ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1989

Seria: MECHANIKA z. 92 Nr kol. 1027

XIII MIĘDZYNARODOWE KOLOKWIUM
"MODELE W PROJEKTOWANIU I KONSTRUOWANIU MASZYN"

13th INTERNATIONAL CONFERENCE ON
"MODELS IN DESIGNING AND CONSTRUCTIONS OF MACHINES"

25-28.04.1989 ZAKOPANE

S. NANNENBERG, K.B. BAKKER

Hogeschool Windesheim - Zwolle
Sektor HTO
Grasdorpstraat 2
NL-8012 EN Zwolle

PROTOTYPING, ÜBER SIMULATION, DYNAMISCHER KONTINUIERLICHER SYSTEME

Zusammenfassung.

Um komplexe dynamische Systeme optimal zu gestalten, kann man erfolgreich die Methode der Modellbildung und der Simulation anwenden. Durch die hohen Entwicklungskosten war dies bis heute beschränkt auf besondere Fälle. In diesem Beitrag wird dargelegt, daß es an der "Hogeschool Windesheim" Fortschritte gibt, durch welche die Entwicklungskosten eines Modells in Grenzen bleiben, und das Modell demzufolge wirtschaftlich interessant wird. Gleichfalls zeigt es sich, daß es nun möglich ist, mit Hilfe einer bereits früher angefertigten Modellenbank, den Optimierungsprozeß schon während der Entwurfphase durchzuführen.

Computerunterstützung beim Entwurfprozeß.

Um zu erkennen, auf welcher Ebene ein Computerprogramm den Entwurfprozeß unterstützen kann, ist es am besten, die Probleme, mit denen sich der Konstrukteur befaßt, auf ihre wesentlichen Merkmale zurückzuführen, und diese möglichst einfach darzustellen.
Jeder Entwurf enthält eine große Anzahl von Variablen, von denen mehrere unabhängig sein können.

Man muß z.B. ein rundes Gefäß mit einem Inhalt von 500 l. entwerfen.
Das Volumen ist gleich Fläche x Höhe. Dieses Problem hat zwei Variablen, den Durchmesser und die Höhe. Wird der Durchmesser gewählt, so läßt sich danach die Höhe des Gefäßes ableiten.
Mathematisch ausgedrückt ist, im vorliegenden Fall,der Durchmesser der unabhängige Variable, und die Höhe die abhängige Variable.
Die Größe der abhängigen Variable (die Lösung) hängt vom gewählten Durchmesser ab.
Es gibt nun eine Menge von Lösungsvarianten; ihre Elemente sind abhängig vom gewählten Wert der unabhängigen Variablen, des Durchmessers.

Darin liegt das wesentliche Problem des Entwurfprozesses. Bei einem Entwurf, der etwas komplexer ist, gibt es nämlich mehrere unabhängige Variablen.
Eine bereits festgelegte unabhängige Variable hat Einfluß auf die später noch zu wählenden neuen unabhängigen Variablen und auf die Qualität des Produktes.
Bei zunehmender Komplexität der gestellten Aufgabe, wächst die Zahl der unabhängigen Variablen stark. Der Weg zur Lösung wird immer unübersichtlicher, und dadurch wird die Wahrscheinlichkeit einer optimalen Lösung sehr gering.
Man kann nun verschiedene Strategien einführen, um zu einem beherrschbaren Entwurfprozeß zu gelangen.

Die Struktur des Entwurfprozesses.

Der Weg von der Aufgabe zur Lösung führt immer über Lösungsvarianten (die Folgen gewählter unabhängiger Variablen). Aufgrund von Hypothesen werden diese Variablen gewählt, und sie müssen später überprüft werden. Falls das Ergebnis unzureichend ist, sind weitere Hypothesen aufzustellen. Auf diese Weise entsteht ein zyklischer Prozeß. (Ref.1)
Für die Hypothesenbildung und -überprüfung stehen viele Wege offen. Grenzbereiche der Hypothesenbildung sind das Finden prinzipiell neuer und und die Wiederverwendung bekannter Lösungen. Die Überprüfung reicht vom Gedankenexperiment bis zum Durchführen eines Meßprogramms. (Abb.1)

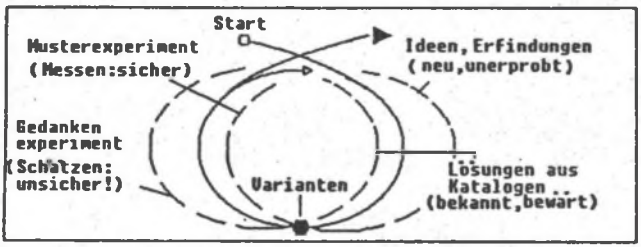

Abb.1

In beiden Teilen treten Verzweigungen auf: Komplexe Probleme müssen zerlegt und einzeln gelöst werden. Durch Vereinigung der Teillösungen entstehen Gesamtlösungsvarianten. Diese sind unter verschiedenen Aspekten zu analysieren. Erst nach der Überprüfung des Gesamtsystems ist ein Urteil über die erzielte Lösung möglich.
Der Übergang von einer konkreten, genau präzisierten Aufgabe zur konkreten, vollständigen Lösung ist nicht in einem Schritt erreichbar.
Notwendig erweist sich eine Lösungskonkretisierung über mehrere Entwicklungsstadien. Dadurch entstehen mehrere Denkebenen, die diesen Entwicklungsstadien entsprechen. Der zyklische Prozeß läuft nun über diese Denkebenen, als durchliefe er eine Spirale. (Abb.2)

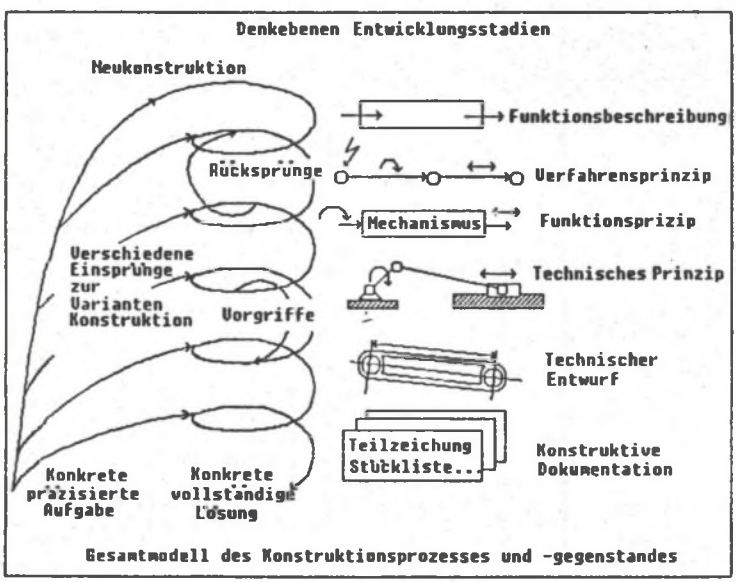

Abb.2

Jede Windung in dieser Spirale stimmt mit einer Denkebene überein. Die Zahl der Ebenen ist vom geforderten Neuheitsgrad abhängig. Durch Problemabstraktion und Entscheidungen über die Wiederverwendung bekannter Lösungen ergeben sich verschiedene Einsprüngen zwischen den Ebenen.
Mit Hilfe dieses Denkmodells lassen sich nun mehrere Hilfsmittel, die im Entwurfprozeß verwendet werden können, einordnen, um zu einem optimalen System zu gelangen.

Zunächst bietet die Unterstützung auf der Ebene der Funktionsdarstellung mit Hilfe des FAST-Diagramms (Functional Analysis Systems Technik) eine Möglichkeit. (Ref. 2,3)
Software-Unterstützung auf dem Gebiet des Wirkungs- und Funktionsprinzips ist bis heute noch unbekannt.
Auf Anregung der Arbeitsgruppe MeKoMe (Methodische Konstruktion von Maschinen Elementen) (Ref.4) wird in europäischem Rahmen zur Zeit an der Uniformierung der Symbole für die Darstellung technischer Prinzipien gearbeitet.
Bekannt sind die Hilfsmittel auf der technischen Entwurfebene. Verschiedene CAD-Zeichenpakete sind inzwischen erschienen.
Auch die Verbindung zur konstruktiven Dokumentation ist bei einer Anzahl von CAD-Paketen realisiert worden.
Optimierung in dieser Phase beschränkt sich auf geometrische Optimierung.
Gleichfalls kann der Konstrukteur sich bei der geometrischen Optimierung des Entwurfs unter berücksichtigung der Herstellungskosten durch Software unterstützen lassen. Die Kopplung eines solchen Kostenpakets mit einem CAD-Zeichenpaket liegt dann auf der Hand.(Ref.5)
Kopplungen zwischen CAD-Zeichenpaketen und der "finite elements method" sind ebenfalls bekannt. In diesem Falle geht es um gleichzeitige Optimierung von Geometrie und Tragkraft. Solche Optimierungsverfahren befinden sich jedoch in der letzten Phase des Entwurfprozesses.
Um die Werte der unabhängigen Entwurfvariablen mit Hilfe des Computers optimal zu bestimmen, muß man den Weg der Modellbildung beschreiten.

Modellbildung kontinuierlicher Systeme.

Modellbildung basiert auf der Systemlehre, das heißt, man betrachtet den Entwurfprozeß als ein System interaktiever Elemente, welche gleichzeitig in wechelseitiger Beziehung zur Umgebung stehen können.

> Wenn System M, das unabhängig ist von System S, benutzt werden kann, um Information über System S zu erhalten, dann wird M ein Modell von S genannt.

Modelle werden benutzt, weil sie leichter hantierbar sind als das reelle System, oder weil es unerwünscht oder unmöglich ist, das System selbst zu manipulieren. Was für ein Modell von einem System gemacht wird, hängt vom angestrebten Ziel ab. Aus der Zielsetzung, mit Hilfe der Modellbildung zu einem optimalen Entwurf zu gelangen, folgt die Forderung, daß die Beziehungen zwischen den verschiedenen Variablen mathematisch zu beschreiben sind.
Derartige Modelle werden physikalische Modelle Genannt.

Eine weitere Einteilung dieser physikalischen Modelle wird gemacht je nachdem sie mehr oder weniger physikalisches Wissen über den Entwurf bzw. Prozeß enthalten. Man unterscheidet dabei weiße, graue und schwarze Modelle:

a) In weißen Modellen sind alle Beziehungen zwischen den physikalischen Variablen und den Parametern bekannt.

b) In grauen Modellen sind ein Teil der physikalischen Beziehungen und Parameter bekannt, der Rest ist aus z.B. Experimenten abzuschätzen.

c) In schwarzen Modellen wird der Prozeß als Black-Box betrachtet. Ohne die Physik des Prozesses zu betrachten, wird versucht das Verhalten des Systems mit mathematischen Beziehungen zu beschreiben. Die Struktur dieser Beziehungen und ihre Parameter haben meist keinen Zusammenhang mit der Realität.

Welches Modell benutzt wird, hängt von der Zielsetzung ab.
In schwarzen Modellen können nur Beziehungen festgestellt werden zwischen einer Anzahl von Eingangswerten und dem dazugehörigen Ausgangswert bei konstanten Parameterwerten. Die erforderlichen Daten sind Experimenten oder bereits früher bekannten Meßwerten (Tabellen, Diagrammen) zu entnehmen. (Ref.6)
Knosala u.a. zeigen, wie mit der von ihnen entwickelten Software derartige Modelle gebaut werden können, bei denen mehrere Parameter variabel sind. (Ref.7)
Bei diesen Modellen sind im allgemeinen die Entwicklungskosten am niedrigsten.
Das Anwendungsgebiet ist infolge des Gültigkeitsbereichs der verschiedenen Parameterwerte beschränkt.
Bei weißen Modellen sind alle physikalischen Beziehungen und Parameterwerte bekannt. Solche Modelle haben ein großes Gültigkeitsgebiet und geben alle benötigten Informationen.
In der Praxis kommt es nahezu immer vor, daß eine Anzahl von Parameterwerten nicht exact bekannt sind. Wenn wir z.B. die Bestimmung eines Wärmeübertragungskoeffizienten betrachten, dann müssen wir bedenken, daß die betreffende Formel aus früheren Experimenten abgeleitet ist, und an sich wieder ein Modell ist, wie z.B. eine Tabelle oder ein Diagramm auch. Außerdem ist es möglich, daß die Oberfläche, die die Wärme überträgt, verschmutzt ist, so daß der Parameterwert sich in unbekannter Weise ändert.
Demzufolge kann man in der Praxis bestenfalls mit grauen Modellen arbeiten.

Die Entwicklung von weißen und grauen Modellen erfordert großen Sachverstand, gute Fachkenntnisse und viel Zeit. Die Entwicklungskosten sind dadurch hoch; derartige Modelle werden werden deshalb nur in besonderen Fällen benutzt.
Angesichts der Entwicklungskosten werden in der Forschung nach einem optimalen Reglungssystem schwarze Modelle benutzt. In diesem Falle sind keine Systemänderungen erlaubt. In Abb. 3 ist die Anwendung der verschiedenen Modelle schematisch dargestellt.

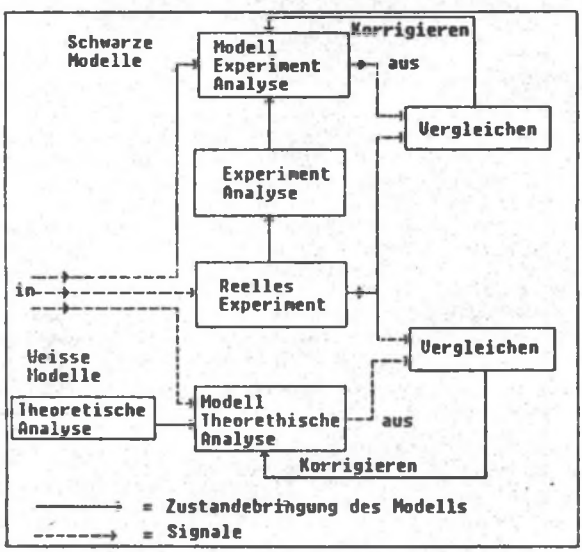

Abb.3

Bei weißen und grauen Modellen kann man die verschiedenen Parameterwerte innerhalb von bestimmten Grenzen frei variieren. Daß heißt, man kann z.B. den Durchmesser eines Rohres ändern, wodurch die Strömung einer Flüssigkeit statt laminar turbulent wird, und sich der Wärmeübergangskoeffizient demzufolge sehr verbessert.
Gerade diese Möglichkeit ist erforderlich im Entwurfprozeß. Wir müssen verschiedenen unabhängigen Variablen einen Parameterwert geben, um den Rest bestimmen zu können. Mit einem solchen Modell wird dann der Effekt einer bestimmten Wahl sichtbar.
Im folgenden wird dargelegt, daß mit einer bestimmten Methode der Modellbildungstechnik, ergänzt durch geeignete Software, der Bau grauer Modelle von technisch kontinuierlichen Systemen zweckmäßig durchgeführt werden und damit eher wirtschaftlich sein kann, als es bis heute der Fall war. Dies öffnet den Weg, die Modellbildung mit anschließender Simulation in den Entwurfprozeß zu integrieren.

Das Bauen weißer Modelle

Bei dem Modellbildungsprozeß weißer Modelle steht die Bilanztechnik zentral. Es zeigt sich, daß man hierbei immer wieder von denselben Grundlagen ausgehen kann. (Abb. 4)

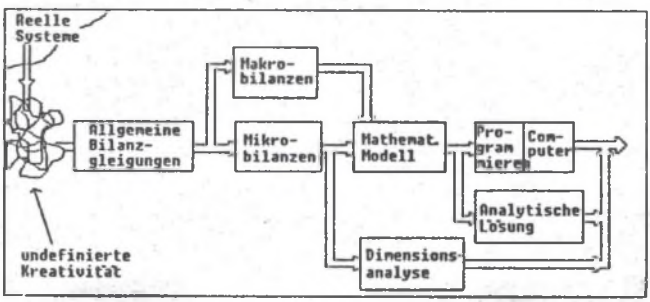

Abb.4

Aus der allgemeinen Bilanztechnik kann man mit Hilfe der Tensorrechnung, die generalisierten Bilanzen in Form eines Differentialoperators für Transport aufstellen. Abhängig von der erforderlichen Detaillierung kann man dann die partiellen Differentialgleichungen (Mikrobilanzen) für das betreffende Problem aufstellen, oder man kann mit Hilfe der Systemgrenzen diskretisieren, wodurch gewöhnliche Differentiale(Makrobilanzen) übrigbleiben.
Das auf diese Weise aufgestellte Modell beschreibt den zu erforschenden Teil des Systems oder eines Subsystems in mathematischen Termen (das mathematische oder weiße Modell) und kann gelöst werden. Die Lösung kann entweder analytisch oder zahlenmäßig, unter Einschaltung des Computers, durchgeführt werden.
Für mehr Einzelheiten wird auf Fullford verwiesen. (Ref.8)
Es leuchtet ein, daß es dazu benötigte mathematische Wissen und die erforderlichen Fachkenntnisse beträchtlich sind.
Dies gilt auch für die benötigte Modellentwicklungszeit. In der Praxis führt man dann weitgehende Vereinfachungen durch, wodurch das ganze Modell handlich wird.

Dynamische weiße Modelle.

Das auf oben geschilderte Weise erzielte Modell ist ein sogenanntes dynamisches Modell. Die Differentialgleichungen stellen im reellen System die Energiepuffer dar. Das System kann diese Energie speichern und nachher wieder abgeben, wodurch es anders reagiert, als man meistens erwartet. In jedem Augenblick gelten die Gleichgewichtsbedingungen , wobei, z.B. in mechanischen Systemen, die Trägheitskräfte ebenfalls eine Rolle spielen.

Statische weiße Modelle

Werden die Differentialgleichungen null gesetzt (es gibt keine Änderungen mehr in den Energiepuffern), so tritt der statische Zustand ein.
Dynamische Kräfte sind dann nicht mehr anwesend, so z.B. ändern sich in der Wärmetechnik die Wandtemperaturen nicht mehr, wodurch die Wärmeströme statisch sind. In diesem Falle bleibt ein System von Gleichungen übrig, das verhältnismäßig einfach zu lösen ist, wobei dem oben geschilderten Weg meist nicht systematisch gefolgt wird.
Da das Aufstellen der Bilanzen im statischen Zustand ziemlich einfach ist, wendet man diese Methode im Interesse der Optimierung der Werte der unabhängigen Variablen (Parameter) häufig an.
In dieser Hinsicht könnte man unter Optimierung verstehen: Die Bestimmung eines Parameters in einer Komponente (z.B. des Achsendurchmessers unter einer bestimmten statischen Belastung) bis zur Festlegung der Parameter in einem System, so daß ein angestrebtes Endkriterium erzielt wird.
Setzt man eine lineare Abhängigkeit zwischen den unabhängigen Variablen voraus, so gelangt man, über diesem Optimierungsprozeß, in die Verfahrensforschung.
In der Maschinenbaupraxis sind die Abhängigkeiten meistens nicht linear.
Optimierung ist jedoch in gleicher Weise möglich, wenn man die Beziehungen zwischen den Variablen durch Polynome ersetzt. (Ref.9)

Praktische Probleme beim Bau weißer Modelle.

Wie bereits erwähnt, werden im Interesse der Lösung der Differentialgleichungen oft weitgehende Vereinfachungen durchgeführt. Infolge dieser Vereinfachungen hat das Modell nur ein sehr beschränktes Gültigkeitsgebiet und ist deswegen nicht auf den normalen Entwurfprozeß anwendbar.
Praktische Probleme sind oft interdisziplinar und verlangen Kenntnisse aus den verschiedenen Fachgebieten. Diese Kenntnisse müssen bei der Modellbildung gleichzeitig angewandt werden. Eine nicht-strukturelle Arbeitsweise führt rasch zu einer "Verstrickung" des Modellbauers.
Wenn man die Vorteile der Unterstützung, die Simulation bieten Kann, im Entwurfprozeß nutzen will, so muß sowohl die Modellbildung als die Implementierung im Computer schnell durchführbar sein.
Der finanzielle Nutzen, den die Simulation einbringt, muß die Lohnkosten, die der Modellbildung verbunden sind, zumindest ausgleichen.
Wird ein solches Hifsmittel strukturell in den Entwurfprozeß eingeführt, so daß es für jeden Konstrukteur anwendbar ist, dann muß auch die Startschwelle niedrig und die Bedienung für den Benutzer einfach sein.

Ein gutes Beispiel von Modellbildung und Simulation, das obengenannten Anforderungen weitgehend entspricht, kann man bei der "finite elements method" erkennen.
Mit Hilfe von Präprozessoren ist die Einfuhr des Modells erleichtert.
Obwohl die zugrundeliegende Theorie universal anwendbar ist, zeigt es sich, daß diese Pakete infolge der Präprozessoren nur eine beschränkte Anwendung haben.
Wenn der Entwurf, bzw. Prozeß als ein System aufgefaßt wird, so heißt dies, daß man mit solchen Paketen eine Komponente dieses Systems optimieren kann.
In der statischen Situation lassen sich damit sehr gute Ergebnisse erzielen, in dynamischen Situationen, wobei zwischen allen Komponenten des Systems Interaktionen bestehen, ist das Gesamtergebnis jedoch zweifelhaft.
Optimierung eines Details braucht nicht zu einer besseren Funktion des Gesamtsystems zu führen.
Das bedeutet, daß man das Gesamtsystem modellieren und durchrechnen muß.
Aber wie modelliert man ein System, in dem Komponenten aus der Reglungstechnik, der Mechanik, der Elektrotechnik, dem Magnetismus und der Hydraulik gleichzeitig eine Rolle spielen.

Systemmodellierung.

Bei der Modellierung von Gesamtsystemen geht man von der Systemlehre aus. (Abb.5)

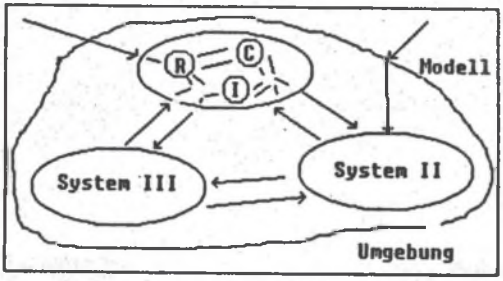

Abb.5

Ein System besteht aus Elementen, die untereinander wechselseitige Beziehungen haben und gleichzeitig auch Beziehungen zur Umgebung haben können.
Eine Gruppe von Elementen, zwischen denen ein starker Zusammenhang besteht, kann man zu einem Teilsystem verbinden und bildet dann ein Subsystem.
Zwischen diesen Subsystemen existieren wiederum Interaktionen; sie bilden gemeinsam das Gesamtsystem, das Modell oder den Entwurf.
Für die Bildung von Universalmodellen dynamischer Systeme, die den gestellten Bedingungen entsprechen, benutzt man die Bonddiagrammtechnik.
Alle Elemente werden, abhängig von ihren physikalischen Eigenschaften, gruppiert und mit einem Universalsymbol angedeutet. Dadurch sind sie von jeder Fachdomäne losgekoppelt und universal einsatzfähig. Ein zweiter, wichtiger Vorteil zeigt sich in der Übersichtlichkeit des entstandenden topologischen Bonddiagramms.
Nehmen wir z.B. das Element "Dissipator", ein Systemelement, das die angelieferte Energie in eine für das System nicht brauchbare Form umwandelt. (Abb.6)

Komponente	Fysikalische Eigenschaft	Symbol	Mögliche Implementationen.
e, f, R e, f, R	e=R*f e=F,M,U,.. f=U,Ω,i,..		

Abb.6

Das Element wird im allgemeinen durch das Symbol R dargestellt. Der Leistungsaustausch dieses Elements mit den übrigen Elementen im System wird beschrieben mit Hilfe der Leistungspaare e (effort) und f (flow).
Im allgemeinen gilt: die Leistung P = e x f.
Die Beziehung zwischen den Leistungspaaren wird durch das dazugehörige Element bestimmt. Abb.6 zeigt auch einige mögliche Interpretationen des Elements R.
Das Bondelement R bekommt dabei den Wert einer Flowvariable f (Geschwindigkeit, Winkelgeschwindigkeit, Stromstärke, Flüssigkeitsstrom) und es berechnet daraus die Effortvariable e (Kraft, Moment, Spannungsverlust, Druckverlust).
Das Element ist mit den übrigen Systemelementen durch einen Bundpfeil verbunden.
Im Simulationsmodell kann man zu jeder Zeit den einfachen Widerstand R durch ein Gefüge von Elementen, den Subsystem, ersetzen.

Die Verbindung dieses Subsystems mit den übrigen Systemen im Modell verläuft nach demselben Protokoll. Dies bedeutet, daß das Modell mit der weiteren Detaillierung des Entwurfs mitwachsen kann. Zu jeder Zeit kann der Entwerfer sein Modell anpassen und durchrechnen lassen. Die (dynamischen) Folgen seiner Wahl werden sofort sichtbar.
Abb.7 zeigt ein Beispiel eines Lastantriebs über eine Reibungskupplung und einen Elektromotor. Wenn der Motor plötzlich angetrieben wird, wird die Reibungskupplung das verfügbare Achsmoment auf die Last übertragen müssen. Wenn dieses Moment zu groß ist, wird die Kupplung rutschen.
Abb.8 zeigt das Bonddiagramm dieses Systems.

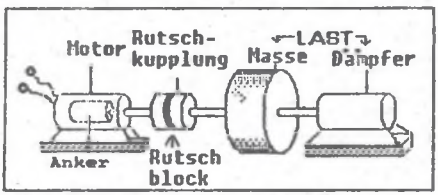

Abb.7

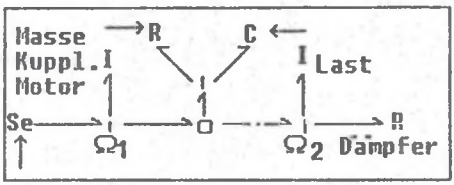

Abb.8

Die halben Verbindungspfeile (Bondpfeile) stellen die Energiebindungen zwischen den Elementen dar.
Infolge der Nicht-Linearität der Reibungskupplung wird an die Elemente R und C (elastische Eigenschaften des Reibungsmaterials) ein Informationssignal gekoppelt. Gleichfalls gilt dies für den Elektromotor (in diesem System ganz vereinfacht).
Das ganze System wird dann in eine Anzahl von Subsystemen unterteilt: Motor, Masse, Reibungsblock und Last.
Abb.9 zeigt dies abermals. Dabei sind die Verbindungspfeile, die die Energiesignale zwischen den Subsystemen darstellen, eingezeichnet. Diese Pfeile sind sogenannten Bondpfeile.

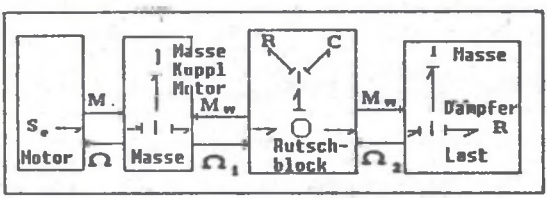

Abb.9

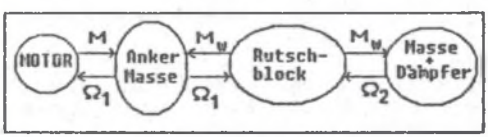

Abb.10

Abb.10 zeigt das ganze System wiederum, aber jetzt als ein Konglomerat von Subsystemen.
Im Princip kann man nun jedes Subsystem modellieren und testen, darauf kann durch eine richtige Verknüpfung dieser Subsysteme das Gesamtmodell zusammengesetzt werden.
Jedes Subsystem kann man dann durch andere ersetzen, solange die voraus bestimmten Interaktionen zwischen den Subsystemen gleich bleiben.

Das Grundproblem der Modellbildung und der Simulation während des Entwurfprozesses kann man nun in zwei Arbeitsebenen aufteilen:

1. Die Anfertigung von Grundmodellen.
2. Die Anwendung dieser Grundmodelle.

Um den Entwurfprozeß zeitlich in Grenzen zu halten, und somit Optimierung durch Simulation wirtschaftlich interessant zu machen, ist eine hinreichende Auswahl an Grundmodellen und geeignete Software notwendig.
Mit dieser Software muß man die Grundmodelle abrufen und das Gesamtmodell auf jeder Denkebene zusammensetzen können.

MOSIS - Ein neues CAE-Simulationspaket.

Um mit Hilfe von obengenannten Möglichkeiten strukturell modellieren und simulieren zu können, wurde bei SIMOTES in Zwolle (NL), in Zusammenarbeit mit der Hogeschool Windesheim, Abt. HTO und der Technische Universiteit Delft ein Grund-Simulationssoftwarepaket, MOSIS, entwickelt. Dieses Paket ermöglicht es, in einfacher Weise Grundmodelle zu implementieren, zu testen, in einer Modellenbank zu speichern, wieder abzurufen und zu verknüpfen.

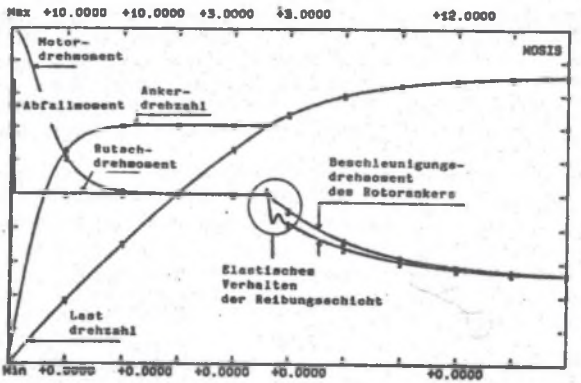

Abb.11

Abb.11 zeigt die Reaktion eines Antriebs beim Einschalten des Elektromotors, wie bereits oben besprochen. Während der ersten Phase des Anlaufens ist das Moment, welches durch die Reibungskupplung übertragen wird, zu groß, und tritt Rutsch auf. Die Drehzahl des Motorankers steigt schnell auf einen konstanten Wert. Das Rutschmoment beschleunigt die Last, und in dem Augenblick,wo der Rutsch aufhört (der dynamische Rutschfaktor wird kleiner als der statische Rutschfaktor), entsteht eine Schwingung. Von der Rutschschicht in der Reibungskupplung ist ein allgemeines Rutschblock-Grundmodell entwickelt.

Abb.12 zeigt anhand einiger Beispiele, wie ein solches Grundmodell in verschiedenen Situationen angewendet werden kann.
Der Benutzer, d.i. der Entwerfer, braucht nur die diversen Verbindungen anzulegen.

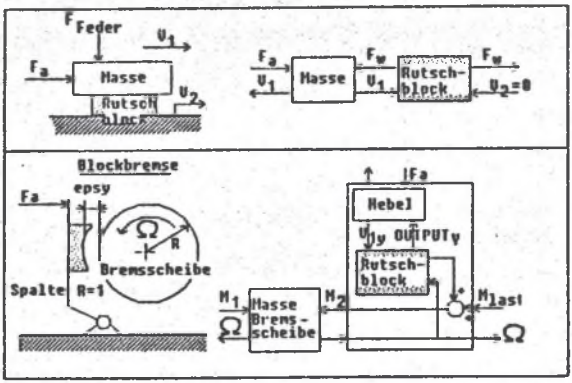

Abb.12

Eine praktische Anwendung von MOSIS.

Infolge der steigenden Energiepreise wird es immer wichtiger, daß die Heizungsanlagen in Gebäuden möglichst optimal arbeiten. Da die Komponenten in den Anlagen bereits weitgehend optimiert sind, ist es schwierig, diese noch weiter zu verbessern. Verbesserungen sind nur erreichbar, wenn man das Ergebnis der Zusammenwirkung aller Komponenten des Gesamtsystems betrachtet. Nur durch Computersimulation kann man darüber verhältnismäßig billig neue Erkenntnisse gewinnen.

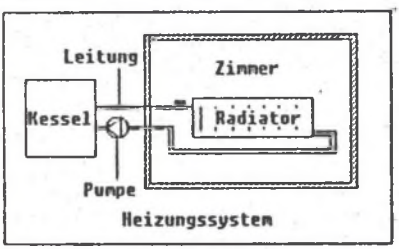

Abb.13

Abb.13 zeigt eine Heizungsanlage, die zu untersuchen ist. Das Gesamtsystem wurde zunächst in folgende Subsysteme aufgeteilt.

1. Kessel
3. Radiator
3. Rohre
4. Zimmer
5. Pumpe

Abb.13

Der Kessel (Abb.14 und 15) wurde anschließend in folgende Subsysteme aufgeteilt:

1a. Brenner 1b. Wärmeaustauscher 1c. Ekonomiser

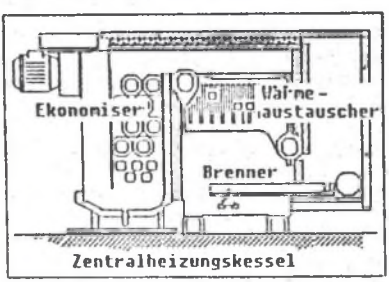

Abb.14

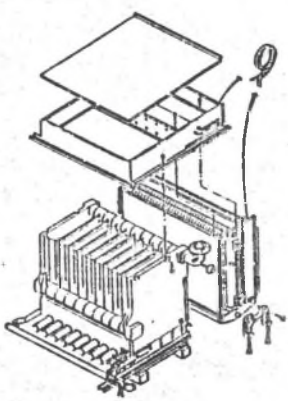

Abb.15

Wegen der großen Temperaturdifferenzen mit den dazugehörigen Nicht-Linearitäten der verschiedenen Parameter wurde der Wärmeaustauscher in vier Subsysteme aufgeteilt (Abb.16: FP, LP, MP, UP). Für all diese Subsysteme brauchte nur ein Grundsubsystem entwickelt zu werden.
Der Ekonomiser wurde in zwei Subsysteme unterteilt; eines für die Rohre, die mit Flossen versehen sind (ECF), und eines für die Rohre ohne Flossen (EC).

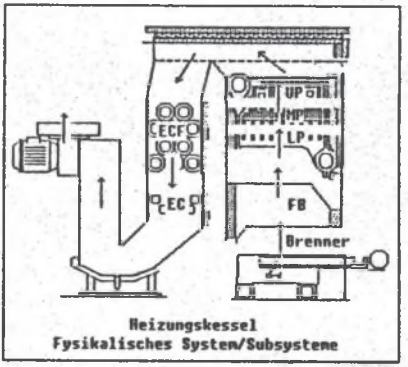

Abb.16

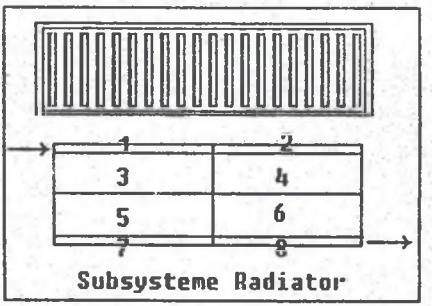

Abb.17

Der Radiator bildet ein System, das aus acht identischen Subsystemen besteht. (Abb.17)
Die Leitungen der Anlage kann man mit Hilfe eines Grundrohrmodells aufbauen. Alle Grundmodelle wurden einzeln gebaut, getestet und in der Modellenbank gespeichert. Für jedes Subsystem, das aus identischen Grundmodellen besteht, wurde ein neues Subsystem gebaut, in dem die Werte der unabhängigen Variablen (PLH und PLE) festgelegt sind. Auch wurden separate Subsysteme mit Material- und Flüssigkeitseigenschaften hinzugefügt.
Durch eine Verknüpfung dieser getesteten Subsysteme konnte das Gesamtmodell zusammengesetzt werden. (Abb.18)

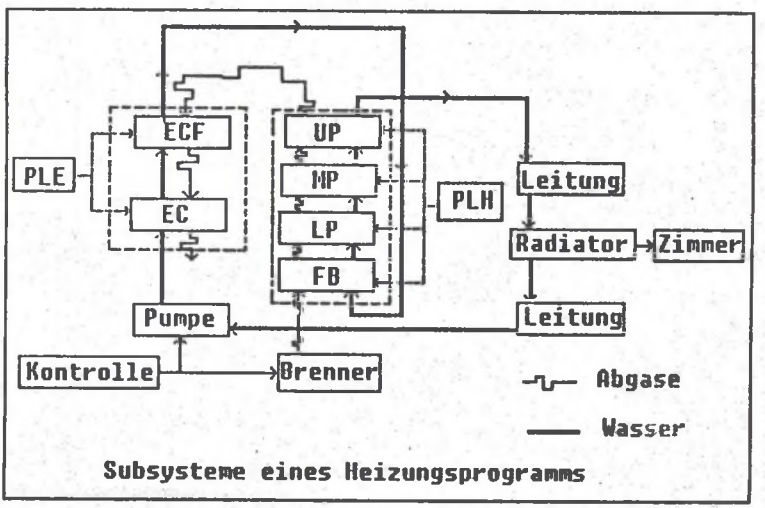

Abb.18

Schließlich wurde das Gesamtmodell getestet und validiert. Die Unterschiede zwischen den stationären Simulationswerten und den Meßwerten im stationären Zustand waren kleiner als 0,5 % der Meßwerte.
Anschließend wurden die Ergebnisse eventueller Änderungen untersucht, wie z.B. Änderung der Flossenhöhe (Änderung der Parameterwerte mit Hilfe eines speziell hinzugefügten Subsystems), Ersatz des Ekonomisers durch einen anderen Typus (Austausch eines kompletten Subsystems) oder Einsatz einer anderen Pumpe.

Das Arbeiten mit Subsystemen ermöglicht es, ein äußerst flexibles Simulationsmodell zu bauen. Dadurch, daß MOSIS formelorientiert ist, bleibt das Programm übersichtlich, und wird sowohl seine Übertragbarkeit als auch die Wartung sehr begünstigt.

A posteriori und a priori Modellbildung.

Im oben geschilderten Beispiel wurde die mathematische Modellbildung anhand eines existierenden Systems durchgeführt. Wenn man diese Arbeitsweise im Entwurfprozeß anwendet, entsteht Abb.19a.

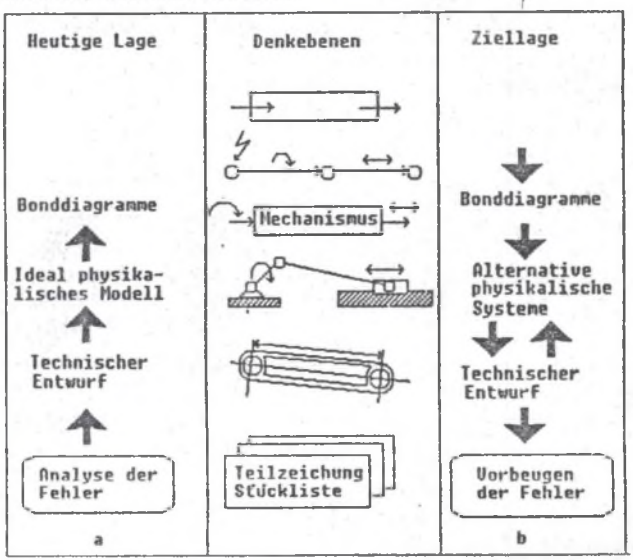

Abb.19

Ausgangspunkt ist meist der Wunsch, über Analyse ein besseres Funktionieren des Systems zu erreichen. Zunächst untersucht man die Konstruktion anhand der Werkzeichnung oder des reellen Systems, um das Funktionieren zu ergründen (Technischer Entwurf).
Anschließend wird das konkrete System mit Hilfe idealer physikalischer Elemente in das ideale physikalische System umgewandelt (Technisches Prinzip).
Schließlich wird dieses Modell in ein Bonddiagramm transformiert (Funktioneller Entwurf).
Diese Arbeitsweise entspricht dem Entwurfprozeß, aber in umgekehrter Reihenfolge. Das Simulationsmodell wird erst gebildet, nachdem eine unbefriedigende Funktion festgestellt ist. Deswegen wird diese Methode auch "posteriori modelling" genannt. (Ref.11)

Bis heute sind damit in der Wärmetechnik an der Hogeschool Windesheim, im Auftrag der Industrie, sehr gute Ergebnisse erzielt worden.
Besser wäre es, einen unzureichenden Entwurf zu vermeiden. Das heißt, bereits während des Entwurfprozesses mit der Modellbildung anzufangen (Kontrolle der Wirkung alternativer Lösungen), und anschließend Simulation durchzuführen.
Diese Methode wird "priori modelling" genannt. (Abb 19b)
Hierbei taucht das Problem auf, daß die endgültige Lösung der Elemente noch nicht bekannt ist. Weiterhin muß man mit Modellen arbeiten, die dem Entwurf in jeder Entwicklungsebene folgen können.
Damit der Entwerfer sich hauptsächlich mit dem Entwerfen an sich beschäftigen kann, darf er nicht viel Zeit auf die Entwicklung eines Simulationsmodell verwenden. Das Simulationsmodell muß er durch das Zusammenfügen von Grundsubsystemen bilden können. Er muß also über eine bestimmte Menge von Grundmodellen verfügen können, die in einer Modellenbank gespeichert sind. Er ist einer von den Benutzern der Grundmodelle, die von einem eventuell zentral angestellten Modellbauer angeliefert werden.
Um damit Erfahrung zu sammeln, sind in MOSIS Grundmodelle gebildet worden für Wärmetransport in Gebäuden und Transport von Flüssigkeiten und Luft durch Rohre.

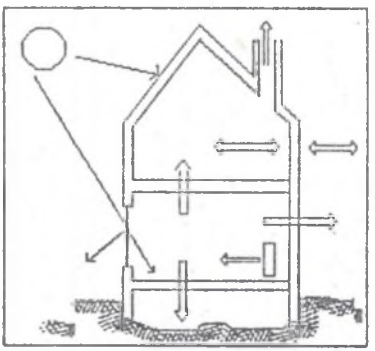

Abb.20

Als Beispiel wird eine Anwendung für industrielle Projekte behandelt, und zwar das Durchrechnen der dynamischen Wärmebelastung in Gebäuden.
Bild 20 zeigt eine Übersicht der diversen Wärmeströme in einer Wohnung. Um ein Modell bilden zu können, betrachtet man das Gebäude als eine Gesamtheit einer Anzahl von wärmetechnischen Subsystemen.
Diese kann man in zwei Hauptmodelle einteilen:

- das Modell "Gebäude"
- das Modell "Heizung"

Das Modell "Gebäude" besteht aus folgenden Grundmodellen:

- Zwischenraum
- Innenraum
- Außenraum
- Senkrechte Wände zwischen zwei Innenräumen
- Senkrechte Wände zwischen Außen- und Innenraum
- Waagerechte Wände zwischen Zwischenraum und Innenraum
- Waagerechte Wände zwischen zwei Innenräumen
- Fenster

Das Modell "Heizung" besteht aus folgenden Subsystemen:

- Radiator
- Leitung
- Kessel

Jedes wärmetechnische Grundsubsystem ist im voraus entwickelt und in einer Modellenbank gespeichert worden, und dessen physikalische Eigenschaften sind beschrieben worden. (Abb.21)

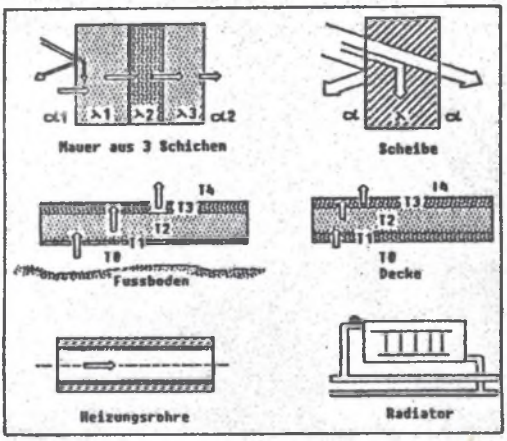

Abb.21

Sobald die Grundskizze eines Gebäudes bekannt ist, kann man mit der Modellbildung beginnen. Man bestimmt ein Koordinatensystem und zeichnet für jedes Stockwerk in den Richtungen X, Y und Z ein sogenanntes Wärmestromschema. In diesem Schema werden die Wärmeströme grafisch dargestellt. (Abb.22)
Von diesem Wärmestromschema ausgehend, kann man nun, vorläufig auf vorgedruckten Formularen, ein Blockschema aufstellen. (Abb.23)

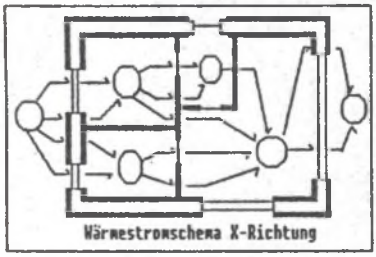

Abb.22

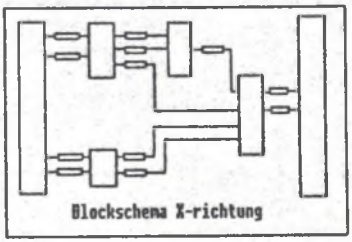

Abb.23

Jedes Rechteck stellt hierbei ein Grundmodell dar und bekommt einen symbolischen bzw. logistischen Namen. Der Benutzer kann mittels dieses Blockschemas die benötigten Modelle einzeln aus der Modellenbank abrufen, definieren, globale Werte für die verschiedenen Parameter einsetzen, verknüpfen und benennen. Hiermit ist dann das Modell "Gebäude" aufgestellt.

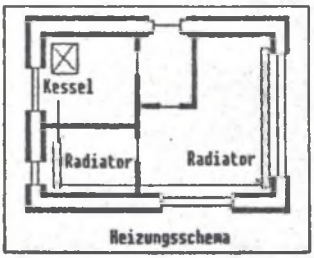

Abb.24

Um das Modell "Heizung" zu bilden, ist als Beispiel eine Raumheizung mit Radiatoren gewählt. Von der Heizungsanlage wird ein sogenanntes Heizungsschema gemacht. In diesem Schema werden die Wärmeströme grafisch dargestellt. (Abb.24)
Aus dem Heizungsschema kann man wieder ein Blockschema ableiten. Mit Hilfe dieses Schemas, das im Prinzip dem Heizungsschema ähnelt, werden verschiedene durch Blöcke dargestellte Subsysteme benannt, die Parameter eingesetzt und miteinander verknüpft.

Weiterhin werden durch die interaktive Verknüpfung der Leitungen und Radiatoren mit dem Modell "Gebäude" die zwei Modelle in ein Gesamtmodell transformiert.

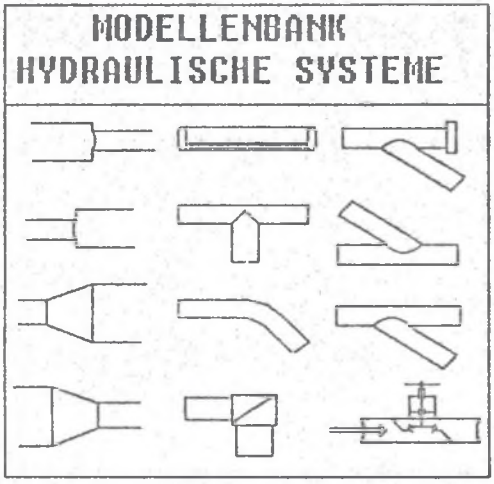

Abb.25

Um feststellen zu können, ob der Wärmeträger, der rundgepumpt wird, überall genügend Wärme in das Gebäude bringt, ist eine Grundmodellenbank für hydraulische Systeme entwickelt worden.
In Abb. 25 sind einige dieser Grundelemente dargestellt.
Aus den ISSO-Normblättern sind alle nicht-linearen Widerstände einzeln dargestellt und in die verschiedenen Modelle implementiert.
Dabei ist z.B. auch der Übergang von einer laminaren nach einer turbulenten Strömung, sowie die Wandrauheit berücksichtigt.

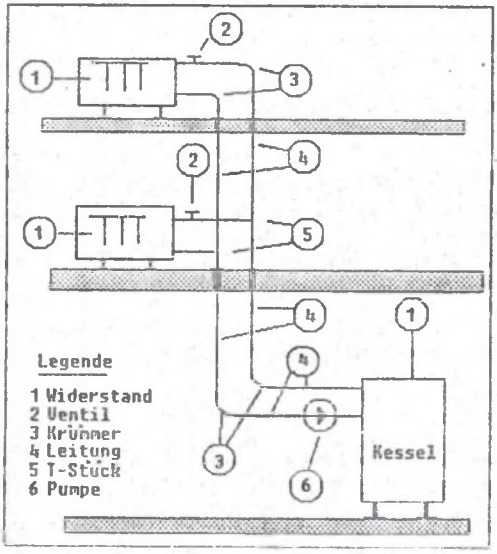

Abb.26

Schließlich läßt sich das gesamte Strömungsmodell für die geplante Heizungsanlage durch Verknüpfung dieser Grundsubsysteme bilden. (Abb.26)
Das so entstandene hydraulische System wird mit dem bereits eher gebildeten Heizungsmodell verbunden.
Auf diese Weise kann man im voraus beurteilen, ob die geplante Anlage gut funktionieren wird.
Sonderwünsche lassen sich in neue Grundmodelle umsetzen. Diese sind wieder in das Gesamtmodell zu integrieren, wodurch die Flexibilität gewährleistet ist.
Dadurch, daß Systementwerfer Grundmodelle entwickeln lassen, die ihnen dann zur Verfügung stehen, können sie bereits im Frühstadium feststellen, was die Folgen einer bestimmten Wahl sind.

REFERENZEN

1. W. Heinrich, "Zur Einführung von Ingenieurstudenten in die Methodologie des Losens komplexer Probleme im Konstruktionsprozess" Proceedeings ICED 1988.

2. J.K. Fowlkes, W.F. Ruggles, J.D. Groothuis, Advanced Fast Diagramming" Proceedings of the SAVE Conference, 1972.

3. G. Kardos, "Fast For systematic Design", Proceedings of ICED 1988.

4. U. Pighini, Department of Mechanical and Aeronautical Engineering University of Roma, I-00184 Rome, Italy.

5. P. Ferreirinha, V. Hubka, M. Andreasen, R. Rosenberg, "Rechnerunterstutztes Entwerfen und Detallieren von Konstruktionsgruppen", Proceedings of ICED 1988.

6. A. van Delft, "Modelvorming en dynamische optimalisering van warmtetechnische systemen", Verwarming en Ventilatie, januari 1988, nr. 1.

7. R. Knosala, W. Pedrycz, H. Wencel, "Bedeutung der Darstellung von Ergebnissen am Beispiel de Dichtungsuntersuchungen", Proceedings of ICED 1988.

8. Fullford, G.D., W.C.T. Pei, "A Unified Approach to the study of Transfer Processes". Ind. Eng. Chem. 61. no. 5, p. 47-69 (1969).

9. W. Tarnowski, "Polyoptimalization as a Decision - Aiding Tool in Design", Proceedings of the ICED, 1988).

10. Karnopp, D.; Rosenberg, R., "System Dynamics: A Unified Approach", John Wiley & Sons 1975; ISBN 0-471-45940-2.

11. R. Rohatynski, "Alternative Methodology for Analysis of Complex Models in Engineering Design", Proceedings of ICED 1988.

TWORZENIE PROTOTYPÓW, DOTYCZACYCH SYMULACJI, DYNAMICZNYCH SYSTEMÓW CIAGŁYCH

S t r e s z c z e n i e

Aby kompleksowe dynamiczne systemy optymalnie przedstawić, można skutecznie zastosować metody tworzenia modeli i symulacji. Na skutek wysokich kosztów, ich rozwój do dnia dzisiejszego był w znacznym stopniu ograniczony. W niniejszej pracy przedstawiono, podjętą w Wyższej Szkole w Windesheim, próbę tworzenia modeli naukowo interesujących, przy stosunkowo niskich ich kosztach.

СОЗДАВАНИЕ ПРОТОТИПОВ КАСАЮЩИХСЯ СИМУЛЯЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ КОНТИНУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Р е з ю м е

Для оптимального представления комплексных динамических систем можно применить иетоды создавания модели и симуляции. По причине высоких расходов развите этих метод до сегодня было ограничено. В этой работе представлено пробу, поднятую в Высшей Школе в Виндесхайм, создавления интересных с точки зрения науки моделей, при релятивно ниских затратах.

Recenzent: doc. dr hab. inż. W. Cholewa

Wpłynęło do Redakcji 10.III.1989 r.