

Ergonomische Evaluation von Kraftwerkskomponenten mittels Virtual Reality-Technologien

Martin BRAUN, Vivien MELCHER

*Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO),
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart*

Kurzfassung: Die ergonomische Evaluation von Produkt- und Systemgestaltungen mittels Virtual Reality (VR)-Technologien verspricht Vorteile hinsichtlich räumlich-dynamischer Darstellung und interaktiver Manipulation von digitalen Prototypen. Gestaltungsdefizite lassen sich bereits im frühen Entwurfsstadium entdecken und mit vergleichsweise geringem Aufwand korrigieren, bevor physische Prototypen entstehen. Die Einbeziehung mehrerer Probanden in eine Virtuelle Umgebung fördert ein kooperatives Vorgehen. Das Redesign ausgewählter Kraftwerkskomponenten im Rahmen eines Industrieprojektes war Anlass, um Stärken und Schwächen der VR-Technologien für die ergonomische Evaluation von digitalen Prototypen zu ermitteln. Neben einer Kurzbeschreibung der technischen Einrichtungen stellt der Beitrag konzeptionelle Vorbereitungen, die praktische Durchführung des Evaluationsprozesses sowie Ergebnisse vor. Es werden Potenziale und Grenzen der virtuellen Evaluationsmethodik diskutiert, die auf praktischen Erfahrungen von Probanden und Versuchsleitern beruhen.

Schlüsselwörter: Ergonomie, digitale Produktentwicklung, Virtuelle Realität, Kraftwerkskomponenten, Praxisbericht

1. Methoden der virtuellen Evaluation

1.1 Technische Ausstattung

Im Zuge der digitalen Produktentwicklung werden vermehrt Virtual Reality (VR-) Technologien eingesetzt, um Rechnersimulationen von Arbeitssystemen und Produkten (*d. h. digitale Prototypen*) bereits in der Entwurfsphase einer ergonomischen Analyse zu unterziehen (Spath et al. 2012). Entsprechende VR-Technologien umfassen neben leistungsfähigen Rechnern vor allem stereoskopische Projektionssysteme und hochauflösende Tracking-Systeme, die eine echtzeitorientierte Interaktion von Proband und Virtueller Umgebung ermöglichen (Dangelmaier 2009). In den vergangenen Jahren lösten großflächige Projektionssysteme die unkomfortablen Bildschirmbrillen (*d. h. Head Mounted Displays*) weitgehend ab. Ein solches 3D-Projektionssystem mit einer dreiseitigen, 5 m langen und 3,4 m hohen Projektionswand (*d. h. Power Wall*, vgl. Abbildung 1) steht im „Immersive Engineering Lab“ des Fraunhofer IAO zur Verfügung (Bues et al. 2009).



Abbildung 1: 3D-Projektionssystem im „Immersive Engineering Lab“ des Fraunhofer IAO

1.2 Wechselwirkungen von Mensch und Technik

Die Ergebnisqualität eines virtuellen Evaluationsprozesses wird maßgeblich durch die Wechselwirkungen von Virtueller Umgebung und Proband bestimmt. Um „körperlos“ im dreidimensionalen Raum zu navigieren und Objekte mit bis zu sechs Freiheitsgraden in Echtzeit zu manipulieren, muss der Proband die Steuerungslogik zuverlässig beherrschen. Vier Aspekte prägen die Wechselwirkung von Mensch und Technik:

- Fähigkeiten, Fertigkeiten und Erfahrungen des Probanden (z. B. Sinneswahrnehmung, räumliches Orientierungsvermögen, angemessene Erwartungen an die Methodik, mögliche Neigung zur Simulatorkrankheit).
- Aufgabenmerkmale (z. B. Eigenschaften der digitalen Prototypen, Komplexität der Aufgabe, Grad der Interaktivität, geforderte Präzision der Interaktion).
- Technische Merkmale der Interaktion (z. B. intuitive Schnittstellengestaltung, visuelle Darstellungsqualität u. a. von Texturen und Farbwiedergabe, mögliche Kollisionserkennung).
- Sensorische Merkmale der Interaktion (z. B. verzerrte Projektionen bei suboptimalem Augpunkt in Mehrpersonenanwendungen, sensorische Divergenz mangels physikalischer Einflussfaktoren wie Gewichtskräfte und Temperaturen in der Simulation).

2. Evaluation von Kraftwerkskomponenten

2.1 Aufgabenstellung

Im Rahmen eines Redesigns von Kraftwerkseinrichtungen (d. h. Generator- und Dampfturbinen-Nebenanlagen) galt es, ausgewählte Komponenten nach anerkannten ergonomischen Kriterien zu gestalten (IEEE 1023-2004, ISO 6385-2004). In der Konstruktionsphase war zu gewährleisten, dass die Komponenten den menschlichen Leistungsvoraussetzungen genügen, Aufgaben funktionell und

zuverlässig auszuführen sind, und letztlich ein Beitrag zum sicheren Anlagenbetrieb geleistet wird. Die ergonomischen Anforderungen bezogen sich auf sämtliche Betriebszustände der Anlage, wie Anlauf, Regelbetrieb, Inspektion, Wartung, Abschaltung und Instandhaltung. Die Anwendung ergonomischer Gestaltungsprinzipien im Konstruktionsprozess wurde mittels geeigneter Checklisten fortlaufend verifiziert (NUREG-0700 2002).

In einem weiteren Projektschritt war die sachgerechte Umsetzung der ergonomischen Gestaltungsprinzipien für die neu konstruierten Kraftwerkskomponenten zu validieren (NUREG-0711 2012). Da in den frühen Phasen des Redesign-Projektes lediglich Konstruktionszeichnungen bzw. digitale Prototypen vorlagen, erfolgte die ergonomische Validierung von Komponenten in einer Virtuellen Umgebung.

2.2 Methodik

In einer gezielten Auswahl wurden 4 Probanden (d. h. Betriebsingenieure und Monteure) beiden Geschlechts sowie unterschiedlicher Körpermaße und Konstitution rekrutiert, die vorab über keine Erfahrungen im Umgang mit Virtuellen Umgebungen verfügten. Sie repräsentierten das Bedienpersonal. Die Einbeziehung der erfahrenen Kraftwerker in den Validierungsprozess stellte sicher, dass ergonomische Gestaltungsdefizite entdeckt und im andauernden Konstruktionsprozess beseitigt werden konnten.

Die ergonomische Validierung der digitalen Prototypen bezog folgende Kriterien ein:

- Zugänglichkeit, Sichtbarkeit und Erreichbarkeit von Anzeigen, Stellteilen, Ventilen und anderen Schnittstellen, gewichtet nach ihrer Nutzungshäufigkeit,
- Durchführbarkeit von idealtypisch beschriebenen Tätigkeitsabläufen und deren Einzelschritte für die oben genannten Betriebszustände, u. a. beim Einsatz von Hebezeugen und der (De-) Montage von Abdeckungen.

Das Vorgehen gliederte sich in drei Phasen (vgl. Abbildung 2):

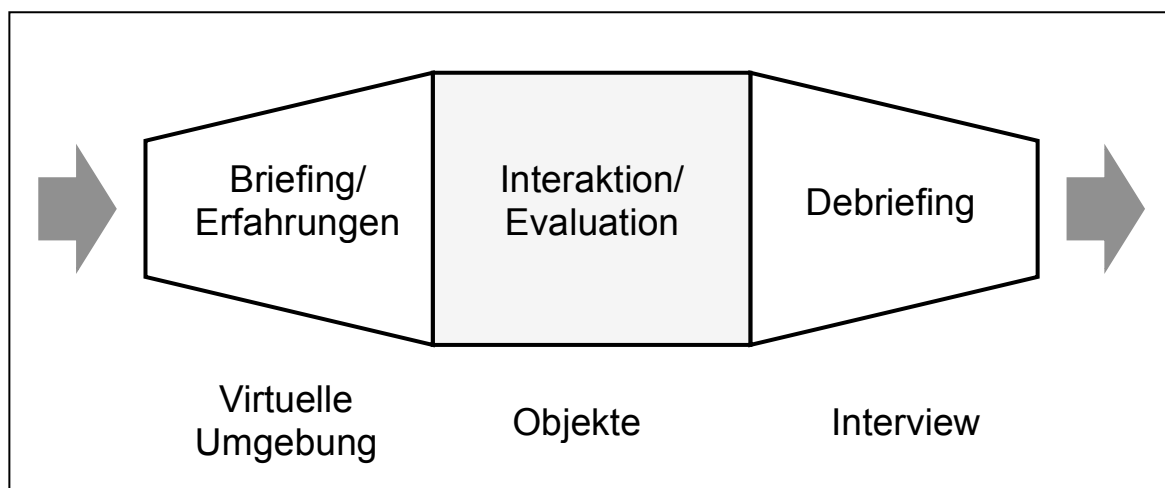


Abbildung 2: Evaluationsphasen in einer Virtuellen Umgebung

Die konkreten Vorgehensschritte im Validierungsprozess waren:

- Begrüßung der Probanden, Einführung in das Projekt, Aufklärung über gesundheitliche Risiken (d. h. Sicherheitsunterweisung).

- Einweisung in den Validierungsprozess; Erläuterung von Szenarien, Aufgaben und Evaluationskriterien (d. h. Probanden wurden vorab schriftlich informiert).
- Klärung der einschlägigen Berufserfahrungen, der Tätigkeitsschwerpunkte und der Kenntnis der ausgewählten Kraftwerkskomponenten.
- Erstes Sammeln praktischer Erfahrungen in der Virtuellen Umgebung anhand einer sachfremden Architektursimulation, um die räumliche Orientierung zu fördern und grundlegende Navigationstechniken zu erlernen. Zudem war Gelegenheit, um mögliche methodische und persönliche Restriktionen (z. B. Simulatorkrankheit) zu identifizieren und zu minimieren.
- Einzelpersonenbezogene Durchführung der Validierung durch angeleitete Tätigkeitsausführung und Methoden des „cognitive walkthrough“ bzw. des „thinking aloud“.
- Videobasierte und fotografische Dokumentation des Geschehens, schriftliche Erfassung von wesentlichen Kommentaren.
- Wiederholung von Aufgaben im Probandenpool, um unterschiedliche Perspektiven zusammenzuführen (vgl. Abbildung 3).
- Schriftliche Befragung der Probanden zur Schnittstellengestaltung anhand von Checklisten bzw. eines Post-Szenario-Fragebogens.
- Abschlussdiskussion (Debriefing).



Abbildung 3: Kooperative Diskussion von Konstruktionsentwürfen in der Virtuellen Umgebung

Zwei Ergonomen leiteten und moderierten den dreitägigen Validierungsprozess im „Immersive Engineering Lab“. Ein Informationstechniker betreute das VR-System und unterstützte die Probanden bedarfsweise im Umgang mit technischen Interaktionsgeräten. Zudem oblag ihm die Aufgabe, die CAD-Datensätze der digitalen Prototypen in das *Wavefront OBJ*-Datenformat zu konvertieren und diese für eine echtzeitorientierte 3D-Rechnersimulation im „Immersive Engineering Lab“ aufzubereiten.

2.3 Systemtechnische Spezifikationen

Die ergonomische Validierung von digitalen Prototypen setzt realistisch anmutende Bedingungen in der Virtuellen Umgebung voraus. Im „Immersive Engineering Lab“ wurden diese Voraussetzungen aufgrund früherer Probandentests als gegeben

erachtet (vgl. Bues et al. 2009). Darüber hinaus wurde der Validierungsprozess wie folgt spezifiziert, um aussagekräftige Ergebnisse zu erlangen:

- Strukturierte Beschreibung von Aufgaben und Tätigkeitsabfolgen anhand von gängigen Betriebsszenarien, unter Einbeziehung ergonomischer, sicherheitstechnischer und funktionaler Gestaltungsanforderungen (d. h. Arbeitsbedingungen, Werkzeugeinsatz, Persönliche Schutzausrüstung).
- Einschränkung der Interaktionsformen mit digitalen Prototypen (d. h. Rotation der Objekte nur um Vertikalachse, keine Skalierbarkeit, keine Aufgliederung in Einzelkomponenten).
- Kontrastreiche, farbliche Markierung von Einzelkomponenten, um diese (auch ohne Kenntnis von Fachbegriffen) anhand von Farbmerkmalen eindeutig bezeichnen zu können.
- Begleitende Verwendung von Konstruktionsunterlagen (*d. h. Print out*), um Planungsdetails wie Bemaßungen etc. zügig nachvollziehen zu können.

Durch seine halboffene Gestaltung und seine funktionale Möblierung bot das „Immersive Engineering Lab“ günstige Voraussetzungen für einen zweckmäßigen Methodenmix aus rechnergestützter Simulation und papierbasierter Dokumentation.

2.4 Ergebnisse

Wenngleich an dieser Stelle nicht auf konstruktive Gestaltungsdetails eingegangen wird, führte das vorab beschriebene Vorgehen zu folgenden Ergebnissen:

- Für die Bedienung der digitalen Prototypen bzw. deren Komponenten konnten dezidierte Aussagen zu Körperhaltungen und Bewegungsabläufen der Probanden getroffen (d. h. Körpergleichgewicht, Komfortbewertungen) und potenzielle Kollisionsstellen identifiziert werden.
- In einem weiteren Schritt wurden anthropometrische Verbesserungsvorschläge für die digitalen Prototypen abgeleitet. Dies betraf die räumliche Anordnung von Stellteilen, Verrohrungen und Anschlagpunkten ebenso wie die Gestaltung von Gehäusen und Öffnungen – um etwa Hebezeuge zweckmäßig einsetzen zu können –, und den Einsatz von Tritten, Leitern und Gerüsten.
- Im Detail konnten eine zweckmäßige Anordnung von Anzeigen, Stellteilen und Ventilen überprüft sowie Greifbereiche und Sichtfelder optimiert werden.

Zusammenfassend wurden in einem iterativen Validierungs- und Optimierungsprozess bewährte Prinzipien einer ergonomischen Produkt- und Systemgestaltung konstruktiv umgesetzt, ohne dass hierfür physische Prototypen erforderlich waren.

3. Diskussion

Trotz beachtlicher Fortschritte der VR-Technologien stellen ergonomische Evaluationen von digitalen Prototypen derzeit eher die Ausnahme als den Regelfall in der betrieblichen Gestaltungspraxis dar. Gründe liegen in einem erheblichen geräte-technischen und personellen Aufwand, der erst ab einem gewissen Projektumfang eine Wirtschaftlichkeit des Vorhabens erwarten lässt. Vor allem in frühen Konstruktionsphasen, in denen keine physischen Prototypen zur Verfügung stehen, bieten VR-Systeme jedoch wesentliche Vorteile gegenüber checklistenorientierten Validierungsverfahren:

- Innovative VR-Technologien und die exklusive Methodik steigern das Interesse von Probanden, am Evaluationsprozess teilzunehmen.
- Die räumlich-dynamische Visualisierung von digitalen Prototypen fördert eine zügige Identifikation von Funktions- und Konstruktionsprinzipien. Zudem werden Gestaltungsdefizite veranschaulicht und deren Auswirkungen auf den arbeitenden Menschen zügig erkannt.
- Die interdisziplinäre Einbeziehung von Konstrukteuren, Betriebspraktikern und Ergonomen in das Vorgehen setzt intensive Diskussionsprozesse in Gang. Deren Verlauf offenbart recht schnell divergierende Sichtweisen und (implizite) Gestaltungsanforderungen, die dann einer einvernehmlichen und bedarfsgerechten Lösung zugeführt werden können.
- Konstruktive Modifikationen können aus dem Prozess heraus vergleichsweise aufwandsarm (z. B. als Screenshot oder als CAD-Datei) dokumentiert und an die Konstrukteure zurückgespielt werden. Trotz technischer Optionen erwies sich die schnelle handschriftliche Papiernotiz jedoch nach wie vor als unabdingbares Element des Evaluationsprozesses.

Wenngleich sich immersive VR- Anwendungen durch eine hohe Intuitivität auszeichnen, erfordert eine ergonomische Evaluation digitaler Prototypen eine eingehende Einweisung der Probanden in das System, um Navigations- und Interaktionstechniken hinreichend präzise zu beherrschen.

Die zeitliche Effizienz des Evaluationsprozesses wurde wesentlich durch die Vorkenntnisse der Probanden beeinflusst. Daher sind profunde Fachkenntnisse der Probanden vorauszusetzen, sollen diese am Evaluationsprozess produktiv teilnehmen.

Es erwies sich zuweilen als mühevoll, die Probanden zur Durchführung von idealtypischen Tätigkeitsabläufen und geschlossenen Handlungsepisoden zu motivieren, wie es die Prüfroutinen vorsahen (NUREG-0700 2002). Ihr Erleben, ihre inneren Vorstellungen und ihr Denken bezogen sich vielmehr auf technische Einzelfunktionen der jeweiligen Komponenten. Aufgrund dieses Umstands ist in weiteren Projekten zu klären, ob sich die ergonomische Validierung digitaler Prototypen stärker an technischen Funktionsweisen, und nicht nur an aufgabenbezogenen Tätigkeitsabläufen orientieren soll. Entsprechend wären Versuchsanleitungen und Checklisten zu modifizieren.

4. Literatur

- Bues M, Blach R, Dangelmaier M, Haselberger F (2009) Virtual Environments and Visual Technologies at Fraunhofer IAO. In: Nozick V (Hrsg) Proceedings of Joint Virtual Reality Conference of EGVE - ICAT - EuroVR 2009. Lyon, S. 91-92.
- Dangelmaier M (2009) Concept Experience – Virtuelle Realität in frühen Phasen der Produktentstehung. In: Gausemeier J (Hrsg) Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. Paderborn: HNI, S. 321-332.
- IEEE 1023 (2004) Guide to the application of Human Factors Engineering systems, Equipment and Facilities of Nuclear Power Generating Stations and other Nuclear Facilities.
- ISO 6385 (2004) Ergonomic Principles in the Design of Work Systems.
- NUREG-0700 Rev 2 (2002) Human System Interface Design Review Guidelines. Washington: U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- NUREG-0711 Rev 3 (2012) Human Factors Engineering Program Review Model. Washington: U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Spath D, Braun M, Meinken K (2012) Human Factors in Manufacturing Systems. In: Salvendy G (Hrsg) Handbook of Human Factors and Ergonomics, 4. Auflage. New York: Wiley, S. 1643-1666.