

# Gestaltungsempfehlungen für Operatorarbeitsplätze – Ableitungen aus einer Eye-Tracking-Studie

**Roberto Kockrow, Annette Hoppe**

Lehrgebiet Arbeitswissenschaft/ Arbeitspsychologie, Brandenburgische Technische  
Universität Cottbus - Senftenberg, Siemens-Halske-Ring 14, 03046 Cottbus,  
Tel.: +49 355 69 4879, kockrow@tu-cottbus.de, <http://www.tu-cottbus.de/fakultaet3/de/arbeitswissenschaft/>

**Kurzfassung:** Die nachfolgend beschriebene Studie beinhaltete eine Analyse des Blickverhaltens an Operatorarbeitsplätzen. Der Fokus lag auf der Untersuchung bestehender Leitstände mit Hilfe eines Blickerfassungssystems, wobei der Einfluss der Visualisierungsmitteldichte auf die Nutzungsgewohnheiten und das Bedienverhalten analysiert werden sollte. Es zeigte sich, dass unabhängig von der Anzahl vorhandener Visualisierungsmittel eine visuelle Komfortzone gebildet wird, welche biologisch motiviert ausgeprägt wird und von vorherrschenden Prozesseigenschaften beeinflusst wird.

**Keywords:** Leitstand, Visualisierungsmittelanzahl, Eye-Tracking

## 1 Problem und Zielstellung

Operatoren in modernen Leitwarten müssen mit Hilfe von Prozessleitsystemen die zugrunde liegenden, dynamischen Prozesse trotz räumlicher Entkopplung überwachen und steuern. Ablaufende Prozesse werden dazu auf Anzeigegeräten wie Bildschirmen oder Großbildprojektionen als informationstechnisches Abbild abstrahiert und aggregiert wiedergegeben<sup>[1]</sup>. Trotz der typischen, starken Informationsvisualisierung gibt es für Leitwarten keine Begrenzung der Anzahl zu verwaltender, digitaler Visualisierungsmittel (DVM) je Operator. In der Literatur wird zwar häufig eine Anzahl an DVM für die Arbeitsplatzbestückung empfohlen, mangels Maximalangaben bleibt eine potenzielle Übervisualisierung der Operatorarbeitsplätze aber offen<sup>[2][3]</sup>. Relevante Kriterien für die Dimensionierung der Visualisierungsmittelausstattung stellen z. B. die zu bewältigende Arbeitsaufgabe und die erforderliche Dynamik der Informationsvisualisierung dar<sup>[4]</sup>. Überlegungen bezüglich der maximalen Visualisierungsmittelausstattung müssen dennoch getroffen werden, da Beanspruchungen mit negativen Effekten durch nicht adäquate Informationsrepräsentationen entstehen können<sup>[5]</sup>.

Im Folgenden werden die Ergebnisse einer wissenschaftlichen Studie unter Verwendung eines Blickerfassungssystems in Leitwarten von Kohlekraftwerken der Vattenfall Europe Generation AG zusammengefasst. Ziel war es, die vorhandene Visualisierungsmitteldichte an Operatorarbeitsplätzen und deren Effekte auf das Blickverhalten der Operatoren zu untersuchen sowie angewandte Bedienstrategien zu analysieren. Die Grundidee lag darin, verschieden stark visualisierte Arbeitsplätze bottom-up zu evaluieren, um individuelles

Nutzerverhalten der Operatoren zu erfassen, die Verwendungshäufigkeit verschiedener Anzeigegeräte zu quantifizieren und die maximal erforderliche Visualisierungsmittelausstattung in Abhängigkeit von Prozessmerkmalen zu identifizieren.

## 2 Theoretische Betrachtung

### 2.1 Der Mensch in Supervisory Control

Von Prozessführungssystemen oder auch Supervisory Control wird gesprochen, wenn eine Mensch-Maschine-Schnittstelle durch einen hohen Automatisierungsgrad verbunden mit einer deutlichen Arbeitsteilung zwischen Mensch und Computersystem gekennzeichnet ist<sup>[1]</sup>. Ziel ist die Entlastung des Menschen und die Bereitstellung informationstechnischer Methoden, Verfahren und Werkzeugen für das Führen komplexer, teilautomatisierter Systeme. Dazu angewendete Leittechnik ist mehrschichtig hierarchisch strukturiert, örtlich sowie funktional dezentral verteilt und bietet Regelungs- und Steuerungsmaßnahmen für die (Teil-) Prozesslenkung. Die Prozessleitsoftware bildet hier die Schnittstelle zwischen den Aktuatoren der Anlage und dem Operator, wobei die Anlage als informationstechnisches Abbild wiedergegeben wird. Diese Systeme arbeiten in Echtzeit und Bedieneingaben werden just-in-time in der Prozessaktuatorik umgesetzt<sup>[6]</sup>. Für die folgende Betrachtung liegt der Fokus auf den Stationen für Bedienungs-, Beobachtungs-, Überwachungs- und Protokollierungsaufgaben, den Operatorarbeitsplätzen in Leitzentralen oder Leitwarten.

Die Hauptanforderungen, welche an sie gestellt werden, sind nach *Sheridan et al. (1983)*<sup>[7]</sup> die Überwachung, Fehlerbeseitigung, Diagnose sowie manuelle Regelungen. Für adäquate Handlungen sind meist große Informationsmengen zu verarbeiten und schwierige Schlussfolgerungen notwendig. 80%-95% der Prozesszeit sind geprägt durch den bestimmungsgemäßen Überwachungsbetrieb<sup>[8]</sup>, während 1%-5% gekennzeichnet sind von hohen Beanspruchungen durch Prozessstörungen oder nicht vorhersehbare Betriebsereignisse<sup>[9][10]</sup>. Der Mensch fungiert also zu einem Großteil der Zeit als passiver Überwacher<sup>[4][11]</sup>, trägt jedoch permanent die Verantwortung für die Wirtschaftlichkeit, Verfügbarkeit und Sicherheit der Anlage. Manuelle Eingriffe sind eher selten und nicht vorhersagbar, besitzen aber meist große Tragweiten und unterliegen oft hohem Zeitdruck. Im Fall von Prozessabweichungen oder Störungen muss der Operator schnell agieren und dafür jederzeit die volle Prozessübersicht besitzen. Daraus ergeben sich die viel zitierten „Ironien der Automation“ nach *Bainbridge (1983)*<sup>[12]</sup>. Eine zutreffende und aktuelle mentale Modellvorstellung von ablaufenden Teilprozessen und deren Wirkungszusammenhängen ist die Basis für das rechtzeitige, proaktive Erkennen von Abweichungen des Prozessverlaufs und das Einleiten korrekter Gegenmaßnahmen. Das erforderliche Situationsbewusstsein für die Erkennung möglicher Fehlerquellen kann nur durch visuelle Abtastung der digitalen Prozessrepräsentationen erfolgen. Dabei agiert der Operator erfahrungsgesteuert, wobei sein Blickverhalten durch die nachfolgend beschriebenen anatomischen Eigenschaften des Sehapparates ebenso determiniert ist wie durch die begrenzten kognitiven Kapazitäten der Wahrnehmung bzw. Verarbeitung von Umgebungsinformationen.

## 2.2 Menschliche Wahrnehmungsfähigkeiten und -grenzen

Das menschliche Auge ist das Sinnesorgan für die visuelle Wahrnehmung der Umwelt. Der visuelle Informationskanal besitzt für die Umgebungswahrnehmung eine Durchsatzrate von ca. 10Mbit/s, was ungefähr 80% seiner Wahrnehmungspanne entspricht<sup>[13]</sup>. Grundsätzlich ähnelt das menschliche Auge im Aufbau und Funktionsprinzip einer Kamera: Die Informationsaufnahme erfolgt - stark vereinfacht zusammengefasst- mittels einer flexible Sammellinse durch Bündelung und Brechung des einfallenden Lichts. Für eine Anpassung an den Sehabstand (Nah- und Fernakkomodation) sowie unterschiedlich starke Lichteinwirkungen (Hell-Dunkel-Adaption) sind Regulationsmechanismen vorhanden<sup>[14]</sup>. Ins Auge einfallende Lichtreize stimulieren Photorezeptoren (Stäbchen und Zapfen) auf der abbildgenerierenden Retina. Die Rezeptoren transformieren die Lichtreize in elektrochemische Signale, die zum Gehirn über Nervenzellen (Sehbahn) geleitet und dort interpretiert bzw. verarbeitet werden. Erst dort erfolgt der eigentliche Wahrnehmungsprozess.

Der Bereich des schärfsten Sehens, die Fovea centralis, ist sehr klein, aber extrem dicht mit Rezeptoren für Farbsehen bestückt<sup>[15]</sup>. In diesem Bereich wird das Maximum an Farbdifferenzierung, Detailschärfe und räumlicher Wahrnehmung gewährleistet. In hellen Situationen sind hierbei maximale Leistungen zu erwarten<sup>[14]</sup>. Der Bereich schärfsten Sehens mit einem Kegelöffnungswinkel von ca.  $\pm 1^\circ$  um den Fixationsort ist aufgrund der Fovea sehr begrenzt<sup>[16]</sup>. In etwa entspricht dies der Größe des Daumnagels bei ausgestrecktem Arm. In einem Bereich von ca.  $4^\circ$ – $5^\circ$  um die Sehachse befindet sich der parafoveale Wahrnehmungsbereich (auch optimales Blickfeld), in dem auf Grund der Abnahme der Stäbchen eine Minderung der Sehschärfe um bis zu 50% in den Bereichen um  $3^\circ$ – $5^\circ$  erfolgt. Trotzdem ist die Sehleistung in diesem Areal noch recht gut<sup>[17]</sup>. Im umgebenden, extrafovealen Wahrnehmungsbereich mit einem Durchmesser von ca.  $30^\circ$  ( $\pm 15^\circ$ ) ist es dahingegen gerade noch möglich, brauchbare visuelle Informationen bewusst aufzunehmen. An ihn schließt sich der periphere Wahrnehmungsbereich an, welcher sich durch ein hohes zeitliches Auflösungsvermögen auszeichnet und besonders sensitiv für Bewegungen und Veränderungen der Umwelt ist. Das periphere Sehen liefert viele Informationen, die zur Auslösung und Steuerung von Blickbewegungen dienen. Wenn ein Reiz als interessant aufgefasst wird, richtet sich der Sehapparat zur Erfassung des Objekts mit dem fovealen Sehen entsprechend aus. Augenbewegungen sind ausreichend, wenn die Distanz zwischen zwei Sehobjekten  $< 30^\circ$  beträgt. Für größere Abstände müssen zusätzlich Kopfbewegung für die Fokussierung des fovealen Sehens auf das neue Sehobjekt eingesetzt werden<sup>[17]</sup>. Die visuelle Wahrnehmung enthält demnach foveale und periphere Sinneseindrücke<sup>[18]</sup>.

Neben anatomisch begründeten Beschränkungen unterliegt die menschliche Wahrnehmung auch kognitiven Determinanten, da die Ressourcen zur Informationsverarbeitung ebenfalls begrenzt sind. Die Verarbeitungskette erstreckt sich über drei Gedächtnisstufen. Um eine Mustererkennung und Merkmalsbildung zu ermöglichen, werden Informationen für extrem kurze Verarbeitungszeit  $t_v$  im sensorischen Gedächtnis (Ultrakurzzeit) vorgehalten. Abhängig von der Art des Reizes wird von ikonischen (visuelle Reize,  $t_v=200ms$ ) bzw. echoischen (auditive Reize,  $t_v=1500ms$ ) Speicher gesprochen (vgl. Human Processor Model nach Card *et al.* (1983)<sup>[19]</sup>). Bei Relevanz werden die Informationen in das ressourcenbegrenzte Kurzzeitgedächtnis überführt, dessen Funktion im Verarbeitungsprozess als Analogie eines Arbeitsspeichers beschrieben werden kann. Die Kapazität ist mit  $7 \pm 2$  Informationseinheiten

(Millersche Zahl<sup>[20]</sup>) begrenzt und kann nicht durch Training, aber durch Bilden von Informationseinheiten, den sog. Chunks, optimiert werden. Nach mehrfachem Wiederholen werden Daten aus dem Kurzzeitgedächtnis in das quasi unbegrenzte Langzeitgedächtnis überführt und dort dauerhaft gespeichert. Wird dieses Wissen längere Zeit nicht bewusst gemacht, erschwert sich der Zugriff bis hin zu dessen vollständigem Verlust<sup>[12]</sup>.

### 2.3 Operatorverhalten an Leitständen

Die Einflussfaktoren auf die Aufmerksamkeitsverteilung des Menschen an Überwachungsarbeitsplätzen sind anhand des für den Fliegerbereich entwickelten Saliency-Effort-Expectancy-Value-Modell (SEEV) von *Wickens (2000)*<sup>[21]</sup> beschreibbar. Anhand dieses Modells sind die Wechselwirkungen der Einflussfaktoren erkennbar. Gemäß des SEEV-Modells regulieren folgende Faktoren die visuelle Aufmerksamkeitsverteilung des Menschen:

Auffälligkeit (*Saliency*) des Signals

- Abheben von der Umgebung durch Größe, Form, Farbe oder andere Eigenschaften,
- auffälliges Signal begünstigt die Erregung visueller Aufmerksamkeit.

Aufwand (*Effort*) für eine erneute Fixation

- geringste physiologische Kosten, wenn der nachfolgende Fixationspunkt im fovealen Blickbereich liegt (Aufmerksamkeitsfokus ohne Augenbewegungen verschiebbar),
- geringe Kosten durch Augenbewegungen in einem kleinen Winkelbereich (< 30°),
- Fixationen in einem darüber hinausgehenden Winkel werden mit Unterstützung der Nackenmuskulatur durchgeführt, in Extremfällen durch Körperdrehungen unterstützt,
- kostenintensive Körperbewegungen bedingen Vermeidung starker Auslenkungen.

Erwartung (*Expectancy*) an die Information

- oft als Bandbreite (Veränderungen/Zeiteinheit) angegeben,
- Steigerung der Anzahl beobachteter Änderungen eines Signals führt zu größerer Änderungserwartung des Signals und zu vergrößertem Aufmerksamkeitspotential.

Wert (*Value*) der Information

- kann sowohl positiv (Wert der visuellen Information für die Aufgabenbearbeitung) als auch negativ (Kosten nicht wahrgenommener Informationen) ausgeprägt sein.

Die Aufmerksamkeitsverteilung wird durch diese Faktoren entsprechend der Gleichung<sup>[22]</sup>

$$P(A) = sS - efEF + (exEX + vV)$$

beeinflusst. Inhibitorisch wirkt demnach vor allem der Aufwand (*Effort*), der für die Verlagerung der Aufmerksamkeit aufgewendet werden muss. Je weiter zwei abzutastende AOI voneinander entfernt sind, umso größer müssen Informationswert, -auffälligkeit oder -erwartung ausfallen, um die hemmende Wirkung des Aufwandes zu kompensieren. Daher ist zu erwarten, dass Operatoren vorrangig in einem visuellen Hauptaktionsbereich agieren, welcher durch das Blickverhalten nachweisbar ist. In diesem Bereich können alle relevanten Anlageninformationen auf den DVM aufgeschaltet werden, so dass für die Verschiebung des fovealen Sehens zur Informationsaufnahme nur geringe physiologische Kosten entstehen.

Insbesondere stark visualisierte Arbeitsplätze lassen intuitiv gesteuerte Benutzungsmerkmale vermuten, wo Visualisierungsmittel z. B. mit variierenden Intensitäten oder für verschiedene Zwecke in den Arbeitsprozess systematisch einbezogen werden. Vermutlich werden entfernter positionierte Visualisierungsmittel wegen des hohen Aufwands eine untergeordnete Rolle spielen, da weit auslenkende Kopf- und Körperdrehungen oder gar Positionsveränderungen für die visuelle Erfassung nötig werden. Daher ist die Berücksichtigung psychologischer Erkenntnisse, auch über visuelles Verhalten, bei der Arbeitsplatzgestaltung und Informationsdarstellung wichtig, um optimale Arbeitsbedingungen für erforderliche Bedien- und Beobachtungshandlungen zu garantieren.

## 2.4 Eye-Tracking und Blickbewegungsparameter

Eye-Tracking wird in verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen angewendet, z. B. in den Neurowissenschaften, der Wahrnehmungs- und Kognitionspsychologie, der Marktforschung und der Sicherheitstechnik. Blickbewegungen einer Person können so zur Erfassung der visuellen Wahrnehmung aufgezeichnet werden. Dazu sind grundlegende Annahmen notwendig, welche von *Just & Carpenter (1980)*<sup>[23]</sup> allgemein gültig formuliert wurden:

- die Blickachse richtet sich auf das Objekt der unmittelbar erfahrenen visuellen Umwelt, das momentan Gegenstand der zentralen Verarbeitung ist,
- die Dauer der Fixation entspricht der Dauer der zentralen Verarbeitung und kann mit dieser gleichgesetzt werden.

Eye-Tracking-Daten sind mit Hilfe zahlreicher räumlicher und zeitlicher Parameter beschreibbar. Hierzu zählen vor allem Fixationsdauer, Fixationsort, kumulierte Fixationen und Blickpfade, um nur einige Beispiele zu nennen. Augenbewegungen werden nach *Rötting* als die Bewegungen des Augapfels bezeichnet, die durch Beobachtung erfassbar sind. Diese Bewegungen werden zu Blickbewegungen, wenn mit ihnen die Aufnahme visueller Informationen verbunden ist<sup>[24]</sup>. Für die Informationsaufnahme (während einer Fixation) muss das foveale Sehen auf ein Sehobjekt ausgerichtet werden. Dazu sind Augenbewegungen in Form von Blicksprüngen (Sakkaden) erforderlich. Während einer Sakkade ist die visuelle Wahrnehmung drastisch herabgesetzt. Eine Informationsaufnahme für das Auge ist nur bei ruhendem Auge möglich. Diese Ruheperioden (Fixationen) zwischen den Sakkaden ermöglichen die Fokussierung von Sehobjekten und somit eine Informationsaufnahme. Als Fixationen werden Ruheperioden gewertet, die mindestens ca. 100ms andauern. Der Mensch ist zum Ausgleich von Positionsveränderungen fähig, um eine Fixation aufrecht zu erhalten. Das kann durch Lageveränderungen des eigenen Körpers, durch Bewegung der Umwelt oder nur des Fixationsobjektes erfolgen. Objekten, die sich langsam bewegen, kann das Auge mit gleitenden Blickbewegungen (sog. smooth pursuits) problemlos folgen.

## 3 Methodik

Die Datenerfassung wurde methodisch in laufende Studien zur Softwareanalyse an Prozessleitsystemen integriert. Somit wurden die Probanden für abzuleitende Aussagen zur Visualisierungsmittelnutzung in ihrem Handeln nicht beeinflusst, da vermittelt wurde, dass der Fokus der Datenerhebung auf einer software-ergonomischen Systemanalyse liegt. Bewusste Hinweise auf zu erhebende Nutzungsstatistiken für vorhandene DVM wurden nicht

explizit gegeben, wodurch eine bewusste Beeinflussung der Ergebnisse auszuschlossen werden kann.

Für die Datenaufzeichnung kam das Dikablis-Blickerfassungsgerät der Firma Ergoneers GmbH zur Einsatz, welches die Fixationspunkte des Probanden über eine, mit zwei Kameras (Augen- und Feldvideo) ausgestattete, kopfgetragene Datenerfassungseinheit aufzeichnet. Die Datenerfassung erfolgte während des Leitstandbetriebs jeweils in der Spätschicht im Normalbetrieb, wobei die Probanden die Head-Unit des Blickerfassungsgeräts trugen. Die leichte Head Unit und die verwendete Funkstrecke für die Datenübertragung sollten den Operatoren eine maximale Bewegungsfreiheit während der Messungen ermöglichen.

Da Blickerfassungsdaten allein für eine software-ergonomische Analyse nur unspezifische Ableitungen erlauben<sup>[25]</sup>, wurde die Methodik durch teilstandardisierte Leitfadeninterviews und eine ergonomische Analyse der verwendeten Prozessleitsoftware vervollständigt und die Datenqualität damit abgesichert. Im Sinne der hier fokussierten Ergebnisse fanden zudem Explorationsgespräche mit den Operatoren statt, um den Prozessverlauf und bearbeitete Tätigkeiten sowie außergewöhnlich wirkende Handlungen zu hinterfragen.

Die Studie wurde an insgesamt 18 Leitstandsarbeitsplätzen in neun Kraftwerksleitwarten durchgeführt. Alle Arbeitsplätze verfügten über mindestens zwei Monitore und mindestens vier Bildwandsegmente. Als maximale DVM-Anzahl wurden 19 Elemente vorgefunden. An der Studie nahmen 86 Operatoren als Probanden freiwillig teil. Im Allgemeinen stellten die Stammeleitstandfahrer der jeweiligen Funktionsbereiche die Probanden für die Studie. Alle Operatoren besaßen eine Qualifizierung und mehrjährige Praxiserfahrung bei einem Durchschnittsalter von 45,5 Jahren (22 bis 59 Jahre). Während der Studie erfuhren die Probanden in ihren Tätigkeitsmustern keine Einschränkungen und konnten auf jedem DVM beliebige Inhaltsrepräsentationen des Prozessleitsystems aufschalten und bedienen. Die reine Datenerfassung mit dem Eye-Tracking-System war auf ca. 30 Minuten terminiert, wobei Interviews sowie Einrichtungen und Justierungen des Messgeräts an den Arbeitsplätzen die Gesamtversuchsdauer auf ca. 70 Minuten ausdehnten.

Nachgeschaltet wurde eine Erweiterungsstudie an einem Kraftwerkssimulator durchgeführt. Die Studie thematisierte das Blickverhalten in besonderen Betriebszuständen, wobei ein Anfahrscenario bearbeitet werden sollte, in dem eine unplanmäßige Störung einer aufgabenspezifisch relevanten Komponente simuliert wurde. Zur Absicherung des Anlagenbetriebs war eine schnelle Diagnose und zeitnahe Einleiten von Gegenmaßnahmen erforderlich. Dies war für generalisierbare Schlussfolgerungen notwendig, da sich Tendenzen für Zusammenhänge zwischen der DVM-Anzahl und dem Operatorverhalten in Normalbetriebsphasen abzeichneten, die unter besonderen Anforderungen geprüft werden sollten. An dieser Teilstudie nahmen acht ausgebildete Operatoren teil.

Die erhobenen Blickerfassungsdaten mussten für die Maximierung der Datennutzung nachgearbeitet werden. So erfolgte eine Ergänzung der automatisierten Pupillenerkennung, indem die Pupille des Probanden teils manuell in den Einzelbildern aufgezeichneter Augenbewegungen definiert werden mussten. Dabei war nur das Augenvideo sichtbar, so dass eine willentliche Verfälschung der aufgezeichneten Blickrichtung aufgrund des fehlenden Feldbezugs auszuschließen ist. Im Anschluss erfolgte die automatisierte Detektion der Markerkarten in den Feldvideos. Das sind am Arbeitsbereich befestigte Muster, welche für das im Raum frei bewegliche Blickerfassungssystem als Orientierungspunkte für weitere

Analysen dienen. Basis für die Auswertung bildeten Blickparameter wie z. B. die Blickfrequenz und die kumulierte Fixationsdauer auf jedem Visualisierungselement. Diese mussten für eine anschließende statistische Auswertung systematisch als Areas of Interest (AOI) grafisch in den Feldvideos definiert und an diese Fixpunkte gebunden werden. Zudem erfolgte die manuelle Erfassung von Aufschalt- und Bedienvorgängen mit einem eigens entwickelten, VBA-basierten und Trigger gesteuerten Erfassungstools.

## 4 Ergebnisse

Die Ergebnisse dieser Studien bezüglich der softwareergonomischen Gestaltung sollen aufgrund ihrer Produktspezifität im Detail nicht erläutert werden. Zusammenfassend zeigten sich bezüglich der Bedienphilosophien, grafischen Gestaltung und der Informationscodierung im Allgemeinen systemweit konsistent umgesetzte Eigenschaften. Dennoch wurden Defizite und Optimierungsvorschläge seitens des Bedienpersonals in den Interviews erörtert, die jedoch keine bedenklichen Ausprägungen aufwiesen. Alle Systeme erlaubten den Operatoren eine flexible und bedarfsgerechte Darstellung beliebiger Anlagenbilder oder Kurvengrafiken auf jedem DVM. Dies führte dazu, dass die Probanden in den meisten Fällen mit ihrer gewohnten, bewährten Konfiguration arbeiteten, bei der erfahrungsgemäß und entsprechend persönlicher Präferenzen relevante Prozessvisualisierungen auf bestimmten DVM aufgeschaltet wurden.

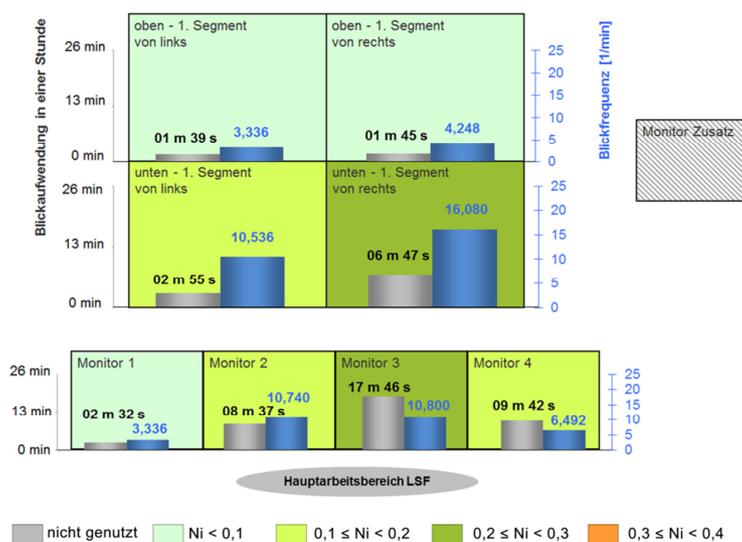


Abbildung 1: beispielhafte Darstellung eines Arbeitsplatzes mit Nutzungsindex der DVM

Es zeigte sich, dass unabhängig von der Anzahl vorhandener DVM jedes Anzeigergerät in den Arbeitsprozess eingebunden wurde. Dabei variierten sowohl die Häufigkeit und Dauer als auch die Art der Nutzung erheblich. Für einige DVM konnten deutlich höhere Fixationsdauern und -frequenzen nachgewiesen werden. Die intensiver genutzten DVM zentrierten sich im näheren Operatorumfeld. Dieser Effekt scheint unter Berücksichtigung der Erkenntnisse zu Eigenschaften und Grenzen der visuellen Wahrnehmung sowie in Anbetracht der Wirkzusammenhänge von Informationsreizen im Sinne des SEEV-Modells plausibel. Auf nah gelegenen DVM ist eine gute Erkennbarkeit von Informationen zu erwarten, wobei bei entfernt positionierten DVM die Schriftgrößen oftmals nicht für eine zweifelsfreie Erkennbarkeit von Detailinformationen ausreichen. Zudem sind für

Fixationswechsel zwischen nah positionierten DVM keine ausschweifenden Sehachsenverlagerungen notwendig, was physiologische Kosten hervorrufen würde und somit vermieden werden müsste. Die konsistente Gestaltung und Kodierung des Gesamtsystems führt zudem dazu, dass insbesondere die Saliens als Auslösereiz für eine Aufmerksamkeitsverschiebung im Sinne des SEEV-Modells grundsätzlich gleichartig auf allen DVM erscheinen. Diesem Verhalten ist die individuelle Konfigurierbarkeit der Belegung jedes verfügbaren DVM mit Anlagenbildern zuträglich, da als wichtig eingeschätzte Informationen operatornah aufgeschaltet werden können. Somit können Effekte wie Informationserwartung und Wert durch Platzierung entsprechender Prozessrepräsentationen bewusst optimiert werden, was weite Bewegungsauslenkungen unnötig macht.

Der offensichtlich subjektiv gewählte Aktionsbereich beinhalten im näheren Umfeld des Operators befindliche Visualisierungselemente, deren Nutzungsintensität überdurchschnittlich ausgeprägt ist. Als Grundlage für die Klassifizierung in relativ selten bzw. häufiger genutzte Visualisierungselemente wurde ein Schwellwert festgesetzt, welcher einer gleichverteilten Blickdauer auf allen  $n$  DVM entspricht ( $S = 1/n$ ). Es zeigte sich, dass Operatoren eine Art „visuelle Komfortzone“ herausbilden, welche nahe dem Hauptarbeitsbereich lokalisiert ist und in dessen Bereich eine längere kumulierte Blickdauer bei teils hohen Blickfrequenzen aufgewendet wird. Aus diesen beiden Parametern wurde durch gleichgewichtete Verrechnung ein Nutzungsindex abgeleitet, wobei die in Studien aus dem Automobilbereich festgestellte Teilung in Kontroll- und Überwachungsfixationen zugrunde liegt<sup>[26]</sup>. Entsprechend dieser Einteilung sind Nutzungsklassen ableitbar, welche die Relevanz des jeweiligen DVM im Arbeitsprozess wiedergeben (siehe Abb. 1). Für entfernter positionierte DVM waren eher hohe Blickfrequenzen bei geringeren Blickdauern zu beobachten, was auf die Nutzung dieser Elemente eher für kurze Kontrollblicke zur Übersichtswahrnehmung hindeutet. Insbesondere an stark visualisierten Arbeitsplätzen konnten jedoch auch vollständige Positionsveränderungen entlang des Arbeitstisches beobachtet werden.

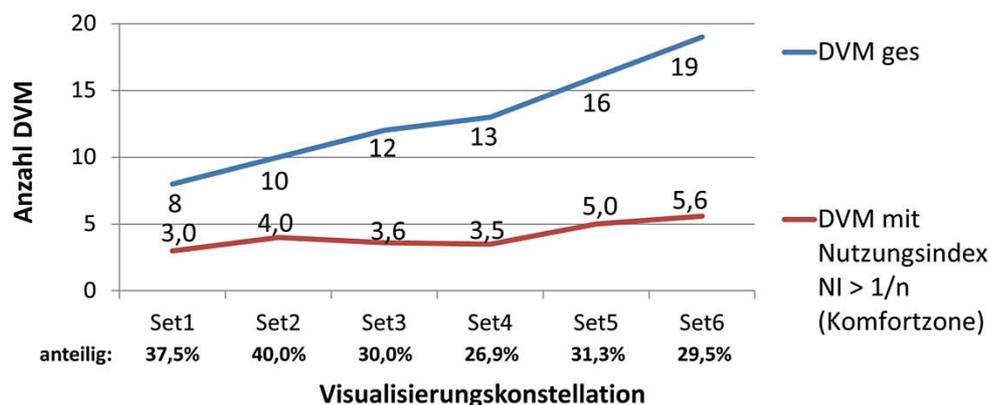


Abbildung 2: Schere zwischen verfügbaren DVM und intensiv genutzten DVM (Komfortzone)

Unabhängig von der Anzahl zur Verfügung stehender DVM erfährt der Umfang der visuellen Komfortzone offensichtlich eine individuelle Sättigung. Es konnte beobachtet werden, dass auch bei stark visualisierten Arbeitsplätzen der Aktivitätsbereich in ähnlicher Weise ausgeprägt war und darüber hinaus verfügbare DVM für die Übersichtswahrnehmung des Gesamtprozessgeschehens genutzt wurde. Auch bei diesen DVM-Konfigurationen wurde der Nutzungsschwellwert bei nie mehr als vier Bildschirmen ( $MW = 2,0$ ) und maximal sechs

Bildwandsegmenten (MW = 1,6) überschritten. Im Durchschnitt über alle untersuchten Arbeitsplätze waren 4,6 DVM und 7,1 Bildwandsegmente an den Leitständen installiert. Die Auswertung der Aufschalt- und Bedienhandlungen zeigte in der Komfortzone, dass diese verstärkt für Bedienhandlungen genutzt wurden. Die hierauf verwendete, meist längere kumulierte Blickdauer belegt das zusätzlich. Auf DVM außerhalb der Komfortzone wurden meist statische Prozessvisualisierungen aufgeschaltet und längere Zeit als Übersichtsgrafiken verwendet. Umschalt- und Bedienvorgänge waren hier eher in geringen Umfang zu beobachten.

Die bislang gezeigten Ergebnisse beziehen sich nur auf den operativen Normalbetrieb. Die statistische Auswertung der erhobenen Daten belegte jedoch auch, dass bei höherem Bedienaufwand eine Erweiterung der Komfortzone zu erfolgen scheint, da hier eine gleichgerichtete statistische Tendenz nachweisbar war. Eine kausale Ableitung wäre die Ausdehnung der Komfortzone in besonderen Betriebssituationen, da hier sowohl eine umfassende Übersichtswahrnehmung als auch regulierende Bedieneingriffe zur Kompensation des Prozessgeschehens notwendig werden.

Während auch im Verlauf des simulierten Anfahrprozesses als repräsentative Aufgabe mit erhöhter Anforderungsspezifikation die Bildung einer visuellen Komfortzone zu erkennen war, zeigte sich eine auf allen Visualisierungsmitteln nahezu gleichverteilte Ausprägung der Visualisierungsmittelnutzung im kritischen Versuchsabschnitt der unplanmäßigen Störung, wodurch sich der Aktionsbereich des Operators deutlich verlagerte. Statt der zuvor intensiv genutzten zwei Monitore und zwei Bildwandsegmente, wurde nach dem Störereignis ein deutlicher Blickzuwachs auf den Visualisierungsmitteln der Monitorebene beobachtet. Die tiefengestaffelt positionierte Bildwand, zuvor als Übersichtsmedium intensiv mit Kontrollblicken belegt, wies in direkter Folge des Ereignisses vergleichbare Blickkennwerte auf wie die Monitore. Dieser Befund kann durch Forschungsergebnisse begründet werden<sup>[27][28]</sup>, wonach in verschiedenen Tiefenebenen des umgebenen Raumes differierende Wahrnehmungspräferenzen bestehen. Im peripersonalen Raum, welcher ungefähr der Greifraumdimension (max. 2m) entspricht und entsprechend der Sehachse vorrangig nach unten gerichtet ist, werden bevorzugt Objektmanipulationen durchgeführt. Diese konnten in der Reaktions- und Handlungsphase nach dem Ereignis durch eine deutliche Steigerung der Bedieneingaben und Aktuatormanipulationen auf Monitorebene nachgewiesen werden. Lediglich in Bezug zur Sitzposition der Probanden weit entfernte Monitore erfuhren eine minimale Blickbelegung. Dieses Blickverhalten ist erklärbar, da bei den resultierenden Sehentfernungen keine zielorientierte Informationswahrnehmung mehr möglich ist.

## 5 Fazit

Die Studie zeigte, dass alle installierten Visualisierungselemente unabhängig von der Anzahl verfügbarer DVM in den Arbeitsprozess integriert wurden. Dabei bildete eine individuell begrenzte Anzahl von DVM jeweils eine „visuelle Komfortzone“ für die Operatoren, indem die Visualisierungsmittel im näheren Umfeld der Probanden intensiver in den Arbeitsprozess einbezogen wurden als andere. Die Komfortzone ist dabei offensichtlich individuell ausgeprägt und wird insbesondere durch den Prozesszustand beeinflusst. Es konnte gezeigt werden, dass diese Zone unabhängig von der Anzahl verfügbarer DVM relativ gleichverteilt ist und anhand der Eigenschaften und Grenzen menschlicher Wahrnehmung erklärbar ist.

Unter Berücksichtigung der ISO 11064-4<sup>[2]</sup> stützen die durchgeführten Studien die Empfehlungen von vier Monitoren zzgl. Zusatzanzeigen als Visualisierungsmittelausstattung für eine effektive Leitstandstätigkeit. Diese Orientierung ist jedoch nur für den Operatorbetrieb in ruhigem operativen Betrieb ausreichend, da im Falle unplanmäßig eintretender Störungen insbesondere installierte Monitore ein wesentliches Arbeitsmittel für die Diagnose und Bewältigung des Störungsgeschehens darstellen. Daher kann es ratsam sein, den Operatoren darüber hinaus Visualisierungsmittel zur Verfügung zu stellen, um in diesen Situationen optimale Arbeitsbedingungen bereitzustellen. Auch wenn diese Situationen verhältnismäßig selten vorkommen, können sie gravierenden Einfluss auf die Verfügbarkeit, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit des Anlagenbetriebs besitzen. Aus ergonomischer Sicht ist es jedoch nicht ratsam, Gesichtsfeld füllende Visualisierungsmittelinstallationen vorzuhalten, da auch in speziellen Problemsituationen nicht mehr als sechs Monitore und sechs Bildwandsegmente verwendet wurden. Diese Angaben können durch branchen- oder anforderungsspezifische Prozesscharakteristika abweichen, spiegeln aber für den Leitstandbetrieb in der Energieerzeugung repräsentative Ergebnisse wieder.

## 6 Quellen

- [1] Herzog: Interaktionsdesign. Gestaltung interaktiver und multimedialer Systeme. München: Oldenbourg, 2006.
- [2] DIN EN ISO 11064-4: Ergonomische Gestaltung von Leitzentralen. Teil 4: Auslegung und Maße von Arbeitsplätzen, 2011.
- [3] Früh; Maier; Schaudel: Handbuch der Prozessautomatisierung. 4. Ausg. München: Oldenbourg Industrieverlag, 2009.
- [4] Ivergård; Hunt: Handbook of control room design and ergonomics: A perspective for the future. Boca Raton: CRC, 2009.
- [5] Hoppe: Technikstress - Theoretische Grundlagen, Praxisuntersuchungen und Handlungsregularien. Aachen: Shaker, 2009.
- [6] Freyberger: Leittechnik. Grundlagen, Komponenten, Systeme. München: Richard Pflaum Verlag, 2002.
- [7] Sheridan et al.: Supervisory Control Systems. IN: Pew: Research needs for human factors. Washington: N.A.Press, 1983.
- [8] Löwe; Dalijono: Entwicklung eines Operatorunterstützungssystems zur Steigerung der Sicherheit hochautomatisierter verfahrenstechnischer Anlagen. IN: Chemie Ingenieur Technik, Volume 84, Issue 11, 2012, S.2027–2034.
- [9] Kraiss: Entscheidungshilfen in hochautomatisierten Systemen. IN: Hoyos; Zimolong (Hrsg.): Ingenieurpsychologie. Göttingen: Verlag für Psychologie Hogrefe., 1990.
- [10] Schubert: Prospektive Gestaltung von Schlüsselindikatoren in der Prozessführung. Dissertationsschrift D83, TU Berlin, 2012.
- [11] Schwarz et al.: Die Gestaltung der Arbeitsumgebung von Operatoren (k-)ein Platz für Innovationen? IN: Proceedings of Automation 2011, VDI Verlag, Jun 2011.
- [12] Bainbridge, L.: Ironies of automation. Automatica, 19/1983, 775–779.
- [13] Zühlke: Nutzergerechte Entwicklung von Mensch-Maschine-Systemen. Berlin/ Heidelberg: Springer-Verlag, 2012.
- [14] Zimbardo; Gerrig: Psychologie. 16. Aufl. Pearson Studium, 2004.
- [15] Guski: Wahrnehmung. Einführung in die Psychologie der menschl. Informationsaufnahme. Stuttgart: Kohlhammer, 2000.
- [16] Grünwied: Psychophysiologische Parameter der Software-Usability: Experimentelle Studie zur Korrelation zwischen Eye-Tracking-Parametern und Software-Designparametern. Dissertation, Bielefeld: 2006.
- [17] Preim; Dachsel: Interaktive Systeme. Grundlagen, GUI, Informationsvisualisierung. Berlin: Springer 2010.
- [18] Joos et al.: Bewegungen des menschlichen Auges: Fakten, Methoden und innovative Anwendungen. In Herrmann; Deutsch; Rickheit (Eds.): Handbuch der Psycholinguistik. Berlin/New York: De Gruyter, 2003.
- [19] Card, S.K.; Moran, T.P.; Newell, A.: The psychology of human-computer interaction. Hillsdale: Erlbaum Ass., 1983.
- [20] Miller, G.A.: The magical number seven, plus or minus two. Psychol. Rev. 63, 1956, S.81-97.
- [21] Wickens: The Trade-off of Design for Routine and Unexpected Performance: Implications of Situation Awareness. In: Endsley; Garland (Hrsg.): Situation Awareness: Analysis and Measurement. Mahwah: Lawrence Erlbaum Ass. Inc., 2000.
- [22] Wickens; McCarley: Applied attention theory. Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [23] Just; Carpenter: A Theorie of Reading: From Eye Fixations to Comprehension. Psychological Review, Vol.87, No.4, 1980.
- [24] Rötting, M.: Parametersystematik der Augen- und Blickbewegungen für arbeitswissenschaftliche Untersuchungen. Schriftenreihe Rationalisierung und Humanisierung. Band 34. Aachen: Shaker Verlag, 2001
- [25] Endmann et al.: Methodenvergleich bei Webseitenevaluationen – Was bringt was? IN: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (Hrsg.): Berichte zum 58. Arbeitswissenschaftlichen Kongress. Kassel: GfA-Press, 2012.
- [26] Salvucci; Liu; Boer: Control and Monitoring During Lane Changes. Vision in Vehicles, No.9, 2001.
- [27] Previc: The neuropsychology of 3-D space. Psychological Bulletin, Vol. 124(2) September, 1998.
- [28] Lichtenstein: Presenting Visual Information in Three-Dimensional Space. Dissertationsschrift D83. TU Berlin, 2013.