publishing, Cham, Switzerland
10. Claeys A, Hoedt S, Soete N, van Landeghem H, Cottyn J (2015) Framework for evaluating cognitive support in mixed model assembly systems. *IFAC Papers On Line*, 48(3): 924–929 <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.201>
11. Colle H A, Reid G B (2005) Estimating a mental workload redline in a simulated air-to-ground combat mission. *The International Journal of Aviation Psychology*, 15(4): 303–319 http://dx.doi.org/10.1207/s15327108ijap1504_1
12. DiDomenico A, Nussbaum M A (2011) Effects of different physical workload parameters on mental workload and performance. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 41(3): 255–260 <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2011.01.008>
13. DIN EN 614-1 (2009) *Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Gestaltungsgrundsätze – Begriffe und Allgemeine Leitsätze*. Berlin: Beuth
14. DIN EN ISO 10075-1 (2018) *Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung*. Berlin: Beuth
15. Fast-Berglund A, Fässberg T, Hellmann T, Davidsson A, Stahre J (2013) Relations between complexity, quality, and cognitive automation in mixed-model-assembly. *Journal of Manufacturing Systems*, 32: 449–455 <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2013.04.011>
16. Frizelle G, Woodcock E (1995) Measuring complexity as an aid to developing operational strategy. *International Journal of Operations & Production Management*, 15 (5): 26–39 <https://doi.org/10.1108/01443579510083640>
17. GDA (2017) *Gemeinsame Deutsche Arbeitsschutzstrategie: Empfehlungen zur Umsetzung der Gefährdungsbeurteilung*. https://www.gda-psyche.de/SharedDocs/Downloads/DE/empfehlungen-zur-umsetzung-der-gefaehrungsbeurteilung-psychischer-belastung.pdf?__blob=publicationFile&v=1. Zugegriffen: 03.09.2019
18. Grandt M (2004): *Zur Erfassung und Bewertung der mentalen Beanspruchung mittels psychophysiologischer Messverfahren*. Dissertation, Bergische Universität Wuppertal
19. Gröger C, Hillmann M, Hahn F, Mitschang B, Westkämper E (2013) The operational process dashboard for manufacturing. *Procedia CIRP*, 7: 205–210 <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.05.035>
20. Hacker W (1998) *Arbeitspsychologie – Psychische Regulation von Arbeitstätigkeiten*. Bern: Huber
21. Hart S G, Staveland L E (1988) Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In: Hancock P A, Meshkati N (Hrsg.) *Human Mental Workload*. Amsterdam: North Holland Press
22. Hinrichsen S, Riediger D, Unrau A (2016) Assistance Systems in Manual Assembly. In: Villmer FJ, Padoano E. (eds) *Production Engineering and Management. Proceedings of 6th International Conference*, 3–14
23. Hinrichsen S, Riediger D, Unrau A (2018) Montageassistenzsysteme – Begriff, Entwicklungstrends und Umsetzungsbeispiele. *Betriebspraxis & Arbeitsforschung*, 232, 24–27
24. Hinrichsen S, Bendzioch S (2019) How Digital Assistance Systems Improve Work Productivity in Assembly. In: Nunes I L (ed) *Advances in Human Factors and Systems Interaction. Proceedings of the AHFE 2018 International Conference on Human Factors and Systems Interaction*, July 21–25, 2018, Orlando, Springer, Cham 332–342 https://doi.org/10.1007/978-3-319-94334-3_33

25. Hinrichsen S, Bornewasser M (2019) How to Design Assembly Assistance Systems. In: Karwowski W, Ahram T (eds) *Intelligent Human Systems Integration 2019. IHSI 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 903. Springer, Cham, 286–292 https://doi.org/10.1007/978-3-030-11051-2_44
26. Hollnagel E (1987) Information and Reasoning in Intelligent Decision Support Systems. *International Journal of Man-Machine Studies*, 27(5): 665–678 [https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(87\)80023-8](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(87)80023-8)
27. Kölz M, Bächler A, Kurtz P, Hörz T (2015) Entwicklung eines interaktiv, adaptiven Montageassistenzsystems. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (Hrsg.): *Verantwortung für die Arbeit der Zukunft. Bericht zum 61. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (GfA) vom 25.–27. Februar 2015 in Karlsruhe*. GfAPress, Dortmund
28. Kretschmer V, Spee D, Rinkenauer G (2017) Der Mensch im Fokus. Kognitive Ergonomie in der Intralogistik. In: Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik (Hrsg.) *Jahresbericht 2016*. Hamm: Griebisch & Rochol: 60–61
29. Laurig W (1990) *Grundzüge der Ergonomie: Erkenntnisse und Prinzipien* (4. Aufl). Berlin: Beuth.
30. Lindblom J, Thorvald P (2014) Towards a framework for reducing cognitive load in manufacturing personnel. In: Stanney K, Hale K S (Hrsg.) *Advances in Cognitive Engineering and Neuroergonomics*: 233–244
31. Liu Y (1996) Queueing network modeling of elementary mental process. *Psychological Review*, 103(1), 116–136 <http://dx.doi.org/10.1037/0033-295X.103.1.116>
32. Luczak H (1986) Manuelle Montagesysteme. In: Spur G, Stöferle T (Hrsg) *Handbuch der Fertigungstechnik*, Vol. 5: Fügen, Handhaben und Montieren. Hanser, München, Wien, 620–682
33. Luczak H (1987) Psychophysiologische Methoden zur Erfassung psycho-physischer Beanspruchungszustände. In *Enzyklopädie der Psychologie: D/III/I Arbeitspsychologie*. Göttingen Hogrefe, 185–259
34. Ma Q G, Shang Q, Fu H J, Chen F Z (2012) Mental Workload Analysis during the Production Process: EEG and GSR Activity. *Applied Mechanics and Materials*, 220–223: 193–197 <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.220-223.193>
35. Metz A M, Rothe H-J (2017) *Screening psychischer Arbeitsbelastung. Ein Verfahren zur Gefährdungsbeurteilung*. Wiesbaden: Springer
36. Nikolenko A, Sehr P, Hinrichsen S, Bendzioch S (2020) Digital Assembly Assistance Systems – A Case Study. In: Nunes I (eds) *Advances in Human Factors and Systems Interaction. AHFE 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 959. Springer, Cham, 24–33 https://doi.org/10.1007/978-3-030-20040-4_3
37. Parasuraman R (2011) Neuroergonomics: Brain, cognition, and performance at work. *Current directions in psychological science*, 20, 181–186 <https://doi.org/10.1177/0963721411409176>
38. REFA-Bundesverband e.V. (2014): *REFA-Grundausbildung 2.0 – Lehrunterlage zu Teil 2A: Ermittlung und Anwendung von Prozessdaten. Modul 2: Arbeitssystemgestaltung*. Darmstadt
39. Reiser J E, Pacharra M, Wascher E (2018) Neuropsychologische Methoden zur Erfassung von Arbeitsbeanspruchung – Ein Überblick und aktuelle Entwicklungen. *Wirtschaftspsychologie* 20 (1): 23–31
40. Rubio S, Diaz E, Martin J, Puente J M (2004) Evaluation of subjective mental workload: A comparison of SWAT, NASA-TLX, and Workload Profile. *Applied Psychology: An International Review*, 53(1): 61–86 <https://doi.org/10.1111/j.1464-0597.2004.00161.x>
41. Samy S N, ElMaraghy H (2010) A model for measuring products assembly complexity. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 23(11): 1015–1027 <https://doi.org/10.1080/0951192X.2010.511652>

42. Schaub K, Caragnano G, Britzke B, Bruder R (2013). The European Assembly Worksheet. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 14(6), 616–639 <https://doi.org/10.1080/1463922X.2012.678283>
43. Schlick C, Bruder R, Luczak H (2018) *Arbeitswissenschaft*. 4. Aufl. Berlin: Springer
44. Stork S, Schübo A (2010) Human cognition in manual assembly: Theories and applications. *Advanced Engineering Informatics*, 24: 320–328 <https://doi.org/10.1016/j.aei.2010.05.010>
45. Takeda H (2006) LCIA – Low Cost Intelligent Automation. Produktivitätsvorteile durch Einfachautomatisierung. mi-Fachverlag, Landsberg am Lech
46. Thorvald P, Backstrand G, Hogberg D, De Vin LJ, Case K (2008) Information presentation in manual assembly: A cognitive ergonomics analysis. In: *Proceedings of 40th Annual Nordic Ergonomics Society Conference (NES 2008): ergonomics is a lifestyle*, Reykjavik, Iceland
47. Unrau A, Hinrichsen S, Riediger D (2016) Development of Projection Based Assistance System for Manual Assembly. In: *Ergonomics 2016 – Focus on Synergy*, 6th International Ergonomics Conference, Zadar, Croatia, 365–370
48. Vollmer M (2015) A robust, simple and reliable measure of heart rate variability using relative RR intervals. <https://marcusvollmer.github.io/HRV/files/paper.pdf>. Zugegriffen: 03. Sep. 2019
49. Wickens CD (2008) Multiple resources and mental workload. *Human factors*, 50(3): 449–455 <https://doi.org/10.1518/001872008X288394>
50. Wölflle M (2014) Kontextsensitive Arbeitsassistenzsysteme zur Informationsbereitstellung in der Intralogistik. Dissertation, Technische Universität München
51. Young M S, Brookhuis K A, Wickens C D, Hancock P A (2015) State of science: mental workload in ergonomics. *Ergonomics*, 58(1): 1–17 <https://doi.org/10.1080/00140139.2014.956151>
52. Zaeh M F, Wiesbeck M, Stork, S, Schübo A (2009) A multi-dimensional measure for determining the complexity of manual assembly operations. *Production Engineering*, 3: 489–496 <https://doi.org/10.1007/s11740-009-0171-3>
53. Zhu X, Hu S J, Koren Y, Marin S P (2008) Modeling of manufacturing complexity in mixed-model assembly lines. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 130(5), 051013 (10 Seiten) <https://doi.org/10.1115/1.2953076>

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

