

# **Aufgabenorientierte Visualisierung eines komplexen verfahrenstechnischen Prozesses unter Verwendung dreidimensionaler Computergrafik**

Carsten Wittenberg

Fachgebiet für Systemtechnik und Mensch-Maschine-Systeme,  
Universität Gesamthochschule Kassel

## **Zusammenfassung**

In diesem Beitrag wird eine Methodik zur Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen vorgestellt, die Visualisierungstechniken der dreidimensionalen Computergrafik verwendet, um Prozeßelemente, -größen und Zusammenhänge zum Führen und Überwachen von technischen Systemen darzustellen. Prozeßgrößen und Zusammenhänge zwischen Prozeßelementen werden durch die Verwendung von prägnanten Farb- und Formkodierungen sichtbar gemacht. Grundlage dieser Visualisierungsmethodik ist der Bildüberlegenheitseffekt, der das menschliche Vermögen beschreibt, bildliche und damit nichtsprachliche Informationen leichter und schneller aufzunehmen und zu verarbeiten als sprachliche Informationen. Zur transparenteren Darstellung wird das zu führende System hierarchisch aufgabenorientiert strukturiert. Als Anwendungsgebiet ist die Prozeßführung in dem Bereich der thermischen Verfahrenstechnik gewählt worden.

## **Summary**

In this contribution a methodology is presented for the design of human-machine interfaces, which uses visualisation techniques of the three-dimensional computer graphics, in order to visualise elements, variables and relations for controlling and monitoring of technical systems. Process variables and relations between elements are made visible by the use of well-known colour and form coding. Basis of this visualisation methodology is the picture superiority effect, which describes the human characteristic, to process figurative and not-linguistic information more easily and faster than linguistic information. For a more transparent representation the technical system is structured task-oriented. As area of application the process controlling of a technical system within the area of thermal process engineering was selected.

## **1 Einleitung und Problemstellung**

Steigende Anforderungen hinsichtlich Qualität, Ökonomie und Ökologie als auch die immer leistungsfähiger und preiswerter werdenden Automatisierungseinrichtungen führen zu einem steigenden Automatisierungsgrad in verfahrenstechnischen Produktionsanlagen. Derartige äußerst komplexe und dynamische Industrieanlagen bedürfen aber nach wie vor der Überwachung und Führung durch den Menschen in einer Leitwarte. In Folge der fortschreitenden Automatisierung nimmt jedoch die Anzahl der beteiligten Menschen ab, während die Zahl der zu überwachenden Prozeßeinheiten und -elemente steigt (z.B. [1][2]) Gleichzeitig sinkt aber auch die Zahl der notwendigen Eingriffe in den technischen Prozeß seitens des Menschen. In der Position des reinen Beobachters ist der Mensch aber nicht mehr in das Prozeßgeschehen eingebunden, er verliert immer stärker den Kontakt zu dem Prozeß. Dieser hohe Automatisierungsgrad führt zum Verlust der manuellen Fertigkeiten in der Prozeßführung, während die Verantwortungsbereiche des einzelnen Menschen immer größer werden [3][4].

Die früher üblichen lokalen Leitwarten sind aufgrund der damaligen technischen Gegebenheiten von großen Tafeln mit elektromechanischen Anzeigegeräten nach der Single – Sensor

– Single – Indicator – Philosophie (SSSI) geprägt worden [5]. Die damit verbundene Darstellungsart setzt beim Menschen eine ausgeprägte Fähigkeit zum schlußfolgernden Denken voraus, welche aber durch die sehr hohe Anzahl von Informationen über den Prozeß sehr erschwert wird. Stetig weiterführende Entwicklungen auf dem Gebiet der Computertechnologie haben zur Verdrängung der elektromechanischen Anzeigegeräte durch die Einführung von rechnergestützten Leitsystemen mit Tisch- und Wandmonitore geführt. Die Gestaltung der neuen grafischen Benutzerschnittstellen richtet sich aber immer noch nach dem Bild der früheren Leitwarten. Die starke räumliche Konzentrierung der Informationen auf den Bildschirmen im Gegensatz zu der räumlich sehr verteilten Anordnung von Anzeigegeräten in den früheren Leitwarten erschwert es aber dem Menschen, die für die aktuelle Situation relevanten Informationen zu erkennen und aus der Flut an Informationen herauszufiltern.

Trotz rasant steigender grafischer Leistung bei den verwendeten Systemen werden menschliche Faktoren sowohl hinsichtlich der Informationsaufnahme als auch des Problemlösens und Planens nicht ausreichend bei dem Design von leittechnischen Benutzerschnittstellen berücksichtigt. Doch gerade die Wahrnehmung von relevanten Prozeßinformationen inmitten der immensen Anzahl von dargestellten Informationen ist für das schnelle und sichere Identifizieren von Störfällen von entscheidender Bedeutung. Ist dann schließlich ein Störfall eingetreten, muß der Operateur unter Verwendung von Problemlöse- und Planungsvorgänge den Prozeß wieder in einen sicheren und zufriedenstellenden Zustand überführen. Derartige kritische Situationen haben die Eigenschaft, daß sie in der Regel neuartig und ungewohnt für die beteiligten Menschen sind. Da in der Regel Routineprozeduren in solchen abnormalen Situationen nicht mehr wirksam sind, muß der Mensch eine geeignete Antwort basierend auf seinem Wissen über das funktionale Systemverhalten selber generieren [6].

Eine den menschlichen Eigenschaften angepaßte Gestaltung der Schnittstelle zu dem technischen Prozeß kann den Mensch in dieser Gesamtsituation unterstützen und die Sicherheit und Leistungsfähigkeit des technischen Prozesses erhöhen. Dagegen kann eine dem Menschen nicht angepaßte Gestaltung (z.B. durch Informationsüberlastung) zu Bedienfehlern führen [7], welche schwerwiegende Folgen nach sich ziehen können.

## **2 Exemplarische Anwendung: Rektifikationsprozeß zur thermischen Trennung eines Zweistoffgemisches**

Als exemplarische Applikation wird ein Rektifikationsprozeß zur thermischen Trennung (Destillation) eines Zweistoffgemisches in seine Bestandteile (Benzol und Toluol) zugrunde gelegt. Der Prozeß besteht aus einer Kolonnensäule mit 10 Glockenböden, einem Vorlagebehälter, zwei Sammelbehältern für die Endprodukte Benzol und Toluol, zwei Wärmetauschern zum Erhitzen des Zulauf- und Sumpfstromes sowie aus drei Kondensatoren zum Abkühlen des Kopfstromes und der Endprodukte (siehe Abb. 1).

Der mathematische Kern des zugehörigen Prozeßsimulators wurde am Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik der Universität Stuttgart als Trainingssimulator entwickelt [8]. Daraus folgt, daß der simulierte Prozeß hinsichtlich des Automatisierungsgrads und der vorhandenen Prozeßinformationen nicht dem derzeit möglichen Stand der Technik entspricht, da mit der Simulation bestimmte manuelle Fertigkeiten der Anlagenfahrer trainiert werden sollen [9]. Dieser simulierte verfahrenstechnische Prozeß besitzt aber gerade deshalb eine ausreichend hohe Komplexität und hohe produktionstechnische Anforderungen zur Erprobung von neuartigen Visualisierungsmethoden zur Prozeßführung. Einige bereits abgeschlossene Forschungsprojekte zur Gestaltung von Bedienoberflächen [10][11] sowie zur systemtechnischen

Entwicklung von grafischen Nutzerschnittstellen (Graphical User Interface GUI) [12][13] konnten mit dieser Simulation erfolgreich durchgeführt werden.

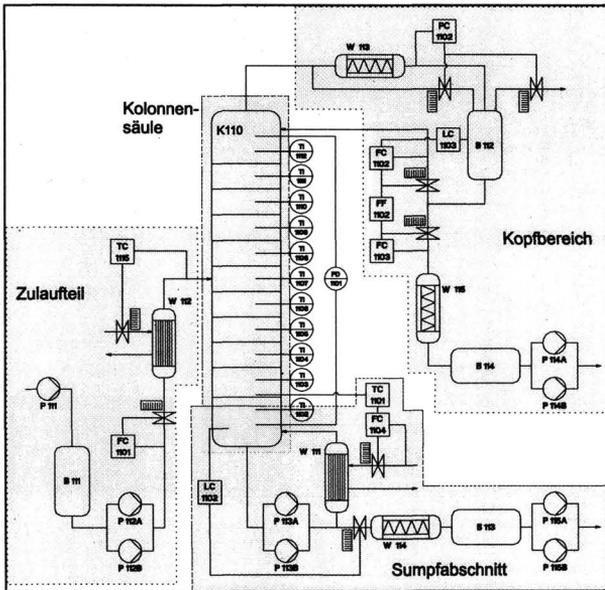


Abb. 1: Fließbild der Rektifikationsanlage [10]

### 3 Vermittlung von Prozeßwissen

Durch die steigende Komplexität technischer Prozesse und der damit einher gehenden Vermehrung der relevanten Prozeßgrößen und Abhängigkeiten ist es extrem wichtig, dem Menschen das Wissen über den Prozeß hinsichtlich seiner funktionalen Eigenschaften und Zusammenhänge zu vermitteln. Die grafische Benutzeroberfläche, die sowohl die Kommunikationsschnittstelle zwischen dem Menschen und dem technischen Prozeß darstellt als auch ein Abbild des technischen Prozesses wiedergibt, bestimmt maßgeblich die Vermittlung von Wissen über das System und damit die Effektivität der Eingriffe des Menschen in den Prozeß. Zur Steigerung dieser Effektivität muß eine Prozeßvisualisierung die notwendigen Informationen in Form einer dem Menschen angepaßten Strukturierung und Darstellung anbieten.

#### 3.1 Mentales Modell

Auf Basis des Wissens über das technische System bildet sich der Mensch ein mentales Modell. Bei einem mentalen Modell handelt es sich um die Vorstellungen, die sich der Mensch hinsichtlich der Funktionalität von dem Prozeß gebildet hat (siehe Abb. 2). Die Bedeutung von mentalen Modellen besteht darin, daß Korrektheit und Differenziertheit des mentalen Modells die Qualität der an ihnen orientierten kognitiven Prozessen und Handlungstätigkeiten bestimmen [14]. Prozeßeingriffe durch den Menschen sind also um so effektiver, je angemessener das der Handlungsregulation zugrunde liegende mentale Modell ist [15]. Die Denkvorgänge bei der Planung von Handlungsschritten können dabei als eine Art dynamischer ko-

gnitiver Simulation des mentalen Modells beschrieben werden, die analog zu Simulationen mathematischer Modelle auf Rechnersystemen iterativ solange mit jeweils veränderten Parametern – den möglichen Eingriffen in das technische System - wiederholt wird, bis ein zufriedenstellendes Resultat erreicht ist [16].

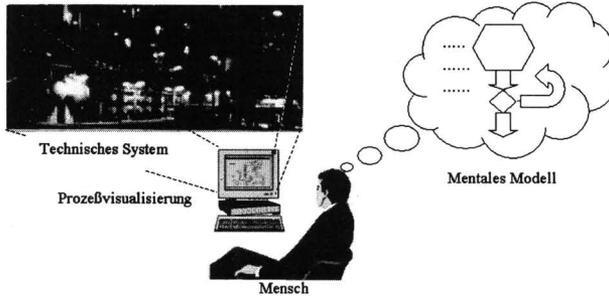


Abb. 2: Prozeß, Prozeßvisualisierung und mentales Modell

Auf der Basis der über die Prozessvisualisierung vermittelten Informationen und funktionalen Zusammenhänge aktualisiert der Mensch sein mentales Modell von dem Prozeß fortwährend durch seine Erfahrungen. Das mentale Modell wird also nicht explizit konstruiert, sondern graduell in der aktiven täglichen Auseinandersetzung mit dem Prozeß entwickelt. Bei diesem kontinuierlichen Identifikationsvorgang kann man zwischen Systemidentifikation (Feststellung einer abgegrenzten Anordnung von aufeinander einwirkenden Gebilden) und Prozeßidentifikationen (Analyse des Transports bzw. der Umformung von Materie, Energie und/oder Information) unterscheiden [17][18]. Der Mensch identifiziert bei diesem Vorgang zuerst die beteiligten Elemente. Anschließend werden die Relationen zwischen den Elementen identifiziert, wobei zwischen Relationswissen (Erkennen eines Zusammenhanges), Vorzeichenwissen (Richtung des Zusammenhanges) und Wirkstärkenwissen (Gewichtung der Relation) unterschieden wird [17].

Mentale Modelle sind trotz der grundsätzlich funktionalen Struktur durch einen starken bildhaft-anschaulichen Charakter geprägt und können durch bildliche Mittel gefördert werden. Generell wird der bildhaften Visualisierung objektiver Gegebenheiten eine große Bedeutung für die Erzeugung mentaler Modelle zugesprochen [16].

### 3.2 Aufgabenorientierte Strukturierung des Prozesses

Um komplexe technische Systeme in allen Aufgabensituationen für den Menschen beherrschbar zu machen, ist der Einsatz einer funktional-orientierten Strukturierung der Prozessinformationen notwendig, welche eine transparente Darstellung des Prozesses ermöglicht und damit das notwendige Prozeßwissen zur Bildung des mentalen Modells vermitteln kann.

Mit der Führung eines jeden technischen Systems sind für den Menschen Aufgaben und Ziele verbunden, die sein Handeln bestimmen. Mit der Erfüllung dieser Aufgaben sind wiederum bestimmte Zustände von Prozeßeinheiten und –elemente verknüpft. Diese Zustände sind abhängig von weiteren Prozeßeinheiten und –elemente, mit denen der Mensch bei der Ausführung der jeweiligen Aufgabe interagiert. Durch Analysen ([19], z.B. [9]) können diese Zusammenhänge ermittelt und als Basis einer strukturierten Visualisierung des technischen Systems verwendet werden. Das Beispiel der Rektifikationsanlage soll dies erläutern.

Die übergeordnete Aufgabe beim Führen dieses Prozesses lautet:

- *Produziere Benzol und Toluol in geforderter Qualität.*

Diese Aufgabe läßt sich in verschiedene Unteraufgaben gliedern:

- *Führe ausreichend Gemisch zu.*
- *Trenne Gemisch in der Kolonne.*
- *Erzeuge Temperaturprofil.*
- *Halte das Rücklaufverhältnis optimal.*
- *Führe das Endprodukt Benzol ab.*
- *Führe das Endprodukt Toluol ab.*
- ...

Beispielsweise müssen sich die Füllstände im Sumpf und im Vorlagenbehälter zur Erfüllung der Unteraufgabe *Führe ausreichend Gemisch zu* innerhalb eines bestimmten Wertebereiches befinden. Der Mensch reguliert diese Füllstände durch das Betätigen von Pumpen und Ventilen. Bei der Visualisierung der Aufgabe ist es also nur notwendig, die beteiligten Elemente und Zustandsgrößen darzustellen. Weitere Prozeßeinheiten und –elemente wie beispielsweise Wärmetauscher, die sich zwar auch in dem beteiligten Untersystem befinden, aber nicht zur Aufgabenerfüllung beitragen, müssen nicht dargestellt werden. Die aufgabenorientierte Prozeßvisualisierung entlastet so den Menschen bei der Identifizierung und vermittelt gleichzeitig die möglichen Prozeßeingriffe zum Erfüllen der jeweiligen Aufgabe.

Werden zusätzlich die Erfüllungsgrade der jeweiligen Aufgaben visualisiert, so kann der Mensch die Dringlichkeit des Eingreifens in den Prozeß erkennen und sein Handeln entsprechend planen.

## 4 Darstellung von Prozeßinformationen

Die Überwachung von Prozeßvariablen ist eine zentrale Tätigkeit in der Prozeßführung. Dabei müssen etliche Informationen gleichzeitig von dem Menschen aufgenommen und verarbeitet werden. Diese menschliche Informationsaufnahme und –verarbeitung ist seit Ende des letzten Jahrhunderts ein Forschungsschwerpunkt in der Psychologie. Ein Ergebnis dieser Untersuchungen ist vor allem die Unterscheidung zwischen sprachlicher und nichtsprachlicher (z.B. bildlich dargestellter) Information. Die Vorteile von bildlicher Information - der sogenannte "*Bildüberlegenheitseffekt*" - sind dabei ermittelt worden. In [20] wird in diesen Zusammenhang das sogenannte multimodale Modell eingeführt. Dieses Modell beschreibt verschiedene Gedächtnisbereiche, die jeweils von der Modalität des auslösenden Reizes abhängig sind und sehr unterschiedliche Leistungsmerkmale besitzen. In Abb. 3 wird der für die Wahrnehmung von Prozeßinformationen wichtige Bereich der visuellen Information in dem multimodalen Modell hervorgehoben.

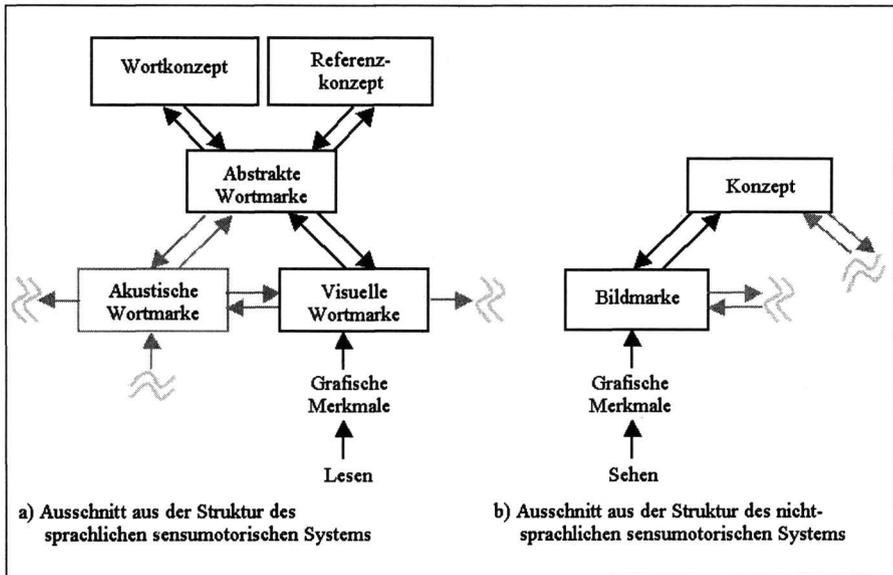


Abb. 3: Multimodales Modell des sensumotorischen Systems hinsichtlich der visuellen Informationsaufnahme (abgeleitet nach [20], siehe auch [21])

Bei der Struktur des sprachlichen sensumotorischen Systems wird durch die unterschiedlichen Reize (visuell oder akustisch), mit denen die informationsverarbeitenden Prozesse ausgelöst werden, zwischen visuellen und akustischen Wortmarken unterschieden. Eine übergeordnete abstrakte Wortmarke integriert diese modalitätsspezifischen Wortmarken. Bedingt durch die bedeutungsmäßige Unbestimmtheit von Sprache sind der abstrakten Wortmarke sogenannte Wort- und Referenzkonzepte zugeordnet. In dem Wortkonzept wird das linguistische Konzept repräsentiert. Das Referenzkonzept ist die Repräsentation der nonverbalen Konzepte (hier: die Prozeßinformationen), auf die mit der sprachlichen Information verwiesen wird.

Einfacher und direkter ist die Struktur des nichtsprachlichen sensumotorischen Systems, da hier die modalitätsspezifische Marke (hier: die Bildmarke) direkt mit dem zugehörigem Konzept verbunden ist. Die bildliche Information muß aber einer entsprechenden Bildmarke eindeutig zuzuordnen sein, um eine schnelle und korrekte Informationswahrnehmung und Zuordnung zu dem entsprechenden Konzept zu gewährleisten.

Durch die rasante Leistungssteigerung in der Computertechnik bietet sich die Verwendung von neuen Technologien wie die dreidimensionale Computergrafik in der Prozeßleittechnik an. Mit Hilfe der dreidimensionalen Computergrafik können komplexe Informationswelten grafisch bildlich-anschaulich visualisiert und manipuliert werden. Der Mensch kann diese Informationen je nach Ausprägung der Visualisierung interaktiv erleben. Forderungen nach bildlicher –Darstellung komplexer Systeme zur Ausnutzung des Bildüberlegenheitseffektes und zur Förderung der Bildung des mentalen Modells durch bildliche Darstellungen (s.o.) können erfüllt werden.

## 5 Visualisierung von Prozebelementen und Prozeßgrößen

Die sogenannten virtuellen Prozebelemente sind zur bildlich-anschaulichen Prozeßvisualisierung eingeführt worden [21]. Es werden dabei die Prozebelemente basierend auf der Abbildung von verbreiteten und damit bekannten Musterelementen aus dem Einsatzgebiet unter Verwendung der dreidimensionalen Computergrafik modelliert. Dabei ist relevant, daß visuelle Charakteristika dieser Elemente dargestellt werden, um bereits vorhandene Bildmarken zur Erkennung des Elements seitens des Menschen zu aktivieren und dadurch notwendige Lernprozesse zu minimieren. So wird beispielsweise eine Pumpe basierend auf der weit verbreiteten Chemie-Normpumpe in Blockbauweise [22] modelliert (siehe Abb. 4).

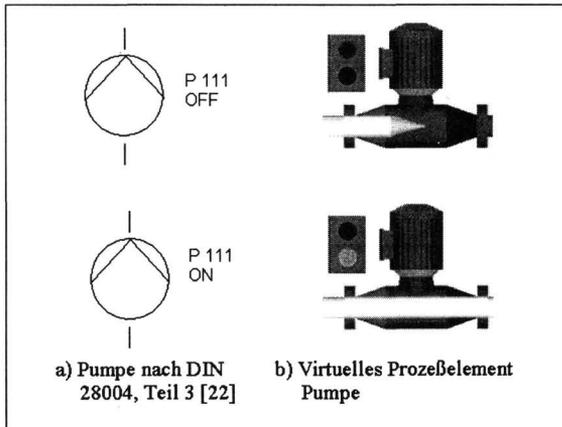


Abb. 4: Vergleich der Darstellung einer Pumpe

Zum Führen eines Prozesses ist die Kenntnis der für die aktuelle Situation bedeutsamen Prozeßgrößen unabdingbar [23]. Allerdings ist dabei nicht immer der absolute numerische Wert der Prozeßgröße gefordert. Häufig reicht auch ein Vergleich mit Sollwerten oder eine qualitative Darstellung der Größe. So ist in vielen Situationen nicht der absolute Füllstand eines Behälters entscheidend, sondern die Frage, ob der Inhalt noch zur Erreichung des Produktionsziels innerhalb eines Zeitabschnitts ausreicht. Entsprechend der Vorgehensweise bei der grafischen Modellierung der virtuellen Prozebelemente werden in diesem Konzept Interaktionsformen entwickelt, die den Bildüberlegenheitseffekt ausnutzen.

Visuelle Größen - z.B. Füllstände oder Durchflüsse - werden bei dieser Visualisierungstechnik realitätsnah dargestellt. Nicht-visuelle Größen wie Temperaturen oder Drücke werden mit Mitteln der Farb- bzw. Formkodierung dargestellt. So assoziiert der Mensch mit Farben bzw. Farbverläufen bestimmte Eigenschaften wie die Temperatur [24][25]. Formänderungen werden mit Druckänderungen assoziiert [26] und eignen sich ebenfalls sehr gut zur Visualisierung von Prozeßinformationen. Soll- und Grenzwerte, die nur bei Abweichungen vom Sollzustand angezeigt werden, erleichtern die Identifizierung des aktuellen Prozeßzustandes und vermindern die Informationsflut. Ein Beispiel ist in Abb. 5 dargestellt. Der Füllstand in dem Tank ist unter dem Grenzwert gesunken. Der Grenzwert wird somit sichtbar, gleichzeitig wird ein verbreitetes Alarmsymbol angezeigt.

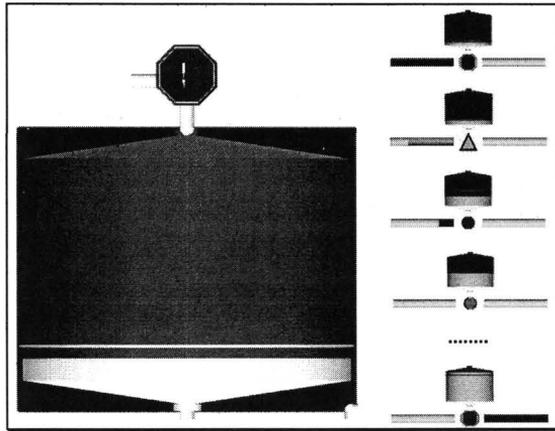


Abb. 5: Darstellung von Füllstand und Grenzwert in einem Tank sowie mögliche Zustände

## 6 Aufgabenorientierte Darstellung des Prozesses

Das gesamte System *Rektifikationsanlage* wird entsprechend den in [9] durchgeführten Analysen aufgabenorientiert strukturiert dargestellt, so daß der Problemlöseraum für den Menschen verkleinert wird und das System transparenter präsentiert wird. In Abb. 6 wird die bereits oben erwähnte Aufgabe *Führe ausreichend Gemisch zu* visualisiert. Im linken Fenster werden die Prozebelemente mit den zugehörigen Prozeßgrößen dargestellt. Im rechten Fenster, dem sogenannten Zielmonitor, wird die Erfüllung der Ziele mit den zugehörigen Prozeßelementen visualisiert.

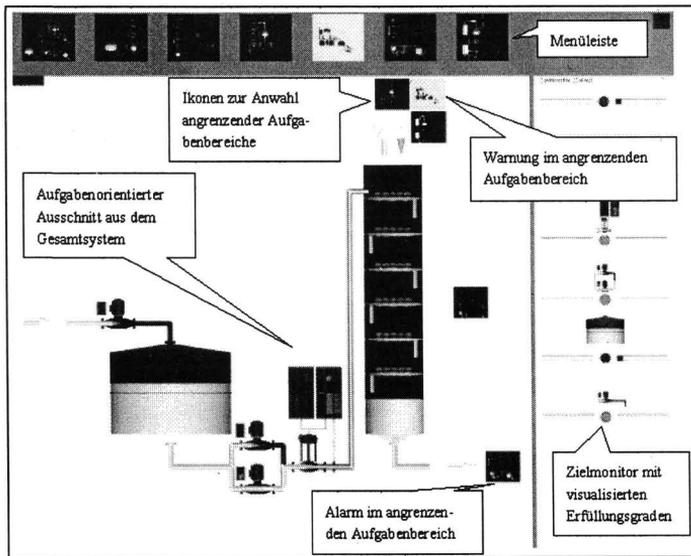


Abb. 6: Aufgabenvisualisierung *Führe ausreichend Gemisch zu*

In diesem Zielmonitor wird nicht nur dargestellt, ob der Zustand des Prozeßelementes oder des Teilsystems dem Zielzustand entspricht, also ob das Ziel erfüllt wird, sondern es wird auch der Grad der Abweichung von dem Ziel in Form von farbigen Säulen dargestellt. Die Farbe und die Länge der Säulen zeigen an, ob ein Ziel erfüllt ist bzw. sich noch im Toleranzbereich befindet (grüner Ausschlag) oder ob eine Warnung (gelber Ausschlag) beziehungsweise ein Alarm (roter Ausschlag) vorliegt. Zusätzlich zu den Säulen werden Ikonen verwendet, um den Zustand der Prozeßelemente hinsichtlich ihrer Zielerfüllung zu visualisieren. Auch hier werden weit verbreitete Symbole (Ziel erfüllt: grüner Kreis; Warnung: gelbes Dreieck; Alarm: rotes Achteck) verwendet. Ist ein Ziel entsprechend den vorgegebenen Sollwerten erfüllt, so wird das Kreissymbol in der Mitte in einem leuchtendem Grün dargestellt. Bei Abweichungen, die aber noch in dem Toleranzbereich liegen, wird die Säule und das Kreissymbol in einem abgeschwächten Grün gezeichnet. Anhand der Säulenlänge und der Richtung kann der Mensch erkennen, wie weit sich das Ziel in dem jeweiligen Bereich befindet, d.h. bei welcher Prozeßeinheit sie/er als erstes eingreifen muß. Liegt eine Warnung oder ein Alarm vor, so werden auch die Elemente hervorgehoben, mit denen Einfluß auf die Prozeßgrößen genommen werden kann, für die eine Zielverletzung vorliegt. Die Interaktion zwischen dem Menschen und Prozeßelementen geschieht direkt per Maus. Die Navigation zwischen den einzelnen Fenstern ist sowohl über die Menüleiste am oberen Bildrand als auch in den einzelnen Unterfenstern möglich. Dazu sind an den Nahtstellen zu benachbarten Aufgabenbereichen Ikonen dargestellt. Werden diese Ikonen angewählt, so wird der gewählte Aufgabenbereich dargestellt. Massen- und Wärmeflüsse werden an den Nahtstellen durch Pfeile dargestellt, deren Durchmesser abhängig von dem jeweiligen Fluß dargestellt werden. Wärmeflüsse werden zusätzlich entsprechend ihrer Temperatur farbig gekennzeichnet. Der Mensch kann so leicht Zusammenhänge zwischen den Unteraufgaben erkennen und diese seinem mentalen Modell hinzufügen.

## 7 Diskussion

Das in diesem Beitrag vorgestellte Konzepte hat zum Ziel, komplexe technische Systeme strukturiert unter Verwendung der dreidimensionalen Computergrafik bildlich-anschaulich darzustellen. Die Verwendung von bildlicher Informationskodierung soll die Informationsaufnahme und Informationsverarbeitung des Menschen erleichtern. Durch die Aufgabenorientierung wird das gesamte System übersichtlicher und transparenter dargestellt, der Mensch erhält einen besseren Zugang zu der Informationswelt des Systems. Gleichzeitig wird die Fülle an Informationen auf die situationsabhängige notwendige Anzahl beschränkt. Die Leistungsfähigkeit dieser Visualisierungstechnik wird im Rahmen von Experimenten untersucht.

## 8 Literatur

- [1] Thierfelder, H. G.: Mit neuester Technik bestehende Kraftwerke modernisieren. ABB Technik 2/1997, pp. 15-24.
- [2] Herbst, L., Rieger, W.: Modernste Prozeßvisualisierung im Kraftwerk Schkopau. ABB Technik 1/1997, pp. 13-18.
- [3] Reinig, G., Winter, P., Linge, V. und Nägler, K.: Trainingssimulatoren: Engineering und Einsatz. Chemie Ingenieur Technik (69) 12/97, pp. 1759-1764.
- [4] Bainbridge, L.: Ironies of Automation. Automatica, Vol. 19 (1983), No. 6, pp. 775-779.
- [5] Raichle, P.: Erfahrungen mit unterschiedlich gestalteten Leitwarten in kontinuierlich arbeitenden Prozeßanlagen. In: Kolloquium Leitwarten. Köln, TÜV Rheinland e.V. 1984, pp. 595-601.
- [6] Vicente, K. J., Rasmussen, J.: The Ecology of Human-Machine Systems II: Mediating "Direct Perception" in Complex Work Domains. ECOLOGICAL PSYCHOLOGY, 2(3) 1990, pp. 207-249.

- [7] Grams, T.: Bedienfehler und ihre Ursachen (Teil 2). *atp – Automatisierungstechnische Praxis*, 40 (1998) 4, pp. 55-60.
- [8] Gilles, E.D., Holl, P., Marquardt, W., Schneider, H., Mahler, R., Brinkmann, K. & Will, K.-H.: Ein Trainingssimulator zur Ausbildung von Betriebspersonal in der Chemischen Industrie. *Automatisierungstechnische Praxis* 32 (1990) Nr. 7, pp. 343-350.
- [9] Wiese, F., Settgast, D.: Analyse von Prozeßführungsproblemen bei einer Destillationskolonne. Unveröffentlichte Studienarbeit. Fachgebiet für Systemtechnik und Mensch-Maschine-Systeme, Universität Gesamthochschule Kassel, 1993.
- [10] Ali, S., Heuer, J., Hollender, M.: Partizipative Erstellung von Bedienoberflächen für Prozeßleitsysteme durch interaktive Gestaltung und Bewertung. Endbericht zum DFG-Forschungsvorhaben Kz. JO 139/6-1 Partizipative Bediengestaltung. Berichtszeitraum: 1.7.92 - 30.6.94. *IMAT - Bericht MMS-14*, 1995; ISSN 0940-094 X Nr. 14, 1995.
- [11] Ali, S., Heuer, J., Hollender, M.: Partizipative Erstellung von Bedienoberflächen für Prozeßleitsysteme durch interaktive Gestaltung und Bewertung. Endbericht zum DFG-Forschungsvorhaben Kz. JO 139/6-2 Partizipative Bediengestaltung. Berichtszeitraum: 1.7.94 - 30.6.96. *IMAT - Bericht MMS-17*, 1995; ISSN 0940-094 X Nr. 17, 1997.
- [12] Tiemann, M.: Evaluation of a methodology for human-machine interface development. In: P. A. Wieringa and H.G. Stassen (Eds.): *Proc. 15th European Annual Conference on Human Decision Making and Manual Control*, Soesterberg, The Netherlands, 1996, pp. 2.3-1 - 2.3-12.
- [13] Borys, B.-B. and M. Tiemann: The DIADEM software development methodology extended to multimedia interfaces. In: *Proc. Annual Conference 1997: Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter, Advances in Multimedia and Simulation*, Bochum, 1997, pp. 117-125.
- [14] Heuer, J., Ali, S., Hollender, M., Rauh, J.: Vermittlung von Mentalen Modellen in einer chemischen Destillationskolonne mit Hilfe einer Hypermedia-Bedienerfläche. In: E. Schoop, R. Witt & U. Glowalla (Eds.): *Hypermedia in der Aus- und Weiterbildung*, Schriften zur Informationswissenschaft, Bd. 17, Universitätsverlag Konstanz, 1995, pp. 27-42.
- [15] Hacker, W.: *Arbeitspsychologie*. Bern: Verlag Hans Huber, , 1986.
- [16] Dutke, S.: *Mentale Modelle: Konstrukte des Wissen und Verstehens – Kognitionspsychologische Grundlagen für die Software-Ergonomie*. Göttingen: Verlag für Angewandte Psychologie 1994.
- [17] Funke, J.: *Wissen über dynamische Systeme: Erwerb, Repräsentation und Anwendung*. Berlin: Springer 1987.
- [18] Isermann, R.: *Identifikation dynamischer System 1 - Grundlegende Methoden. 2. neubearbeitete und erweiterte Auflage* Berlin: Springer 1992.
- [19] Johanssen, G.: *Mensch-Maschine-Systeme*. Berlin: Springer 1993.
- [20] Engelkamp, J.: *Das menschliche Gedächtnis*. Göttingen: Verlag für Psychologie 1990.
- [21] Wittenberg, C.: Unterstützung der menschlichen Informationsaufnahme durch Prozeßvisualisierung mittels virtueller Prozeßelemente. In: K.-P. Gärtner (Hrsg.): *Menschliche Zuverlässigkeit, Beanspruchung und benutzerorientierte Automatisierung*, pp. 173-182. Bonn: DGLR 1997.
- [22] Ignatowitz, E.: *Chemietechnik*. Haan-Gruiten: Verlag Europa – Lehrmittel, 1992.
- [23] Färber, G., Polke, M., Steusloff, H.: *Mensch-Prozeß-Kommunikation*. *Chemie-Ingenieur-Technik* 57 (1985) Nr. 4, pp. 307-317.
- [24] Frieling, H.: *Licht und Farbe am Arbeitsplatz*. Bad Wörishofen: Verlagsgemeinschaft für Wirtschaftspublizistik, 1982.
- [25] Heller, E.: *Wie Farben wirken*. Reinbek: Rowohlt, 1989.
- [26] Houssidas, L.: An exploratory study of the perception of causality. *The British Journal of Psychology. Monograph Supplements*. Cambridge University Press 1964.

## Adresse des Autors

Dipl.-Ing. Carsten Wittenberg  
 Fachgebiet für Systemtechnik und Mensch-Maschine-Systeme  
 Institut für Meß- und Automatisierungstechnik, Fachbereich 15 Maschinenbau  
 Universität Gesamthochschule Kassel  
 34109 Kassel  
 Email: carsten@imat.maschinenbau.uni-kassel.de