

Wiener Studien zur Politischen Ökonomie

Band 18

**Gesamtwirtschaftliche Metamodellierung:
Komplexe Dynamiken und Visualisierung**

Rengs (2006)



Schriftenreihe herausgegeben von Univ.-Prof. Dr. Gerhard Hanappi

ISSN 2074-9880

Die folgende Dissertation von Mag. Dr. Bernhard Rengs basiert auf dem Forschungsprojekt

„Gesamtwirtschaftliche Modellierung: Komplexe Dynamiken und Visualisierung“,

das 2002 von der österreichischen Nationalbank finanziert wurde. Die stets steigende Anzahl neuer makroökonomischer Modelle hat deren Vergleich immer wichtiger werden lassen. Um diesen zu unterstützen hat das Team von Ökonomen und Wirtschaftsmathematikern an der TU Wien eine Reihe interessanter Arbeiten durchgeführt. Die Dissertation von Mag. Dr. Rengs ist nicht nur seine höchst originelle und eigenständige wissenschaftliche Forschungsleistung, sondern liefert auch die umfassendste und detaillierteste Zusammenfassung unserer Arbeiten.

Hardy Hanappi

(Projektleiter)

DISSERTATION

Visualisierung dynamischer makro- ökonomischer Modelle

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Sozial- und Wirtschaftswissenschaften
unter der Leitung von

a.o. Prof. Mag. Dr. Gerhard Hanappi
E105
Institut für Wirtschaftsmathematik

eingereicht an der
Technischen Universität Wien
Fakultät für Informatik

von

Mag. rer. soc. oec. Bernhard Rengs
Matrikelnummer 9426981
A-1030 Wien, Landstr. Hptstr. 84/7

Wien, am 01.02.2006

Kurzfassung

In dieser Arbeit werden Methoden vorgestellt um die Struktur und Hauptaussage makroökonomischer Modelle graphisch darzustellen. Dies geschieht durch Zurückführung der darzustellenden Modelle in ihre elementarste Form – ein Relationensystem ökonomischer Größen – wodurch eine Vielzahl unterschiedlich strukturierter Modelle, wie etwa Gleichungssysteme, Simulationsprogramme, Modelle künstlichen Lebens (Artificial Life Modelle), etc. untersucht werden können, d.h. alle Modelle deren Struktur zur Prognosezeit insofern determiniert ist, dass die an einer Relation beteiligten Variablen, und das muss für alle Relationen des Modells gelten, vor einem Simulationslauf ermittelt werden können. Die Verbindungen im Relationensystem des Modells werden danach mittels Simulationsläufen des Modells gewichtet – entweder durch ein externes Simulationsprogramm, oder in Form eines Gleichungssystems, welches mit TSP gelöst wird – wonach diese Struktur- und Gewichtungdaten, mittels eines neu entwickelten, interaktiven Darstellungsprogramms angezeigt werden. Um diese Analysen auf unterschiedlichen Aggregationsstufen zu unterstützen und die Beantwortung unterschiedlicher Fragestellungen zu ermöglichen, wurden vier verschiedene Darstellungen entwickelt, welche eine integrierte Gesamtanalyse ermöglichen.

Dies ermöglicht eine visuelle Beurteilung der Strukturen und Aussagen eines makroökonomischen Modells, mit all ihren kognitiven Vorteilen (spontane Wahrnehmung und Selektion, erhöhtes kognitives Potential), was in einer Reduktion der Komplexität des Modells resultiert. So können die zentralen mathematisch modellierten Aussagen eines Modells meist auf einen Blick, (unabhängig von möglicherweise manipulativen Beschreibungstexten oder anderen manuell erstellten textuellen Interpretationen) betrachtet werden. Dies ermöglicht etwa auch eine sofortige Evaluation der Effektivität und des Sinns möglicher makroökonomischer Instrumente (etwa geldpolitischer) – und dies lediglich anhand von Fakten, d.h. der Ergebnisse welche die Simulation des Modells tatsächlich liefert. Entwickelt wurde dieses Programm grundsätzlich um einen Vergleich der Strukturen unterschiedlicher Modelle zu ermöglichen, aber auch zu didaktischen Zwecken, d.h. um ökonomisch unzureichend geschulten Entscheidungsträgern oder Studenten (aller Art) ein leichteres Verständnis von makroökonomischen Modellen zu ermöglichen. Zusätzlich ermöglicht es auch den Entwicklern makroökonomischer Modelle bereits während des Entwicklungsprozesses ohne viel Aufwand zu überprüfen, ob sich ursprünglichen Theorien mit den vom Modell getroffenen mathematischen Aussagen decken.

Abstract

This work presents methods, which make it possible to graphically display the structure and main statements of macroeconomic models. This is achieved by converting the models, which are to be displayed, into their most elementary form – a relation system of economic variables – which makes it possible to analyze a number of differently structured models, like equation systems, simulation-programs, artificial life models, that is, all models, whose structure is to some degree determined at the time of conducting a forecast, which means that all variables that are part of a certain relation, which has to be true for all relations of the model, are known before starting a simulation run. The connections of the model's relation-system are then weighted by calculating simulation runs of the model – either produced by an external simulation program, or by solving an equation system using TSP – after which these structure and weight data can be displayed using a newly developed interactive computer program. To support this analysis at different aggregation levels and to create the possibility to answer different questions about the model, four different kinds of graphs were developed, which enable the user to conduct an integrated multi-level analysis of the whole model.

Thus visual evaluation of the structures and statements of a macroeconomic model gets possible, which brings with it all the cognitive advantages of visual perception (spontaneous perception and selection, increased cognitive potential), which results in a reduction of the model's complexity. Thus a model's mathematically modelled key statements can be evaluated at a glance (independent of possibly manipulative descriptions or other manually created textual interpretations). This, for example, makes an instantaneous evaluation of the effectiveness and usability of macroeconomic instruments possible – solely by analysis of facts, which are the results that were actually produced by the model's simulation runs.

This program was originally developed to provide means to compare the structures of different models, but also for didactic purposes – to support the comprehension of macroeconomic models, especially for decision makers who are insufficiently trained in economics, or students of all kinds. An additional purpose it to provide developers of macroeconomic models with means to check whether the originally intended theories are indeed reflected by the model's mathematically produced statements.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	3
Abstract	4
Inhaltsverzeichnis.....	5
Einleitung	7
Motivation & Zielsetzung	7
Aufbau der Arbeit.....	8
1 Makroökonomische Modelle.....	11
1.1 Der Modelbegriff.....	11
1.2 Makroökonomische Modelle.....	13
1.3 Ökonomisch strukturelle Modelle.....	29
1.4 Statistische Modelle	59
1.5 Fokus der weiteren Analysen	63
2 Alternative Sichtweisen ökonomischer Modelle.....	65
2.1 Ökonomische Strukturen aus graphentheoretischer Sicht.....	72
2.2 Intertemporäre Kausalität	80
2.3 Komplexität	91
2.4 Schlüsse.....	104
3 Informationsvisualisierung.....	107
3.1 Visuelle Datenverarbeitung.....	110
3.2 Informationsvisualisierung.....	121
3.3 Konstruktionsgrundlagen	128
3.4 Visuelle Dimensionen der Darstellung	139
3.5 Möglichkeiten computerbasierter Visualisierung	162
3.6 Visuelle Metaphern	168
3.7 Schlüsse.....	174
4 Modell-Visualisierung.....	177
4.1 Gesamtkonzept des Darstellungspakets	181
4.2 Grafische Darstellungen.....	194
4.3 Dynamische Strukturanalyse.....	211
4.4 Statische Strukturanalyse	226
4.4 Statische Strukturanalyse	226
4.5 Weitere Darstellungen.....	232
4.6 Schlüsse und Ausblick	238
5 Anhang	241
5.1 Literaturliste	241
5.2 Beispiel eines ökonomischen Modells	247
5.3 Abbildungsverzeichnis	251
5.4 Tabellenverzeichnis.....	252
5.5 Detailliertes Inhaltsverzeichnis	253
5.6 Lebenslauf.....	255

Einleitung

Motivation & Zielsetzung

Die folgende Arbeit wurde vom Autor, zu einem großen Teil, im Rahmen eines von der österreichischen Nationalbank (OeNB), durch den Jubiläumsfonds geförderten, Forschungsprojektes abgefasst. In diesem Zuge danke ich daher der Nationalbank für ihre Unterstützung ebenso wie Professor Dr. Hardy Hanappi von dem Institut für Volkswirtschaftslehre und Wirtschaftsinformatik der Technischen Universität Wien, für seine Unterstützung, sowie für seine ursprüngliche Grundidee der graphischen Darstellung von makroökonomischen Modellen, welche die grundsätzliche Basis dieses Projektes bildete.

In diesem Zuge möchte ich ebenfalls meinen wissenschaftlichen Kollegen und Vorgesetzten Professor Dr.Dr. Helmut Frisch und Professor Dr. Franz Hof, sowie meinem Kollegen DI Andreas Unterluggauer für ihre grundsätzliche und inhaltliche Unterstützung danken.

Die folgende Arbeit setzte es sich zum Ziel Möglichkeiten theoretisch zu entwickeln, dynamische ökonomische Modelle, nach erfolgter Modellierung (ex – post), zu visualisieren (graphisch darzustellen). Diese Möglichkeiten sollten im Rahmen eines Projektes der österreichischen Nationalbank als Computerprogramm realisiert werden.

Der erwünschte Effekt war dabei eine Reduktion der Komplexität makroökonomischer Modelle für Analytiker bzw. Betrachter im allgemeinen, welche das zu untersuchende makroökonomische Modell vermutlich nicht selbst entwickelt haben, mit Hilfe von Methoden der computergestützten Informationsvisualisierung. Hierbei sollten makroökonomische Modelle auch für den geldpolitischen Bereich (d.h. auch solche zur Entscheidungsunterstützung) berücksichtigt werden

Eine der zusätzlichen Prämissen dabei war, dass die prinzipielle Möglichkeit geschaffen werden sollte unterschiedlich strukturierte Modelle untersuchen zu können, speziell auch alternative Modelle, welche nicht in Form von Gleichungssystemen verfügbar sind, sondern nur mehr in algorithmischer Form, d.h. als Computerprogramme simuliert werden können, wie beispielsweise Artificial Life Modelle.

Für den Normalfall, welcher als Model definiert wurde, welches bereits in Form von geschätzten Gleichungen vorliegt, sollte eine leicht verfügbare und leicht implementierbare Lösungsmethodik entwickelt werden, wobei andere Modelle mittels anpassbarer Programmschnittstellen integrierbar sein sollten.

Im ersten Schritt, der Entwicklung eines Prototyps, dessen wissenschaftliche Fundierung und Zulässigkeit in den Bereichen der Visualisierung und Ökonomie, diese Arbeit grundsätzlich repräsentiert, wurde die Möglichkeit der Unterstützung alternativer ökonomischer Ansätze bei allen Analysetechniken vorgesehen und grundsätzlich eingearbeitet. Der „Proof of Concept“, d.h. im speziellen die Testläufe der Umsetzung als Computerprogramm wurden, auch aufgrund der komplizierten Verfügbarkeit alternativer Modelle, jedoch anhand von Standard Modellen erbracht.

Aufbau der Arbeit

In Anlehnung an die Empfehlungen einiger Ratgeber und Vorschriften für das Verfassen von Dissertationen und wissenschaftlichen Abschlussarbeiten (etwa: [Eco_2002]), wurde versucht die vorliegende Arbeit so abzufassen, dass ihr auch Leser, welche nicht mit den hier behandelten Spezialgebieten vertraut sind, die Arbeit verstehen können und einen Nutzen daraus ziehen können.¹

Für Spezialisten, des im jeweiligen Unterkapitel am stärksten involvierten Fachbereichs, mag diese Arbeit daher an manchen Stellen zu ausführlich sein, was sich jedoch nicht vermeiden lässt, um die Kontinuität der Argumentation für alle Leser zu gewährleisten.

Diese Zielsetzung gewinnt umso mehr an Bedeutung da diese Arbeit im Schnittbereich mehrerer Wissenschaftsbereiche liegt – speziell jener der Ökonomie, der Informatik (Schwerpunkt Visualisierung), sowie der Mathematik (Schwerpunkt Graphentheorie) – deren Konzepte in dieser Arbeit verbunden wurden. An dieser Stelle möchte ich daher meinen Kollegen Professor Franz Hof (Ökonomie), sowie meinem studentischen Kollegen Andreas Unterluggauer (Informatik) danken, da mir dank ihrem Feedback die soeben angesprochene

¹ Einige Empfehlungen zur Verfassung von Dissertationen gehen noch weiter – sie fordern, dass die Arbeit von jedermann lesbar sein sollte, was jedoch nur sehr bedingt erfüllt werden kann. Dennoch wurde versucht die Verständlichkeit der Arbeit nicht unnötig zu erschweren, in dem relevante Konzepte stets erläutert werden.

Problematik noch klarer und bewusster wurde. So werden etwa graphentheoretische Konzepte (in der Informatik meist früh vermittelte Konzepte), sowie einige Grundlagen der computergestützten Visualisierung, in dem für die Arbeit benötigten Rahmen, relativ ausführlich erklärt, da eine geschlossene Argumentation für ein gemischtes Publikum aus den oben angesprochenen Fachbereichen, sonst nicht gewährleistet wäre, bzw. die wissenschaftliche Rechtfertigung der Arbeit für den jeweils anderen Bereich sonst möglicherweise in Frage stünde, wie dies bei inter- (bzw. transdisziplinären) Projekten und Arbeiten häufig der Fall ist.

In diesem Sinne sind daher etwa die einleitenden Unterkapitel 1.1 bis 1.2 als eine Art prosaische, nichtwissenschaftliche Annäherung an den Modellbegriff zu sehen, welche versucht das Verständnis des Lesers (speziell des ökonomisch nicht Geschulten) von einer bestimmten, möglicherweise eingeschränkten Bedeutung des Modellbegriffs (entweder definiert durch das Alltagsleben, oder aber auch einer möglichen Bedeutung in seiner speziellen Disziplin), zu erweitern, um in den darauf folgenden Kapiteln die selbe Begriffsbasis zu haben, aber auch um in späteren Kapiteln einen erweiterten Modellbegriff (d.h. weiter gefasst als in der klassischen Ökonomie) anwenden zu können.

Im restlichen ersten Kapitel wird ein Überblick über die gebräuchlichsten Arten makroökonomischer Modelle gegeben, wobei diese auf ihre Verwendbarkeit für eine visuelle Analyse, bzw. auf die Sinnhaftigkeit einer solchen Analyse hin beurteilt werden.

Das zweite Kapitel beginnt nun die ermittelten Überschneidungen makroökonomischer Modelle zu betrachten und analysiert die ihnen gemeinsamen logischen Strukturen mit Hilfe alternativer Sichtweisen, vor allem der Graphentheorie. Auf diese Weise wird auch ermittelt, welche grundlegenden Darstellungskonzepte bei der späteren Realisierung zur Anwendung kommen können, auf Basis der zu erwartenden Strukturen, d.h. im Hinblick auf Art, Größe und etwaige Endlichkeit der Strukturen.

Im dritten Kapitel werden visuelle Grundlagen und Möglichkeiten der Darstellung und computerbasierten Visualisierung wiedergegeben um die Kriterien eines wissenschaftlichen Visualisierungskonzeptes nachvollziehen zu können, welche sich teilweise stark von in der Privatwirtschaft praktizierten, ad-hoc (bzw. trial and error) Methoden unterscheiden. Diese werden dabei auf ihre Brauchbarkeit für die vorliegende Fragestellung untersucht und beurteilt.

Im vierten Kapitel werden die in den vorigen Kapiteln gewonnenen Erkenntnisse verbunden und zu einem integrierten Darstellungs- und Analysekonzept entwickelt, welche in dieser Form als Computerprogramm in Java entwickelt wurde. Dabei wird eingehend auf die möglichen Fragestellungen und Anwendungsmöglichkeiten eingegangen, sowie erläutert, wie einzelne bekannte, bzw. behobene relevante Problemquellen umgangen wurden, insofern sie von Bedeutung sind (die Problemstellung oder Lösung nicht trivial war).

Da in jedem Kapitel eingehend auf die Schnittstellen zu den vorigen Kapiteln eingegangen wird, d.h. in jedem Kapitel eine ausführliche Einleitung und Zusammenfassung gegeben wird – speziell um die Kontinuität der transdisziplinären Lösung für eine größere Leserschicht zu gewährleisten, wird auf eine ausführliche Zusammenfassung nach dem letzten Kapitel verzichtet, da diese nur eine Aneinanderreihung der Kapitelzusammenfassungen wäre.

Ebenso werden die Ausblicke sehr kurz gehalten, da die Limitationen und möglichen Probleme der Darstellungen und des Ansatzes an sich, im vierten Kapitel bereits ausführlich beschrieben sind.

1 Makroökonomische Modelle

1.1 Der Modelbegriff

1.1.1 Was ist ein Modell?

Viele Vorgänge und Geschehnisse des alltäglichen Lebens sind nicht direkt beobachtbar und die wirkenden Kräfte sind mit den vorhandenen Mitteln oftmals nicht genau oder überhaupt nicht messbar.

Aber auch viele beobachtbare Vorgänge sind nicht intuitiv verständlich und speziell die Zusammenhänge und Interaktionen zwischen unterschiedlichen Kräften können nicht ad-hoc erfasst werden. Ohne ein tieferes Verständnis der Vorgänge ist es jedoch auch nicht möglich zu sagen wie ein Vorgang genau abläuft und wodurch er ausgelöst wurde. Dadurch wird eine Voraussage wie sich dieser Prozess entwickeln wird, bzw. wann er wieder auftreten wird sehr schwer oder gar unmöglich.

Seit tausenden Jahren versuchen die Naturwissenschaften mittels der objektiv beobachtbaren und messbaren Größen herauszufinden wie die Interaktion unterschiedlicher Kräfte unterschiedliche Effekte erzeugen kann.

Man stelle sich ein stark vereinfachtes Beispiel aus der Meteorologie vor, welches anhand von Größen wie der Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeiten versucht vorherzusagen wie sich das Wetter, also beispielsweise die Tageshöchsttemperatur in den folgenden Tagen, entwickeln wird. Man könnte versuchen schrittweise logische Zusammenhänge zwischen den gemessenen Größen herzustellen und zu zeigen wie bestimmte Kombinationen von Größen bestimmte Ergebnisse nach sich ziehen. Eine Beschreibung der Vorgänge welche zu einer Temperatur Veränderung führen können, beschränkt auf eine simple qualitative Aussage wie Erhöhung oder Abnahme, würde man als ein beschreibendes Modell bezeichnen. In diesem Sinne könnte man auch meinen dass einem Bauernkalender ein Wettermodell zugrunde liegt, auch wenn man dies nicht als wissenschaftliches Modell bezeichnen würde, dennoch liegt diesem Modell meist eine Vielzahl an Beobachtungen zugrunde.

Das Wort Modell selbst wird heutzutage für eine Vielzahl verwandter Konzepte verwendet, für die weiteren Betrachtungen ist jedoch nur der Bereich des wissenschaftlichen Modells von Interesse wie er seit der Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts verwendet wird, auch wenn die Grundlagen bereits viel länger existieren [Müller_2000]. Ein frühes Beispiel der Verwendung des Modellbegriffes des zwanzigsten Jahrhunderts wurde mit dem Atommodell auf dem Feld der Physik gegeben, welche auch davor immer ein Vorreiter des Modelldenkens war. Ein wissenschaftliches Modell ist grob gesprochen eine Abstraktion der Realität, welche in unterschiedlichen Formen einer Vielzahl an Zwecken dienen kann.

Meist handelt es sich dabei um eine vereinfachte Darstellung eines bestimmten realen Konzepts oder Vorgangs, den man zu verstehen versucht, was man als deskriptives Modell bezeichnen würde. In den Natur- und Sozialwissenschaften kommt dieser Art Modell sehr hohe Bedeutung zu, da das Verständnis und die Erklärbarkeit von natürlichen Vorgängen am Anfang jeder weiterführenden Untersuchung stehen.

Eine weitere Art von Modellen, welche unser heutiges Leben bestimmen sind Modelle, die nicht versuchen reale Vorgänge zu beschreiben, sondern den Ablauf, bzw. die Struktur eines Objektes oder Vorgangs normativ vorzuschreiben. Ein Beispiel dafür wären Vorgehensmodelle, welche bestimmte (Arbeits-)Schritte oftmals in einer bestimmter Reihenfolge vorschreiben um ein Ziel zu erreichen, bzw. schneller oder besser zu erreichen. Solche präskriptiven oder normativen Vorgehensmodelle wurden bereits seit vielen Jahren in der Ökonomie, Betriebswirtschaftslehre und in den letzten Jahrzehnten auch in den Computerwissenschaften in Form von Entscheidungsmodellen und Arbeitsmodellen (Qualitätsmanagement) entwickelt. Die Bezeichnung Modell hat hier eine sehr ähnliche Bedeutung wie bei serienmäßig erzeugten Produkten - so beschreibt etwa ein Vorgehensmodell eine mit konstanter Qualität beliebig oft wiederholbare Handlungsfolge.

Jene Modelle, welche in der Ökonomie und anderen Sozialwissenschaften verwendet werden, haben meist einen stark deskriptiven Charakter, da im Zentrum der Betrachtung soziale Systeme stehen, wobei nicht alle Größen dieser Systeme kontrollierbar sind, auch wenn solche Modelle oftmals entwickelt werden um Entscheidungen ableiten zu können. Dennoch können Modelle von stark unterschiedlicher Struktur sein, da sie aus den unterschiedlichsten Zwecken entwickelt werden, beispielsweise komplett deskriptive zu Unterrichts- oder Verständniszwecken, oder stärker präskriptive Modelle welche politisch motiviert sind und ein bestimmtes Vorgehen vorschreiben. Auch ökonomische Modelle welche von der

Rationalität der Agenten ausgehen, d.h. der Annahme, dass Personen in Entscheidungssituationen stets die objektiv logische und richtige Wahl treffen, schreiben oft ein bestimmtes Vorgehen vor und haben daher präskriptiven Charakter.

1.2 Makroökonomische Modelle

Bei den weiteren Betrachtungen wird nun nur mehr ein ganz bestimmter Bereich ökonomischer Modelle betrachtet, der sich mit der Struktur großer ökonomischer Systeme befasst, d.h. mit Ländern, Staaten, Staatengemeinschaften und ähnlichen Systemen. Dieser Bereich der Wirtschaftswissenschaften – die Makroökonomie, betrachtet zwar ebenso wie alle Bereiche der Ökonomie das Zusammenspiel und die Interaktionen von sozialen Systemen bei wirtschaftlichen Vorgängen, hat jedoch eine sehr spezifischen Blickwinkel auf die großen Zusammenhänge. Diese sozialen Systeme werden von Personengruppen und Institutionen gebildet, welche Einfluss auf gesamtwirtschaftliche Größen (den beobachtbaren und messbaren Zustand von Staaten) haben, wobei der Staat als entscheidende Institution ein wichtiger Teil makroökonomischer Modelle darstellt.

Auch wenn es sehr unterschiedliche Ansätze gibt wie sich Änderungen dieser Zustände vorhersagen lassen und wie sie zu begründen sind, so sind der Gegenstand der Betrachtung doch immer noch die (wirtschaftlichen) Beziehungen zwischen Menschen. Diese nehmen jedoch, allein schon durch ihre schiere Anzahl, derartige Ausmaße sowie einen hohen Grad an Komplexität an, sodass sie nicht mehr detailliert betrachtet werden können. Es ist daher also jedenfalls nötig Vereinfachungen zu treffen um ein brauchbares Modell zu erhalten, welches die wichtigen Fakten weder zu stark vereinfacht, noch unüberschaubar wird, und so Schlüsse und Einsichten gewährt, welche nicht alleine durch direkte Beobachtung und Messung gewonnen werden könnten.

Bereits seit längerem bauen viele Wissenschaftszweige eine Vielzahl ihrer Konzepte auf der Tatsache auf, dass die Datenspeicherungs- und Datenverarbeitungskapazität des menschlichen Gehirns, speziell das Kurzzeitgedächtnis, generell begrenzt ist [Miller_1956]. Diese Begrenzung ist speziell im Hinblick auf abstrakte Fakten noch intensiver und muss daher

entweder akzeptiert oder durch Verwendung von Hilfsmitteln umgangen werden. Viele Wissenschaftsbereiche, wie bspw. der Informatik, speziell jene die sich mit der Konzeption der Interaktion von Mensch und Maschine beschäftigt, sind ständig mit diesem Problem konfrontiert, da sich der menschliche Verstand als „Flaschenhals“ in der Kommunikation mit der Maschine erweist. Möglichkeiten diese Beschränkungen zu umgehen sind speziell bei Visualisierung von Daten und Strukturen gegeben, welche den Grad der Komplexität, welchen es zu erfassen gibt reduzieren können, Genauere Analysen dazu sind im Kapitel Visualisierung zu finden.

Betrachtet man volkswirtschaftliche Phänomene, so kann man erkennen, dass diese meist von Systemen verursacht werden, deren detaillierte Abläufe und Zusammenhänge für den Menschen, in ihrer Gesamtheit, nicht mehr ohne Unterstützung zu erfassen sind. Die Modellbildung dient nun dazu diese Systeme verständlich zu machen, welche prinzipiell nur in Form von Modellen, was Vereinfachungen und Verallgemeinerungen impliziert, betrachtet und verstanden werden können. Die Tatsache dass jeder Wissenschaftler, Politiker oder andere Entscheidungsträger, welcher mit makroökonomischen Fragen konfrontiert ist, diese Gesamtheit des Systems ebenfalls nicht erfassen kann, impliziert, dass diese entweder Modelle benötigen um ihre Entscheidungen zu treffen oder den Zufall entscheiden lassen müssten, wie bspw. würfeln oder losen müssten.

Modellbildung und –analyse sind daher das zentrale Werkzeug der Makroökonomie und werden angewendet um reale Phänomene, vereinfacht darzustellen, wobei es drei Hauptziele des ökonomischen Modellbaus gibt (vgl. Hanappi, Intriligator, Kleinewefers)²:

- Ökonomische Prozesse zu verstehen sowie zu erklären und zu kommunizieren
- Zukünftige Entwicklungen ökonomischer Prozesse vorhersagen zu können
- Ökonomische Prozesse kontrollieren und steuern zu können

Die Notwendigkeit ökonomische Prozesse zu verstehen ist, bis zu einem gewissen Grad für jede ökonomische Anwendung gegeben, ob es sich nun um den überaus wichtigen Faktor des

² In diesem Zusammenhang leitet Intriligator auch die drei Hauptaufgaben der, die Ökonomie unterstützende, Methodenwissenschaft der Ökonometrie ab, welche er mit Strukturanalyse, Vorhersage und Politikevaluation benennt

Kommunizierens ökonomischer Theorie handelt, bspw. mit Studenten, Schülern (Lehre), Experten (Kritik, gemeinsame Forschung) oder Entscheidungsträgern (Vorgehensempfehlungen), wo ein genaueres Verständnis, sowie die Interpretation der gefunden Zusammenhänge nötig ist, oder ob das Ziel nun Vorhersagen zukünftiger Entwicklungen sind, wozu, je nach Modellierungsansatz ein unterschiedlich hoher Grad an Verständnis nötig ist. Manche Ansätze versuchen auch überhaupt nicht die beteiligten ökonomischen Prozesse zu erklären, sondern nur die statistischen Zusammenhänge zwischen den Variablen so weit zu verstehen, dass ein mathematisches Modell erstellt werden kann. In jedem Fall wird es, unabhängig von der geplanten Anwendung, zur effizienten Umsetzung dieser ersten Zielsetzung zumindest nötig sein, die Zusammenhänge zwischen den entscheidenden ökonomischen Größen in der Vergangenheit mathematisch, in Form eines Modells erklären zu können.

Die Zielsetzung zukünftige Entwicklungen ökonomischer Prozesse vorhersagen zu können, erfordert prinzipiell gesehen ein mathematisches Modell zu entwickeln, welches Erwartungswerte für die relevanten Größen zukünftiger Perioden (zumindest einer Periode), innerhalb eines akzeptablen Konfidenzintervalls, liefern kann. Dies kann für eine Vielzahl an Anwendungen relevant sein, beginnend mit der Vorhersage von Aktienmärkten, Geldmärkten, usw. für alle Institutionen, zumindest ab einer bestimmten Größe, auch wenn sie nicht die Macht haben die Märkte in großem Stil zu beeinflussen, d.h. auch wenn es nur darum geht geeignete Anpassungsstrategien zu ermitteln.

Das Ziel ökonomische Prozesse kontrollieren und steuern zu können, impliziert die Entwicklung eines mathematischen Modells, welches in der Lage ist die Auswirkungen von unterschiedlichen alternativen Entwicklungen auf das Modell, d.h. Änderungen des Erwartungswertes bestimmter interessanter Ziele (bspw. Inflation, Arbeitslosigkeit, usw.) in Reaktion auf unterschiedliche Handlungen (Zinssatzerhöhung, -senkung, Steuererhöhungen, -senkungen, Geldmengenanpassungen usw.), innerhalb eines akzeptablen Konfidenzintervalls, berechnen zu können. Diese Fragestellungen alternativer Handlungsmöglichkeiten, fallen in den Bereich der Politikevaluation, und sind speziell für Institutionen relevant, welche tatsächlich die Macht bzw. Befugnis haben ökonomische Größen direkt zu verändern, wie bspw. Zentralbanken und Regierungen. Solche Modelle können aber auch eingesetzt werden um alternative Anpassungsstrategien für unterschiedliche Zukunftsszenarien vorzubereiten, bspw. wenn die Ergebnisse der Analyse in anderen Modellen weiter verwendet würden.

Generell sollte man bei Betrachtung der drei Hauptaufgaben annehmen, dass es grundsätzlich eine Art von Hierarchie des Verständnisses gibt, d.h. dass eine Aufgabe auf die andere aufbaut, da es nicht verlässlich möglich ist, Folgen einer bestimmten Vorgehensweise zu testen (Prozesse zu steuern) ohne Vorhersagen berechnen zu können, welche selbst jedoch nur glaubhaft getroffen werden können, wenn die Strukturen des untersuchten Systems verstanden sind.

Betrachtet man die in der Ökonomie gebräuchlichen Methoden der Modellierung so gibt es grob gesprochen, hauptsächlich vier Arten von Modellen, welche sich, vor allem durch ihren unterschiedlichen Formalisierungsgrad, für unterschiedliche Zwecke eignen – die folgende Liste daher diesem Formalisierungsgrad aufsteigend sortiert:

- Verbale Modelle
 - Graphische Modelle
 - Algebraische Modelle
 - Algorithmische Modelle
- } Mathematische Modelle

Wie bereits erwähnt, stellen verbale Modelle heutzutage normalerweise nur eine erste Vorstufe des weiteren Modellbaus dar, da die Theorien, welche in einem rein textuellen Modell enthalten sind, auf Grund des geringen Formalisierungsgrades, nicht effektiv kontrolliert werden können, da sie mit empirisch erhobenen Zahlen, höchstens qualitativ verglichen werden können und auch keine (nur vage) Vorhersagen für die Zukunft liefern können. Die einzige Aufgabe, welche verbale Modelle dennoch erfüllen können, sind qualitative Erklärungen von ökonomischen (Teil-) Prozessen zu liefern, wobei jedoch die Teilaufgabe der Theoriekommunikation, je nach Autor, mit stark variierender Effizienz und Genauigkeit erfüllt wird. Speziell komplexe Beziehungen zwischen verschiedenen ökonomischen Größen sind schwer allgemein zu beschreiben, es kann leicht zu Missverständnissen kommen, was jedoch auch an der großen Anzahl menschlicher Sprachen, sowie der oftmals sehr ungenauen Verwendung dieser liegen mag.

Ein Modelltyp welcher hauptsächlich als Erweiterung zu einem verbalen Modell vorkommt, ist ein Graphisches Modell (zwei- oder dreidimensional) wie oftmals in Form eines

geometrischen Modells [Intriligator_1996], welches zwei (oder mehrere) sehr relevante Größen in einem Diagramm miteinander in Beziehung setzt. Ein sehr bekanntes Beispiel dafür wäre ein IS-LM / AS-AD Diagramm, welche das Gleichgewicht auf dem Geldmarkt herleiten soll³. Solche Diagramme erfüllen meist ebenfalls nur didaktische Funktionen (Kommunikationsaspekt]), da sie komplexe Beziehungen in vielen Variablen nur schlecht, bzw. gar nicht darstellen können. Es gibt seit einigen Jahren neuere Ansätze der Modellierung, welche mit dem Erstellen eines graphischen Modells der vermuteten elementaren Beziehungen zwischen den Größen eines ökonomischen Systems, in Form eines Flussdiagramms beginnen. Im darauf folgenden Schritt wird dieses graphische Modell mittels dahinter liegender Gleichungen erweitert, um die Verbindungen quantifizieren zu können, wie dies bspw. bei der Modellierungssoftware Powersim [Powersim] oder Simulink [Simulink] der Fall ist. Da das Modell im Endeffekt jedoch aus Gleichungen, d.h. aus einem mathematischen Modell, besteht, ist der graphische Teil des Modells, genauso wie die in dieser Arbeit vorgestellten Analysemethoden, eher als graphische Repräsentation von mathematischen Modellen zu sehen, anstatt als rein graphisches Modell.

Mathematische Modelle werden in den folgenden Kapiteln eingehender besprochen werden und beschreiben die ökonomischen Prozesse meist in Form von deterministischen oder stochastischen Gleichungen und Ungleichungen, wobei zur genaueren Schätzung und Berechnung komplexerer Modelle inzwischen computergestützte Schätzungs- und Lösungsverfahren nötig sind.

Diese Modellform eignet sich aufgrund der Exaktheit ihrer Darstellung prinzipiell gut zur Erfüllung aller drei Aufgaben, in der Praxis hängt die Anwendbarkeit für die Aufgaben jedoch von der Modellierungstechnik ab, weshalb im folgenden Kapitel daher einige bekannte mathematische Modellierungsverfahren vorgestellt werden.

Algorithmische Modelle sind prinzipiell gesehen mathematische Modelle, sie verwenden jedoch zusätzliche Operatoren und Konstrukte, welche in einem „gewöhnlichen“ algebraischen mathematischen Modell nicht verfügbar sind, sondern nur in Computerprogrammiersprachen, und sind nur mehr in Form von Computerprogrammen

³ Randbemerkung: Speziell die Annahmen des IS-LM (Geldmarkt) Modells sind jedoch in letzter Zeit immer mehr unter Kritik geraten, wie bspw. mit konkret alternativen Ansätzen durch Romer [Romer_2000], bzw. einem andern ausführlichen Ansatz eines Gesamtmodells mit alternativ formuliertem Geldmarkt, bei Unterluggauer [Unterluggauer_2002]

realisierbar. In diese Kategorie fallen bspw. Multiagentensysteme, welche die Entscheidung einzelner Agenten simulieren und auf diese Weise die volkswirtschaftlichen Aggregate erzeugen. Obwohl auch viele algebraische mathematische Modelle im Endeffekt als Computerprogramme realisiert werden, stellt dies dann jedoch kein algorithmisches Modell dar, da das Modell auch ohne Programm berechenbar wäre (lediglich mit größerem Aufwand).

Wie auch in den folgenden Unterkapiteln im Überblick gezeigt werden wird, gibt es eine Reihe sehr unterschiedlicher Ansätze mathematischer und algorithmischer Modelle, welche sich in der Auffassung wie bzw. welche der Hauptaufgaben überhaupt erfüllt werden können, stark variieren. Daher sind nicht alle makroökonomischen Modellierungstechniken zur Bearbeitung jeder dieser drei Hauptaufgaben einsetzbar bzw. gedacht, was einerseits an ihrem internen Aufbau, aber auch an ihrer grundlegenden Auffassung über bestehende ökonomische Lehre liegt.

So führt dies auch dazu, dass es bspw. Modellierungstechniken gibt, welche Vorhersagen treffen ohne jedoch die ökonomischen Zusammenhänge verstanden zu haben, bzw. ohne die modellierten Zusammenhänge ökonomisch interpretieren zu können – sie basieren lediglich auf statistischen Zusammenhängen (bspw. VAR Modelle).

Da für große volkswirtschaftlich Entscheidungstragende Institutionen, wie bspw. Regierungen, Zentralbanken und Großbanken, die Evaluation möglicher zukünftiger Erwartungswerte relevanter volkswirtschaftlicher Größen in Bezug auf ihre möglichen Handlungen (Politikevaluation), von großer Bedeutung ist, wird in den folgenden Kapiteln auf jene Modelle besonders eingegangen werden, welche diese Aufgabe der Makroökonomie unterstützen.

1.2.1 Mathematische makroökonomische Modelle

Historisch gesehen haben sich die heute in Verwendung befindlichen makroökonomischen Modelle alle aus, bzw. spätere in Gegensatz zu, einer einzigen Hauptrichtung entwickelt, welche im Umfeld von Jan Tinbergen und Ragnar Frisch in den dreißiger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts entwickelt wurde [Morgan_1990]. Tinbergen übernahm das Prinzip, dass ein Wirtschaftszyklus Modell zwei Bestandteile haben sollte – einem ökonomischen Mechanismus der die Relationen zwischen den relevanten ökonomischen Größen darstellt (dem Makrosystem), sowie außerhalb dieses Systems liegenden Einflüssen bzw. Schocks – was Frisch 1933 am Beispiel seines „rocking horse business cycle“⁴ – Modells veröffentlichte. Ein wichtiger Punkt des Modells war die explizite Untersuchung und Formulierung der Strukturen der betrachteten Wirtschaft, sowie die Trennung der inneren Zusammenhänge der Wirtschaft (der Strukturen) von den auslösenden Größen (Um in seiner Metapher zu bleiben: Die Regeln bzw. Gesetze nach welchen sich das Pferd bewegt, und wodurch es den Anstoß zur Bewegung erhielt sind getrennte Fragestellungen).

Tinbergen entwickelte und schätzte in weiterer Folge im Jahr 1936 das erste halbwegs realitätsnahe makroökonomische Modell des Wirtschaftszyklus, bzw. durch Anwendung der ersten Schätzmethoden auch das generell erste makroökonomische Modell, welches er für die Wirtschaftsdaten der Niederlande entwickelte [Klein_1986]. Im Auftrag des Völkerbundes (League of Nations) entwickelte er seine Methodologien weiter, speziell im Hinblick auf die Möglichkeiten andere Wirtschaftszyklustheorien zu überprüfen und zu bewerten.

In seinem zweiten Bericht an den Völkerbund (League of Nations) entwickelte er eine Methodologie, die zu überprüfenden Theorien, mittels Formalisierung in Form von mathematischen Relationen, welche er zu Modellen zusammenfasste, zu überprüfen, d.h. entweder zu widerlegen oder zumindest teilweise zu bestätigen. Dazu ging er, im Gegensatz zu früheren mathematischen Formalisierungen, welche nur langfristige Gleichgewichtssituationen abbildeten, speziell auf die Effekte und Strukturen von

⁴ Die Metapher wurde gewählt, da die Wirtschaft ebenso zyklisch aufeinander folgenden Auf-/Ab- Bewegungen folgt wie das Schaukelpferd eines Kindes.

kurzfristigen ökonomischen Prozessen, sowie in weiterer Folge auch auf die zeitliche Verzögerung kurzfristiger ökonomischer Effekte ein.

Diese versuchte er auch graphisch darzustellen, später auch in Form einfacher symbolischer Diagramme, um seinen Theorien der konstanten zeitlichen Verzögerung zusätzlich Nachdruck zu verleihen, da seine Methoden und Theorien zu dieser Zeit, von der ökonomischen wissenschaftlichen Gemeinschaft, nicht gut aufgenommen wurden. Eines seiner ersten Diagramme sollte den Einfluss von unberechenbaren Störungen R auf die Profite der Unternehmen Z_t^C , sowie die periodenübergreifenden Verzögerungen von Z_t^C auf sich selbst darstellen:

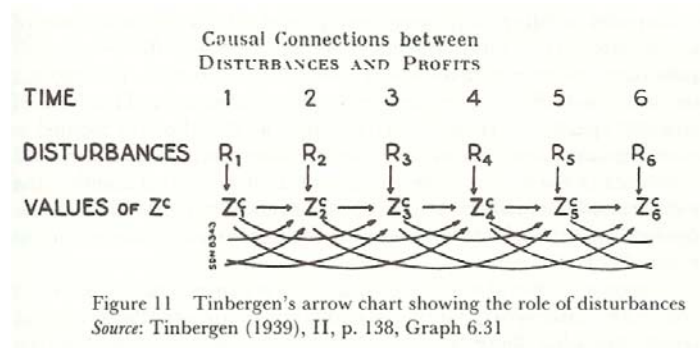


Abbildung 1: Tinbergen's Diagramm ökonomischer Verzögerungen aus [Morgan_1990]

Trotzdem Tinbergen anfänglich auf Widerstand von großen, bzw. einflussreichen Ökonomen wie bspw. Keynes stieß⁵, da sie sich unter anderem nicht vorstellen konnten, dass die "willkürliche" Auswahl einzelner ökonomischer Größen und Verzögerungen sinnvolle Ergebnisse liefern könnte, legte Tinbergen dennoch den Grundstein für "moderne" dynamische Makromodelle.

Auch fand sein Ansatz relativ bald danach immer mehr Unterstützung, wie beispielsweise durch Haavelmo, welcher die Ansätze von Tinbergen, um das seiner Meinung nach zentrale Element der Stochastik erweiterte, was er unter anderem damit begründete, dass man der Vorhersage eines Modells nicht trauen würde (und könnte), welches eine exakte

⁵ Die Kritik von Keynes soll laut Morgan [Morgan_1990] einen sehr negativen Effekt gehabt haben, was hauptsächlich daran lag, dass er nicht realisiert hatte, dass die meisten seiner Kritikpunkte de facto unhaltbar waren, da er den ersten Bericht von Tinbergen an den Völkerbund vermutlich nicht sorgfältig gelesen hatte, möglicherweise auch da er, trotzdem er von Beginn der Zeitschrift an Editor von Econometrica war, die Wissenschaft der Ökonometrie noch deutlich unterschätzte.

Punktvorhersage liefert, wie etwa der Aussage, dass der Konsum in der nächsten Periode exakt x Mrd. (d.h. jeder auf den Dollar/Euro exakten Summe) betragen würde.

Basierend auf den Arbeiten von Tinbergen und Haavelmo, erarbeitete die Cowles Commission (for Research in Economics) in den vierziger und Anfang der fünfziger Jahre (initiiert von Jacob Marshak), eine genauere Vorgehensweise und Methodik zur Formulierung und Schätzung von ökonometrischen Modellen und Gleichungen, welche bereits während Ihrer Arbeit nicht ganz unumstritten war. Nichts desto trotz war dieser Ansatz der Cowles Commission bis in die siebziger Jahre die Standard Methode zur Formulierung ökonomischer Modelle für die meisten ökonomischen Fragestellungen, welche auch als DSE (Dynamic Simultaneous Equations) Modelle bezeichnet werden.

Anfang der achtziger Jahre wurde immer mehr Kritik gegen den Cowles Ansatz laut, welches sich einerseits gegen die statistischen Schätzmethoden wendete, bspw. wegen des Einsatzes von Einzelgleichungsverfahren bei der Schätzung, die Beschränkungen zwischen Gleichungen des Modells nicht beachteten [Sims_1980], und andererseits gegen die Annahme konstanter Beziehungen (in Form von konstanten Parametern) unter Vernachlässigung von Regimewechseln und Änderung anderer wirtschaftlicher Rahmenbedingungen [Lucas_1976]. Auch als Reaktion auf diese Kritik wurden daher alternative Methoden entwickelt, wie bspw. VAR Modelle welche auf jegliche ökonomische Theorie verzichten und nur nach statistischen Zusammenhängen zwischen Variablen suchten, um Modelle zu vermeiden welche bereits durch inkorrekte ökonomische ex-ante Theorien fehlerbehaftet sind [Sims_1980].

Nachdem diese VAR Modelle aus einer Reihe von Gründen, wie bspw. dem Erhalt ineffizienter Schätzer (siehe Hall, in [Haber_2000]) auch aufgrund der Anzahl und Komplexität der zu untersuchenden Beziehungen, zumindest für größere Modelle, bisher keine guten Vorhersagen liefern, kamen auch Modelle im Stil der Cowles Commission in den neunziger Jahren wieder vermehrt in Verwendung. Dies geschah auch deshalb da die statistischen, ökonometrischen Schätzmethoden inzwischen stark weiterentwickelt wurden bei welchen das Modell inzwischen auch als Ganzes betrachtet wurde.

Im Laufe der achtziger und neunziger Jahre, entwickelten sich darüber hinaus weitere alternative Methoden der Modellierung. So wurden beispielsweise, basierend auf Annahmen

der neoklassischen Theorie, analog zu sektoralen Input-Output Modellen eine neuer Klasse an Modellen, die CGE (Computable General Equilibrium) Modelle entwickelt.

Darüber hinaus wurde in den neunziger Jahren, durch die schnelle Evolution (bzw. Revolution) der Desktop (Personal) Computer vom besseren Taschenrechner zur "Rechenfabrik", welche, im Gegensatz zu früher, auch noch von jedermann relativ leicht zu bedienen ist, neue Ansätze möglich, welche davor, aufgrund fehlender Rechenleistung oder fehlender Methodik verworfen worden waren. Ein Beispiel für Modelle mit einer hohen Zahl an benötigten Rechenoperationen, welches bereits erwähnt wurde, sind Modelle im Stil der Cowles Commission, wenn die Schätzung der Parameter, sowie etwaige Signifikanztests der Modellvariablen selbst [Hendry_1997], als wichtiger Teil des Modells betrachtet werden, welche zumindest für die breite Masse (falls man dies bei der wissenschaftlichen Gemeinschaft so bezeichnen kann), erst durch die Rechenleistung moderner Computer möglich wurde.

Ein Beispiel für alternative Modellansätze, welche durch die fehlende Methodik vor der Evolution der Computer, speziell auch durch den Aspekt der Evolution der Programmiersprachen, nicht realisierbar waren, bzw. auch gar nicht in den Sinn kamen, sind Artificial Life Modelle. Dies sind Modelle, welche den Aspekt der Mikrofundierung recht kompromisslos realisieren, in dem die theoretische Darstellung (Modellierung) der ökonomischen Entscheidungsträger (Spieler), hinunter bis zu der Ebene einzelner Unternehmen und Haushalte reicht. Das Resultat solcher Modelle sind Computerprogramme, welche diese Multiagentensysteme [Axelrod_1997] realisieren in dem sie eine, oft sehr große Anzahl, an Agenten (Spielern) realisieren, deren Entscheidungen auf exogene Größen sowie den Handlungen der anderen Agenten basieren, und durch ihre Handlungen die volkswirtschaftlichen Aggregatsgrößen erzeugen.

Resümierend sieht es Anfang des dritten Jahrtausends so aus, dass es eine Vielzahl an unterschiedlichen Modelltypen gibt, welche unterschiedlich gut zur Untersuchung verschiedener Zielsetzungen geeignet sein mögen, was jedoch immer wieder angezweifelt wird – es besteht einfach keine Einigkeit über die Eignung der Modelltypen, was jedoch angesichts der Größe der wissenschaftlichen Gemeinschaft auch zu erwarten ist. Tatsache ist jedenfalls, dass alle Modelltypen, welche zuvor kurz vorgestellt wurden, unter stetigen Anpassungen und Neuerungen der Methodik, gegenwärtig immer noch in Verwendung sind (bzw. neuere Methoden bereits in Verwendung sind) wobei Modelle im Stil der Cowles

Commission, VAR Modelle sowie Mischformen die wahrscheinlich meist verwendeten Modelle sind.⁶ Ohne diese Ansätze werten zu wollen, gehen neuere Betrachtungen der ökonomischen Modellierungstechniken davon aus, dass die erfolgreichsten Ansätze jene sein werden (sind), welche die besten statistischen Methoden mit Strukturen ökonomischer Theorie verbinden [Hanappi_2001a].

⁶ Da es nicht Ziel dieser Arbeit ist die Eignung bzw. Zutreffen, einzelner Modellierungsmethoden zu kritisieren, sind alle bisherigen und folgenden Äußerungen über diese Methoden, nicht als Zustimmung oder Kritik zu werten. Alle Kritiken die geäußert wurden, dienten lediglich der Wiedergabe von historisch de facto anerkannten Einwänden, wie bspw. der Lucas-Kritik, welche direkt [Sims_1980] oder indirekt [Lucas_1978] größere Neuerungen bei (bzw. neue Alternativen zu) der ökonomischen Modellierung, nach sich zogen.

1.2.2 Einteilung ökonomischer Modellierungstechniken

Die bisher angesprochenen Modelle wurden bisher aus dem Blickwinkel ihrer historischen Entstehung betrachtet, wobei es jedoch (zumindest) zwei Kriterien gibt, nach welchen die Modellierungstechniken sich sinnvoll klassifizieren lassen um generell auf Fragen bezüglich der Nützlichkeit bzw. Durchführbarkeit einer gemeinsamen Analysemethodik eingehen zu können.

Teilen wir die zuvor vorgestellten Modelltypen in jene, die versuchen gezielt ökonomische Theorie zu modellieren, d.h. Modelle die noch vor Betrachtung und Schätzung der Daten ökonomische Annahmen (ex ante Annahmen), treffen und diese im Modell, durch Annahme bestimmter Zusammenhänge, in Form bestimmter Gleichungen, realisieren, sowie in jene die lediglich statistische Zusammenhänge aus den verfügbaren Daten ableiten.

In einem nächsten Schritt teilen wir sie in jene Modelle die in algebraischer Form, d.h. in Form von Gleichungen, darstellbar sind und jene die nur in algorithmischer Form, d.h. als Computerprogramm, darstellbar sind. Obwohl jedes algebraische Modell, d.h. jedes Modell das als, wie auch immer geartetes, Gleichungssystem vorliegt, auch als algorithmisches Modell formuliert, also als Computerprogramm realisiert, werden kann, so gilt dies nicht in jedem Fall auch umgekehrt. Da in der algorithmischen Form teilweise andere Operatoren und Logikkonstrukte möglich sind, können manche Modelle, wie bspw. Artificial Life Modelle, nicht direkt in algebraische übersetzt werden. Darüber hinaus werden algebraische Modelle meist „analog“ entwickelt, sodass sie von Vornherein überblickbar, bzw. lösbar sind – ein solch lösbares System lässt sich dadurch auch in ein korrekt terminierendes Programm übersetzen. Ein Computerprogramm welches ein System von extrem hoher Komplexität repräsentiert, welches in manchen Fällen überhaupt nicht terminiert, d.h. zu einem Ergebnis kommt, entspräche daher einem nicht lösbaarem algebraischen Modell⁷.

⁷ Zum Thema der Äquivalenz von nicht lösbaaren Systemen und nicht terminierenden Programmen siehe [Chaitin_1998]

Teilt man nun die bisher betrachteten Modellarten nach diesen Kriterien ein, so sieht dies folgendermaßen aus:

	Modelle mit ex ante ökonomischer Theorie	Modelle ohne ex ante Ökonomische Theorie
Algebraische Modelle	DSE Modelle CGE Modelle	Stochastische Modelle (z.B.VAR) Compumetrics
Algorithmische Modelle	Artificial Life Modelle	

Tabelle 1: Einteilung makroökonomischer Modelle

Vom Standpunkt ökonomischer Interpretation wird der Hauptnutzen der hier zu entwickelnden Analysetechnik (der Visualisierung von ökonomischen Modellen) wohl bei Analyse jener Modelle liegen, welche versuchen ökonomische Theorien zu modellieren, was fast ausschließlich Modelle mit ex ante ökonomischer Theorie sein werden. Dies ist jedoch nicht als Wertung bestimmter Modellierungstechniken zu verstehen, sondern lediglich als Analyse der Nützlichkeit bzw. sinnvoller Anwendbarkeit der hier aufgezeigten Methodik.

Nichts desto trotz mag sich die Zielgruppe der für die visuelle Analyse gut geeigneten Modelle in Zukunft auch erweitern, da auch einige der rein statistischen/stochastischen Modellierungs- Methoden sehr wohl daran interessiert sind ökonomische Theorie zu modellieren, bzw. aus den Daten abzuleiten, dies jedoch (aus Sicht der zeitreihenanalytischen Ansätze) ohne sich von früheren Theorien irritieren zu lassen (aber auch ohne die Vorteile existierender Theorien nutzen zu können) wie bspw. Computational Economics [Kaboudan_2001].

Falls, bzw. sobald, solche Modelle in der Lage sein werden, aus Sicht ökonomischer Strukturen annähernd sinnvolle Modelle zu liefern, würde eine Methode zu Analyse bzw. Kritik solcher Modelle für den Modellbauer wahrscheinlich sogar noch größeren Nutzen haben als bei der Analyse anderer Modelle, da die Modellstrukturen dieser statistischen Modelle anfänglich auch dem Modellbauer selbst, unbekannt sein werden, da er sie vermutlich nicht ökonomisch gezielt entwickelt haben wird.

Darüber hinaus stehen strukturelle algebraische Modelle in einem hierarchischen Zusammenhang, da ein dynamisches Strukturmodell in n Variablen in eine Menge von n Zeitreihenmodellen mit jeweils einer Variablen überführt werden kann (vgl. Abraham Wald).

Der zweite Aspekt der Einteilung, welcher eng mit der Durchführbarkeit einer gemeinsamen Analyse zusammenhängt, war jener der Modellierungstechniken, wobei nur zwischen einer algebraischen und einer algorithmischen Form unterschieden wurde.

Die Beschränkung in der Einteilung auf diese zwei Faktoren mag auf den ersten Blick als unzureichend erscheinen, da die aufgeführten Modelle (CGE, VAR, DSE ..) vom Standpunkt der ökonomischen Grundaussagen und Annahmen sowie den Methoden der Modellbildung, d.h. auch vom Standpunkt der Ökonometrie aus gesehen, größtenteils völlig unterschiedlich sind.

Betrachtet man diese Modelle jedoch a posteriori nach Modellierung und Schätzung, so gibt es zumindest vom Standpunkt der Möglichkeiten der Analyse eigentlich nur zwei fundamental unterschiedliche Typen; jene die sich noch als Gleichungssystem darstellen lassen (algebraische Modelle), im Gegensatz zu den anderen Modellen die sich nicht als Gleichungssystem darstellen lassen (algorithmische Modelle). Selbstverständlich können viele Modelle, bei Betrachtung der Gleichungen selbst, noch als eine bestimmte Modellart dargestellt werden, was jedoch die Möglichkeit ihre Strukturen zu analysieren, bzw. die dennoch nicht vorhandene Möglichkeit Gleichungen aus Modellen in algorithmischer Form zu betrachten, nicht tangiert.

Will man daher die modellierten Strukturen, von Modellen in algebraischer Form und Modellen in algorithmischer Form, mit den gleichen Methoden analysieren, so muss man sich bei der Analyse auf Elemente beschränken, welche diese beiden Arten gemeinsam haben, bzw. welche aus beiden Arten gewonnen werden können.

Um diese Information zu isolieren betrachten wir daher im Folgenden die Strukturen von makroökonomischen Modellen, wobei das Hauptaugenmerk auf jenen liegt, die gezielt versuchen Theorie zu modellieren, d.h. Modelle mit ex ante eingebrachter ökonomischer Theorie. Angemerkt sei hier, dass die Brauchbarkeit einer Strukturanalysetechnik, wie bereits erklärt, auch für Modelle ohne ex ante eingebrachte ökonomische Theorie, in den Raum gestellt wird, zumindest für jene die den Anspruch erheben aus den Daten nach Modellierung ökonomische Aussagen ableiten zu können, bzw. zu wollen.

1.2.3 Gemeinsamkeiten makroökonomischer Modelle

Wie bereits erwähnt ist es bisher, aufgrund der endlichen, teilweise stark limitierten, Informationsspeicherungs- und -verarbeitungskapazitäten, sowohl jene von Computern (was sich jedoch im Laufe der Zeit ändert), als auch jene des Menschen (was sich, zumindest ohne technische Hilfe – und diese Ansätze sind gegenwärtig jedoch noch dem Bereich der Science Fiction zuzuordnen – nicht stark verändern wird) nicht möglich alle einzelnen Fakten und Entscheidungen, die an den Veränderungen eines sozioökonomischen Systems, zu betrachten. Um dennoch die Entwicklungen eines solchen Systems anhand aller Details betrachten zu können müssten, alleine für einen relativ kleinen Staat wie Österreich, für jeden Einwohner (nehmen wir ganz grob acht Millionen an), alle wirtschaftlich relevanten Daten (nehmen wir eine kleine Zahl von zehn beobachteten Eigenschaften an) zu verschiedenen Zeitpunkten (nehmen wir an dies geschieht monatlich), zentral erfasst und gespeichert werden, was unter Vernachlässigung der Erhebung von wichtigen Daten aller Unternehmen und Institutionen (was selbstverständlich in einem wirklich makroökonomischen Modell nicht der Fall sein kann), pro Jahr bereits 960 Millionen erfasste Daten wären. Ganz abgesehen davon, dass diese Daten, aus datenschutzrechtlichen Gründen, meist nicht verfügbar sind, wären solche Daten höchstwahrscheinlich nur mit großer zeitlicher Verzögerung zu erhalten. Solche Ansätze, welche tatsächlich die gesamte Bevölkerung eines Landes im Modell abbilden, anstatt eine Anzahl an repräsentativen Agenten abzubilden (wie dies bei “üblichen“ Multiagenten Modellen der Fall ist) sind daher sehr selten, bzw. nur in eingeschränkter Form, d.h. für bestimmte Sektoren oder Regionen, zu finden.

Speziell bei der Betrachtung von Entscheidungen von Personen, können meist nur mehr die Spuren, welche Ihre Handlungen in der Gesamtheit hinterlassen haben, untersucht werden. Ein wichtiges Element der makroökonomischen Modellbildung sind daher Daten in Form von volkswirtschaftlichen Aggregaten, welche beispielsweise den gesamten Konsum, bzw. die gesamten Investitionen, das Volkseinkommen (GDP) oder ähnliche Daten abbilden, wobei die Verfügbarkeit und Qualität der Daten sich, für manche Länder, bzw. für manche Fragestellungen, als sehr problematisch erweisen kann, da die Erhebung von Daten generell mit Kosten verbunden ist, und Entwicklungs- und Schwellenländer diese daher oft nicht genau erheben.

Diese Problematik ist speziell auch in den Nachfolgestaaten der Sowjetunion, bzw. generell von Staaten welche aus einer jahrzehntelangen Planwirtschaft übergeführt wurden relevant, da hier meist erst brauchbare Daten für die Zeit nach der Umstellung zur Marktwirtschaft existieren, welche darüber hinaus in den ersten Jahren auch noch stark verzerrt sind (für den Fall, dass sich das Land später stabilisiert hat) und daher oftmals nicht direkt verwendbar sind.

Andere volkswirtschaftliche Größen, wie beispielsweise Steuersätze, Zinssätze, usw. sind, im Gegensatz zu den vorher erwähnten Daten, nicht schwer zu erheben, da sie allgemein bekannt und für jedermann in einer bestimmten Region gleich sind.

Ein Teil der, in makroökonomischen Modellen zu Anwendung kommenden, ökonomischen Größen wird jedoch nicht direkt beobachtet, bzw. ist generell nicht beobachtbar, weshalb einige Daten durch Ableitung aus anderen Größen gewonnen werden, wobei dies meist nur eine Näherung darstellt.

Von hoher Bedeutung für die ökonomische Modellbildung ist daher auch die Verfügbarkeit von Datensätzen für die Parameter auch wegen der Messbarkeit der relevanten Größen, da viele relevanten Effekte, wie bereits erwähnt, nicht oder nur schlecht zu beobachten sind. Die zur Verfügung stehenden, d.h. gemessenen Daten sind stark beschränkt und je nach Quelle der Daten oftmals auch von unterschiedlicher Qualität.

Falls Fehler oder Verzerrungen in den Daten gefunden werden, welche entweder nicht mit anderen Daten dieses Landes oder auch überregionalen Trends übereinstimmt, ist es oftmals auch nötig die Zeitreihen der Daten zu korrigieren, wodurch zwar die errechneten Werte besser mit den modellierten Zusammenhängen und den erwarteten Trends übereinstimmen, aber auch die Verlässlichkeit des Modells abnimmt.

1.3 Ökonomisch strukturelle Modelle

Der erste Schritt bei der Entwicklung von neuen Modellen, welche bisher nicht, oder nur unzufriedenstellend, beantwortete Phänomene betrachten, ist meist die Entwicklung eines groben deskriptiven Modells, welches versucht die, für eine bestimmte Fragestellung relevanten, Größen und ihr Zusammenspiel zu ermitteln. Die Grundlagen eines solchen Modells werden normalerweise aus einem theoretischen Modell, einem Paradigma, abgeleitet, in dem es auf dessen sozialwissenschaftlichen Ansatzpunkten aufbaut. Dieser Schritt steht am Anfang aller Modelle, welche in einem sozialwissenschaftlichen Kontext entwickelt werden, und versuchen Aussagen aufgrund von tatsächlich vermuteten Abläufen zu treffen. Es existieren auch andere Ansätze, welche versuchen Modelle von ökonomischen Systemen rein auf Basis der statistischen Zusammenhänge erhobener Daten herzustellen, ohne diesen per se einen bestimmten logischen Zusammenhang zu unterstellen, wie bereits gezeigt wurde.

Ein auf üblichem Weg entwickeltes deskriptives Modell (in manchen Wissenschaftsbereichen auch als heuristisches bezeichnet), beschreibt mit Worten die Zusammenhänge zwischen den wichtigen Akteuren, d.h. Personen, Personengruppen oder Institutionen. An dieser Stelle versteht, bzw. beschreibt ein solches Modell die inneren Abläufe meist nicht genau - es sieht, bis auf wenige Ausnahmen, nur die äußeren Umstände. Die extremste Form eines solchen Modells, in welchem keine internen Abläufe genauer betrachtet werden, wird als „Black Box“ bezeichnet [Intrilligator_1996]. Diese Konzept stammt ursprünglich aus der Elektrotechnik und wurde in den zwanziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts entwickelt um Systeme zu entwickeln, welche von außen nach innen entwickelt werden, d.h. es wird zuerst bestimmt welche Ausgaben sie auf bestimmte Eingaben liefern sollen und erst danach werden jene Elemente entwickelt welche die Inputs mit den korrekten Outputs verbinden [Bissel_2001].

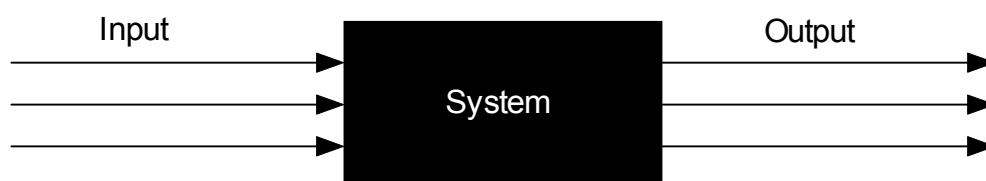


Abbildung 2: Ein System als Blackbox

Grundsätzlich beginnen alle Modelle in solch einem Blackbox Stadium, in welchem nur die äußeren beobachtbaren Spuren zu sehen sind, welche für ein bestimmtes Phänomen verantwortlich gehalten werden. Wie besprochen versuchen Ansätze welche existierende ökonomische Theorie gezielt modellieren wollen, die Zusammenhänge logisch weiter zu verfolgen und das Modell immer genauer zu erklären, wobei bestimmte Teile selbst wieder zu einer neuen Blackbox werden:

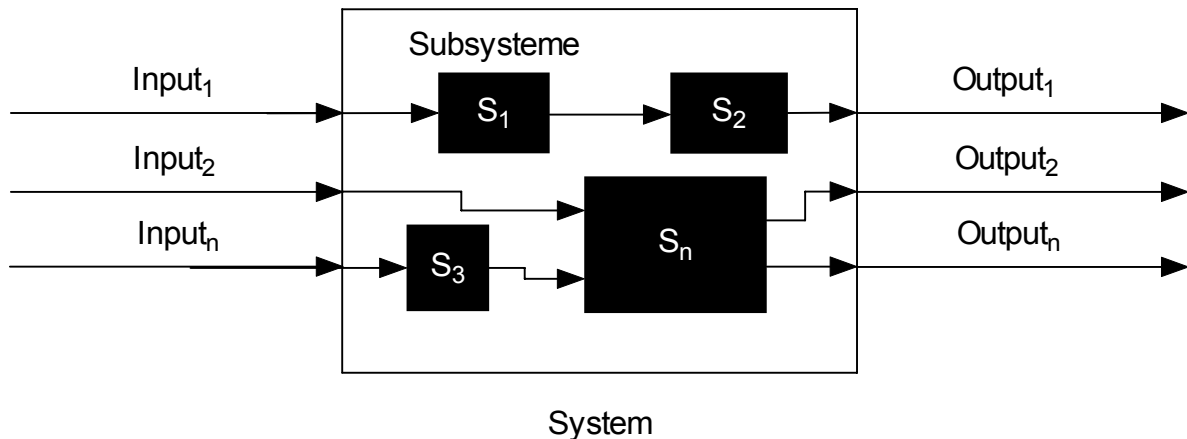


Abbildung 3: Modelle mit kaskadierten Blackboxen

Das bedeutet, dass man in der Beschreibung des Modells zwar in eine tiefere Schicht vorgedrungen ist, die genauen Abläufe in der Schicht darunter aber immer noch unbekannt sind. Insofern man das untersuchte System nicht hinunter bis zur kleinsten Einheit modelliert, d.h. in der Ökonomie bis zum einzelnen Entscheidungsträger, was bisher eigentlich auch kein relevantes Modell versucht, so wird jedes Modell eigentlich ein Modell von kaskadierten Blackboxen sein. Die Frage der Ökonomie bzw. Ökonometrie, des beginnenden zwanzigsten Jahrhunderts war wohl auch wie viel Detail man benötigt, und welche Zusammenhänge untersucht werden müssten, um quantifizierte Aussagen über zukünftige Entwicklungen machen zu dürfen, d.h. welche Variablen zu schätzen sind und welche Daten dabei zu berücksichtigen sind. Tinbergen war der Meinung, dass das Untersuchen der für am wichtigsten gehaltenen Größen ausreichend ist um repräsentative Zusammenhänge zwischen den Größen herstellen zu können. [Morgan_1990]

Zusätzlich zu einer bestimmten Beschreibungstiefe der Zusammenhänge, werden oftmals eingeschränkte Modelle entwickelt, welche nur einen ganz bestimmten Teil des gesamten

Systems detailliert beschreiben und den Rest fast als Blackbox belassen, speziell wenn das Verhalten bestimmter Faktoren oder Bereiche, wie bspw. der Geldmarkt, von größerer Bedeutung für eine bestimmte zu analysierende Fragestellung war als andere Bereiche:

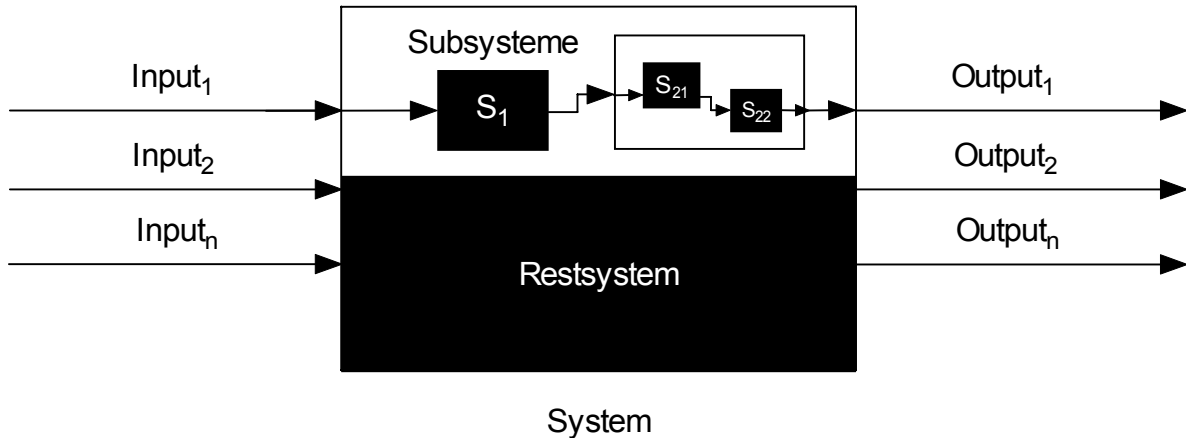


Abbildung 4: Modelle mit variierender Modellierungstiefe

Wobei makroökonomische Modelle, welche alle relevanten Märkte (Kapital-, Arbeits-, Gütermarkt) beschreiben dabei als Totalmodell bezeichnet werden, Modelle welche bestimmte Märkte nicht modellieren als Partialmodelle bezeichnet werden. Dennoch können sowohl Partial- als auch Totalmodelle die von ihnen abgebildeten Märkte mit unterschiedlicher Detaillierung modellieren.⁸

Um genaue Vorhersagen machen zu können, welche dann einerseits als konkrete Handlungsempfehlung dienen können und andererseits um das Modell und seine zugrunde liegenden Annahmen und Theorien tatsächlich überprüfen zu können, wird ein mathematisches Modell entwickelt. Modelle ohne mathematische Komponenten und ohne Analyse von vergangenen quantitativen Beobachtungen, sind daher in der Ökonomie nur als Anfangsstufe der Erklärung zu sehen. Die folgenden Ansätze, welche gezielt ökonomische Theorie in die Modellierung einbringen, stellen daher Systeme ökonomischer Relationen in Form eines mathematischen Modells dar. Bei solchen Modellen werden nur jene ökonomischen Größen mit Relationen verbunden, welche vom System als beeinflussbar oder als das System beeinflussend angenommen werden. Durch die Richtung der Relationen sowie den Zusammenhang der Relationen im Modell ergeben sich endogene Abläufe, welche vom

⁸ Für eine eingehendere Diskussion von Black- und Whiteboxes in der Ökonomie siehe [Hanappi_1994]

System berechnet und beobachtet werden, und nicht beeinflussbare Größen welche exogen belassen und lediglich beobachtet werden.

Algebraische Modelle

DSE Modelle

Die zum Zweck der Politikevaluation immer am häufigsten eingesetzte Methode der makroökonomischen Modellierung, ist jene in Form von DSE (Dynamic Simultaneous Equations) Modellen – Nachfahren des Ansatzes der Cowles Commission, welche versuchen wirtschaftswissenschaftlich fundierte Erklärungen und Vorhersagen für ökonomische Variablen, in Form von deterministischen bzw. meist stochastischen Differenzgleichungen zu modellieren.

Der dynamische Aspekt ist nötig um die ökonomische Realität korrekt abbilden zu können, da alle makroökonomischen Prozesse erst zeitverzögert wirken, da Anpassungsprozesse in Reaktion auf Änderungen bzw. Schocks, bspw. auf Grund von festgelegten Vertragslaufzeiten bei diversen Großinvestitionen bzw. –finanzierungen und aus vielen anderen Gründen, gewisse Reaktionsspannen haben, da schnellere Anpassungen sehr kostenintensiv und teilweise auch verfrüht sein können. Dabei kann die Spanne der zeitlichen Verzögerung pro Variable variieren, bzw. auch mehrere unterschiedliche Verzögerungen pro Variable im gleichen Modell wirken.

Im Gegensatz zu einem dynamischen Modell, welches selbstverständlich auch gleichzeitige Beziehungen enthalten kann, würden in einem statischen Modell alle Variablen lediglich gleichzeitige Beziehungen aufweisen. Ein solches Modell könnte daher nicht einmal Gleichungen enthalten, welche von ihrem eigenen früheren Wert abhängen, was jedoch bei den meisten Variablen der Fall ist.

Dadurch kann ein rein statisches Modell keine ökonomischen Prozesse beschreiben, da Prozesse die Veränderungen von Situationen im Lauf der Zeit schildern, sondern lediglich eine Situation, weshalb solche Modelle speziell für komparativ-statische Vergleiche eingesetzt werden, wie bspw. Veränderungen einer bestehenden Gleichgewichts- oder auch Ungleichgewichtssituation unter Veränderung einzelner Voraussetzungen, d.h. Variation der Parameter.

Ein ökonomisches Modell besteht, unabhängig davon ob es statisch oder dynamisch ist, grundsätzlich aus den folgenden drei Elementen:

- Variablen
- Parameter
- Gleichungen (sowie Ungleichungen)

Der logische Zusammenhang zwischen den drei Elementen ist dann dadurch gegeben, dass das Modell aus einer Zahl an Gleichungen besteht, welche ihrerseits den Zusammenhang zwischen Variablen erklären, wobei die freien Parameter, bei gegebener Funktionsform, die konkrete Richtung und Stärke der Beziehung zwischen zwei Variablen darstellen und die Ungleichungen diverse Restriktionen der Variablen (z.B. Budgetrestriktion) sowie ökonomisch sinnvolle Wertebereiche (Definitionsbereiche) für die Variablen und freien Parameter angibt. Als einfachstes Beispiel eines solchen Zusammenhangs, nehmen wir eine lineare Gleichung eines solchen Systems betrachten wir die folgende Gleichung:

$$Y_t = a + b \cdot X_t + \varepsilon$$

Wobei Y_t die endogene Variable wäre, welche durch die exogene Variable X_t (oder auch endogene, falls im Gleichungssystem zusätzlich eine Gleichung in der Form $X_t = f()$ vorkäme), sowie der Konstanten a (freier Parameter), und dem konstanten Faktor b (freier Parameter), sowie der stochastischen Störvariablen ε , beschrieben würde. Eine Gleichung die eine stochastische Variable (Stör- bzw. Zufallsvariable) enthält wird dadurch zu einer stochastischen Gleichung, jede weitere Gleichung die entweder selbst ebenfalls eine stochastische Variable enthält oder eine endogene Variable welche selbst durch eine stochastische Gleichung definiert wurde, wird selbst zu einer stochastischen Gleichung.

Betrachtet man die ökonomische Bedeutung der Variablen, bzw. welche Bedeutung Zeit für die Variable an sich hat (zumindest aus empirischer Sicht), so kommen in ökonomischen Modellen hauptsächlich Variablen folgender drei Typen vor:

- Bestandsgrößen (stocks)
- Flussgrößen (flows)
- Verhältnisgrößen (ratios)

Bestandsgrößen stellen eine Menge einer beliebigen Einheit, an einem bestimmten Stichtag dar, wie bspw. Kapitalstock (in €) am 31.12.2000, Geldmenge M1 (in €) am .. , Bevölkerungszahl am .., usw.

Flussgrößen hingegen werden, ebenfalls in einer beliebigen Einheit, über einen bestimmten Zeitraum (Jahr, Quartal, Monat, ..) gemessen, wie beispielsweise Einkommen im Jahr 2000 (€/Jahr), Investitionen im Quartal 4/2001 (€/Quartal), Konsum im Jahr 2001 (€/Jahr), usw. Wobei die Flussgrößen entweder direkt erhoben werden, bzw. meist aus der Differenz zweier Bestandsgrößen berechnet werden (bspw.: $flow_t = stock_t - stock_{t-1}$).

Verhältnisgrößen stellen einen Quotienten, bestehend aus einer Bestandsgröße / Bestandsgröße, Flussgröße / Flussgröße oder einer Bestandsgröße / Flussgröße dar, wie bspw. Erwerbsquote = Erwerbstätige / Bevölkerung..

Nachdem in den Gleichungen des Modells oftmals Variablen unterschiedlicher Einheit (Dimension), bzw. auch dimensionslose (reine Zahlen), zur Verwendung kommen, ist es, auch für die Interpretation der Parameter, wichtig diese Dimensionen immer anzugeben (und vor allem zu kennen), um eine sinnvolle Interpretation der Ergebnisse zu ermöglichen.

Variablenklassifizierung

Die Variablen eines DSE Modells müssen, vom Modellentwickler, in einem ersten Schritt in endogene Variable, welche vom System beschrieben und berechnet (erklärt) werden, sowie in exogene Variable, welche als von anderen Modellen unveränderbare äußere Einflüsse angenommen werden, deklariert werden, wozu bereits ökonomische Theorie nötig ist. Zusätzlich zu den endogenen und exogenen, kann es in DSE Modellen noch Hilfsvariable geben, welche jedoch keine ökonomischen Größen repräsentieren, sondern lediglich aus mathematisch formalen Gründen benötigt werden.

Generell wird versucht, möglichst viele der an einem ökonomischen Prozess beteiligten Variablen in Form endogener Variablen, d.h. als im Rahmen des Modells explizit beschriebene Abläufe zu formulieren. Ein Modell welches nur endogene Variable enthält,

wird technisch gesehen als geschlossen bezeichnet, ein Modell welches endogene und exogene Variable enthält, wird als offen bezeichnet.⁹

Jede endogene Variable muss daher durch eine Gleichung beschrieben werden, welche ihren Wert in der gegenwärtigen Periode, in Abhängigkeit von einer Zahl an exogenen und/oder endogenen Variablen, berechnet, wodurch endogene Variablen theoretisch für jede beliebige Periode berechenbar wären, insofern die nötigen Daten vorhanden sind.

Da exogene Variable nicht vom System berechnet werden, müssen deren Werte für jede Periode vorgegeben werden, wodurch ein bestimmter temporaler Arbeitsbereich des Modells bereits implizit vorgegeben wird, da die Menge der vorgegeben Daten, d.h. die Zeitreihe der Variable endlich ist, außer das Modell enthält keine exogenen Variablen mehr. Für Modelle deren Zielsetzung es ist, das Verhalten des untersuchten makroökonomischen Systems, mehrere Perioden in die Zukunft zu simulieren, um bspw. die mittelfristigen Auswirkungen verschiedener alternativer Vorgehensstrategien zu evaluieren (Optcon, Slopol [Weyerstraß_2001]), ist es daher nötig die exogenen Variablen fortzuschreiben, was meist mit Hilfe ökonometrischer Methoden außerhalb des Modells geschieht.

Variablen, welche vom restlichen System nicht beeinflusst werden, d.h. eigentlich als exogen einzustufen wären, werden manchmal dennoch endogen, jedoch als nur von sich selbst abhängig, modelliert, da sie dann bereits automatisch fortschrieben werden, bzw. da dann keine Zeitreihen mehr mit dem Modell mitgeführt werden müssen – dies führt jedoch dazu, dass die Variable ungenauer abgebildet wird als dies durch die exogene Zeitreihe möglich war, falls die exogenen Daten tatsächlich empirisch erhoben wurden. Für Variable, welche von ihrer Natur aus einen sehr geraden, d.h. linearen, oder zumindest monotonen Verlauf haben (zumindest kurz bis mittelfristig gesehen), ist diese Diskrepanz wohl generell gering, wodurch sie sich gut dafür eignen durch eine einfache Gleichung beschrieben zu werden¹⁰.

⁹ Diese Klassifizierung darf nicht mit der ähnlich bezeichneten Art der angenommenen Volkswirtschaft, d.h. geschlossene Volkswirtschaft, falls keine externen wirtschaftlichen Verbindungen und Einflüsse bestehen (was bei der Weltwirtschaft als Ganzes der Fall wäre, aber oftmals auch als vereinfachende Annahme bei Modelle getroffen wird), im Gegensatz zu eine offenen Volkswirtschaft.

¹⁰ Selbstverständlich könnte auch ein nicht monotoner Verlauf mit mehreren Knickpunkten durch eine Gleichung, mittels Taylor Reihen approximiert werden, was jedoch eine höhere Zahl an Parameter benötigen würde.

Wie bereits erwähnt, enthalten DSE Modelle dynamische Komponenten, d.h. dass in den Gleichungen zur Beschreibung endogener Variablen, sowohl endogene als auch exogene zeitverzögerte Variablen (Lags und Leads), zur Anwendung kommen können. Wobei Lags aus der Vergangenheit in die Gegenwart zeigen (in der Form $Y_t = f(X_{t-n})$ mit $n > 0$ d.h. X_{t-n} beeinflusst Y_t mit einer Verzögerung von n Perioden ($X_{t-n} \rightarrow Y_t$)), was kausal gesehen kein Problem ist, da bestimmte reale Prozesse erst verzögert anlaufen bzw. von sich selbst abhängen. Darüber hinaus kann der kausal paradoxe Effekt eintreten, dass wenn eine große Anzahl, bzw. einige sehr einflussreiche (institutionelle) Entscheidungsträger davon ausgehen, dass eine bestimmte Variable von einer anderen in der Vergangenheit abhängt und ihre Entscheidungen bezüglich der beeinflussten Variable darauf abstimmen, dann können diese Beziehungen nach einiger Zeit tatsächlich entstehen, bzw. Beziehungen die einmal zurecht zeitlich verzögert abhängig waren, bleiben aufgrund der Erwartung über die Beziehung auch weiterhin aufrecht (auch wenn diese Prozesse inzwischen eine schnellere Anpassungszeit haben könnten).

Leads hingegen sind Relationen die aus der Zukunft in die Gegenwart zeigen (in der Form $Y_t = f(X_{t+n})$ mit $n > 0$, d.h. X_{t+n} beeinflusst Y_t mit einer Verzögerung von n Perioden ($X_{t+n} \rightarrow Y_t$)). Da dies im realen System natürlich nicht direkt möglich ist, da die Zukunft keinen deterministischen Einfluss auf die Gegenwart haben kann¹¹, muss die Zukunftsgröße in diesem Fall als Erwartungswert einer ökonomischen Größe interpretiert werden, welcher eventuell gegen den tatsächlichen eintretenden Wert konvergiert, d.h. die Erwartungen werden im Modell gegebenenfalls erfüllt. D.h. anstatt externe Schätzfunktionen einzusetzen, bzw. die Variablen als eigene endogene Variable (mit zugehöriger Schätzfunktion) für die Zukunftsgröße zu verwenden, könnte als Spezialfall angenommen werden, dass das Modell generell alle Variablen korrekt vorhersagt, d.h. dass eigentlich alle endogenen Variablen des Modells korrekt erwartet werden (d.h. $E(X_{t+1}) = X_{t+1}$). Dennoch gibt es unterschiedliche Ansätze wie diese Lösung tatsächlich numerisch berechnet wird, wobei ein gebräuchlicher Algorithmus zwar von der Näherung von Erwartungswerten ausgeht [Fair_1983], ein neuerer Algorithmus bspw. jedoch von einem Simultanlösungsverfahren für einen finiten Zeithorizont

¹¹ Dies ist selbstverständlich im realen System nicht möglich, da (im Gegensatz zur Quantenphysik) zumindest die für Menschen wahrnehmbare Dimension der Zeit, streng gerichtet ist (Vergangenheit \rightarrow Gegenwart \rightarrow Zukunft) und in der lokalen Approximation des für ökonomische Prozesse relevanten Zeithorizonts (\ll 1 Mio. Jahre), unter Vernachlässigung relativistischer Phänomene (solche wären Geschwindigkeiten $\sim c$, supermassive Gravitationsfelder, Zeitpunkte nahe dem Urknall usw.), auch linear verläuft ($t_{NEU} = t_{ALT} + 1$, auch wenn noch nicht genau bekannt ist ob die Zeit an sich, in einer minimal geringen Form, doch gequantelt ist, d.h. diskret ist (Loop-Quantengravitationstheorie), oder ob die Zeit eine kontinuierliche Dimension ist)

ausgeht [Boucekkine_1995], d.h. mehrere Gleichungen werden für mehrere Zeitschritte zugleich (genähert) gelöst.

Die endogenen Variablen werden daher immer nur für den Zeitpunkt t der Simulation bestimmt, d.h. alle Gleichungen (zumindest in (funktionaler) Strukturform) weisen eine endogene Variable im Zeitpunkt t auf der linken Seite ($V_t = f(V_1, \dots, V_n)$) auf.

Die Berechnung eines DSE Modells muss nun, aufgrund der beschriebenen intertemporalen Relationen, Schritt für Schritt, d.h. Zeitperiode für Zeitperiode (mit vorgegebener Zeitrichtung) erfolgen, wobei nur die endogenen laufenden (unverzögerten) Variablen direkt berechnet werden können (solange keine interdependenten Beziehungen zwischen endogenen Variablen die direkte Berechnung verhindert), alle anderen werden in Form von präterminierten Variablen verwendet, d.h. sie müssen vor Beginn der Berechnung eines Zeitschrittes bereits vorberechnet zur Verfügung stehen.

So können bspw. auch die endogenen verzögerten Variablen nicht direkt berechnet, daher erst in Form von vorherbestimmten (präterminierten) Variablen verwendet werden, d.h. sie werden am Beginn jeder Simulationsperiode zu einem Vektor aus vorherbestimmten (endogenen) Variablen zusammengestellt, wobei die Variable aus den, in der korrekten vergangenen Zeitperiode, bereits berechneten Variablen entnommen wird.

Befindet sich die Simulation in einer frühen Periode, d.h. in einem der ersten Zeitschritte, und betrachtet eine endogene Variable eine andere endogene Variable in einem früheren Zeitschritt, in welchem noch keine Simulation stattgefunden hat, so gibt es hierfür keine berechneten Daten. Deshalb werden für eine Anzahl an Zeitperioden, gleich der maximalen zeitlichen Verzögerung der jeweiligen Variablen (X) im Modell, Daten in Form von Zeitreihen benötigt – entweder in Form empirischer Daten, oder mittels eines Näherungsalgorithmus berechnete Daten, was jedoch keinen Unterschied für das Modell macht, da es außerhalb geschieht. D.h. sollte die Simulation des Modells mit der Berechnung des Jahres 1970 beginnen, und würde die max. Verzögerung der Variable X drei betragen (X_{t-n} , $\max(n) = 3$), also eine Gleichung in der Form $Y = f(X_{t-3})$ Teil des Systems sein, so würden zur Berechnung des Modells, Daten ab dem Jahr 1967 benötigt.

Exogene Variable, welche jedenfalls in Form vom Zeitreihen vorliegen, werden, egal ob sie nun als verzögerte oder als laufende Variablen verwendet werden, als präterminierte

Variable behandelt und ebenfalls zu Beginn jeder Simulationsperiode zu einem Vektor prädeterminierter Variablen zusammengestellt. Analog zu den endogenen Variablen, müssen selbstverständlich Daten für eine Anzahl an Zeitperioden, gleich der maximalen Verzögerung, vor der ersten Zeitperiode für welche simuliert werden soll, verfügbar sein.

Die letzte Gruppe der Variablen sind die Hilfsvariablen, welche jedoch keine ökonomischen Größen repräsentieren, sondern aus formalen mathematischen Gründen benötigt werden. So wird bspw. die Zahl 1 in einer Gleichung der Form $Y_t = a \cdot 1 + b \cdot X_t + \varepsilon$ als exogene Hilfsvariable bezeichnet, welche dazu dient die Dimension (Einheit – etwa Euro, Dollar, Tonnen, usw.) der endogenen Variablen Y_t eindeutig beizubehalten, d.h. die Parameter a und b sind dimensionslos, und die exogene Variable 1 hat die selbe Dimension wie die endogene Variable Y_t .

Entscheidungsmodelle

Betrachtet man nun (wirtschaftspolitische) Entscheidungsmodelle (monetäre, fiskale Modelle), oder Modelle welche spieltheoretischen Charakter haben, so kommt zusätzlich zu der bisherigen Einteilung noch eine weitere Untereinteilung hinzu, welche die Bedeutung bestimmter Variablen herausstreicht – die Instrumente, als Teil der exogenen Variablen, und die Ziele als Teil der endogenen Variablen.

Die Instrumente, welche eine Teilmenge der exogenen Variablen sind, und dadurch auch im Modell in jedem Zeitpunkt neu gesetzt werden können, repräsentieren jene Variablen, die vom Entscheidungsträger beeinflusst bzw. direkt bestimmt werden können, wie beispielsweise den Zinssatz oder die Geldmenge – zwei übliche Instrumente von Nationalbanken – wobei sie in Wirklichkeit oftmals nur in kleinen Schritten angepasst werden (können) – siehe Zinssatz. Die Menge der Instrumente repräsentiert jedenfalls die einzigen Mittel der Einflussnahme auf die ökonomischen Prozesse, welche im Modell explizit abgebildet sind, wobei die Bedeutung der Variablen an sich, meist nur in ihren Auswirkungen auf andere Variablen liegt, ihrem Wert selbst jedoch nur geringe Bedeutung beigemessen wird, d.h. oftmals nur Mittel zum Zweck ist.

Die Ziele, welche eine Teilmenge der endogenen Variablen sind, repräsentieren hingegen jene Variablen des Modells, welche der Entscheidungsträger als wirtschaftspolitisch, bzw. volkswirtschaftlich relevant betrachtet und daher zu optimieren sucht. Diese Ziele, wie

beispielsweise die Inflation, oder die Arbeitslosenrate, usw., können nicht direkt gesetzt, d.h. beeinflusst werden, sondern nur indirekt. Dies geschieht (theoretisch und praktisch) durch strategisches Setzen (Verändern) der Instrumente, oftmals auch durch Beeinflussung über Nebenziele. Aus Sicht des Entscheidungsträgers erfüllen nun alle endogenen und exogenen Variablen, welche nicht der Menge der Instrumente oder Ziele angehören, nur mehr die Aufgabe von Hilfsvariablen.

Trotzdem die Klassifizierung der Instrumente und Ziele große Bedeutung hat, kann in der strukturellen Darstellung jedoch kein Unterschied zu anderen exogenen respektive endogenen Variablen gesehen werden. D.h. diese Eigenschaften können nicht alleine aus den Gleichungen der strukturellen Form abgeleitet (erkannt) werden, sondern ergeben sich aus der Zuordnung von Variablen zu Eigenschaften der beobachteten sozioökonomischen Entitäten. Bei Umwandlung in eine reduzierten oder finale Form hingegen, bzw. generell bei der Vereinfachung des Modells, muss der Status der Variablen als Instrument oder Ziel jedenfalls beachtet werden, damit sie nicht durch Vereinfachung und Umformung verschwinden, da man sonst die Einflüsse von Instrumenten auf die Ziele nicht mehr berechnen (beobachten) kann.

Parameter

Generell wird in DSE Modellen zwischen freien und gebundenen Parametern unterschieden, wobei freie Parameter im Modell als unveränderlich, d.h. als im Modell konstante Zahlen angenommen werden. Die freien Parameter geben nun die Richtung und Stärke des Zusammenhangs zwischen zwei Variablen an, wobei diese meist unter Verwendung empirischer Daten für bestimmte Regionen und Zeiträume geschätzt werden, wozu eine Reihe ökonometrischer (statistischer) Methoden zur Verfügung stehen, welche in den letzten Jahrzehnten, seit der Kritik von Sims, erhebliche Fortschritte gemacht haben. Betrachten wir dennoch die Bedeutung konstanter Parameter, und sehen uns nochmals eine einfache Gleichung an:

$$(i) Y_t = a + b \cdot X_t + \varepsilon$$

Der Parameter a würde nun eine fixe Basisgröße darstellen, welche in allen Zeitabschnitten konstant bleibt, und der Parameter b würde einen konstanten Anteil (Neigung) darstellen, welche ebenfalls keinen zeitlichen Index hat und ebenfalls konstant bleibt.

Gebundene Parameter kommen hingegen hauptsächlich in Definitionsgleichungen (Identitäten) vor und haben in aller Regel die Werte +1, -1 und 0, wie bspw. in dieser Gleichung

$$(ii) Z_t = Y_t + d \cdot V_t$$

In der Gleichung (ii) repräsentiert d nun den gebunden Parameter und bestimmt nun mit den möglichen Werten $d \in \{-1, +1\}$ das Vorzeichen der strukturellen Beziehung. Der mögliche Wert $d = 0$ ist eigentlich der am häufigsten verwendete, wenn man das gesamte Gleichungssystem als Matrix betrachten würde, was bei vielen Schätzungs- und Lösungsverfahren auch der Fall ist. Hier würde ja theoretisch jede Variable in jeder Zeile vorkommen, sie würde lediglich mit einem Parameter mit dem Wert 0 multipliziert. Andere Werte gebundener Parameter sind möglich, wenn die Beziehung genau bekannt ist und sich empirisch bestätigt hat.

Betrachtet man nochmals die beiden Parameter der Gleichung (i), so sieht man, dass diese, in einer linearen Gleichung (wie (i)), über die gesamte Laufzeit des Modells konstant bleiben, und würden damit eine immer gleiche Beziehung zwischen den Variablen X_t und Y_t unterstellen. Dies entspricht aber nicht in jeder Gleichung der Realität, bzw. stimmt meist nur für begrenzte Zeiträume, wie schon zuvor besprochen wurde, was auch Ursprung der Lucas Kritik war. Das Problem ist, dass es in gewissen Abständen zu nicht-linearen Veränderungen sowohl des Verhaltens, als auch der Strukturen von Staaten kommt, d.h. zu Strukturbrüchen bzw. Regimewechseln, welche oftmals nicht nur von kurzfristiger Natur sind, sondern das gesamte Systemverhalten verändern können, wodurch sich auch die Parameter verändern würden. Abhängig von der Form der Gleichung (sowie der Geschwindigkeit und Intensität der Veränderungen des abgebildeten Landes), sowie den angewendeten Schätzverfahren, welche eine Zeitreihe, etwa durch Taylorpolynome, möglicherweise auch besser approximieren könnte, haben solche Brüche unterschiedlich starke Auswirkungen auf die Aussagekraft des Modells. Auch aus diesem Grund liefern viele Modelle nur bei Betrachtung bestimmter eingeschränkter Zeiträume Ergebnisse die Nahe an den empirisch erhobenen

Zahlen liegen, wobei der Zeitraum kleiner wird, je detaillierter sie die ökonomischen Prozesse abzubilden versuchen.

Beachtet man diese Problematik nicht rechtzeitig und bildet man einen zu langen Zeitraum mit einer einfachen linearen Gleichung ab, so wird man dies bereits bei Schätzung der Parameter erkennen, da diese eine hohe Standardabweichung aufweisen werden.

Da die verwendeten ökonometrischen Verfahren, jedoch in aller Regel nicht im Nachhinein aus den Gleichungen des Modell erkannt werden können, wird in dieser Arbeit nicht näher auf die unterschiedlichen Methoden (2SLS, 3SLS, FIML, etc.) eingegangen werden.

Betrachtet man die Gleichungen, d.h. die Strukturen des Modells aus dem Blickwinkel der, im Kapitel 2 Alternative Sichtweisen ökonomischer Modelle genauer erläuterten, General Function Form, so wären die, von unterschiedlichen Schätzmethoden möglicherweise unterschiedlich generierten Gleichungsstrukturen dennoch gleich. Selbst wenn in der Gleichung, durch alternative Methoden, bspw. Polynome mit mehrfacher Verwendung derselben Variablen oder Indikatorfunktionen, zur korrekten Überbrückung von Strukturbrüchen etwa, verwendet würden, so wäre die Richtung der Beeinflussung der unterschiedlichen Variablen dennoch gleich. D.h. die grundlegende qualitative Struktur des Modells wäre dennoch gleich, so haben beispielsweise die Gleichungen

$$(a) Y_t = a + b \cdot X_{t-1}$$

und $(b) Y_t = a + b \cdot X_{t-1} + c \cdot X_{t-1}$

grob qualitativ gesehen die gleiche Struktur $X_{t-1} \rightarrow Y_t$, die quantitativen Eigenschaften der zweiten Gleichung können dennoch in den berechneten Werten, d.h. durch Simulation, in Form geringerer Abweichungen, gesehen werden.

Betrachtet man hingegen die Ergebnisse von Methoden, welche qualitativ unterschiedliche Ergebnisse liefern, so würden diese auch bei Betrachtung der grundlegenden Strukturen erkennbar bleiben. Betrachtet man daher die folgenden beiden Gleichungen

$$(a) Y_t = a + b \cdot X_{t-1}$$

und $(c) Y_t = a + b \cdot X_{t-1} + c \cdot X_{t-2}$

so sieht man, dass sich aus diesen, aufgrund temporal qualitativ unterschiedlicher Beziehungen auch unterschiedliche Strukturen $X_{t-1} \rightarrow Y_t$, und $X_{t-2} \rightarrow Y_t$, ergeben.

Gleichungen

Im Gegensatz zu technischen Disziplinen, spielt die Zeit bei ökonomischen Fragestellungen zwar auch eine große Rolle, da sie, schon alleine deshalb weil die Messung von ökonomischen Größen zeit- und kostenintensiv, und dadurch auch de facto nur in einem gewissen Rahmen möglich ist¹², jedoch findet sie nicht in Form einer weiteren kontinuierlichen Dimension (Größe) Einzug in das Modell. Da die Anzahl der sinnvollen (möglichen) Messzeitpunkte, in einer betrachteten Zeitperiode (der Gültigkeitsdauer des Modells), jedenfalls endlich ist (und die Anzahl darüber hinaus auch relativ geringe ist – je nach Fragestellung und Verfügbarkeit untersucht man Daten im Abstand von einzelnen Jahren, Monaten, bzw. selten auch kürzere Zeiträume), wird die Zeit daher als diskrete Größe behandelt.

Temporale Dynamik

In einem dynamischen makroökonomischen Modell können zwischen den ökonomischen Größen gleichzeitig sowohl statische als auch dynamische temporale Relationen existieren (bzw. angenommen werden).

Eine Gleichung welche lediglich statische Relationen (d.h. nur laufende Variablen aber weder Lags (Verzögerte) noch Leads (Vorlaufende)) enthält, und daher sowohl auf der linken Seite (per Konvention der strukturellen Form), als auch auf der rechten Seite nur Variablen im aktuellen Zeitschritt t enthält, entspricht einer „gewöhnlichen“ Gleichung, es werden lediglich alle Variablen mit dem Index t versehen um anzuzeigen, dass es sich nicht um intertemporär konstante Größen (Konstante) sondern um dynamische Variable handelt. (Ist das gesamte

¹² Daten für einige ökonomische Fragestellungen, bspw. Konsummengen, Verhalten usw., werden hingegen in Zukunft, aufgrund der technischen und organisatorischen Entwicklungen im dem Bereich der EDV Vernetzung von diversen Geschäften (Point-of-Sales), zumindest als repräsentative Querschnitte, höchstwahrscheinlich auch mit höherer Frequenz verfügbar sein. Die Bestrebungen von Konzernen gehen dabei in Richtung von Echtzeit Verarbeitung und Erfassung

Modell statisch, d.h. enthält es lediglich statische Gleichungen, so wird die Zeit meist überhaupt nicht dargestellt)

Betrachtet man rein statische Gleichungen in einem dynamischen Modell, so können diese oftmals nicht mehr (bzw. nicht in jedem Fall) als Beziehungen in einem Zeitpunkt betrachtet werden (d.h. tatsächlich statische Zusammenhänge, wie bspw. Strukturen), zumindest so man Verhaltensgleichungen betrachtet, welche die Reaktion von Personen und Institutionen auf das beobachtbare Verhalten bzw. die Veränderung (oder den Zustand) ihrer Umgebung (in Form allgemeinen Rahmenbedingungen, anderen Personen und Institutionen), beschreiben. Diese müssen nun oftmals ebenfalls in einem dynamischen Kontext gesehen werden, d.h. auch sie repräsentieren oftmals dynamische Prozesse, welche jedoch in kürzeren Zeitrahmen ablaufen als abgebildet, d.h. ein Modell welches auf Jahresdaten basiert und statische Relationen enthält (d.h. Beziehungen im gleichen Zeitraum (d.h. im gleichen Jahr) ablaufen), wären bei Betrachtung von kürzeren Zeiträumen, wie bspw. Quartalen oder Monaten, nicht mehr als statisch, sondern als dynamisch zu erkennen, d.h. die bisher als laufende Variablen deklarierten Variablen müssten dann möglicherweise als verzögerte Variablen deklariert werden, auch wenn diese Zeiträume möglicherweise kürzer sind als es dargestellt wird.

Aus einem ähnlichen Grund müssen gleichzeitige gegenseitige Beziehungen der Form zweier Gleichungen $Y_t = f(X_t, \dots)$ und $X_t = f(Y_t, \dots)$, ebenfalls neu interpretiert werden, da es hier ein Feedback zwischen den Variablen gibt, was nur durch sehr schnelle Vorgänge erklärt werden kann (schneller als die Betrachtung, wenn nicht gar unendlich schnell). [Hanappi_2001]

Um die verzögerten und vorlaufenden Relationen (Lags und Leads) abbilden zu können, werden diese in Form von Differenzgleichungen dargestellt. Dadurch werden die Beziehungen jedenfalls nur relativ zueinander dargestellt, nicht jedoch relativ zum gesamten System, auch wenn dies für den ungeübten Beobachter so scheinen mag, was im Kapitel 2 "Alternative Sichtweisen ökonomischer Modelle" genauer erläutert werden wird..

Man kann nun sechs unterschiedliche Arten unterscheiden wie der Faktor der Zeit in dynamischen Gleichungen zur Anwendung kommen kann [Kleinewefers_1983], wobei die endogene Variable entweder

- von der Zeit t direkt abhängt

$$Y_t = f(t)$$

- von (der Höhe) anderer(n) temporalen Instanzen der selben Variablen abhängt (d.h. einen autoregressiven Prozess darstellt)

$$Y_t = f(Y_{t-1}) \text{ oder } Y_t = f(Y_{t-1}, Y_{t-2}) \text{ oder } Y_t = f(Y_{t-a}, Y_{t-b}, \dots)$$

- von der Höhe anderer Variablen in der Vergangenheit abhängt (d.h. ein gelagerter / verzögerter Prozess)

$$Y_t = f(X_{t-1}) \text{ oder } Y_t = f(X_{t-1}, X_{t-2}) \text{ oder } Y_t = f(X_{t-a}, X_{t-b}, \dots)$$

- von der Höhe anderer Variablen in der Zukunft abhängt (d.h. ein lead / vorausschauender Prozess - Interpretation als Erwartungswert)

$$Y_t = f(X_{t+1}) \text{ oder } Y_t = f(X_{t+1}, X_{t+2}) \text{ oder } Y_t = f(X_{t+a}, X_{t+b}, \dots)$$

- von der Veränderung einer anderen Variablen über die Zeit abhängt

$$Y_t = f(\Delta X_t)$$

- von der Kumulation einer anderen Variablen über die Zeit abhängt

$$Y_t = f\left(\sum_{i=k}^t X_i\right)$$

Eine weitere Möglichkeit ist, dass endogene Variablen auch durch Mischformen dieser Relationen festgelegt werden.

Betrachtet man die Beziehungen von einem elementaren Standpunkt intertemporärer Beeinflussung im Nachhinein, d.h. im Nachhinein aus der General Function Form dieser Gleichungen, so kann man nur vier qualitativ unterschiedliche Relationen identifizieren, da sich die letzten beiden Beziehungen nicht von der dritten unterscheiden lassen, da $Y_t = f(\Delta X_t)$ tatsächlich in der Form verzögerte Variable X minus noch länger verzögerter Variable X vorkommen müsste (d.h. $Y_t = f(X_{t-i} - X_{t-k})$ mit $k > i$), wobei die Reihenfolge oder Richtung der Relation jedoch nicht erkennbar ist: $Y_t = f(X_{t-i}, X_{t-k})$. In dieser Form der Darstellung sind daher nur die ersten vier als qualitativ unterschiedlich identifizierbar.

Betrachten wir die mathematische Struktur der, in makroökonomischen Modellen, vorkommenden, Gleichungen, auch in Hinblick auf verfügbare Lösungsverfahren für Differenzgleichungssysteme, so spielt die Linearität der Gleichungen eine gewisse Rolle. Generell kommt linearen Gleichungen große Bedeutung zu, da oft argumentiert wird, dass der Zusammenhang vieler Größen oftmals linear interpretierbar ist, wenn auch einige Faktoren

für nicht-lineare Zusammenhänge sprechen, da einige natürliche Prozesse von ihrer Natur aus nicht linear sind [Hanappi_1994]¹³.

In Hinblick auf Lösungsverfahren versucht man meist nicht-lineare Gleichungen durch geeignete Umformung oder Ersetzungen zu linearisieren, bzw. durch logarithmieren beider Seiten der Gleichung die Linearität wieder herzustellen. Ist es möglich durch logarithmieren eine lineare Gleichung zu erhalten so spricht man davon, dass die Gleichung zumindestens linear in Logarithmen ist, bzw. auch von Log-Linearität, wie es bspw. bei der Verwendung von Cobb-Douglas Produktionsfunktionen im Format $Y = A^X \cdot B^Z$, welche in $\log Y = \log A \cdot X + \log B \cdot Z$ umgewandelt werden können, der Fall ist.

Als Argument gegen die Verwendung nicht-linearer Gleichungen in ökonomischen Modellen wird auch oftmals genannt, dass nicht-lineare Gleichungen (Prozesse), im lokalen Umfeld um bekannte Punkte durch lineare Gleichungen approximiert werden können, wodurch jedoch (theoretisch) die Frage aufgeworfen würde, wie ein solches System mit größeren Schocks umgeht, da hier große Abweichungen geschehen könne. Generell ist die Berechenbarkeit allein jedoch kein Argument für/gegen nicht-lineare Modelle, da es eine Reihe an zugegebenermaßen teilweise sehr rechenintensiven, Näherungs-/Lösungsverfahren sowohl für den Fall linearer als auch nicht-linearer Gleichungssysteme, gibt.

Ökonomische Bedeutung

Betrachtet man nun die ökonomische Bedeutung der Gleichungen, d.h. welche Vorgänge, Strukturen, usw. sie beschreiben, so wird, je nach Auffassung, eine unterschiedliche Anzahl an Gleichungsarten unterschieden. Die grösste Unterteilung geht von drei grundlegenden Arten an Gleichungen aus [Kleinewefers_1983]:

- Ökonomische Funktionen
- Definitionsgleichungen (= Identitäten = Strukturgleichungen)
- Gleichgewichtsbedingungen

¹³ Darüber hinaus unterscheidet man auch zwischen der von Linearität (von Gleichungen) in Parametern und der Linearität (der Gleichungen) in Variablen.

Die Definitionsgleichungen stellen Beziehungen zwischen Variablen dar, welche immer gelten, wie beispielsweise die Zusammenfassung der Bestandteile eines Aggregats, wie beispielsweise $I_t = I1_t + I2_t + I3_t$, wobei die endogene Variable nur von dem Wert der Variablen und den gebundenen Parametern abhängt.

Gleichgewichtsbedingungen dienen dazu einen ökonomischen Zustand (jenen des Gleichgewichts) im Modell herzustellen, wie bspw. Marktgleichgewichte, wobei diese auch oftmals Ziel der ökonomischen Analysen sind.

Die letzte Gruppe der Gleichungen sind die ökonomischen Funktionen, welche als Obermenge der folgenden Gleichungstypen zu sehen sind, wobei die Folgenden (speziell Verhaltensfunktionen) oftmals als auf einer Ebene mit den Definitionsgleichungen und Gleichgewichtsbedingungen dargestellt werden:

- Verhaltensfunktionen (bspw. Nachfragefunktion)
- Technische Funktionen (bspw. Produktionsfunktion)
- Institutionelle Funktionen (bspw. Mindestreservenfunktion, Steuerfunktion)
- Zielfunktionen (bspw. Nutzen- und Wohlfahrtsfunktionen)

Da die Klassifizierungen der ökonomischen Bedeutung von Gleichungen nicht eindeutig festgelegt sind und meist nicht eindeutig von der Gleichung auf die geplante Form Rückschlüsse gezogen werden können (auch wenn dies in heuristischer Form geschehen kann, d.h. bestimmte Formen können manchmal direkt ausgeschlossen werden, auch wenn der geübte Modellbauer die ökonomische Bedeutung der Gleichung in Zusammenhang mit den beteiligten Variablen oftmals erkennen kann), speziell auch in Anbetracht dessen, dass manche Gleichungen mehreren Arten zugerechnet werden können, müssen Informationen darüber, für den Fall der Verwendung dieser Information im Zuge einer Analyse, vom Modellentwickler angegeben werden.

Modelldarstellungen

Die übliche Vorgehensweise der Modellentwicklung ist bei DSE Modellen das Übersetzen der ökonomischen Annahmen in Gleichungen. So werden die zu modellierenden Variablen

als endogen festgelegt und die vermuteten ökonomischen Effekte und Prozesse, als Beziehungen zwischen den Variablen, qualitativ festgelegt.

In dieser ersten ursprünglichen Form, welche als Strukturform des Modells bezeichnet wird, stehen auf der linken Seite der Gleichung jeweils die beschriebenen endogenen Variablen, und auch der Rechten Seite können nun sowohl endogene laufende, verzögerte und/oder vorausschauende auch exogene laufende, verzögerte und/oder vorausschauende Variable vorhanden sein. Betrachtet man diese Form eines Modells, so kann man alle durch die Sprache der Mathematik ausgedrückten ökonomischen Aussagen, welche das Modell in Form von Gleichungen enthält, noch relativ gut erkennen (vorausgesetzt diese Aussagen würden überhaupt gut umgesetzt – sollte dies nicht der Fall sein, so wird man sie jedenfalls anhand dieser gut kritisieren können).

Unabhängig von der Darstellung in Strukturform, reduzierter Form oder finaler Form können alle Darstellungen anstatt als Gleichungssysteme auch als Matrizen betrachtet werden (im Fall linearer Gleichungen ist dies wohl offensichtlich), was speziell bei ökonometrischen Methoden von Relevanz ist. Die Matrixdarstellung der Strukturform wird dann in folgender Form angeschrieben, wobei die laufenden endogenen Variablen als von den vorbestimmten Variablen, sowie von etwaigen stochastischen Variablen, abhängig dargestellt werden:

$$\Gamma \cdot \bar{z} = \Lambda \cdot \bar{w} + \bar{e}$$

Der Vektor \bar{e} wird von den stochastischen Variablen gebildet, welcher im Fall eines deterministischen Modells jedoch ein Nullvektor wäre. Dabei wäre Γ eine spärlich besetzte quadratische Matrix welche die Parameter der endogenen Variablen in jeder Gleichung enthält (d.h. kommt die j . Variable in der i . Gleichung nicht vor, so ist das der Wert in der Parametermatrix Γ an der Stelle $a_{ij} = 0$), und \bar{z} wäre der Vektor der endogenen Variablen. Die (ebenfalls spärlich besetzte) Matrix Λ würde hingegen die Parameter der exogenen und verzögerten endogenen, d.h. der prädeteterminierten Variablen, enthalten, wobei \bar{w} der Vektor der prädeteterminierten Variablen ist.

Um ein einfacher lösbares und auch kleineres Gleichungssystem zu erhalten werden Modelle zu Berechnung in eine reduzierte Form umgewandelt, in welcher die logischen Strukturen schon nicht mehr so gut erkennbar sind, da manchmal eine Vielzahl an Umformungen und Zusammenfassungen geschehen ist. Ziel der Umformungen ist es, dass in der reduzierten Form nur noch Gleichungen vorkommen, welche auf der linken Seite nur noch vorbestimmte

Variablen aufweisen, d.h. nur mehr exogene und verzögerte endogene Variablen, jedoch keine laufenden endogenen mehr. Dazu wird jede endogene Variable, deren rechte Seite der sie festlegenden Gleichung, selbst laufende endogene Variablen enthält, direkt in die Gleichungen, in welchen sie selbst enthalten ist, eingesetzt. Da es nun nicht mehr zwangsläufig für jede endogene Variable eine sie direkt beschreibende Gleichung gibt, d.h. nicht mehr jede Variable explizit vom System berechnet wird, sondern manche Variable in anderen Gleichungen "aufgegangen" sind, weshalb bei der Umformung selbstverständlich beachtet werden muss, welche Variablen an sich bereits von Bedeutung sind, was speziell bei Entscheidungsmodellen relevant ist. (Darüber hinaus wird auch die semi-reduzierte Form unterschieden)

Grundsätzlich gibt es noch eine weitere, speziellere Darstellungsform, welche noch stärker vereinfacht ist als die reduzierte Form, bei welcher im Gegensatz zu Letzterer zusätzlich noch die vorbestimmten endogenen Variablen entfernt (zusammengefasst) wurden. Diese Darstellung wird als Finale Form bezeichnet, bei welcher die rechte Seite der Gleichungen nur mehr laufende und verzögerte exogene Variable explizit sichtbar enthält, d.h. die endogenen nur mehr von exogenen Variablen abhängen. Dazu wird die reduzierte Form einem Eliminationsverfahren unterzogen, welches jedoch nicht auf jede Gleichung / jedes Modell anwendbar ist. Diese Darstellung wird hauptsächlich zu Diagnose, Prognose und wirtschaftspolitischen Analysen verwendet, ist jedoch nur eine Umwandlung der strukturellen Form, d.h. Modelle werden nicht nativ in dieser Form entwickelt – außer die Gleichungen in Strukturform sind (mehr oder weniger zufällig) von Beginn an, nicht von endogenen Variablen abhängig.

Um die Strukturen und inneren Abläufe der vorgestellten ökonomischen Modelle nachvollziehen zu können wird es daher, wie bereits erwähnt, jedenfalls nötig sein die Strukturform des Modells zu betrachten, da sowohl in der reduzierten Form, als auch in der finalen Form, ein Großteil der Informationen nicht mehr ablesbar sein wird, da die mathematische Umformulierung und Vereinfachung des Modells die Abbildung der ökonomischen Strukturen meist bis ins Unerkennliche verschwimmen lässt.

Ein größeres Modell mit einer größeren Anzahl an Gleichungen und Variablen, würde hingegen in jeder der Darstellungsformen ad hoc schlecht zu interpretieren sein, weshalb auch die in den folgenden Kapiteln vorgestellten Methoden entwickelt wurden, dennoch muss jede

weiterführende Analysetechnik, jene Darstellung wählen, welche noch die meisten strukturellen Informationen enthält.

Lösbarkeit von Modellen

Die Frage der Lösbarkeit von ökonomischen Modellen in DSE Form hat seit der Entwicklung immer besserer Lösungs- und Näherungsverfahren, selbst wenn sie sehr rechenintensiv sind, was durch den intensiven Einsatz von Computern jedoch wieder relativiert wird, im Normalfall nicht mehr die Brisanz die sie früher hatte. Dennoch kann man durch Betrachtung des inneren Zusammenhangs der Gleichungen Rückschlüsse auf die Lösbarkeit ziehen, welche auch eine kausale Betrachtung dieser ermöglicht.

Man unterscheidet hier zwischen:

- Rekursive Modelle
- Interdependente Modelle
- Blockrekursive Modelle
- Blockdiagonale Modelle

Die einfachste Art der Lösung ist bei rekursiven Modellen möglich, welche derart (trivial) verknüpft sind, dass mit der Berechnung einer endogenen Variablen begonnen werden kann, welche selbst nur mehr von vorherbestimmten Variablen abhängt, und alle weiteren endogenen Variablen Stück für Stück gelöst werden können, d.h. jeweils nur von vorherbestimmten und/oder in dieser Periode bereits berechneten laufenden endogenen Variablen abhängt, wodurch das gesamte System Stück für Stück gelöst werden kann.

Kompliziertere Lösungsverfahren sind jedoch bei interdependenten Modellen nötig, welche verschachtelt verknüpft sind, d.h. dass die endogenen Variablen gegenseitig voneinander abhängig sind und dadurch nicht einzeln berechnet werden können, also keine einzige endogene Variable im System ist nur von vorherbestimmten abhängig – das System kann daher nur mehr simultan berechnet werden.

Der häufigere Fall ist jedoch eine Mischform der beiden, die Blockrekursivität, wobei es einige Gleichungen gibt, welche voneinander gegenseitig abhängig sind, und auf diese Weise einen Block bilden, welcher nur gleichzeitig gelöst werden kann, wobei es jedoch, im

Gegensatz zum interdependenten Modell, einige endogene Variablen gibt, welche außerhalb dieses Block sind – entweder in Form von einzelnen endogenen Variablen, welche direkt gelöst werden können, bzw. in Form von anderen Blöcken, welche in sich wieder interdependente Blöcke getrennt sind:

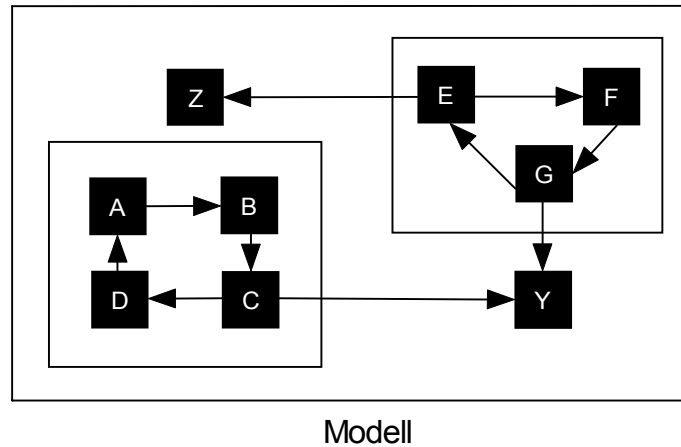


Abbildung 5: Blockrekursive Modelle

Die letzte relevante Möglichkeit sind blockdiagonale Modelle, welche, wie die blockrekursiven Modelle, interdependente Blöcke enthalten, welche jedoch bei blockdiagonalen Modellen überhaupt nicht miteinander kausal verbunden sind. Tatsächlich hat man es daher mit mehreren getrennten Modellen zu tun, welche sich gegenseitig nicht beeinflussen, und ist daher eher als Indikator für einen Fehler im Modell, d.h. eine fehlende Relation, welche die Blöcke miteinander verbindet.

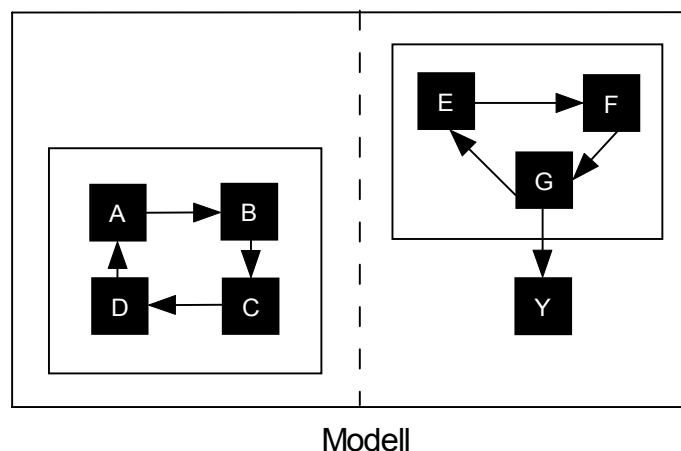


Abbildung 6: Blockdiagonale Modelle

In den folgenden Kapiteln wird zur Vereinfachung der Erklärung einiger Problemstellungen, sowie der Demonstration der entwickelten Techniken, ein einfaches Beispiel eines makroökonomischen Modells eingesetzt werden, welches, aus den folgenden elf Gleichungen besteht ¹⁴:

Produktionsfunktion: Cobb-Douglas Produktionsfunktion mit eingesetzten Koeffizienten zur Schätzung des exogenen technischen Fortschritts:

$$(1) Y_t = (\alpha_{1,1} \cdot (\alpha_{1,2}^{TRENDE})) \cdot ((KAP_t / P_t)^2) \cdot (EMP_t^{(1-2)}) \cdot P_t$$

Definitionsgleichung Kapitalstock:

$$(2) KAP_t = KAP_{t-1} - DEP_t + I_t$$

Lineare Abschreibungsfunktion:

$$(3) DEP_t = \alpha_{3,1} \cdot KAP_{t-1}$$

Lineare Investitionsfunktion: (Verhaltensgleichung):

$$(4) I_t = \alpha_{4,1} - (1 / \alpha_{4,2}) \cdot R_t$$

Arbeitsnachfragefunktion: Dynamisierte Arbeitsnachfrage mit eingesetzter Grenzproduktivität des Kapitals (langsame Anpassung).

$$(5) WR_t = \alpha_{5,1} \cdot WR_{t-1} + (1 - \alpha_{5,1}) \cdot (1 - 2) \cdot (Y_{t-1} / EMP_{t-1})$$

Arbeitsangebot: (im hier angenommenen Gleichgewicht gleich der Beschäftigung) linear abhängig von der Bevölkerungsentwicklung:

$$(6) EMP_t = EMP_{t-1} + \alpha_{6,1} \cdot (POP_t - POP_{t-1})$$

¹⁴ Das im weiteren Verlauf öfter als Beispiel verwendete Modell wurde von Prof. Hardy Hanappi für das ÖNB Projekt als Beispiel zusammengestellt und für Österreich geschätzt. Jegliche ökonomischen Eigenschaften sowie ökonomische Aussagen dieses speziellen Modells sind ausdrücklich nicht Inhalt dieser Arbeit. Das Modell dient in dieser Arbeit lediglich dazu die Eigenschaften mathematischer ökonomischer Modelle für den Leser beispielhaft aufzuzeigen und zu zeigen wie die hier vorgestellten Methoden mit den Eigenschaften solche Modelle umgehen. Für den interessierten können die Datenreihen des Modells im Anhang gefunden werden.

Konsumfunktion: In diesem einfachen Modell wird diese keynesianische Konsumfunktion verwendet, welche nicht zwischen privatem und staatlichem Konsum unterschieden wird:

$$(7) CTOT_t = (\alpha_{7,1} + \alpha_{7,2} \cdot (Y_{t-1} / P_{t-1})) \cdot P_t$$

Zinssatz: Die Gleichung wurde aus der invertierten Sozialproduktidentität mit eingesetzter linearer Investitionsfunktion abgeleitet:

$$(8) R_t = \alpha_{8,1} \cdot (\alpha_{8,2} - (Y_t - CTOT_t - (X_t - M_t)))$$

Preisniveau: Die Gleichung wurde aus der invertierten Gleichgewichtsbedingung des Geldmarkts, mit eingesetzter linearer Geldnachfragefunktion, abgeleitet:

$$(9) P_t = P_{t-1} + (M1_t + \alpha_{9,1} \cdot R_t) / (\alpha_{9,2} + \alpha_{9,3} \cdot (Y_{t-1} / P_{t-1}))$$

Bevölkerungswachstum: Die Bevölkerung wird lediglich linear fortgeschrieben:

$$(10) POP_t = \alpha_{10,1} + \alpha_{10,2} \cdot POP_{t-1}$$

Hilfsfunktion: Misst den Fortschritt der Zeit (t) – wird aus Simulationstechnischen Gründen benötigt:

$$(11) TREND_t = TREND_{t-1} + 1$$

Der Parameter 2 (in den Gleichungen (1) und (5)) entspricht dem Kapitalquote des BIP („Capital share“), wodurch 1-2 der Lohnquote („Labour share“) entspricht. Der Parameter 2 wird meist mit 1/3 angenommen, bzw. in einem Bereich rund um 1/3.

Die Gleichungen Y_t (1), WR_t (5) sowie EMP_t (6) bildet den realen Teil des Modells, wobei die exogene Variable POP_t (10) endogenisiert wurde (Zusätzlich kommt die Hilfsvariable $TREND_t$ zum Einsatz).

Die Gleichungen $CTOT_t$ (7), R_t (8), I_t (4) sowie P_t (9) ergänzen das Modell, wobei die Gleichgewichtsbedingungen des Güter und Geldmarktes bereits implizit in den Gleichungen enthalten sind, und daher etwa R_t (8) keine reine Verhaltensgleichung darstellt.

CGE Modelle

Eine weitere Klasse an Modellen, welche hauptsächlich zur kurzfristigen Politikevaluation eingesetzt wird, sind die Modelle des berechenbaren Allgemeinen Gleichgewichts (CGE Modelle). Diese Modelle basieren hauptsächlich auf Annahmen der neoklassischen Theorie und wurden in Anlehnung an ältere sektorale Input-Output Modelle entwickelt, wobei die einzelnen volkswirtschaftlichen Sektoren, oftmals stark disaggregiert abgebildet werden.

Grob gesprochen werden bspw. die Warenmärkte auf der Nachfrageseite als aus privaten Haushalten, staatlichen Agenten bestehend, sowie aus Firmen auf Seite des Angebots modelliert; die Menge des möglichen Konsums ist dabei durch Budgetbeschränkungen eingeschränkt, wobei das Einkommen, bspw. der Haushalte, aus dem Verkauf ihrer Arbeitskraft an Firmen, sowie aus Erlösen aus Kapitalinvestitionen, resultiert. In dem einige dieser Agenten aus dem Ausland sind, werden auch Exportnachfragen behandelt. Durch den "Verkauf" der Arbeitskraft und des Kapitals der privaten Haushalte an Firmen können diese produzieren, wozu sie von anderen Firmen zusätzlich Zwischenprodukte erwerben. Der Staat hat zusätzlich eine Reihe von Möglichkeiten diverse sektorale Flüsse, mittels Variation von gezielten Steuern und Subventionen, umzuleiten.

Da der Großteil des Modells durch die Abbildung der Input-Output Relationen, d.h. den Wertflüssen zwischen den unterschiedlichen Sektoren gebildet wird, besteht das Modell hauptsächlich aus einer Reihe von Nachfrage- und Angebotsfunktionen, sowie Produktionsfunktionen (welche den technologischen Zusammenhang von Arbeit und Kapital bei der Produktion von Gütern zeigen) und Nutzenfunktionen, welche an die empirischen Daten durch Setzen der Parameter angepasst werden, wobei dies jedoch auf andere Weise geschieht als bei DSE Modellen.

Die neueren CGE Ansätze, welche heutzutage eingesetzt werden, ermöglichen inzwischen auch die Darstellung von (keynesianischen) Ungleichgewichten, wobei die Parameter solcher Modelle, im Gegensatz zu DSE Modellen, jedoch nicht auf für DSE Modelle übliche ökonometrische Weise geschätzt werden. D.h. es wird nicht versucht das Verhalten der Modelle an eine Zeitreihe empirischer Daten anzupassen und so die Entwicklungen einer

Zeitperiode nachzubilden, sondern das System wird auf einen Zeitpunkt kalibriert. Dabei wird ein Benchmarkzeitpunkt als Ausgangspunkt des Systems gewählt, und die Parameter so an die empirischen Daten dieses Zeitpunkts angepasst, dass sich das Modell zu diesem Zeitpunkt im Gleichgewicht befindet. Dabei wird versucht die Daten dieses Zeitpunktes möglichst gut zu replizieren, welche meist aus einer Social Accounting Matrix (SAM) extrahiert wurden, (welche die Aggregate aller Transaktionen wiedergibt, die zwischen den wirtschaftlichen Sektoren (Agenten) innerhalb eines Jahres ablaufen). Neuere Ansätze verlangen dabei nicht mehr, dass das System einem ständigen allgemeinen Gleichgewicht unterliegen muss, sondern nur, dass es sich bei Kalibrierung auf einem stabilen Pfad zu dem Allgemeinen Gleichgewicht befand. Dennoch sind CGE Modelle meist nicht in der Lage längerfristige Ungleichgewichte, wie jenem auf dem Arbeitsmarkt, zu erklären.

Generell liegt der Hauptvorteil von CGE Modellen darin, dass die Beziehungen (Flows) zwischen den Sektoren relativ leicht zu erkennen sind, und auch leicht variierbar sind, wodurch die Analyse alternativer Szenarien, im Vergleich zu einer kalibrierten (und daher empirisch überprüften) Basislösung sehr leicht realisiert werden kann. Darüber hinaus besitzen CGE Modelle meist auch langfristig glaubhafte Eigenschaften, welche der neoklassischen Theorie folgen. Im Allgemeinen eignen sich CGE-Modelle hauptsächlich für Untersuchungen, in welchen keine genaue Prognose der, in folgenden Perioden zu erwartenden, Werte ökonomischer Größen gefragt sind. Ein weiterer Einwand ist, dass diese Modelle meist das Preisniveau nicht bestimmen, und daher nicht gut zur Evaluierung von Fragen der Geld- und Fiskalpolitik geeignet sind.

Algorithmische Modelle

Multiagenten Modelle

In den letzten Jahren wurde einige ökonomische Ansätze immer gefragter, welche versuchen die Mikrofundierung ökonomischer Modelle auf ein neues Niveau zu heben. In engem Zusammenhang mit spieltheoretischen Ansätzen, bzw. durch Formulieren des Modells als Spiel, versucht man hier die Interaktionen der ökonomischen Agenten bis zu den einzelnen Haushalten zu modellieren.

Die Entscheidungen der Agenten, welche entweder als homogen und damit als durchschnittliche Haushalte modelliert wurden, oder als heterogene Gruppe von Agenten, wobei dann meist eine relativ kleine Zahl unterschiedlicher Agenten modelliert wird, welche jeweils für eine Gruppe oder Schicht repräsentativ sind (d.h. sie haben unterschiedliche Nutzenfunktionen / Nutzenmaximierungsstrategien bzw. Möglichkeiten), und dann vielfach repliziert werden (aber aus Gründen der Rechenkapazität teilweise immer noch um einen Faktor geringer als die tatsächlich Anzahl der Agenten in der realen Welt, werden die Ergebnisse der Entscheidungen der Agenten mit korrekten Verhältnissen auf die gesamte Anzahl hochgerechnet, dann kumuliert und erzeugt so, im Fall von makroökonomischen Modellen, die ökonomischen Größen/Aggregatsgrößen.

Bei einem makroökonomischen AL- Modell würden daher aber dennoch die gleichen Größen als Input in Frage kommen, wie bei DSE Modellen, der Output wäre ebenfalls gleich, wobei die qualitative Struktur der Modellrelationen, obwohl die Berechnung in Form einer Agentensimulation auf Mikroniveau geschieht, in aller Wahrscheinlichkeit, dem Modellbauer dennoch bekannt ist. Denn die Methoden, welche die Agenten verwenden um ihre Entscheidungen zu treffen, d.h. welche Variablen des Modells in die Entscheidungsfindung der Agenten miteinbezogen werden (d.h. Teil ihrer Verhaltensgleichung in einem DSE Modell wären), sind im Normalfall dennoch bekannt¹⁵.

¹⁵ Für einige grundlegende Beispiele zum Thema Artificial Life siehe etwa [Epstein_1996]

Single Agent Type vs. Multiple Agent Type

Für den Fall dass es Agentengruppen mit unterschiedlicher Entscheidungsbildung gibt, d.h. wenn man es mit einer Art Multi Agenten Typ – Multiagenten Modell zu tun hat, so variieren meist die Schwellenwerte (Parameter) ihrer Nutzenfunktionen, oder es gibt strukturell unterschiedliche Nutzenfunktionen, wobei die betrachteten Variablen jedoch die gleichen bleiben, lediglich die zeitliche Verzögerung der Variablen variiert.

Die einzelnen Nutzenfunktionen, und damit die Entscheidungsstrategien, variieren noch stärker wenn während der Simulation genetische Algorithmen eingesetzt würden (was jedoch nur bei mittel- bis langfristiger Simulation sinnvoll wäre), egal ob die genetischen Algorithmen nur die Parameter variieren können, oder auch die beteiligten Variablen (was selbstverständlich auch durch Setzen des Parameters einer Variablen zu null geschehen kann). In jedem Fall wird eine Analyse der Modellstruktur, zumindest betreffend einer Beziehung die eine endogene Variable beschreibt, welche nicht alle Agenten auf die gleiche Weise errechnen, d.h. eigentlich einer Anzahl unterschiedlicher Beziehungen, welche gemeinsam die selbe endogene Variable beschreiben, de facto unmöglich, bzw. sinnlos.

Betrachtet man daher ein Modell, welches, zumindest teilweise, keine im vorhinein eindeutig festgelegten Relationen mehr hat (höchstwahrscheinlich in den Verhaltensgleichungen), im Nachhinein an Hand der Daten, so könnte man höchstens eine Art durchschnittliche Relation ermitteln, welche eine Bevölkerung durchschnittlicher Agenten aufweisen würde (die es in dieser Situation nicht gibt). Das aggregierte Verhalten dieser durchschnittlichen Agenten würde jedoch auch wieder dem Verhalten des gesamten Marktes in einem "normalen" DSE Modell entsprechen, selbstverständlich wäre dies aber nur als Interpretation zu Vergleichszwecken zu sehen, bei der das unterschiedliche Verhalten der Agenten auf ein durchschnittliches Verhalten projiziert würde, wodurch es aber nicht mehr als akkurate Wiedergabe der Modellstrukturen angesehen werden könnte, sondern nur mehr als Extraktion der allgemeine Aussagen des Modells über den Zusammenhang der ökonomischen Größen. (Also eine mathematische Interpretation der Repräsentation)

Im Gegensatz zu DSE Modelle erhofft man sich jedoch bei Artificial Life Modellen, stärker noch als bei anderen mikrofundierten Modellen, das Auftreten ("Emergence"), bzw. die Beobachtbarkeit von ökonomischen Effekten und Zusammenhängen, welche erst bei der AL Simulation auftreten.

Diese Wissenschaft der Multiagenten Systeme, welche unter den Begriffen „artificial economic life“, „agent-based economics“ läuft, ist gegenwärtig in schnellem stetigen Wandel und es kann daher schwer beurteilt werden, welche Bedeutung diesen Modellen in naher Zukunft, d.h. in den nächsten Jahren zukommen wird. Eine Reihe von Ansätzen aus diesem Bereich beschäftigte sich in den letzten Jahren hauptsächlich mit der grundsätzlichen Analyse, wie das Verhalten von Agenten, im Bezug auf Auswahl und Evolution von Nutzenmaximierungsstrategien, generell in Form von Computerprogrammen –modellen dargestellt, bzw. realistisch nachgebildet werden kann, wobei prominentere Vertreter, wie etwa John Casti, der Ansicht sind, das ein exaktes Nachvollziehen der einzelnen Abläufe auf Mikroebene nicht das Ziel solcher Analysen ist.¹⁶ Eine Reihe anderer Ansätze versucht inzwischen bereits konkrete Ergebnisse vorherzusagen, wobei diese Modelle in Zukunft vielleicht die besten Möglichkeiten haben werden, komplexe Abläufe zu untersuchen und gute Vorhersagen zu liefern.

Betrachtet man den Umstand, dass Multiagenten Systeme als algorithmische Modelle realisiert werden müssen, so bringt das diesen Modellen, welche in Form eines Computerprogramms realisiert werden, den Vorteil während des Ablaufs nicht notwendigerweise an starre Relationen zwischen den Variablen gebunden zu sein. D.h. es ist möglich etwaige Strukturbrüche in beobachteten Systemen, etwa durch Veränderung der Parameter der Gleichungen, im Modell mit abzubilden. [Hanappi_2001]

Aus all diesen Gründe ist eine Repräsentation eines Artificial Life Modells daher möglich, wobei aber entweder auf eine Reihe der Eigenschaften jedes konkreten Modells direkte eingegangen werden müsste, oder aber von Beginn an die Tatsache in Kauf genommen werden müsste, dass man die genauen Strukturen dieses Modells nicht mehr darstellen kann, sondern nur mehr an die DSE Modelle abgenähert interpretieren kann, wodurch jedoch ein Vergleich mit den Aussagen von DSE Modellen wieder möglich wäre.

¹⁶ Für eingehendere Betrachtungen des Artificial Life, Complexity in Economics und Multiagent Bereichs, etwa Brian Arthur ([Arthur_1997]), John Casti [Casti_1998], oder Robert Axelrod [Axelrod_1997]

1.4 Statistische Modelle

Wie bereits erwähnt gibt es auch Ansätze welche nicht versuchen die Zusammenhänge innerhalb der Blackbox logisch zu erklären, sondern nur mittels statistischer Methoden gefundener Zusammenhänge argumentieren. Diese Modelle werden auch als atheoretische Modelle bezeichnet und gehen davon aus, dass alle den Daten unterstellten Strukturen, welche nicht direkt aus den Daten abgeleitet wurden bereits Fehler enthalten (können).

Algebraische Modelle

VAR Modelle

Der Ansatz der Vektor-autoregressiven Modelle (VAR Modelle) entstand, wie bereits erwähnt, aus der Kritik von Sims (1980) an den, bis dahin hauptsächlich eingesetzten, Modellen im Stil der Cowles Commission, aber auch an anderen ökonomischen Modellen.

Der Hauptpunkt der Kritik war, dass alle ökonometrischen geschätzten Modelle schon allein dadurch fehlerbehaftete sind, dass den Daten, noch vor exakter Sichtung und Schätzung, bestimmte theoretische Zusammenhänge unterstellt werden.

Die Grundaussage, dass man sich nicht absolut sicher sein kann, welche der, möglicherweise an einem ökonomischen Prozess beteiligten Variablen, nun in welcher Gleichung mit welcher Verzögerung vorkommen sollte, was in diesem Punkt, der ursprünglichen Kritik an ökonometrischen Makromodellen (d.h. zu Zeiten von Tinbergen's ersten Modellen) zumindest ähnlich ist. Der Ursprung der Kritik von Keynes, welcher der Meinung war, dass bei diesen Methoden zu wenig theoretisches Vorwissen in Verwendung ist, war demgegenüber ein anderer.

Sims ging in seiner Kritik jedoch noch viel weiter, da er der Meinung war, dass auch die Auswahl der Variablen und Zusammensetzung zu Gleichungen (auch bereits ohne möglicherweise schlecht geschätzte Parameter sowohl Konstante und Koeffizienten) Fehler enthalten kann, bzw. jedenfalls enthält, da jede a priori Theorie die nicht rein auf dem

statistischen Zusammenhang der Daten basiert, fehleranfällig ist. Der Lösungsansatz war daher, dass es besser ist gar keine wirtschaftstheoretischen Überlegungen in das Modell einfließen zu lassen und überhaupt keine ökonomischen Gleichungen festzulegen.

Dies beginnt schon damit, dass es keine Klassifizierung zwischen endogenen und exogenen Variablen mehr gibt, da einfach alle möglichen Größen als endogen definiert werden. (Dennoch muss eine Liste an am Modell beteiligten Variablen erstellt werden, was eigentlich auch wieder als ökonomischer Eingriff betrachtet werden könnte, denn auch wenn diese Liste oftmals alle verfügbaren umfasst, ist die Frage wie stark disaggregiert diese Daten sind, bzw. inwieweit die Einflüsse von Nachbarländern beachtet werden.)

Betrachtet man ein DSE Modell in Form von Matrizen, so sind die Parametermatrizen im Normalfall sehr spärlich besetzt, d.h. man geht von Beginn an davon aus, dass jede endogene Variable nur von einer kleinen Anzahl an Modellvariablen abhängt, welche auch explizit bestimmt werden. Bei VAR Modellen geht man hingegen grundsätzlich davon aus, dass diese Variablen nicht von einem Menschen, aufgrund vermuteter oder empirisch bewiesener Zusammenhänge, entschieden werden soll. Daher werden in einem ersten Schritt einmal, bei der Bestimmung von endogenen Variablen, grundsätzlich alle Variablen angewandt (d.h. eine voll besetzte Matrix), und dann mittels ökonometrischer Schätzung aus den empirischen Daten, die Signifikanten ermittelt. Dabei wird auch für jede Variable jede erdenkliche kausale Verzögerung (Lag) getestet, da die ad hoc Annahme von bestimmten Verzögerungen ebenfalls als zu starke Einschränkung angesehen wird – wobei jedoch meist von sehr kurzen Verzögerungen (etwa eine Periode) ausgegangen wird. Darüber hinaus wird bei VAR Modellen meist von linearen Beziehungen ausgegangen, ebenfalls unter dem Hauptargument, dass entweder bestimmt werden müsste welche Beziehungen nicht-linearer Natur sind, bzw. in welcher Form - oder aber eine noch größere Anzahl an Möglichkeiten getestet werden müsste. Jedoch ist auch diese Annahme der Linearität eine Vorentscheidung (des Modellentwicklers), welche nach dem VAR Ansatz eigentlich ausgeschlossen werden sollte.

Theoretisch kann dieser Ansatz gute Vorhersagen für einige wenige (eine) zukünftige Periode(n) treffen, da er sich den tatsächlichen Daten vermutlich besser anpassen kann als dies mit ökonomisch-theoretischen Modellen möglich ist. Dieser Vorteil geht jedoch meist bei der Vorhersage mehrerer Perioden verloren, da die statistischen Methoden meist nur die

gegenwärtigen Trajektorien des Systems fortsetzen, welche jedoch nicht unbedingt Rückschlüsse über längerfristige Entwicklungen geben.

In jedem Fall ist das Hauptproblem von VAR Modellen für Fragen der Politikevaluation, dass alle Variablen als endogen festgelegt wurden, wodurch es keine exogenen Variablen gibt, was automatisch auch bedeutet, dass es keine Instrumentvariablen gibt, wodurch der Einfluss bestimmter Änderungen auf das System auch nicht getestet werden kann.

Computational Economics Modelle

Einige Ansätze, welche einen ähnlichen Vorgehensansatz wählen, kommen aus Richtung der Künstlichen Intelligenz und verwenden Programme, welche die inneren Strukturen des Systems selbst entwickelt, wobei der Grad der Selbstständigkeit der Software hier variieren kann. Einige dieser Programme unterstützen die Modellierer lediglich, oder suchen bessere Lösungen beginnend bei einem bestimmten Punkt, wobei man meist versucht Muster in vorhandenen Datensätzen zu finden und Vorhersagen anhand dieser Treffen zu können.

Andere Programme entwickeln fast völlig selbstständig neue mathematische Modelle, ein Beispiel für einen solchen Ansatz, welcher sich aus der Statistik und Informatik, entwickelt hat, ist beispielsweise der Bereich der „Computometrics“ [Kaboudan_2001], einem Bereich der Computational Economics, welcher bisher sehr komplexe Modelle liefert, die in ihrer Struktur sehr chaotisch aussehen, aber bereits mathematisch sinnvolle Ergebnisse und oftmals gute Voraussagen liefern. Dennoch können durch solch extreme Methoden gegenwärtig keine Strukturen beurteilt werden, da der Struktur der Modelle gegenwärtig kaum ökonomische Theorie zugrunde liegt, was jedoch im Sinne des Entwicklers liegt, welcher hofft mit Hilfe dieser Modelle früher oder später neue, sinnvolle Strukturen zu entdecken.

Gegenwärtig werden diese Modelle daher genützt um kurzfristige Vorhersagen zu treffen, ein tieferer geplanter Sinn, aus ökonomisch theoretischer Sicht läge jedoch darin, dass solche Programme anhand der Daten früher oder später reale Strukturen unterstellen könnten, d.h. von sich aus neue theoretische Modelle entwickeln könnten, was jedoch bisher nicht erreicht werden kann.

Darüber hinaus gibt es eine große Anzahl an weiteren Modellierungstechniken im Bereich der Computational Economics, auf welche hier jedoch, aufgrund ihrer großen Zahl und der relativ schnellen Weiterentwicklung dieses Bereichs, wodurch die Aktualität vorgestellter Modelle ohnehin nicht lange gegeben ist, weshalb hier nicht weiter auf diesen Bereich eingegangen wird.¹⁷ Die Klassifizierung von Modellen aus dem Bereich der Computational Economics, in Bezug auf die vorgestellten Kategorien, kann jedoch nicht für die gesamten Bereich erfolgen, da er eine Vielzahl von Modellen abdeckt, welche unterschiedliche Ausprägungen haben können. Die Beurteilung der Möglichkeit bzw. Sinnhaftigkeit der visuellen Darstellung einer bestimmten Modellierungsmethode kann dabei sinngemäß, analog zu den im letzten Kapitel vorgestellten Beispielen, mittels der bereits vorgestellten Kriterien, erfolgen.

¹⁷ Für eine eingehende Besprechung von Computational Economics Methoden und Modellen siehe etwa [Amman_1996]

1.5 Fokus der weiteren Analysen

Die zuvor vorgestellten, rein statistisch basierten, Modelle sind nicht von großem Interesse für diese Arbeit, da vermutlich kein großes Interesse an der Analyse ihrer Strukturen bestehen, da sie ja nicht vorgeben ökonomische Theorie zu enthalten, wobei dieser Effekt speziell bei Methoden wie Compumatic, welche genetische Algorithmen zur Erzeugung der Modellstrukturen (inklusive transzendenter Operatoren) verwenden, extrem stark wirkt.

Nicht desto trotz, könnte sich eine Analyse mit den hier vorgestellten Methoden auch für diese Modelle als interessant erweisen, bzw. zumindest für VAR Modelle, da es möglich ist zu Veranschaulichen, wie ökonomisch logisch oder unlogisch, die Strukturen eines untersuchten Modells aussehen. Man sollte wohl annehmen, dass ein VAR Modell, welches gute Vorhersagen treffen kann, doch zumindest teilweise ökonomische “Wahrheiten“ widerspiegelt – tut es dies nicht, d.h. zeigen sich keine ökonomisch sinnvollen Strukturen, so ist dies eine weitere Möglichkeit diese Kategorie an Modellen zu kritisieren, bzw. vielleicht sogar zu verbessern.

Im Fokus der weiteren Annahmen und Analysen werden daher jedenfalls Modelle stehen, welche versuchen ökonomischen Strukturen, unter Berücksichtigung ökonomischer Theorie, abzubilden. Hier sollen jedoch auch alternative Methoden berücksichtigt werden, so lange diese ökonomische Relationen abbilden, auch wenn dies bspw. exklusiv in Form von Computerprogrammen geschieht.

In jedem Fall haben alle hier vorgestellten Arten makroökonomischer Modelle seit Tinbergen, zumindest eine wichtige Gemeinsamkeit; sie beschreiben die Abläufe in der Blackbox mittels eines mathematischen Modells, was als Fixpunkt der weiteren Betrachtungen dienen muss. In jedem mathematischen (analytischen) makroökonomischen Modell werden die relevanten ökonomischen Größen zu Variablen und die Interaktionen und Beziehungen zwischen den Größen zu Gleichungen, welche die Größen in Relation zueinander setzen, auch wenn manche Ansätze in ökonomisch nicht sinnvollen Gleichungen resultieren.

Eine Reihe möglicher Ausprägungen von logischen Modellrelationen, sowie ihre Implikationen auf die nötigen Analysen, werden im Teilkapitel über ökonomische Strukturen genauer untersucht und dargestellt.

2 Alternative Sichtweisen ökonomischer Modelle

Wie bereits erläutert werden die meisten makroökonomischen Modelle, zumindest ab einem bestimmten Punkt, als mathematisches Modell formuliert, sei es zur Vorhersage, Validierung von Theorien (des Modells) oder Politikevaluation. Ein noch viel tiefer liegender Grund für die Repräsentation von ökonomischen Modellen als Gleichungssystem ist die Übersetzung von, oftmals mehrdeutigen bzw. bei sprachlichen Unterschieden leicht missverständlichen, textuellen Modellen, in eine international einheitliche exakte Sprache – jene der Mathematik. Im Gegensatz zu anderen natürlichen „gemeinsamen“ Sprachen (common languages), wie beispielsweise Englisch, handelt es sich bei der Mathematik um eine abstrakte Sprache, welche kein Mensch nativ beherrscht.

Solange es sich um kleinere Modelle ohne zeitliche Verzögerung handelt, sind die resultierenden mathematischen Modelle, sowohl kurz- als auch langfristig, relativ leicht überblickbar und stellen damit auch tatsächlich eine Reduktion der Komplexität des Modells in Punkto Verständlichkeit dar. Sobald die Modelle jedoch aus einer größeren Zahl an Gleichungen bestehen (größer werden) oder mehrere unterschiedliche zeitliche Verzögerungen aufweisen, sind diese Modelle, bzw. ihre impliziten Aussagen nicht mehr leicht überblickbar, bzw. kontrollierbar. Sie können dann Effekte enthalten welche erst zeitlich verzögert und darüber hinaus indirekt wirken und daher de facto nicht ohne eingehende Analyse und einzelne Berechnung der Auswirkungen, erkennbar sind.

Betrachten wir also erneut die Grundlagen der mathematischen Repräsentation von ökonomischen Modellen. Die zentrale Zielsetzung ist es dabei die ökonomischen Größen, bzw. gemessenen Indikatoren für diese Größen, sowie Hilfsgrößen miteinander in messbare Beziehung zu setzen.

Auch wenn Tinbergen vermutlich hauptsächlich an Gleichungssysteme dachte als er in einem Artikel die Essenz ökonomischer Modelle zusammenfasste, gab er dennoch eine sehr offene Definition für Modelle an, welche sich auch auf andere, neuere Arten der Modellformulierung übertragen lässt. Er sprach darin hauptsächlich von einer Liste von Variablen, sowie einer

Listen von Gleichungen (für den Fall von mathematischen Modellen) oder Relationen welchen die Variablen folgen müssen.¹⁸ [Tinbergen_1981]

Die gängigste Methode dies zu tun ist, wie bereits ausführlich erwähnt, mittels mathematischer Gleichungssysteme, jedoch ist dies nicht die einzige Möglichkeit der Forderung der Messbarkeit und Deterministik der Modelle nachzukommen – es gibt auch neuere Ansätze die dies, etwa in Form von Computerprogrammen, ermöglichen. Solche Programme, welche beispielsweise Artificial Life Modelle implementieren, liegen oftmals nicht in Form expliziter Gleichungssysteme, sondern nur in algorithmischer Form, d.h. als Computerprogramm vor.

Auch hier ist lediglich bekannt welche Variablen an der Berechnung welcher endogenen Variablen beteiligt sind, auch wenn die genauen Operatoren und Koeffizienten nicht bekannt sein sollten. Diese algorithmische Form steht in der Hierarchie theoretisch über der algebraischen Form da, je nach Programmiersprache, jedes algebraische Modell in ein algorithmisches umgewandelt werden kann, da meist alle algebraischen und transzendenten Operatoren berechnet, bzw. genähert werden können. Umgekehrt kann jedoch nicht jede algorithmische Form direkt und eindeutig, bzw. zumindest nicht effizient auf ein Gleichungssystem reduziert werden.

Ein Vergleich zwischen Modellen unterschiedlicher Methodik ist jedoch schwer, bzw. überhaupt nur möglich wenn gemeinsame Eigenschaften gefunden werden, die einen Vergleich auf Basis von einheitlichen Fakten ermöglichen.

Betrachten wir daher erneut die Mathematik als Sprache, welche als Ergebnis eine algebraischen Repräsentation eines Modells mittels Gleichungen, welche, auf ihrer einfachsten Ebene, aus Variablen und Relationen zwischen den Variablen bestehen.

Die Variablen in den Gleichungen entsprechen den Worten in natürlichen Sprachen, die Relationen (Operatoren) zwischen den Variablen entsprechen den Bindeworten in natürlichen Sprachen. Diese Variablen und Relationen (Worte und Bindeworte) können nun nach semantischen mathematischen Regeln zu Gleichungen (Sätzen) zusammengesetzt werden.

¹⁸ Zusätzlich sprach er von der Notwendigkeit des Testens der Gültigkeit der Gleichungen, wozu seiner Meinung nach das Schätzen der Koeffizienten jedenfalls erforderlich ist und oftmals zur Korrektur der Variablen- und Gleichungsliste führen wird. Dies beeinflusst jedoch nicht die Notwendigkeit weiterer grundlegender Strukturen außer Variablen und Relationen zwischen diesen.

Das Zusammenfassen von Sätzen (Gleichungen) zu Texten (Gleichungssystemen) führt zu Modellen.

Wie in natürlichen Sprachen erfordert die Sprache der Mathematik die Einhaltung von Syntax und Semantik, wobei dem Einhalten dieser beiden eine größere Bedeutung beikommt als bei natürlichen Sprachen, da Abweichungen nicht automatisch ausgeglichen werden können und oftmals zu weit entfernten Fehlern führen können.

Betrachtet man mathematische Modelle als eine internationale Sprache der Ökonomie und analysiert ihre Bestandteile, wie die einer normalen Sprache so kann man auch leicht sehen wie der Zusammenhang zwischen diesen bestimmt ist. In diesem Sinne dient die algebraische Mathematik nur als Mittel zum Zweck der Berechnung und Darstellung.

Versuchen wir die Struktur des Modells zu betrachten um die kausalen Zusammenhänge, zumindest auf einem einfachen Niveau, darstellen zu können wird daher vorerst nur die Information benötigt, welche Variablen welche anderen Variablen in welchem Zeitpunkt beeinflussen. Um diese grundlegende Information abzubilden, so dass sie aus der algebraischen Form als auch aus jeder deterministischen algorithmischen Form extrahierbar ist, kommt die *General Function Form* zur Anwendung. Diese wird als Grundlage der weiteren Betrachtungen dienen, da sie zwei Merkmale hat, welche bei der weiteren Verarbeitung und Darstellung große Vorteile bringt. Bei der Darstellung in Function Form werden die bestimmten Variable auf der linken Seite der Gleichung, als Funktion der bestimmenden Variablen auf der rechten Seite der Gleichung, angeschrieben. Die General Function Form verlangt darüber hinaus, dass die bestimmenden Variablen lediglich als Auflistung, ohne Vorzeichen, Koeffizienten, Operatoren und Konstante angegeben werden. Wäre also Z die bestimmte Variable und X und Y die bestimmenden Variablen so würde die General Function Form der Gleichung folgendermaßen aussehen:

$$Z = f(X, Y)$$

Da es sich bei dem Großteil der ökonomischen Modelle um dynamische Modelle handelt, ist es nötig eine Form der General Function Form einzusetzen, welche die relativen zeitlichen Verzögerungen, analog zur Darstellung als Differenzgleichungen bei Modellen in Form von Gleichungssystemen berücksichtigt.

Daher müssen auch statische Relationen, welche im selben Zeitschritt ablaufen, angegeben werden, d.h. X und Y sind im als gegenwärtigen Zeitschritt t erhobene Größen zu verstehen, d.h. X und Y stehen eigentlich für X_t und Y_t .

Um ein Beispiel anhand ökonomischer Gleichungen zu geben betrachten wir die zwei folgenden Gleichungen des im Anhang zu findenden klassischen Modells:

$$(2) KAP_t = KAP_{t-1} - DEP_t + I_t$$

$$(3) DEP_t = 0.04916237323 * KAP_{t-1}$$

$$(4) I_t = 128839.535 - (1 / 0.00007416869087) * R_t$$

Die erste Gleichung welche KAP_t (den Kapitalstock dieses Modells) im aktuellen Zeitpunkt t festlegt ist trotzdem es sich um ein geschätztes Modell handelt, in einer leicht lesbaren Form. Sobald jedoch geschätzte Konstante wie in der zweiten Gleichung, welche DEP_t (Depreciation – Abwertungen / Abschreibungen) beschreibt, vorkommen, so reduziert sich die Lesbarkeit bereits stark. Betrachtet man die dritte Gleichung, welche eine Verhaltensgleichung darstellt und die Reaktion der Investitionen I_t auf Veränderungen der Sekundärmarktrendite R_t beschreibt, so sieht man, dass die Gleichung noch schwerer lesbar wird sobald geschätzte Koeffizienten dazukommen. Der Einfluss von R_t auf I_t kann jetzt nur mehr vermutet werden, da sogar das Vorzeichen sehr stark von den jeweiligen Daten abhängt. Um mehr Informationen als diese übermitteln zu können wird jedenfalls ein Visualisierungsansatz nötig sein – um dies zu tun muss jedoch erst ein Schritt zurück gemacht werden. Stellen wir daher die drei obigen Gleichungen in General Function Form dar, dann sieht dies folgendermaßen aus:

$$(2) KAP_t = f (KAP_{t-1}, DEP_t, I_t)$$

$$(3) DEP_t = f (KAP_{t-1})$$

$$(4) I_t = f (R_t)$$

Analog kann diese Art der Darstellung auch aus jedem Computerprogramm extrahiert werden, da sie nur aussagt, welche Variablen in der Berechnung welcher endogenen Variablen beteiligt sind, ohne bestimmte Operatoren vorzuschreiben oder zu verlangen – eine Information welche der Softwareentwickler jedenfalls benötigt.

Kehren wir also zu der Betrachtung der Zur Betrachtung verschiedener Problemstellungen der weiteren Analyse, welche sich durch die dynamische Natur der Modelle ergeben können, nehmen wir nun an, dass die Wirkung der einzelnen beeinflussenden Variablen, wie beispielsweise KAP_{t-1} , DEP_t , I_t im Fall der ersten Gleichung, auf die beeinflusste Variable, KAP_t , voneinander getrennt betrachtet werden kann. Auch sollten diese einzelnen Einflüsse, aufgrund Unkenntnis der Formeln bei algorithmischen Modelle nicht bekannt sein, bzw. die unterschiedlichen Einflüsse aus einer bekannten algebraischen Form nicht einfach herauszurechnen sein, so werden wir hier trotzdem annehmen, dass zumindest die Wirkung ermittelbar ist. Die Argumentation dafür lautet, dass wir diese einzelnen Beziehungen, trotz Unkenntnis dieser, mit Hilfe von Simulationen der Modelle annähernd berechnen können werden, solange entweder die Gleichungen inklusive der zugehörigen Daten, beziehungsweise die algorithmische Form, d.h. das Computerprogramm, vorliegt, worauf in den folgenden Kapiteln noch eingehender eingegangen wird. Betrachten wir vorerst die einzelnen Variablen, und führen dazu eine Schreibweise ein welche von der beeinflussenden (d.h. der in dieser Gleichung unabhängigen¹⁹) endogenen oder exogenen Variablen, mittels eines Pfeils auf die abhängige Variable zeigt, dann hätte bspw. eine Gleichung mit der allgemeinen Funktions Form $Y_t = f(X_t)$, die kausale Form $X_t \rightarrow Y_t$. So ergeben sich aus (2) die folgenden drei separaten kausalen Verbindungen, wobei, wie erwähnt, die Annahme getroffen wird, dass diese drei tatsächlich getrennt betrachtet werden können:

$$(2a) KAP_{t-1} \rightarrow KAP_t$$

$$(2b) DEP_t \rightarrow KAP_t$$

$$(2c) I_t \rightarrow KAP_t$$

Betrachtet man diese Relationen, so sehen diese, da man ja im Moment nur die Relationen einer einzelnen Gleichung betrachtet, aus als wären diese drei lediglich triviale Beziehungen, welche lediglich eine einfache kausale Struktur haben. Im Normalfall werden komplexere Beziehungen erst bei Betrachtung mehrerer Gleichungen auftreten, bzw. erst bei Betrachtung des gesamten Modells. In jedem Fall sind die impliziten kausalen Strukturen des Modells, und

¹⁹ Diese unabhängigen Variablen müssen, bei Betrachtung des Gesamtsystems, jedoch nicht notwendigerweise unabhängig sein, denn im Endeffekt sind nur exogene Variablen vom System unabhängig. Dies führt jedoch dazu, dass nur bei Betrachtung des Modells als Ganzes die tatsächlich unabhängigen Variablen erkannt werden können. Daher wäre es sinnvoll ist, die Variablen bei einer Analyse eines solchen Modells im Vorhinein als systemunabhängige (exogene) Variable zu kennzeichnen, wodurch Exogene auch bei Betrachtung einzelner Relationen als solche zu erkennen wären.

damit die Annahmen, erst bei Betrachtung des gesamten Modells einschätzbar, auch wenn diese nach einer etwaigen Sortierung oder Gruppierung auch wieder getrennt beobachtet werden können.

Nehmen wir nun der Einfachheit halber für einen Moment an, dass (2a) – (2c) ein eingeschränktes Modell M' definieren, und schreiben wir die Darstellung dieser kausalen Beziehungen als eine Menge an Variablen A und einer Menge an Beziehungen B um. Betrachten wir nun die Beziehungen B , welche jeweils von einer Variablen (bspw. DEP_t in (2b) zu einer anderen zeigen (bspw. KAP_t in (2b)) als Inzidenzfunktion über der Menge der Variablen A , welche der Elemente aus B eindeutig ein geordnetes Paar an Variablen aus A zuordnet, dann bekommen wir folgende Repräsentation der grundlegenden Beziehungen des eingeschränkten Modells M :

$$\begin{aligned}
 M &= (A, B) \\
 A &= \{ KAP_t, KAP_{t-1}, DEP_t, I_t \} \\
 B &= \{ kap_1, dep_1, i_1 \} \\
 f(kap_1) &= (KAP_{t-1}, KAP_t) \\
 f(dep_1) &= (DEP_t, KAP_t) \\
 f(i_1) &= (I_t, KAP_t)
 \end{aligned}$$

Diese Repräsentation ist eine andere Darstellung der Gleichung (2), unter Voraussetzung der zuvor genannten Möglichkeiten betreffend der Unterscheidbarkeit der einzelnen Beziehungen zwischen den Variablen, welche das Modell, bzw. in diesem Fall die Gleichung, lediglich aus einem anderen Blickwinkel betrachtet.

Betrachten wir nun im Vergleich dazu die allgemeine Definition von Graphen aus dem Bereich der diskreten Mathematik (Graphentheorie)²⁰ siehe bspw. [Bronstein_2001], welche speziell in der Informatik große Bedeutung erlangt hat, so sehen wir, dass ein *endlicher gerichteter Graph* G ebenfalls aus einer endlichen Menge an *Knoten* V , sowie einer endlichen Menge an *gerichteten Kanten* (auch als *Bögen* bezeichnet) E besteht auf welcher eine

²⁰ Eine spezielle Form von Graphen, welche jedenfalls allgemein bekannt ist, sind die Bäume welche, aus graphentheoretischer Sicht, zyklusfreie d.h. schlingenfreie, gerichtete Graphen sind. Ein Beispiel dafür wären Stammbäume (Familienbäume), sowie ähnliche Konstrukte die Hierarchien darstellen, welche der voriger Definition genügen.

Inzidenzfunktion definiert ist, welche den Elementen aus E jeweils *geordnete Paare* von Knoten aus V zuordnet ²¹:

$$G = (V, E)$$

$$V = \{ v_1, v_2, \dots, v_n \}$$

$$E = \{ e_1, e_2, \dots, e_n \}$$

$$f(e_1) = (v_1, v_2)$$

....

$$f(e_n) = (v_2, v_n)$$

Man kann leicht erkennen, dass die Charakteristika ökonomischer Modellrelationen, wie sie zuvor aus der General Function Form des Modells abgeleitet wurden, mit der Definition eines Graphen übereinstimmen, d.h. dass ein ökonomisches Modell auch als Graph geschrieben und dargestellt werden kann. Die Ähnlichkeit bzw. Äquivalenz von gerichteten Graphen und ökonomischen Modellstrukturen ist für zwei verschiedene Problemstellungen relevant.

- Die Grundprinzipien der Graphentheorie liefern die Basis zur Bearbeitung bzw. Lösung einer Reihe von Problem- und Fragestellungen, welche sich auch auf ähnliche Konstrukte, wie ökonomische Modelle in geeigneter Darstellung, übertragen lässt.
- Graphen beinhalten bereits per Definition eine Art der graphischen Repräsentation, welche eine Basis zur visuellen Darstellung dieser Konstrukte bietet, welche hier nur kurz angesprochen und im Kapitel über Modellvisualisierung genauer erläutert und verweitert wird.

Im Folgenden betrachten wir daher einige relevante Begriffe der Graphentheorie und ihre Übersetzung bzw. Anwendbarkeit auf wichtige Faktoren ökonomischer Modelle, anhand der Gleichungen des Beispielmodells.

²¹ Die Graphentheorie unterscheidet zwischen gerichteten und ungerichteten Graphen, wobei ungerichtete Graphen eine Verallgemeinerung darstellen, wobei der einzige formale Unterschied darin liegt, dass die Inzidenzfunktion den Kanten aus E lediglich ungeordnete Paare an Knoten aus V zuordnet. Die Schreibweise der Inzidenzfunktion für ungerichtete Kanten ist durch die Angabe einer Menge gekennzeichnet (d.h. geschwungene Klammern: $f(e_k) = \{ v_i, v_j \}$). Im Gegensatz dazu kommen in unseren Graphen vorerst lediglich gerichtete Kanten vor, welche als geordnetes Paar angeschrieben werden (d.h. runde Klammern: $f(e_k) = (v_i, v_j)$).

2.1 Ökonomische Strukturen aus graphentheoretischer Sicht

In der graphischen Darstellung der Graphen werden Knoten, welche nun unsere Modellvariablen, d.h. in aller Regel ökonomische Größen sowie Hilfsgrößen, repräsentieren, als Punkte oder kleine Kreise gezeichnet. Die gerichteten Kanten, welche die Relationen zwischen den Variablen definieren, werden als Verbindungslinien mit Pfeilspitze eingezeichnet, welche von dem beeinflussenden Knoten (der bestimmenden Variablen) ausgehen und auf den beeinflussten Knoten (die bestimmte Variable) zeigen. Der Graph M , welchen wir zuvor aus der Gleichung (2) des Beispielmodells abgeleitet haben, würde daher folgendermaßen aussehen:

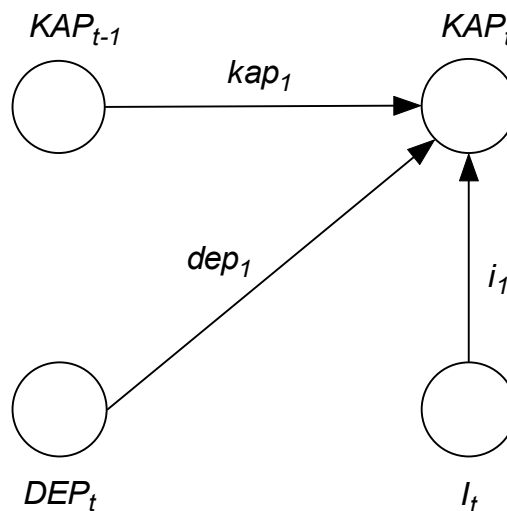


Abbildung 7: Elementare Modellbeziehungen als Graph (M)

Das Diagramm zeigt nun die elementaren Beziehungen, welche in der Modellgleichung (2) enthalten waren²². Eines der Merkmale von Graphen, das sich aus der Graphentheorie ergibt, ist die *Adjazenz*, d.h. Nachbarschaft, welche für Knoten definiert ist die durch eine Kante verbunden sind, und daher nun auch für die (Repräsentation der) Modellvariablen definiert ist. Im Fall der gerichteten Graphen, welcher für uns größere Bedeutung hat, ist beispielsweise

²² In der gegenwärtigen Darstellung kann die Art der Einflussnahme, d.h. stärkende (positive) oder verringernde (negative) Beziehung nicht abgelesen werden, dies wird in späterer Folge durch Gewichtung der Kanten geschehen, wozu mehr Informationen als nur die General Function Form nötig sein werden, wozu es eine Vielzahl an Möglichkeiten gibt, was im Kapitel über ökonomischen Visualisierung genauer erläutert wird.

DEP_t benachbart zum Knoten KAP_t , wobei DEP_t als *Startpunkt* und KAP_t als *Zielpunkt* der Kante dep_t bezeichnet werden, d.h. $f(dep_t) = (DEP_t, KAP_t) \in B$.²³ Der Begriff der Nachbarschaft in Graphen (und auch Modellen) wird spätestens bei der Untersuchung von Graphen mit komplexen Strukturen, wie etwa Netzwerken, interessant und wird später vertieft werden.

Kausalität

Nun da auch eine graphische Darstellung der kausalen Zusammenhänge zwischen ökonomischen Größen, durch Repräsentation als Graphen etabliert wurde, können auch die grundlegenden „Muster“, welche die Bausteine der Modelle bilden, sowie ihre Auswirkungen, leichter dargestellt werden, was in manchen wissenschaftlichen Büchern bereits in ähnlicher Form, bspw. als Blockdiagramme, meist zu Lehrzwecken, präsentiert wurde, jedoch meist nur dazu dient allgemeine ökonomische Zusammenhänge aufzuzeigen, siehe bspw. [Intriligator_1996] oder [Kleinewefers_1983].

Betrachten wir daher in einem ersten Schritt, welche kausalen Strukturen in (ökonomischen) Modellen generell vorstellbar sind [Kleinewefers_1983], und betrachten diese direkt als Graph, so zeigen sich, unter momentaner Vernachlässigung der temporalen Komponenten, die sechs folgenden kausalen Strukturen (in laufenden endogenen Variablen):

- Einfache Kausalität

$$(X_t \rightarrow Y_t) \quad Y_t = f(X_t)$$



Abbildung 8: Einfache Kausalität als Bogen eines Graphs

Dies ist die einfachste Relation (die triviale Relation), in der X_t direkter Nachbar von (adjazent zu) Y_t ist, welche alle direkt in Beziehung stehenden Variablen aufweisen, wobei bei Betrachtung mehrerer Relationen in einem gemeinsamen Kontext zu

²³ In ungerichteten Graphen wäre die Adjazenz zwischen zwei *Endpunkten* definiert, welche über eine ungerichtete Kante miteinander verbunden werden.

komplexeren Strukturen führen kann, welche jedoch aus denselben elementaren Beziehungen besteht, d.h. alle folgenden Strukturen bestehen aus einer Menge an trivialen Relationen.

- Inputverzweigung

$$(X_t \rightarrow Y_t, Z_t \rightarrow Y_t) \quad Y_t = f(X_t, Z_t)$$

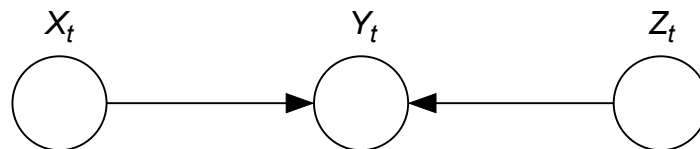


Abbildung 9: Inputverzweigung als Graph

Eine Inputverzweigung ist eine Beziehung in welcher eine abhängige Variable von mehreren Variablen abhängt – graphentheoretisch gesehen bestimmen die Inputverzweigungen eines bestimmten Knotens Y_t seinen Eingangsgrad $d_G^-(Y_t)$ welcher gleich dem Betrag der Anzahl der eingehenden Kanten (d.h. der unabhängigen Variablen in der Gleichung, welche Y_t bestimmt) ist, wobei Schleifen mehrfach gezählt würden. Bei einem Modell in struktureller Form können die Inputverzweigungen der endogenen Variablen direkt aus den einzelnen Gleichungen erkannt werden, wobei selbstverständlich nur endogene Variable eine Inputverzweigung aufweisen können, da exogene Variable per Definition einen Eingangsgrad $d_G^-(Y_t) = 0$ haben müssen, da sie selbst nicht vom Modell bestimmt werden.

- Outputverzweigung

$$(Y_t \rightarrow X_t, Y_t \rightarrow Z_t) \quad X_t = f(Y_t), Z_t = f(Y_t)$$

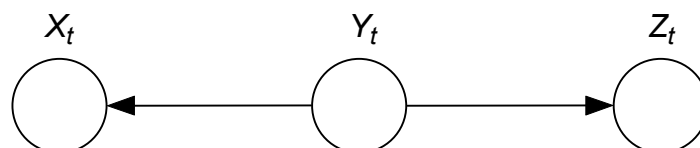


Abbildung 10: Outputverzweigung als Graph

Eine Outputverzweigung bezeichnet eine Variable (endogene oder exogene), welche direkten Einfluss auf (Beziehungen zu) mehrere Variable hat – graphentheoretisch gesehen bestimmen die Outputverzweigungen den Ausgangsgrad des betrachteten

Knotens Y_t als $d_G^+(Y_t)$ gleich dem Betrag der Anzahl der ausgehenden Kanten. Der Ausgangsgrad eines Knotens kann nur durch Betrachtung des gesamten Modells erhoben werden, da er alle Vorkommnisse einer Variablen in den Modellgleichungen beschreibt.

- Kausalkette

$$(X_t \rightarrow Y_t, Y_t \rightarrow Z_t, Z_t \rightarrow W_t) \quad Y_t = f(X_t), Z_t = f(Y_t), W_t = f(Y_t)$$



Abbildung 11: Kausalkette als elementare Bahn eines Graphs

Die Verbindung mehrerer verbundener Relationen einfacher Kausalität, d.h. eine Folge F mehrerer benachbarter Kanten/Bögen eines Graphen, welche keinen Bogen des Graphen doppelt enthält, wird als Kette bezeichnet (wobei diese Struktur meist nur ein Teil eines größeren Modells bzw. Graphen ist). Ist in dieser Folge der Startpunkt eines Knotens gleich dem Zielpunkt seines Vorgängers d.h. die Folge als solches durchgehend gerichtet, so spricht man von einer Bahn. Wenn die Knotenfolge nun keinen Knoten doppelt enthält (d.h. sich die Kanten nicht durch einen Knoten kreuzen), so spricht man von einer elementaren Kette bzw. Bahn. Auf diesen Folgen ist nun zusätzlich zur Adjazenz ein Begriff der Länge definiert, welchen ich im Fall von Bahnen als kausale Entfernung interpretiere; so hat das obige Beispiel der Bahn $F = (xy_1, yz_1, zw_1)$ eine Länge von drei, d.h. dass W_t , über diese Bahn, drei Schritte von X_t entfernt ist (d.h. es existiert eine transitive Relation (\equiv Bahn) $X_t \rightsquigarrow W_t$). Unter Verwendung unterschiedlicher graphentheoretischer Algorithmen kann nun auch die minimale oder maximale Entfernung (kritischer Pfad) zwischen zwei beliebigen Knoten des Graphen, effizient ermittelt werden, wobei Varianten dieser Algorithmen speziell auch für gewichtete Graphen (günstigste Verbindungen) relevant sind. Im Fall von gerichteten Graphen kann die Entfernung zwischen zwei beliebigen Knoten, trotz Betrachtung aller möglichen Alternativen, auch unendlich groß sein, da nicht jeder Knoten notwendigerweise von jedem anderen aus erreichbar ist. Die ökonomische Interpretation dieses Umstandes ist, dass nicht jede Variable eines Modells notwendigerweise jede andere beeinflusst. Dies bedeutet, dass von unterschiedlichen Startpunkten aus nur Partitionen des Graphen des gesamten Modells, d.h. Teilgraphen

erreicht werden können, schon alleine deshalb, da manche Knoten einen Eingangsgrad $d_G^-(Y_t) = 0$ haben (exogene), aber auch andere keine Route zum Zielpunkt haben.

- Wechselwirkung

$$(X_t \rightarrow Y_t, Y_t \rightarrow X_t) \quad Y_t = f(X_t), X_t = f(Y_t)$$

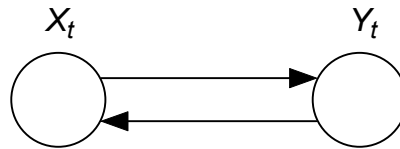


Abbildung 12: Wechselwirkung in Graphen

Die Wechselwirkung zweier Variablen, welche sich gegenseitig beeinflussen, führt nun im Gegensatz zu den bisherigen dargestellten Strukturen dazu, dass der Graph nicht mehr streng gerichtet ist, d.h. dass es auch gegenläufige Beziehungen oder Zyklen gibt, was im Fall von zwei laufenden Variablen dazu führt, dass ein gleichzeitiges Lösungsverfahren / Näherungsverfahren zur Berechnung des dargestellten Gleichungssystems nötig sein wird. Vom graphentheoretischen Standpunkt her kann ein gerichteter Graph auch einzelne ungerichtete Kanten enthalten, eine Repräsentation der Wechselwirkung als zwei gerichtete Kanten, gibt jedoch die Struktur besser wieder.

- Kausalschleife

$$(X_t \rightarrow Y_t, Y_t \rightarrow Z_t, Z_t \rightarrow X_t) \quad Y_t = f(X_t), Z_t = f(Y_t), X_t = f(Z_t)$$

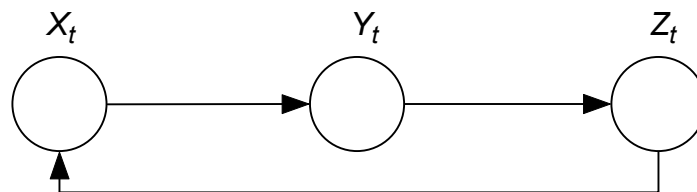


Abbildung 13: Kausale Schleife

Wenn eine Variable eine andere indirekt beeinflusst, d.h. wie hier eine Bahn von X_t nach Z_t führt, und dann zusätzlich eine Verbindung zur Ausgangsvariablen zurückführt, d.h. im Beispiel Z_t eine einfache kausale Beziehung mit der Ausgangsvariablen X_t hat, dann spricht man von einer kausalen Schleifen. Allgemein gesprochen ergibt sich eine kausale Schleife, wenn eine Bahn im Graphen zum Ausgangspunkt zurückführt, was als Zyklus bezeichnet wird.

Dieses ist die zweite Struktur, welche dazu führt, dass es im Graphen Wege ohne Ende geben kann (tatsächlich ist die kausale Entfernung der Bahnen (transitiven Relationen) $X_t \rightsquigarrow Y_t$, $X_t \rightsquigarrow Z_t$, $X_t \rightsquigarrow X_t$, sowie aller Permutationen, ohne Abbruchbedingung unendlich), was insofern relevant ist, dass dies einerseits die Lösbarkeit des Modells beeinträchtigt, und andererseits dass man solche Modelle nicht mehr als Bäume²⁴ bzw. baumähnliche Struktur betrachten kann, da nicht jeder mögliche Weg im Graphen einen Endpunkt hat, wodurch auch Darstellungsverfahren, welche auf Bäume anwendbar sind (derer gibt es speziell in den modernen Visualisierungstheorie sehr viele) nicht mehr direkt anwendbar sind.

Wie auch in der vorigen Struktur besteht dennoch die Möglichkeit dass die Wege ein Ende finden, indem sie als Bahnen betrachtet werden, welche per Definition jede Kante nur einmal enthalten. Betrachtet man nun die längste mögliche Bahn von einer Variablen zu einer bestimmten anderen, so erhält man die kausale Entfernung zwischen diese Variablen, welche für den bisherigen Fall gleichzeitiger Beziehungen jedoch noch keine große Relevanz haben.

Ökonomische Modelle, und damit auch in den sie repräsentierenden Graphen, können nun aus einer Reihe von Kombinationen der hier angeführten Relationen bestehen, wobei die Existenz bestimmter Relationskonstellationen, sowie die Art ihrer Verknüpfung die erste Ebene der Komplexität des Modells definiert. Die Beurteilung dieser Zusammenhänge kann nur auch als Graph, und damit auch visuell erfolgen, wie bei folgendem Beispiel:

²⁴ Ein graphentheoretischer Baum ist im, für die Informatik sehr bedeutsamen, gerichteten Fall, ein zusammenhängender Graph ohne Zyklen. Zusammenhängende Graphen weisen keine Knoten, bzw. Teilgraphen auf, welche keinerlei Verbindung zu anderen Teilgraphen haben, im gerichteten Fall bedeutet dies, dass zumindest bei keinem Knoten K des Graphen gleichzeitig der Eingangsgrad und Ausgangsgrad gleich null sind, d.h. $d_G^+(K) + d_G^-(K) > 0$.

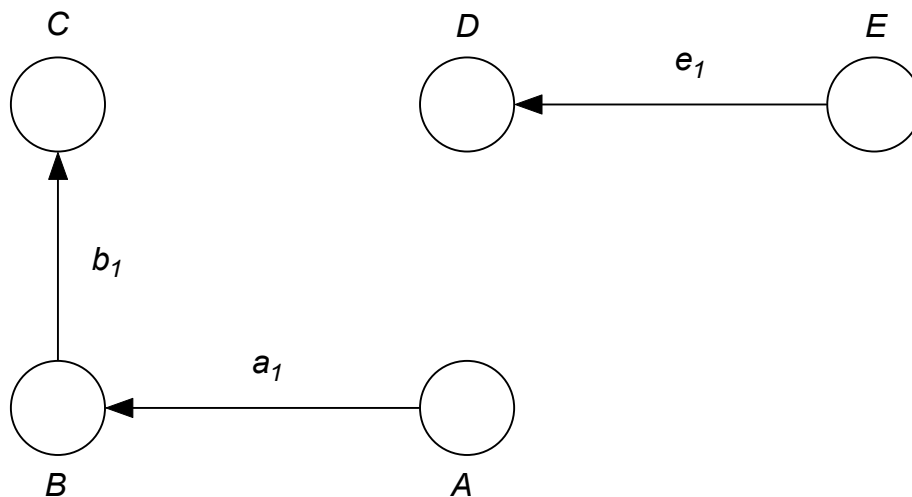


Abbildung 14: Endogene, exogene und isolierte Variablen in Graphen

Wäre das obige Diagramm die Darstellung des gesamten Graphen und damit des gesamten Modells, so wären A und E exogene Variable, B , C und D hingegen endogene Variable, wobei man sofort erkennen kann, dass der Graph in diesem Fall nicht zusammenhängend ist, d.h. dass die Untergraphen U_1 (mit den Knoten A , B , C) und der Untergraph U_2 (mit den Knoten D , E), blockdiagonal sind. Es wird hier daher höchstwahrscheinlich ein Fehler vorliegen, da der Untergraph U_2 nicht mit dem Rest des Systems in Verbindung steht, was beispielsweise geschehen würde wenn verschiedene Märkte im Modell realisiert wurden, wobei bspw. jedoch einer nicht mit dem System verbunden wurde.

Wie bereits erwähnt führen kausale Schleifen zu komplexen Strukturen – zumindest teilweise interdependente Strukturen²⁵ – wobei man Wechselwirkungen ebenfalls als spezielle Form einer kausalen Schleife betrachten muss, welche die für eine kausale Schleife geringst mögliche kausale Entfernung zwischen zwei laufenden Variablen von zwei (Kanten) hat – bei intertemporären Relationen ist eine kürzere Schleife möglich – eine Schlinge, d.h. wenn eine Variable von sich selbst im Lauf der Zeit abhängt, welche eine kausale Entfernung von eins hat.

Betrachtet man die Auswirkungen dieser Strukturen für das Modell als Ganzes, dann können Schleifen, wie bereits im Kapitel über DSE Modelle erwähnt, grob gesprochen zu

²⁵ Dies gilt in laufenden Variablen (als statische Beziehungen) denn bei verzögerten Variablen gibt es weitere Aspekte der Komplexität, wobei jedoch Lags, die für die Lösung des Systems relevanten Aspekte der Interdependenz, nicht beeinflussen (da sie zu den vorbestimmten Variablen zählen) – im Gegensatz zu Leads, welche unterschiedlich interpretiert und gelöst werden können)

interdependenten oder blockrekursiven Modellen führen (im Gegensatz zu rein rekursiven Modellen).

Für den Fall, dass das Modell keine kausalen Schleifen, in laufenden Variablen, hat handelt es sich um ein rekursives Modell, was wohl ein sehr seltener Fall ist. Das andere Extrembeispiel wäre, dass das Modell aus einer einzigen großen kausalen Schleife besteht, also dass alle Variablen des Modells durch eine einzige Bahn verbunden sind, welche in sich geschlossen ist, d.h. bei welcher der Startknoten gleich dem Zielknoten ist, wie bspw. beim einfachen Beispiel der Abbildung 13, wobei es jedoch auch zusätzliche Verbindungen zwischen den Variablen geben kann.

Der häufigste Fall ist wahrscheinlich die Mischform des blockrekursiven Modells, bei welcher es, vom Standpunkt der Abhängigkeit aus, in sich geschlossene interdependente Strukturen gibt, welche jedoch dennoch durch eingehende Kanten verbunden sind (ohne diese Verbindung würde es sich wieder um ein blockdiagonales Modell handeln):

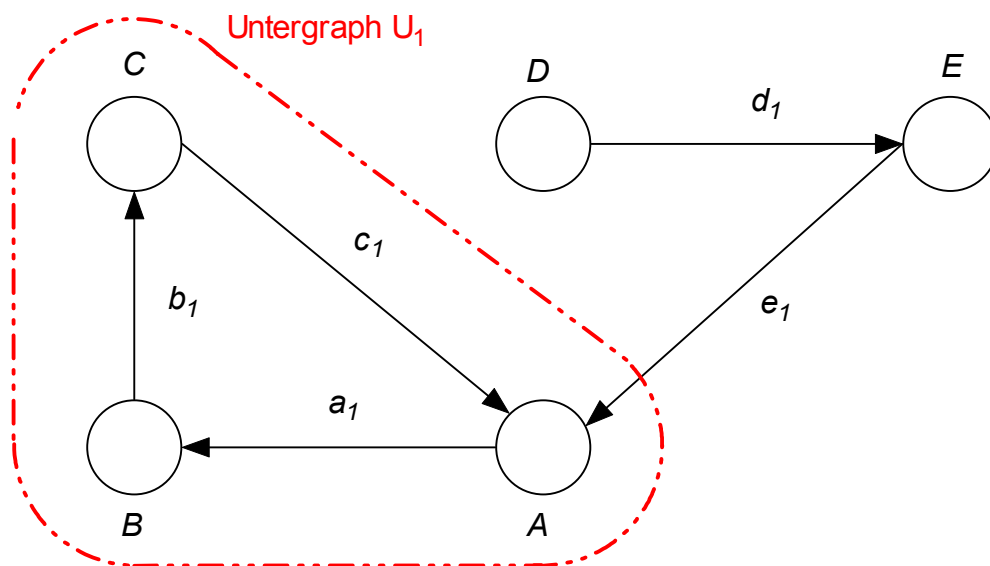


Abbildung 15: Blockrekursive Modelle in Graphen

In diesem Modell würden die Knoten A, B, C nun einen Untergraphen U_1 bilden, welcher in sich interdependent ist (ein interdependenter Block wäre), das Modell insgesamt bezüglich der Knoten E, D und des Untergraphen U_1 jedoch rekursiv ist.

2.2 Intertemporäre Kausalität

Bei dynamischen Modellen reicht es jedoch nicht aus nur eine Dimension von Entfernung zu definieren, man muss diesen Begriff auch für den Aspekt der Zeit, betreffend zeitlicher Verzögerungen, welche in Form von Lags und Leads vorkommen können, erneut prüfen und bestimmen.

Betrachtet man daher die ursprüngliche Abbildung 7 erneut, so sieht der Graph wohl auf den ersten Blick wie drei (graphentheoretisch minimal komplexe / triviale) einfache Beziehung aus, es fallen jedoch die verschiedenen beiden temporalen Instanzen der Variable KAP , in den Zeitpunkten t und $t-1$, in Form von KAP_t und KAP_{t-1} auf. Die beiden Variablen werden hier de facto als völlig eigenständige Variablen dargestellt, obwohl sie jedoch die gleiche ökonomische Größe in unterschiedlichen Zeitpunkten repräsentieren.

Es stellt sich an dieser Stelle daher die Frage wie mit dem Faktor Zeit generell umgegangen werden soll, da er von der obigen Darstellung, abgesehen von der Beschriftung der Variablen, zumindest vom Blickwinkel der Visualisierung aus, nicht (ausreichend) reflektiert wird. Etwaige Darstellungen müssen daher, ebenso wie jede strukturelle Analyse eines dynamischen Systems, einen Weg finden diesen wichtigen Aspekt der intertemporären Dynamik korrekt darzustellen, respektive zu beobachten. Visuell gesehen bietet sich dazu eine Reihe an Möglichkeiten, entweder durch Beibehaltung der Darstellung bzw. Betrachtung der einzelnen Instanzen derselben Variablen, welche im Modell vorkommen, jedoch in Verbindung mit Einführung einer Art Zeitlinie, welche die Zusammengehörigkeit der Instanzen herausstreicht, und die Zeitpunkte deutlich hervorhebt.

Eine andere Möglichkeit die zeitliche Komponente mitzuverarbeiten besteht darin, die unterschiedlichen Instanzen der Variablen als eine gemeinsame ökonomische Größe darzustellen, wobei jedoch beachtet werden muss, dass dann nicht mehr alle Verbindungen direkte Modellrelationen darstellen – es müssen daher neue Interpretationen für die Verbindungen erarbeitet werden, welche eng mit der dargestellten Relation zusammenhängen werden.

Betrachten wir daher in einem ersten Schritt die Veränderung des Graphen wenn wir die beiden temporalen Instanzen von KAP , d.h. die Variablen KAP_t und KAP_{t-1} , in einem Knoten vereinen, jedoch nur von Standpunkt der intertemporären kausalen Strukturen um zu sehen welche Arten der intertemporären Beeinflussung bei dynamischen ökonomischen Modellen zu beachten sein werden. Dazu passen wir die Struktur des Graphen an, in dem wir statt der Variablen KAP_t und KAP_{t-1} in der Liste der Knoten A nur mehr intertemporäre Variable wie KAP eintragen. Um die temporalen Strukturen dennoch erkennen zu können, re-definieren wir den Graphen, sodass wir relative temporale Indizes in den geordneten Knotenpaaren nicht als unterschiedliche Knoten interpretieren, sonder lediglich als Indikator um laufende und verzögerte Verbindungen unterscheiden zu können, wobei laufende Beziehungen weiterhin wie gehabt angezeigt werden, verzögerte Beziehungen in den folgenden Beispielen, aus rein didaktischen Gründen hingegen, als strichpunktierte Linien angezeigt werden.

Die Definition des Graphs M' sieht dann folgendermaßen aus:

$$M' = (A', B')$$

$$A' = \{ KAP, DEP, I \}$$

$$B' = \{ kap_1', dep_1', i_1' \}$$

$$f(kap_1') = (KAP_{t-1}, KAP)$$

$$f(dep_1') = (DEP, KAP)$$

$$f(i_1') = (I, KAP)$$

Die Darstellung des Modells M' sieht dann folgendermaßen aus:

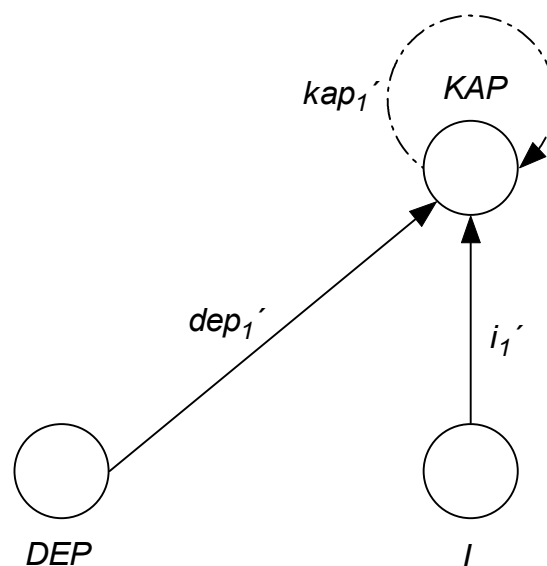


Abbildung 16: Verzögerte Selbstbeeinflussung als Schlinge im Graph (M')

Die Kante kap_1 welche KAP und KAP_{t-1} verband wird daher zu einer Schlinge, welche die Natur der stetigen Selbsterhöhung von KAP , im Lauf der Zeit besser darstellt als das vorige Diagramm – die unterschiedliche zeitliche Verzögerung der Kanten, dep_1 und i_1 ohne Verzögerung ($\Delta t = 0$), versus kap_1 mit einem Schritt Lag ($\Delta t = 1$), ist hier durch die strichpunktierte Linienstil angedeutet. Aus Sicht der Modellbeziehungen entstehen Schlingen dieser Art bspw. bei selbst erhöhenden Stockgrößen, wofür KAP ein gutes Beispiel ist, wobei selbstverständlich auch Flussgrößen, als von einem früheren eigenen Wert abhängig modelliert werden können.

Erweitern wir in einem nächsten Schritt unsere Betrachtung der temporalen Beeinflussung des Graphen M' , indem wir es durch Hinzufügen der Beziehungen der Gleichungen (3) und (4) auf den folgenden Graphen N erweitern:

$$\begin{aligned}
 N &= (A, B) \\
 A &= \{ KAP, DEP, I, R \} \\
 B &= \{ kap_1, dep_1, i_1, kap_2, r_1 \} \\
 f(kap_1) &= (KAP_{t-1}, KAP) \\
 f(dep_1) &= (DEP, KAP) \\
 f(i_1) &= (I, KAP) \\
 f(kap_2) &= (KAP_{t-1}, DEP) \\
 f(r_1) &= (R, I)
 \end{aligned}$$

Die Darstellung des soeben spezifizierten Graphs N ergibt dann folgendes Bild:

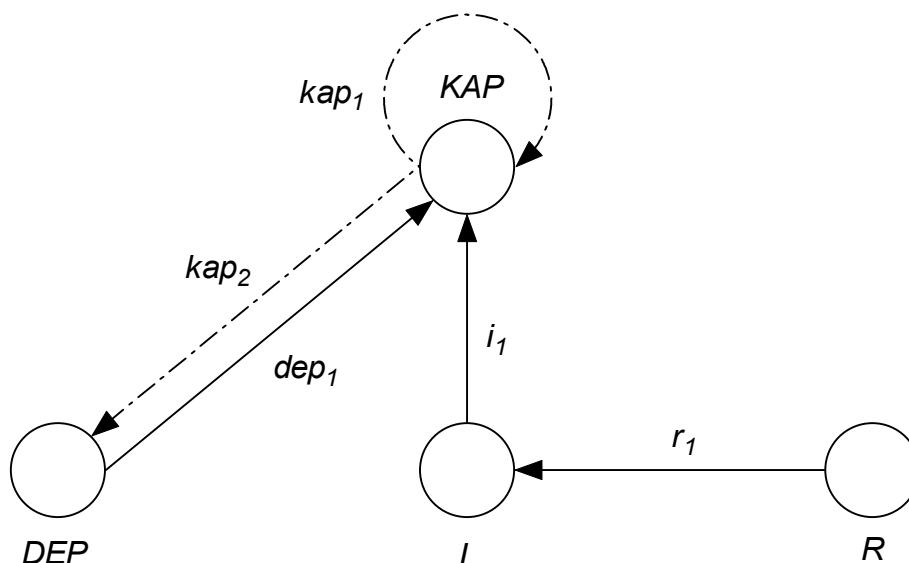


Abbildung 17: Direkte zeitliche Verzögerungen in Modellen (Graph N)

Da der Graph N lediglich zwei zeitlich verzögerte Relationen, kap_1 und kap_2 , aufweist, welche um jeweils nur eine Periode verzögert (gelaggt) sind, kann man die Problematik der relativen Verzögerung noch nicht gut erkennen, welche sich in größeren bzw. komplexeren Modellen zu multiplen verschachtelten Verzögerungen erweitern kann. Für den ungeübten Beobachter, bzw. auf den ersten Blick, könnte es bei Betrachtung der einzelnen Gleichungen so erscheinen, als würde die größte zeitliche Verzögerung des Systems jeweils der größten zeitlichen Verzögerung, welche in den Gleichungen zu finden war, entsprechen, d.h. $\max(\Delta t)$ aller Modellgleichungen. Man darf sich jedoch nicht von Formulierungen wie bspw. jener dass die Variable KAP um eine Periode verzögert, als KAP_{t-1} , im Modell erscheint, irritieren lassen, da sie missverständlich ist. Die korrekte Ablesung dieser Beziehung, im Graphen als kap_2 gekennzeichnet, ist selbstverständlich, dass KAP speziell auf DEP um eine Periode verzögert wirkt, d.h. $KAP_{t-1} \rightarrow DEP$ bedeutet $\Delta t_{kap2} = 1$.

Dies bedeutet, dass aus der Gleichungsform an sich nur die direkten Verzögerungen ablesbar sind, die indirekten Verzögerungen können, unter Umständen, nur bei Betrachtung eines Zeitfensters mit größerer "Breite" als $\max(\Delta t_k)$ für alle $k \in B$ gesehen werden.

Um die nötige Breite dieses Zeitfensters auch tatsächlich ermitteln zu können, ist es nötig den bereits besprochenen Begriff der kausalen Entfernung wieder aufzugreifen, und der neuen Fragestellung anzupassen. Um dies weiter zu verdeutlichen betrachten wir folgenden einfachen Graphen, welche eine temporal komplexere Struktur hat:

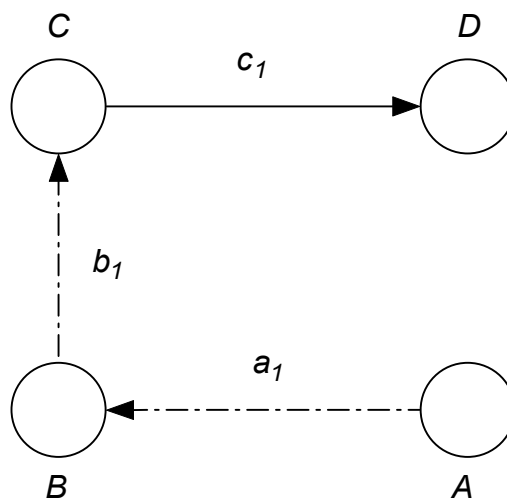


Abbildung 18: Temporale Länge von Bahnen in Graphen / Temporale Entfernung

Die strichpunktierten Linien a_1 und b_1 stehen hier weiterhin für intertemporäre Relationen, die durchgehenden stehen weiterhin für kontemporäre Relationen. Will man nun die temporale Länge der Bahn $F = (a_1, b_1, c_1)$ ermitteln so muss man den Verbindungen einen Wert zuweisen, da die Verzögerung eine Richtung hat (Zukunft / Vergangenheit entsprechen Lag / Lead) und nicht notwendigerweise die Länge eins hat. Wenn wir dies tun, so wird der Graph zu einem *bewerteten* oder *gewichteten* Graph, wobei wir kontemporäre Verbindungen mit null bewerten und jeder intertemporären (verzögerten) Kante einen Wert in Höhe der Anzahl relativ verzögerter Perioden zuweisen, wobei Lags einen positiven und Leads einen negativen Wert bekommen. Berechnet man nun die Länge der Bahn F als temporale Entfernung, so würde diese, unter der Voraussetzung, dass die Kanten a_1 und b_1 jeweils eine Periode verzögert sind (d.h. $\Delta t = 1$ also resultierend aus $B_t = f(A_{t-1})$ und $C_t = f(B_{t-1})$), daher zwei betragen.

Leider sind dynamische ökonomische Modelle oftmals weit stärker verbunden (vernetzt) als die bisherigen Beispiele, wodurch sich eine Vielzahl an möglichen Bahnen im Graphen ergibt, was selbstverständlich umso komplexer ist, je weiter (kausal) entfernt zwei Knoten voneinander sind, was das folgende Beispiel verdeutlicht:

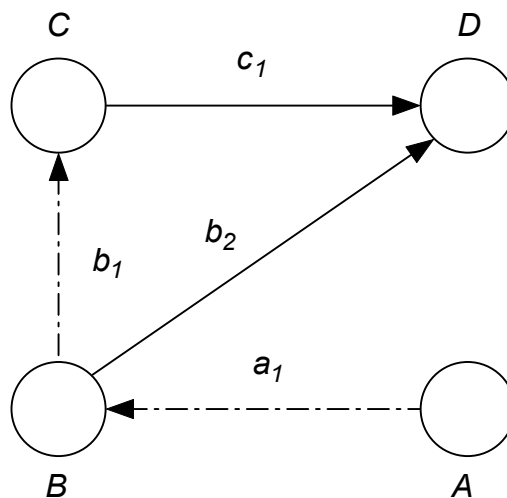


Abbildung 19: Mehrfach indirekte temporale Effekte in Graphen

In diesem Fall gäbe es zwei Bahnen von A nach D, und zwar $F_1 = (a_1, b_1)$ und $F_2 = (a_1, b_2, c_1)$, welche jedoch keine Alternativen darstellen sondern beide kausale Folgen sind, d.h. sowohl F_1 als auch F_2 treten ein. Da jedoch F_1 eine temporale Entfernung von eines hat, und F_2 eine temporale Entfernung von zwei aufweist, beeinflusst die Variable A sowohl innerhalb von einem Zeitschritt indirekt die Variable D, als auch in zwei Zeitschritten indirekt (vermutlich jedoch mit unterschiedlicher Intensität, wobei diese nicht zwangsweise mit der Zeit abnimmt, d.h. dass "ältere" Einflüsse nicht unbedingt schwächer sein müssen).

Ein Effekt dem schon zu Tinbergen's Zeiten eher mit Unverständnis begegnet wurde ist, dass auch Einflüsse, welche um zwei Perioden verzögert sind, in jeder Periode erneut eintreffen würden, zumindest wenn die Strukturen als temporal konstant angenommen wurden, wie dies bei DSE Modellen der Fall ist. Das folgende Diagramm ist nun eine Darstellung der Relationen des letzten Modells, wobei nun jedoch die Kumulation der Einflüsse über die Zeit ersichtlich ist, indem die Variablen nun nach den zwei Achsen "Variable" und "Zeit" ausgerichtet wurden:

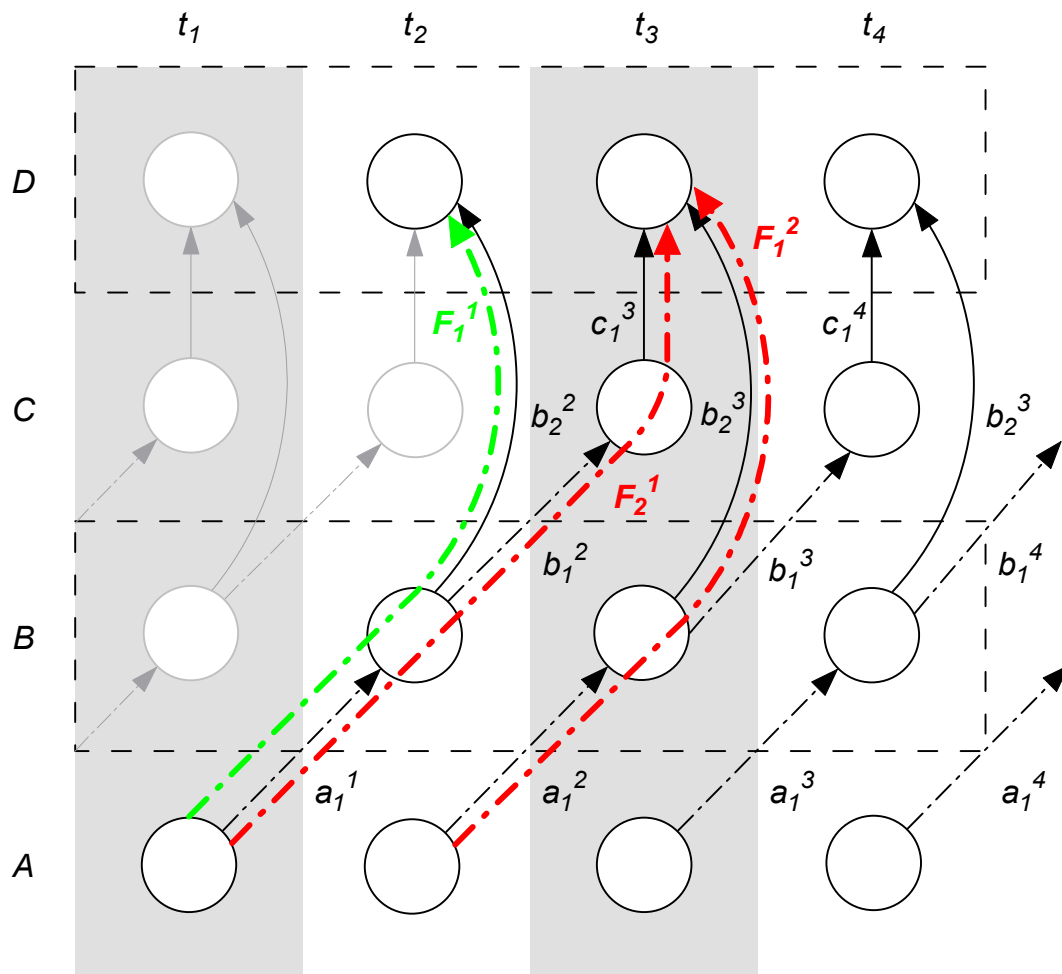


Abbildung 20: Konstante intertemporale Modellrelationen mit mehrfachen Einflüssen in Graphen

Betrachtet man obiges Diagramm so kann man gut erkennen wie die kausalen Bahnen F_1^1 und F_2^1 (d.h. jene Einflüsse, welche vom Knoten (der Variable) A im Zeitpunkt t_1 verursacht wurden) zwar zu verschiedenen Zeitpunkten beim Knoten D eintreffen – und zwar in t_2 (F_1^1) und t_3 (F_2^1). Dennoch erreicht D im Zeitpunkt t_3 gleichzeitig mit F_1^1 ein weiterer Einfluss, und zwar F_1^2 , wodurch in jedem Zeitpunkt de facto alle möglichen Einflüsse auch tatsächlich eintreten, wenn sie auch unterschiedliche Startpunkte haben. Betrachtet man die Realisierung solcher Dynamiken im Modell, so beginnt die Simulation aller Variablen gleichzeitig in einer

Periode (hier t_1), alle verzögerten Relationen, welche aus einer Periode vor der ersten Berechnung kommen, müssen als Zeitreihe angegeben werden, im obigen Diagramm sind diese aus der Vergangenheit, vor der ersten Simulation, kommenden Relationen nur angedeutet. Betrachtet man die Strukturen weiter, so können die Einflüsse von A , bspw. wenn es als Instrument (d.h. Steuerungsvariable) dient, die Variable D (falls sie beispielsweise ein Ziel repräsentieren würde), jedoch nicht in der ersten Periode der Berechnung erreichen. Im Diagramm wurden diese Knoten und Kanten, welche noch nicht durch eine Änderung von A beeinflusst werden konnten, grau dargestellt.

Will man daher alle Auswirkungen einer Änderung von A auf D betrachten, so muss man eine längere Zeitperiode gleich der Länge der temporal längsten Bahn als Betrachtungszeitraum wählen, wobei zu diesem Zeitpunkt jedoch, wie in der vorigen Grafik zu sehen ist, eine Reihe temporal kürzerer Einflüsse, welche seit der Änderung der Variablen von der selben Variablen A ausgelöst, bereits mehrfach eingetroffen sind und gewirkt haben.

Man muss sich daher bewusst sein, dass die temporal weiter entfernten Einflüsse, aus den berechneten Daten, im Modell unter Umständen nicht einzeln betrachtet werden können, da kürzere sie bereits beeinflusst haben könnten. Hat ein Einfluss bspw. durch die Bahn F_2 den Knoten D erstmals erreicht, so dauert es jedoch, wie im Diagramm gut zu erkennen ist, nicht weitere zwei Zeitperioden bis derselbe Effekt den Knoten D wieder erreicht, sondern er trifft ab jetzt jede Periode ein.

Würde man daher die Variable A in der ersten möglichen Periode einmalig um einen Anteil des bisherigen Wertes erhöhen, d.h. einen transitorischen Schock in das System einbringen, so würde man bspw. in der vierten Periode der Simulation, d.h. im Zeitpunkt t_4 , nur mehr die kumulierte intertemporale Wirkung aller Bahnen von A nach D betrachtet werden - in diesem Fall hätte die Wirkung F_1 dreimal, die Wirkungsbahn F_2 zweimal D erreicht – numerisch beobachtbar wäre hingegen nur mehr eine rein kumulative Wirkung von F_1 und F_2 .

In einem komplexeren Modell wäre die Zahl der unterschiedlichen kausalen Wirkungsbahnen zwischen zwei Knoten (Variablen) in manchen Fällen vermutlich viel größer, tatsächlich könnten diese jedoch nicht getrennt werden. Es ist nun jedoch möglich das gesamte Systemverhalten zwischen zwei Variablen zu betrachten, wobei die maximale temporal-kausale Entfernung (d.h. die längste temporale Bahn) zwischen den Knoten, der Verzögerung entspricht die alle modellierten Effekte benötigen um den Zielknoten zumindest einmal

beeinflusst zu haben, was man als temporal-kausale Initialverzögerung bezeichnen könnte – ab diesem Zeitpunkt kommen, wie bereits erwähnt, alle Einflüsse in jeder Periode an, (wenn auch zeitverzögert), wobei eine erneute Veränderung im System, selbstverständlich wieder die selbe Initialverzögerung aufweisen würde.

Generell können auch direkt benachbarte (kausal oder temporal kausal benachbarte) Beziehungen numerisch nur dann als getrennte direkte Beziehungen betrachtet (d.h. gemessen) werden, wenn es keine weiteren indirekten Verbindungen gibt. Gibt es diese doch, dann kann nur mehr die Summe aller indirekten Beziehungen zwischen den benachbarten Knoten betrachtet werden. In beiden Fällen ist die Betrachtung dieser kumulierten indirekten (und direkten) Relationen dennoch sinnvoll, da es das Systemverhalten des Modells wiedergibt, es ist lediglich eine Frage der Interpretation dieser Relationen.

Nehmen wir daher ein leicht verändertes Modell der letzten Darstellung (Abbildung 20) an um diesen Effekt der gemeinsamen Wirkung besser zeigen zu können:

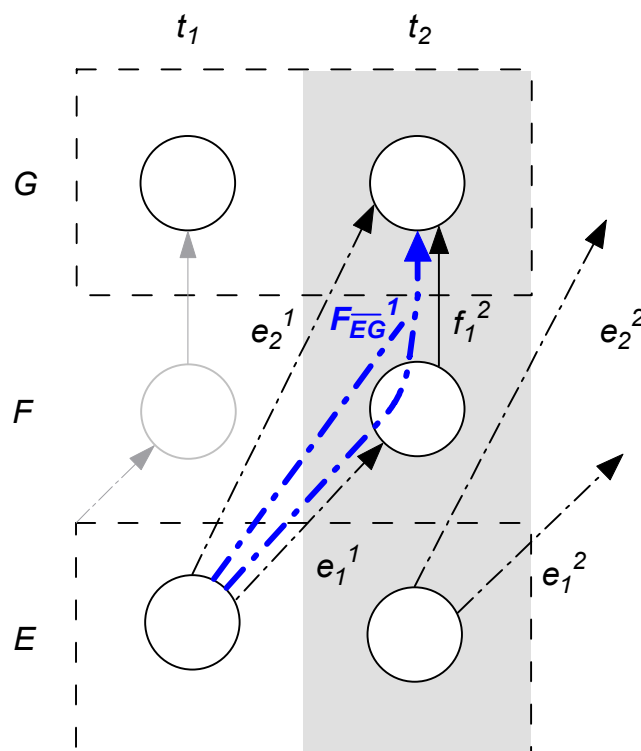


Abbildung 21: Kumulation von messbaren Effekten in Modellen

Versucht man die Wirkung von E auf G zu beobachten, welche direkt über die Kante e_2^t verbunden sind, so muss man jedoch bedenken, dass jede Veränderung von E immer auch

indirekt über F mittels der Bahn (e_1^t, f_1^t) auf G , auch wenn dies in diesem Beispiel erst zeitverzögert auftritt. Tatsächlich beobachtet man daher bei jeder Erhöhung von E in G nicht den Effekt von e_2^t sondern immer den Effekt der (fiktiven) kumulierten Wirkungsbahn F_{EG}^t . Diese stellt daher das messbare Systemverhalten auf Änderungen der Variablen E dar, was bei Beobachtung dieser Auswirkungen auf eine bestimmte Variable, wie bspw. G , als eine Art intertemporale Systemelastizität (bzw. systemische Grenzneigung) der Variablen G bezüglich Änderungen der Variablen E interpretiert werden kann.

Der Einwand, dass eine Untersuchung der kurzfristigen intertemporalen Strukturen, generell irrelevant sein könnte, da dynamischen Modelle eine kleine Zahl an zeitlichen Verzögerungen aufweisen, welche darüber hinaus meist nur gering verzögert sind (d.h. $\max(\Delta t_k)$ ist klein), und komplexere Strukturen daher vernachlässigt werden können, ist für die Entwicklung einer allgemeinen Analysetechnik nicht relevant, da eine solche Beschränkung der Idee eine Vielzahl an Modellen zu unterstützen, entgegenwirkt. Außerdem ist die Notwendigkeit einer Analysetechnik, speziell bei Modellen mit mehrfach verschachtelten temporal-logischen Strukturen (sehr komplexe Modelle), sehr hoch.

Darüber hinaus sind Modelle mit einer längeren Verzögerung wie $\max(\Delta t_k) \geq 4$ generell nicht so weit hergeholt, da beispielsweise Modelle mit Quartalsdaten eine Verzögerung von vier Perioden aufweisen sobald sie eine um ein Jahr verzögerte Beziehung enthalten, was aufgrund der üblicheren Modellbildung mit Jahresdaten, häufig der Fall ist. Ein gutes Beispiel dafür wären die Modellen SLOPOL1-3 (Neck et.al. 1997-2003, etwa in [Weyerstraß_2001]), welche, aufgrund der geringen Anzahl an verfügbaren Wirtschaftsdaten des eigenständigen Sloweniens, Quartalsdaten verwenden mussten um eine Mindestanzahl an Daten zur ökonometrischen Schätzung des Modells zur Verfügung zu haben, jedoch in vielen Beziehungen nur unter Einsatz von einjährigen Verzögerungen signifikante Korrelationen erreichen konnten.

Betrachten wir eine etwas komplexere Struktur in dem wir weitere Gleichungen des bereits zuvor eingesetzten Beispielmodells ansehen:

$$(6) \text{ EMP} = f(\text{EMP}_{t-1}, \text{POP}, \text{POP}_{t-1})$$

$$(10) \text{ POP} = f(\text{POP}_{t-1})$$

Die Repräsentation dieser beiden Gleichungen formulieren wir nun in folgendem Graphen, welcher dieselben Anpassungen, bezüglich der Darstellung intertemporaler Beziehungen, wie die vorigen Beispiele enthält:

$$N' = (C, D)$$

$$C = \{ POP, EMP, Y \}$$

$$B = \{ pop_1, pop_2, pop_3, emp_1, emp_2 \}$$

$$f(pop_1) = (POP_{t-1}, POP)$$

$$f(pop_2) = (POP_{t-1}, EMP)$$

$$f(pop_3) = (POP, EMP)$$

$$f(emp_1) = (EMP_{t-1}, EMP)$$

$$f(emp_2) = (EMP, Y)$$

Die Darstellung sieht daher nun folgendermaßen aus:

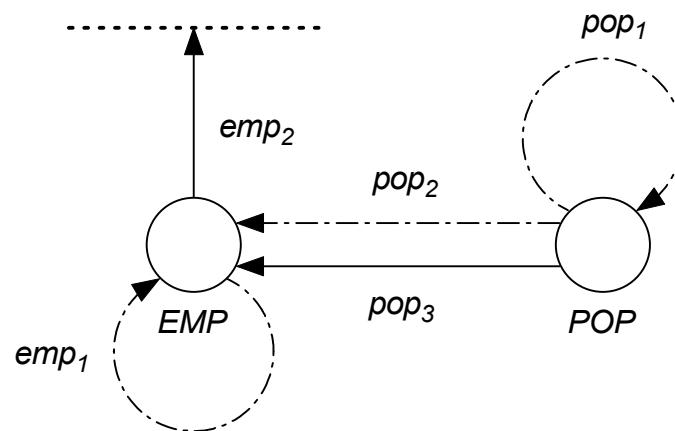


Abbildung 22: Lediglich selbstbeeinflusste Variablen in Graphen

Der Graph²⁶ weist in dieser Form nun sowohl *Mehrfachkanten* (pop_2, pop_3)²⁷ als auch Schlingen (pop_1, emp_1) auf, wobei *EMP* eine “normale“, sich selbst erhöhende, endogene

²⁶ In der Darstellung des Graphs fehlt die in der Definition angegebene Variable *Y*, welche weggelassen wurde um weitere Ungenauigkeiten zu vermeiden, da die Gleichung von *Y* noch drei weitere Kanten enthalten würde, welche auch in der Definition des Graphs *N'* nicht angegeben wurden, da das Beispiel sonst zu unübersichtlich würde. Die Kante *emp₂* in Richtung zu *Y* ist daher nur angedeutet und durch die punktierte Linie wird die Verbindung zum restlichen Graphen/Modell angezeigt.

Variable repräsentiert, da der *Eingangsgrad* des Knotens *EMP* größer null ist (graphentheoretisch: $d_G^-(EMP) > 0$), d.h. es existieren eingehenden Kanten - die Anzahl der ausgehenden Kanten $d_G^+(EMP)$ ist hier gegenwärtig nicht relevant.

Der Knoten *POP* weist hingegen nur eine eingehende Kante (pop_1) auf, wodurch er zwar endogen bestimmt wird, jedoch (im gesamten System) nur von sich selbst abhängt, wie dies auch bei der Gleichung (11) der Fall ist, welche die Hilfsvariable *TREND* (die den Lauf der Zeit t im Modell repräsentiert) beschreibt. Diese Eigenschaft, im gesamten System nur von sich selbst abzuhängen macht diese Variablen einer exogenen Variablen ähnlich, da sie vom restlichen System ebenfalls nicht beeinflusst wird. Es könnte verschiedene Gründe geben warum diese Variablen als endogen definiert wurden – im Fall von *TREND* wäre höchstwahrscheinlich nicht nötig gewesen wäre diese Variable zu endogenisieren, wenn es dafür auch viele Gründe geben mag, wie bereits im vorigen Teilkapitel über DSE Modelle besprochen wurde. Der Unterschied ist jedoch, dass *TREND* verlustfrei endogenisiert wurde, da es den simplen diskreten Fortschritt der zeitlichen Perioden anzeigt. Die lineare Endogenisierung von *POP* führt hingegen jedenfalls zu einem Verlust an Genauigkeit, welcher kaum ein Nutzen im Modell entgegensteht, da *POP* sich lediglich selbst linear fortschreibt, was jedoch vermutlich eine ungenauere Wiedergabe ist als die exakten (bei der Bevölkerungszahl jedoch ohnehin eine bereits interpolierte Schätzung auf Basis von Volkszählungen oder ähnlichen Erhebungen) Zahlen (ausgenommen man unterstellt den erhobenen Zahlen, dass sie von der Realität stärker abweichen als die eigene lineare endogene Vorhersage dies tut).

²⁷ Durch die Zusammenfassung von *POP* und POP_{t-1} zu einem Knoten kommt es dazu, dass die Kanten pop_2 und pop_3 die gleichen Knotenpaare (*POP*, *EMP*) zugeordnet sind, was als *Mehrfachkanten* bezeichnet wird. Würde der Graph weder Mehrfachkanten noch Schlingen aufweisen, so würde man ihn als schlichten Graph bezeichnen, wie dies bei vielen graphentheoretischen Netzwerken (sowie Bäumen) der Fall ist.

2.3 Komplexität

Komplexität des untersuchten Systems

Nun da die wichtigsten grundlegenden Charakteristika der gebräuchlichsten Ansätze makroökonomischer Modelle aufgezeigt wurden, ist es nötig eine der Hauptzielsetzungen ökonomischer Modelle erneut zu betrachten, bevor über weitere Vorgehensweisen entschieden werden kann. Gemeint ist hiermit die Zielsetzung makroökonomische Prozesse zu verstehen und kommunizieren zu können, wobei die Kommunikation bereits verstandener Prozesse eine sehr wichtige Aufgabe ist, da auch das exakteste Verständnis meist nur stark eingeschränkten Nutzen hat, wenn es sich nicht auf Entscheidungsträger, bzw. andere Experten übertragbar lässt. (Auch deshalb, da die erkannten Zusammenhänge sonst von anderen nicht überprüfbar sind)

Da die untersuchten Systeme jedoch nicht nur aus einer großen Anzahl an Elementen bestehen, sondern aus einer sehr großen Zahl an interdependent und intertemporär agierenden und entscheidenden Agenten, welche darüber hinaus noch ihre Verhaltensweisen im Lauf der Zeit verändern, bzw. anpassen. Generell resultiert die Beobachtung eines ganzen Systems solcher Agenten meist nicht in Prozessen die mit den elementaren Prozessen der Agenten übereinstimmen, sondern in qualitativ unterschiedlichen dynamischen Strukturen, welche die bereits erwähnten Eigenschaften aufweisen: Nicht-Linearität einiger ökonomischer Prozesse (Summe der Effekte der einzelnen Agenten ist nicht notwendigerweise gleich dem Gesamteffekt), Interdependenz (Verhalten der Agenten hängt auch von dem Verhalten und der Veränderung (Evolution) der anderen Agenten ab) und dem Entstehen von neuen Eigenschaften, welche die einzelnen Agenten nicht aufwiesen [Hanappi_2000].

Das Erklären von Prozessen in solchen komplex adaptiven Systemen [Arthur_1997], kann aufgrund der Zahl und Komplexität der tatsächlich beteiligten Details, nur in Form einer gewissen Vereinfachung, in Verbindung mit einer gewissen Formalisierung erfolgen, d.h. durch Erstellen eines Modells, welches beide Forderungen gleichzeitig erfüllt, wobei jedoch die unterschiedlichen vorgestellten Ansätze der Modellierung diese beiden Forderungen mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad erfüllen. Einige dieser Ansätze sind der Ansicht, dass

man die solche komplex adaptiven Systeme nur dann verstehen kann wenn man sie auch mit realitätsnahen Details nachbildet, wie dies bei Multi Agenten Modellen der Fall ist. Andere, üblichere Ansätze der ökonomischen Modellierung, bspw. DSE Modelle versuchen diese Systeme nicht detailliert zu verstehen, sondern nur die oberflächlich sichtbaren Effekte in Verbindung zu setzen, dafür nehmen sie jedoch eine gewisse Verzerrung der Ergebnisse (in Zukunft vermutlich eine größere Verzerrung als jene welche die Strukturen detaillierter betrachten), sowie der tatsächlichen Strukturen in Kauf.

Der Begriff der Komplexität, welcher sich bei der Untersuchung großer sozio-ökonomischer Systeme jedenfalls aufdrängt, hat sich im letzten Jahrzehnt zu einem häufig interdisziplinär bearbeiteten Forschungsgebiet entwickelt, woran Wissenschaftler aus diversen Bereichen, wie Soziologie, Ökonomie, Physik, Biologie, oder Chemie, arbeiten. All diese Bereiche sind daran interessiert Methoden zu entwickeln, die Systeme welche im Zentrum ihrer Untersuchungen stehen, besser zu verstehen, meist um sie später gezielt beeinflussen bzw. steuern zu können. Hierbei ist die erste Frage aus welchen Strukturen / Abläufen diese Komplexität resultiert und wie diese in Verbindung stehen. Auch wenn den unterschiedlichen wissenschaftlichen Disziplinen inzwischen einige gemeinsame Methoden, zu Verfügung stehen, so sind die meisten komplexitätstheoretischen Ansätze meist nicht ohne Anpassungen zu übernehmen, d.h. es gibt kaum allgemeingültige Lösungen, da die beobachteten Systeme wie etwa komplexe Moleküle, biologische Zellverbände oder wirtschaftlich interagierende Personengruppen offensichtlich dennoch strukturell sehr unterschiedlich sind.

Eine Entwicklung von welcher die meisten dieser Disziplinen, trotz der großen Unterschiede, profitierten, und daher auch immer größeren Anklang findet, entstammte aus einem Bereich der diskreten Mathematik, und zwar der Graphentheorie. Durch Betrachtung eines soziologischen Systems als Netzwerk, in diesem Fall als ungerichteter²⁸ Graph der interpersonellen Beziehungen, gelang es Strogatz und Watts [Watts_1999] vor einigen Jahren

²⁸ Im Gegensatz zu den bisher untersuchten Graphen ist ein solches Netzwerk interpersoneller Beziehungen (d.h. ein soziologisches Netzwerk) prinzipiell ungerichtet, da interpersonelle Beziehungen auf Gegenseitigkeit beruhen, d.h. hat eine Person eine Beziehung zu einer anderen, so gilt dies auch umgekehrt (auch wenn es im realen Leben von beiden verknüpften Seiten unterschiedliche Auffassungen über Art und Intensität dieser Beziehung geben kann, was jedoch auch im Graphen mittels in beiden Richtungen unterschiedlich bewerteten Kanten auch realisiert werden könnte – so es tatsächlich möglich wäre die Intensität der Beziehung quantifizieren).

(1998) erstmals eine Erklärung für das „Small Worlds“ Phänomen²⁹ zu finden, was bis zu diesem Zeitpunkt – seit der empirischen Entdeckung durch Milgram nicht sinnvoll gelungen war. Die Lösung lag darin, dass soziologische Systeme weder durch völlig geordnete noch durch zufällige Graphen (Systeme) repräsentiert werden können, d.h. dass sie nicht rein zufällig und musterfrei verteilt sind, sondern dass sie eine besondere Topologie aufweisen, welche zu kurzen Wegen zwischen zwei beliebigen Knoten sowie einer hohen Ausfallsicherheit führen.

Dies wird dadurch erreicht, dass es innerhalb der sehr großen Gesamtzahl an Knoten eine relativ kleine Anzahl an Knoten gibt die hoch vernetzt sind, d.h. eine große Anzahl an Nachbarn haben, wobei eine Menge dieser hoch vernetzten Knoten untereinander verbunden sind, sowie dass Knoten existieren die Verbindungen haben die weite Distanzen (sowohl soziologische als auch räumliche Entfernungen) überbrücken, d.h. als Shortcuts fungieren. Dadurch können selbst außen liegende Knoten, die nur wenige Verbindungen haben (wenige Personen kennen) dennoch über einen relativ kurzen Weg zum Ziel kommen, da sie nur irgendwie einen der hoch vernetzten bzw. weit reichenden Knoten erreichen müssen.

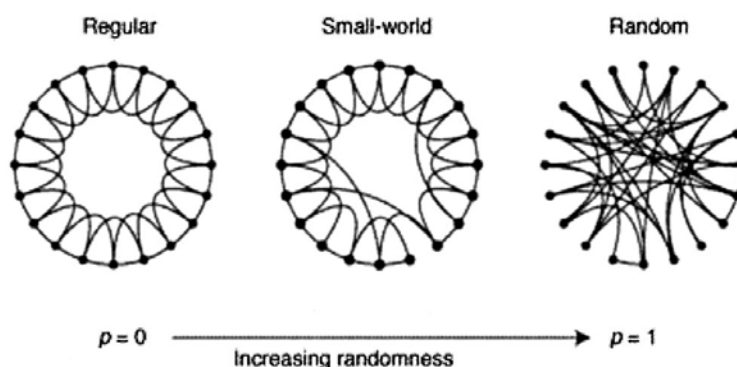


Abbildung 23: Netzwerk Topologie aus [Watts_1999]

²⁹ In einigen empirischen Untersuchungen zeigte sich, dass die durchschnittliche Entfernung zwischen zwei beliebigen Personen der modernen Welt (d.h. ausgenommen tatsächlich isolierter Bevölkerungsgruppen), erstaunlicherweise nur sechs Verbindungen beträgt. Dazu wurden unter anderem auch Versuche gemacht die Kettenbriefen ähnlich waren, wobei Personen (Sender) gebeten wurden den Brief entweder an eine bestimmte vorgegebene Person (Empfänger) zu senden (über welchen nur elementare Informationen gegeben wurden), falls sie diese persönlich kannten, oder an eine Person weiterzusenden (Zwischenempfänger) von welcher sie dachten, dass sie dem Empfänger sozial (und räumlich) näher standen und dieser die Anweisungen mitzuteilen und alle Informationen über die vorigen Zwischenempfänger weiterzuleiten. Die Weiterleitung endete sobald der Empfänger erreicht wurde, welcher die Ergebnisse an die Versuchsleiter zurücksendete, wobei sich zeigte dass die Briefe im Durchschnitt sechs versendet wurden, bis sie ihr Ziel erreicht hatten. Dieser extrem kurze Weg würde in zufälligen Graphen einen sehr hohen Vernetzungsgrad erfordern, d.h. eine sehr hohe Anzahl an Verknüpfungen zwischen allen Knoten erfordern würde. In einigen dieser Untersuchungen welche durchgeführt wurden zeigte sich, dass die durchschnittliche Länge dieses Weges relativ konstant sechs Verbindungen beträgt, auch bei Betrachtung eines soziologischen Systems mit der Größe Nordamerikas, d.h. mit einer Personen (Knoten) Anzahl von mehreren hundert Millionen.

Um den Zustand realer Netzwerke tatsächlich messen zu können, um so auch die Theorie empirisch überprüfen zu können, verwendeten Watts und Strogatz zwei Indikatoren, welche die strukturellen Eigenschaften des Systems angeben sollten. Einer der Indikatoren betrachtet die charakteristische Länge (L) der Wege, und ist damit ein Durchschnittswert der Länge des Weges zwischen zwei beliebigen Knoten, welcher bereits im letzten Kapitel in Form der kausalen Entfernung etabliert wurde, und ist sowohl für den Fall gerichteter als auch für den Fall ungerichteter Graphen anwendbar, wenn diese auch unterschiedliche Ergebnisse liefern, da, wie bereits im vorigen Kapitel erwähnt, im gerichteten Fall nicht jeder Knoten von jedem Knoten aus erreichbar ist.

Der zweite Indikator, welcher recht innovativ war, ist der Clustering Koeffizient (C), welcher ein lokales Maß für die Vernetzung eines Knotens ist, wobei ein höherer Wert eine höhere lokale Verknüpfungsdichte eines Knotens mit seiner Nachbarschaft angibt. Es soll damit die Bildung von lokalen "Gruppen" erfasst werden, in welchen viele Knoten miteinander verbunden sind, d.h. Cluster bilden, wobei Knoten mit großem lokalem C_i in einem solchen engen Verbund sind. Grundsätzlich ist dieser Koeffizient dazu gedacht sehr große Netzwerke mit einer großen Zahl an Knoten (>1000), bzw. für größere Nachbarschaften von Knoten (d.h. jeder Knoten hat mehrere Nachbarn) zu untersuchen:

$$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i - 1)} \quad \text{Clustering Koeffizient [Reka_2003]}$$

Da k_i die Anzahl der Kanten, die den betrachteten Knoten mit seinen Nachbarn verbindet, repräsentiert, und E_i die Anzahl der Kanten darstellt, welche zwischen diesen k_i benachbarten Knoten (also der lokalen Nachbarschaft) betrachtet, so kann man sofort erkennen, dass der Koeffizient nur den ungerichteten Fall betrachtet, und darüber hinaus dieser Clustering Koeffizient für minimale Nachbarschaften, wie bspw. außen liegende Knoten welche nur einen Nachbarn haben, überhaupt nicht definiert ist. Selbst eine Anpassung dieses Algorithmus an gerichtete Graphen, welche nicht trivialer Natur ist, schon alleine durch die Frage der neu zu definierenden Nachbarschaft, sowie eine Überbrückung der Definitionslücke, würde dennoch nicht einige andere negative Eigenschaften dieses Maßes für stark unterschiedlich strukturierte Netze ausgleichen. Das Hauptproblem liegt darin, dass Cluster aller Größe den selben Clustering Koeffizienten aufweisen wenn sie gleich stark vernetzt sind, wobei dieser Grad der Vernetzung jedoch nur an der jeweiligen Nachbarschaft gemessen wird, was für ähnlich strukturierte Netzwerke ausreichender Größe auch tatsächlich

relevante Ergebnisse liefert, für kleine Nachbarschaften jedoch darin resultiert, dass selbst ein Cluster aus zwei Knoten, welche untereinander verbunden sind, das höchst mögliche C_i , also die stärkste Verknüpfungsdichte/Komplexität aufweisen würde, auch wenn der Cluster nur aus drei Knoten und drei Verbindungen bestehen würde.

Im Normalfall gibt der Durchschnitt der Koeffizienten, welche für jeden Knoten berechnet wurden, die durchschnittliche Vernetzung des gesamten Netzwerkes (Graphen) wieder und repräsentiert so ein Maß an Komplexität des beobachteten Systems für den ungerichteten Fall (so das System mit allen Details wiedergegeben wurde).

Generell ist die tatsächliche empirische Erhebung dieser beiden Indikatoren und ähnlicher detaillierter Eigenschaften komplexer Systeme, überhaupt erst seit dem extensiven Einsatz der EDV möglich (und daher erst seit kurzer Zeit in Anwendung), da beispielsweise zur Berechnung der charakteristischen Länge, die kausale Entfernung (Länge der Bahnen) von jedem Knoten zu jedem anderen Knoten nötig ist, was im Fall eines Netzwerkes mit 100.000 Knoten (eine relativ moderate Größe für komplexe Netzwerke), im ungerichteten Fall (arithmetische Reihe: $n \cdot (n + 1) \cdot 0,5$) bereits über 5 Milliarden Berechnungen benötigen würden.

In den letzten Jahren wurden in Folge eine Reihe von natürlichen und künstlichen Netzwerken analysiert, wobei in allen möglichen Disziplinen in Netzwerken (und Systemen welche sich als Netzwerke repräsentieren lassen) unterschiedlichster Art und Größenordnung empirische Beweise für ein ähnliches Verhalten gefunden. Speziell natürliche, aus evolutorischen Prozessen entstandene, Netzwerke (Systeme) weisen diese Eigenschaften von Small World Netzwerken auf. Beispiele für solche Netzwerke sind zahlreich und umfassen im Mikrobereich (eher Nanobereich) organische (Menschliches Gehirn, Zellstrukturen) ebenso wie anorganische Strukturen, sowie im Makrobereich bspw. in Kollaborations- (Publikations) Netzwerken im Soziologischen Bereich, vgl. dazu [Buchanan_2002] und [Reka_2002].

Aber auch künstliche Strukturen, welche evolutionär entstanden sind (d.h. im Laufe der Zeit gewachsen sind) scheinen diese Eigenschaften oftmals automatisch zu besitzen, höchstwahrscheinlich da sich diese Eigenschaften als robust erweisen und sich im Laufe der Zeit durchsetzen (Soziologische, Ökonomische Systeme).

Andere künstliche Strukturen, welche revolutionär entstanden sind (künstlich geschaffen wurden), weisen diese Strukturen nicht notwendigerweise auf, aber jene die eine solche Struktur, absichtlich oder unabsichtlich, nachbilden, sind aufgrund ihrer schnellen

durchschnittlichen Erreichbarkeit und der hohen Ausfallsicherheit des Gesamtsystems meist sehr erfolgreich, siehe die Struktur des Internet (einer Partition davon), welches nach Analysen trotz hoher Anzahl an Knoten ein geringes $L = 3,7$ aufweist (ein Zufallsgraph ähnlicher Größe würde $L = 6,36$ aufweisen), im Gegensatz zu einem untersuchten Stromnetz, welches $L = 18,7$ aufwies (der Zufallsgraph hätte $L = 12,4$) [Watts_1999], wodurch sich zeigt, dass die höhere Robustheit des Internet auch mit Hilfe der statistischen Analysetechniken belegen lässt.

Die für makroökonomische Fragestellungen untersuchten Systeme haben, je nach Größe und Entwicklungsstand des untersuchten Landes, mittelfristig gesehen, eine relativ ähnlich hohe (d.h. relativ gleich bleibende) Komplexität, welche im Zuge diverser Globalisierungstrends in den meisten Ländern jedoch auch stetig erhöht wird.

Dennoch wird die Messung der Komplexität im Sinne der Vernetzung der makroökonomischen Prozesse früher oder später thematisiert werden müssen, im Mittelpunkt der folgenden Betrachtungen ist jedoch nicht die Komplexität der beobachteten Systeme an sich, sondern jene der resultierende Modelle, welche die Komplexität der Realität mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad und Komplexität wiedergeben. D.h. die Komplexität von untersuchtem System und abgebildetem System sind aufgrund der meist sehr hohen Aggregationsstufe makroökonomischer Modelle an sich, meist nicht übereinstimmend (nicht einmal auf derselben Stufe).

Komplexität des abgebildeten Systems

Die erste Notwendigkeit bei der Erstellung von makroökonomischen Modellen ist also wie bereits angedeutet die Reduktion der Komplexität der realen Prozesse, was prinzipiell bereits durch die Darstellung als Modell an sich geschieht. Diese Reduktion der Komplexität durch Formalisierung als Modell, entspricht jedoch nicht bei jedem Ansatz ökonomischer Modellierung auch einer Verbesserung des Verständnisses, wie es bei rein statistischen, atheoretischen Modellen der Fall ist, welche die realen makroökonomischen Prozesse zwar vereinfachen und formalisieren, ein Verständnis dieser aber dennoch nicht ermöglichen. Aus einer Vielzahl an Gründen, welche bereits erörtert wurden, ist das explizite Verständnis dieser Strukturen jedoch oftmals von Interesse. Geht man bei weiterer Betrachtung nur von

Modellen aus, welche eine ökonomisch sinnvolle Repräsentation der kurz- bis mittelfristigen Effekte ökonomischer Prozesse liefern, so ergibt sich eine neue Hürde des Verständnisses der beobachteten Strukturen, welche im Model selbst zu suchen ist.

Das bedeutet, dass die Erklärung der Prozesse selbst, welche in Form eines Modells geschieht, selbst wieder zu einem komplexen Konstrukt wird, dessen Implikationen, je nach den Eigenschaften der individuellen Modellierungen, von Menschen nicht mehr ad hoc verstanden werden können. Es ist daher möglich (und auch häufig der Fall), die Erstellung eines Modells, zwar eine große Reduktion der Komplexität gegenüber den ökonomischen Prozessen darstellt, das resultierende Modell (ein Relationensystem) jedoch immer noch zu komplex ist um als solches (Ganzes) verstanden zu werden, und daher erst selbst wieder interpretiert werden muss. In der noch folgenden Arbeit werden daher einige Möglichkeiten vorgestellt werden, welche genau diesem Aspekt Rechnung tragen, in dem sie diesen Schritt der Interpretation vereinfachen und normieren, und damit eine verlässliche unverzerrte (d.h. neutral gegenüber unterschiedlichen ökonomischen Schulen und Theorien sowie politischen Ansichten) Kommunikation, der Strukturen und deren Implikationen, an bestimmte Zielgruppen erst zu ermöglichen.

Aus diesen Überlegungen der Interpretierbarkeit und Verständlichkeit des Modells ergeben sich nun zwei grundsätzliche Faktoren, welche die Komplexität des Modells selbst, verursachen:

- Komplexität resultierend aus den Eigenschaften des Relationensystems
- Komplexität resultierend aus der Art der Repräsentation

Die erste Ebene der Komplexität des Modells resultiert aus den strukturellen und topologischen Eigenschaften des untersuchten Relationensystems, wie der Anzahl der beteiligten Knoten/Variablen, sowie der Anzahl, Art und Verschachtelung der Relationen (Komplexität). Diese resultieren wiederum aus den Grundannahmen, der Detaillierungsstufe und dem Realitätsgrad des Modells, was im Folgenden noch differenzierter betrachtet wird, wobei die Methoden welche eine Bestimmung der Komplexität des Relationensystems ermöglichen, jenen ähneln die diese auch reduzieren können. (Wie beispielsweise die Betrachtung als Graph)

Die zweite Ebene der Komplexität, welche aus der Art der Repräsentation folgt, betrifft die Verständlichkeit der Modellierungstechnik an sich. Grundsätzlich erfüllt der Aspekt der *formalen* Repräsentation von Systemen zwei Aufgaben, jene der Formalisierung zum Zweck der Berechenbarkeit, sowie der Formalisierung zur Verbesserung der Verständlichkeit (bzw. Vereinheitlichung des Verständnisses).

Die beiden Faktoren weisen jedoch einen großen Unterschied auf, denn der Aspekt der Berechenbarkeit bleibt, in aller Regel, auch bei großen Modellen mit einer hohen Anzahl an Relationen (>1000), erhalten, wenn auch Modelle dieser Größe aufgrund ihrer Komplexität (computational complexity) nur mehr mit Computern gelöst (genähert) werden können – dennoch ist es möglich.

Der Aspekt der Verständlichkeit, welcher in engem Zusammenhang mit der Struktur von formalisierten Relationensystemen ist jedoch nur bei elementare Beziehungen, bzw. einer geringen Anzahl an Verschachtelungen gegeben, wobei die Möglichkeit der Erfassung der Implikationen aller Zusammenhänge bereits ab einer geringen Zahl an Relationen (vermutlich einer Zahl unter zehn) abnimmt und kurz darauf völlig verloren geht, was durch die stark eingeschränkte menschliche Wahrnehmungs- und Speicherkapazität [Miller_1956] begründet ist, worauf im folgenden Kapitel noch eingegangen wird. Um einen Überblick über wichtige Eigenschaften und Dynamiken des Systems zu ermöglichen, sowie bei Bedarf auch detaillierte Relationen betrachten zu können, ist daher eine Art der Darstellung des Modells nötig, welche eine geringe Komplexität in Form einer weniger abstrakten Repräsentation hat, wozu die Visualisierung, d.h. eine graphische Repräsentation dienen wird.

Dennoch steht außer Frage, dass komplexe Systeme, wie makroökonomische Systeme, aus vielen Gründen/für unterschiedliche Zwecke, in einer stark formalisierten Form vorliegen müssen. Deshalb wird in dieser Arbeit auch nicht empfohlen Modelle an sich (bzw. ausschließlich) in einer graphischen Form zu formulieren (wie dies bei geometrischen Modellen der Fall wäre), sondern die Anwendung von Methoden zur vereinfachten graphischen Repräsentation von formalisierten Modellen, in welcher Form (algebraisch, algorithmisch) diese auch immer vorliegen. Auch wenn es einige Methoden gibt komplexe dynamische Dynamiken als graphische Modelle zu entwickeln, so werden auch diese danach mit einem zusätzlichen, stärker formalisierten, Modell erweitert, in dem die visuell entwickelten Relationen quantifiziert werden.

Um die Komplexität eines bestimmten Modells, welche durch die strukturellen Eigenschaften des Relationensystems verursacht wird, nun tatsächlich erfassen, bzw. einschätzen zu können, muss die Struktur dieser Modelle betrachtet werden, wozu hier nun eine Rangordnung in enge Anlehnung an Hanappi vorgestellt wird, welche eine Einteilung ermöglicht. Die grundsätzliche Einteilung des Relationensystems erfolgt unter Betrachtung jener Strukturen, welche bereits in den vorigen Kapiteln vorgestellt wurden.

In einem ersten Schritt betrachtet man die Komplexität der einzelnen Relationen, welche, ausgehend von der Komplexität ihrer Lösbarkeit (welche sich ja erst aus der logischen Komplexität ableitet), grob gesprochen folgende Komplexitätsstrukturen haben können:

Rein Algebraische Komplexität

<i>Temporale Komplexität</i>	Relationen	Linear	Nicht-Linear
	Statisch	<i>SL</i>	<i>SN</i>
	Dynamisch (Lag)	<i>DL</i>	<i>DN</i>
	Dynamisch (Lead)	<i>LL</i>	<i>LN</i>

Tabelle 2: Komplexität von ökonomischen Relationen

Die höhere Komplexität von tatsächlich nicht-linearen, im Gegensatz zu linearen Relationen, ist zumindest im Sinne der Berechenbarkeit jedenfalls einleuchtend, schon da sie Operatoren höherer Ordnung verwenden und dadurch keine leicht antizipierbaren linearen Verläufe mehr enthalten.³⁰

Die temporale Komplexität der Relationen ist ähnlich, denn die Berechnung dynamischer (gelagter) endogener Variablen erfordert jedenfalls die Durchführung von Simulationen, d.h. das Relationensystem kann nicht in einer Berechnung (einem Simulationslauf) komplett endogen gelöst werden (d.h. nicht ohne der Verwendung vorbestimmter Variablen), dennoch werden die Variablen dann in Form von vorbestimmten Variablen verwendet. Daher

³⁰ Man könnte dieses Kriterium noch weiter unterscheiden, etwa durch zusätzliches Einfügen eines Log-Linearen Falls, welcher in der Unterscheidung der Komplexität zwischen den beiden liegt, was jedoch nicht üblich ist, da der Verlust der einfachen Lösbarkeit des linearen Systems (mittels Matrix Inversion) bereits im log-linearen Fall geschieht. Dennoch könnte man den nicht-linearen Falls, betreffend der zur Verwendung kommenden Operatorengruppen, unterscheiden, d.h. man könnte einzelne Stufen der algebraischen Komplexität, wie Strich-, Punkt-, Exponentialoperatoren unterscheiden.

entstehen durch hinzufügen von Lags, keine zusätzlichen kausal interdependenten Strukturen, dennoch erfordert die Lösung den Einsatz der Simulation und erhöht daher die Komplexität, darüber hinaus sind auch die Auswirkungen an hand von Daten erst nach einigen Perioden abzulesen (Je nach Verzögerung).

Die Komplexität von vorlaufenden dynamischen endogenen Variablen (Leads) ist theoretisch noch höher, da Werte verwendet werden sollen, welche im gegenwärtigen Zeitpunkt t der Simulation noch nicht berechnet wurden, da sie von gegenwärtigen Variablen abhängen, die Berechnung bedarf daher eines Näherungsverfahrens, sowie die Interpretation von Zukunftswerten, welche je nach Lösungsverfahren auch eigentlich eine andere Aussage (und oftmals nicht in jedem Fall Ergebnisse) liefert.

Die Komplexität der Relationen C_R definieren wir daher folgendermaßen, wobei das Modell, wie in im vorigen Teilkapitel bei der Erstellung der Graphen, in Relationen (Kanten) zwischen zwei Variablen (Knoten) zerlegt wird:

- Die elementare Beziehung, in welcher eine endogene Variable lediglich von einer anderen laufenden (exogenen) Variablen (linear) abhängt, ist die einfachste (die triviale) Relation mit geringster Komplexität ($C_R(SL) = 1$). Endogene laufende Variable können komplexere Relationen verursachen, wenn sie interdependente Strukturen bilden, dies wird jedoch in einem späteren Schritt betrachtet, daher ist ihre Komplexität ebenfalls eins.
- Für Relationen ist die Komplexität so definiert, dass folgende Bedingungen erfüllt sind: $C_R(SL) < C_R(SN)$, $C_R(DL) < C_R(DN)$, $C_R(LL) < C_R(LN)$, $C_R(SL) \leq C_R(DL)$, $C_R(SL) \leq C_R(LL)$, $C_R(DL) \leq C_R(LL)$, $C_R(SN) \leq C_R(DN)$, $C_R(SN) \leq C_R(LN)$, $C_R(DN) \leq C_R(LN)$
 - Jede intertemporale Relation erhöht die Komplexität der Relation in Höhe der zeitlichen Verzögerungen, d.h. die Dauer des zeitverzögerten Effektes, welche diese Relation im System erzeugt ($C_R = 1 + L(R)$), wobei jedoch die zusätzliche Komplexität der vorlaufenden Relationen diese zusätzlich erhöht, ($C_R = 1 + L(R) + 1$)

- Jede log-lineare Relation erhöht die Komplexität der Relation um eins ($C_R' = C_R + 1$), jede nicht-lineare Relation erhöht die Komplexität um zwei.

Die Komplexität des Modells (C_M) setzt sich nun aus der Komplexität der Relationen (C_R) zusammen, wobei jedoch unterschiedliche Kombinationen von Relationen unterschiedliche Komplexität hervorrufen kann, d.h. Relationen, welche einander gegenseitig beeinflussen (interdependente Strukturen) sind komplexer als andere:

- Je größer die Anzahl an Variablen in einer Zusammengesetzten Relation, desto komplexer ist die zusammengesetzte Relation (durch Input- bzw. Output-Verzweigungen verursachte Komplexität)
 - Daher: Grundsätzlich ist die Komplexität des Systems, vorerst unter Vernachlässigung der interdependenten Strukturen gleich der Summe der Komplexität der einzelnen Relationen ($C_M = \sum C_R$)
- Die Anzahl der Variablen (k) in interdependenten Blöcken (d.h. die Anzahl der Variablen, welche an kausalen Schleifen beteiligt sind und sich daher gleichzeitig beeinflussen), bildet die interdependente Komplexität (C_I) und wird zur Komplexität des Systems addiert ($C_M' = C_M + C_I = C_M + k$), denn jede interdependente Relation muss beim simultanen Lösungsverfahren mit berücksichtigt werden.

Auf diese Weise kann nun eine Art Komplexität des Modells berechnet werden, so wie sie sich für einen neutralen Betrachter des Modells ergeben würde, diese kann man als strukturelle Komplexität bezeichnen welche vom Modell verursacht wird, und nach einer höchstwahrscheinlich nötigen Anpassung der einzelnen Wertigkeiten (je nach angewandten Lösungsverfahren) auch in der zur Lösung des Modells nötigen Zeit (calculation time) niederschlägt.

Wie jedoch bereits erwähnt wurde, gibt es jedoch unterschiedliche Personengruppen, d.h. es gibt nicht nur eine Art Betrachter mit dem selben Vorwissen und der selben Auffassungsgabe.

Daher ergibt sich für einen tatsächlichen Betrachter jedoch eine unterschiedliche große Komplexität desselben Modells, d.h. die wahrgenommene Komplexität des Modells ist ein relatives Maß. Die Wahrgenommene Komplexität ist daher von mehreren Faktoren abhängig:

- Der strukturellen Komplexität des Modells C_M
- Ökonomisches Vorwissen des Betrachters E_U
- Anpassungsgeschwindigkeit (Intelligenz) des Betrachters I_U

Die individuelle Komplexität, mit welcher sich nun einen Benutzer des Modells konfrontiert sieht, ist dann $C_U = 1 / C_M \cdot 0,5 (E_U + I_U)$, wobei E_U und I_U derart gewählt werden, dass I_U bei einem Benutzer durchschnittlicher Intelligenz gleich eins ist, sowie E_U für einem Benutzer welcher das Modell gut kennt, bzw. dessen extensives ökonomisches Wissens solchen Kenntnissen gleichkommt, eins beträgt (d.h. eins wäre das Maximum). Das bedeutet, dass die individuelle Komplexität für einen Benutzer mit mittlerer Intelligenz, welcher das Modell kennt, gleich der strukturellen (objektiven) Komplexität wäre, d.h. $C_U = C_M$.

Tatsächlich gibt es nun eine (mehr oder weniger weiche) Schwelle individueller Komplexität, ab welcher die Implikationen eines Modells, bspw. in Form von Gleichungssystemen, erst langsamer erfasst werden, und irgendwann überhaupt nicht mehr direkt betrachtet werden können – Modelle welche diese Schwelle überschreiten können daher nicht mehr als Ganzes erfasst werden – es können nur mehr Teile betrachtet und bewertet werden.

Psychologisch gesehen gibt es darüber hinaus noch eine Frustrationsschwelle bei der Informationsaufnahme, welche bei Überschreitung einer höheren individuellen Komplexitätsschwelle (sehr individuell), zu einem in einem absoluten Unverständnis des gesamten Modells führen können (emotionale Reaktionen), diese ist jedoch noch schwerer zu erfassen.

Wie bereits erwähnt hat die individuelle Komplexität jedoch noch einen weiteren Faktor – die Darstellungsart des Modells, welche zwar theoretisch allen Benutzern eine ähnlichen Vorteil bringen sollte, es kann jedoch aufgrund der variierenden Ausprägung der Wahrnehmung unterschiedlicher Personen variieren, welche nicht unbedingt mit dem Vorwissen in Verbindung steht (Visuelle Typen, Mathematische Begabung, usw.). Dennoch sind die Unterschiede zwischen Personen mit vergleichbarem Vorwissen im Durchschnitt gesehen vermutlich sehr ähnlich, wir nehmen die Komplexität, welche aus der Art der Darstellung des

Modells resultiert (C_T) daher als relativ einheitliche Konstante an: $C_U' = C_T / C_M \cdot 0,5 (E_U + I_U)$, wobei C_T für eine Darstellung als Gleichungssystem als eins angenommen wird.

Es gilt nun daher diese Komplexität C_U zu reduzieren, was anhand einer Änderung der Darstellung geschehen kann, welche eine geringere Komplexität aufweist, d.h. C_T soll reduziert werden. Um dies effektiv erreichen zu können muss jedoch ein Teil der Genauigkeit aufgegeben werden, was jedoch nur zu Zwecken allgemeiner Analyse akzeptabel ist, meist wenn der Benutzer ein niedriges E_U aufweist, was jedoch unterschiedliche Gründe haben kann, wie beispielsweise einen ökonomischen Laien (Entscheidungsträger mit mehr oder weniger langfristig niedrigem E_U), sowie bei der Analyse eines fremden Modells durch einen Experten (kurzfristig niederes E_U) – oder wenn die strukturelle Komplexität C_M sehr hoch ist, d.h. in allen Fällen in welchen C_U sehr hoch ist, muss zwangsläufig auf Detail verzichtet werden um Einblicke gewinnen zu können.

Wie im nächsten Kapitel besprochen werden wird, bietet die Visualisierung (d.h. die Repräsentation des Modells in grafischer Form) die beste Möglichkeit Modelle mit hohem C_U effektiv zu reduzieren, wobei beide Möglichkeiten der Reduktion abgedeckt werden können:

- Reduktion der Komplexität C_U um einen Faktor
- Reduktion der Komplexität C_U auf einen (relativ) konstanten Wert

Die Reduktion um einen Faktor wurde bereits besprochen, und erfolgt alleine durch Darstellung in einer übersichtlicheren Form, welche leichter mehr Daten transportieren kann, d.h. durch geeignete Visualisierung.

Die Reduktion auf einen konstanten Wert (C_V), d.h. $C_U = C_D$, ist hingegen keine triviale Aufgabe, da diese nichts geringeres, als die Repräsentation eines beliebig großen und komplexen Modells, als eine konstant große und konstant komplexe Menge an entscheidenden Relationen, erfordert. Dabei kann jedoch, je nach struktureller Komplexität des Modells, nur mehr ein sehr kleiner Teil des Modells angezeigt werden, was daher nur als eine alternative Methode der Darstellung, für bestimmte Fragestellungen, welche einen allgemeinen Überblick liefern sollen, akzeptabel wäre.

2.4 Schlüsse

Im ersten Kapitel wurde eine Einführung in wichtige Begriffe der makroökonomischen Modellierung gegeben, wobei die Charakteristika, die für die Analyse der ökonomischen Strukturen meist verwendete Darstellung in Form von Differenzgleichungssystemen (DSE), genauer untersucht wurden. Es wurden ebenfalls die Zusammenhänge zwischen dieser Darstellungsart sowie anderen alternativen Ansätzen untersucht und ermittelt, welche Modellierungsansätze einer tiefer gehenden Analyse bedürfen, bzw. bei welchen eine weitere Analyse überhaupt sinnvoll ist. Der Begriff eines (ökonomisch sinnvollen, d.h. nicht atheoretischen) Relationensystems ökonomischer Größen bildet damit die Schnittmenge der Ansätze, welche sinnvoll untersucht werden können.

Aufbauend darauf wurden in diesem zweiten Kapitel die Grundlagen statischer und intertemporärer (dynamischer) kausaler (ökonomischer) Strukturen betrachtet, welche inhärenter Bestandteil eines solchen dynamischen ökonomischen Relationensystems sind – das allen hier relevanten Modellen zugrunde liegt. Dies geschah anhand der dafür gut geeigneten Graphentheorie, in Anlehnung an, in der Literatur speziell in Lehrbüchern teilweise eingesetzte, Block- und Ablaufdiagramme. Die Begriffe der kausalen Entfernung und speziell der temporalen kausalen Entfernung wurde als wichtiger Bestandteil jeder Analyse dynamischer Modelle entwickelt, welche sich sowohl auf die nötigen Parameter der Analyse der Systeme, als auch auf die Komplexität der betrachteten Modelle im Allgemeinen auswirkte. Je höher der Grad der Vernetzung, speziell der intertemporären Vernetzung, desto komplexer sind die Modelle, wodurch die Manifestation aller kausalen Effekte immer stärker verzögert wird, bzw. kurz- bis mittelfristig nicht mehr im betrachteten Zeithorizont des Modells beobachtbar ist.

Als gemeinsamer Nenner der Modelle, sowohl in Form algebraischer (Gleichungssysteme bzw. Matrizen) als auch algorithmischer Modelle (Computerprogramme), wurde eine intertemporäre Art der General Function Form in engem Zusammenhang mit repräsentierenden Graphen, herausgearbeitet, welche aus den Modellen zu extrahieren ist, und eine vereinheitlichte Realisierung des zuvor erwähnten Relationensystems repräsentiert. Dadurch sind die Kernstrukturen des Modells erkennbar, wobei bei der Analyse der genauen

Richtung und Stärke der Relationen zwischen den ökonomischen Größen, bzw. den Variablen, in weiterer Folge entweder durch das Eingehen auf die speziellen Strukturen der einzelnen Modellierungstechniken möglich ist, bzw. bei manchen algorithmischen Ansätzen überhaupt nicht möglich sein wird, oder durch Anwendung numerischer Methoden (Näherungen mittels Analyse von Simulationsläufen), welche in der Lage sind alle Modelle zu betrachten – diese müssen jedoch in enger Anlehnung an die jeweilige Analysetechnik angesetzt werden, weshalb dieser viel versprechende Ansatz erst im Kapitel der Umsetzung zusammen mit den Darstellungsmethoden angesprochen wird.

Die hier durchgeführte Analyse der, von makroökonomischen Modellen zu erwartenden Strukturen, lieferte einen Überblick welche Charakteristika diese aufweisen würden, worauf in den späteren Kapiteln zurückgegriffen werden wird.

Als wichtiger Punkt wurde auf die Komplexität der zu erwartenden Modelle, auf Basis ihrer Strukturen sowie dem Wissen und den Fähigkeiten des Benutzers, eingegangen, in dem ein theoretisches Maß für die Komplexität etabliert wurde, aus welchem in weiterer Folge die Möglichkeiten der Einflussnahme auf die, vom Modellbenutzer wahrgenommene, Komplexität abgeleitet wurden.

3 Informationsvisualisierung

Der Bereich der Informationsvisualisierung beschäftigt sich im Gegensatz zu anderen Bereichen der Visualisierung mit der Darstellung von abstrakten Daten, mit dem Ziel die Komplexität der betrachteten Daten oder Strukturen, wie sie im letzten Kapitel definiert wurden, effektiv zu reduzieren. Diese Komplexitätsreduktion soll es ermöglichen eine größere Zahl an Daten oder komplexeren Strukturen in kürzerer Zeit zu erfassen und zu beurteilen, als dies nur anhand von Datenreihen oder Gleichungen möglich wäre. Dieser Effekt der *kognitiven Verstärkung* kann jedoch nur durch geeignete Darstellungen erreicht werden, wobei jedoch nicht notwendigerweise alle Fragestellungen betreffend bestimmter Daten oder Strukturen, in einer einzelnen Darstellung beantwortet werden können, da dies zu einer „Überladung“ der Darstellung führen kann, welche der Reduktion entgegenwirkt, bzw. diese komplett negieren kann.

Die allgemeine Begründung dafür, dass die erwähnte Komplexitätsreduktion am besten mit einer visuellen Darstellung erreicht werden kann, liegt einfach gesagt darin, dass ein Großteil der menschlichen Kognition (und damit der Verarbeitungskapazität des menschlichen Verstands), zumindest bei einem Großteil der Menschen (Abgesehen von Behinderten oder speziell begabten/trainierten Personen), ohnehin im visuellen Wahrnehmungssystem gebunden ist und stetig versucht relevante visuelle Muster zu analysieren und mit Bekannten Mustern zu vergleichen, auch wenn der Großteil dieser Energien relativ „banal“ (zur räumlichen Fortbewegung, Freund/Feind Erkennung, usw.) genutzt wird. Dennoch kann das Potential dieses Wahrnehmungssystems (dieses Sinns)³¹ auch für andere Aufgaben, wie der

³¹ Lange Zeit kursierte das Gerücht, dass das Potential des menschlichen Verstandes nur zu etwa zehn Prozent ausgenutzt wird, und auch in diversen populistischen Medien noch heute kursiert, speziell wenn es darum geht Schulungen und Bücher, bzw. generell esoterische Ideen übernatürlicher psychischer Kräfte zu verkaufen, welche die Nützung der restlichen neunzig Prozent ermöglichen (populärstes Beispiel: Uri Geller's Autobiographie (1995) enthält diese Behauptungen angeblich noch immer). Generell existiert dieser Mythos bereits seit längerem und wurde in der Periode von 1870-1930 noch dadurch verstärkt, dass Experimente/Untersuchungen an Menschen durchgeführt wurden (teilweise auch an Tieren (Hunde, Katzen), welche zu noch inkorrektoren Rückschlüssen auf Menschen führten – Im Gegensatz zum organischen Aufbau des Gehirns, unterscheidet sich die Strukturierung der Bereiche des menschlichen Gehirns sehr stark von jener bei fast allen Tieren), bei welchen, später bereits sehr gezielte Elektroschocks (mit minimaler Spannung anhand von Nadelelektroden) in einzelnen Gehirnregionen erzeugt wurden, um so Reaktionen (Muskelzuckungen usw.) hervorzurufen. Auch bei diesen Test zeigt sich, dass sehr große Bereiche des menschlichen Gehirns scheinbar

Analyse abstrakter Zusammenhänge und Strukturen benutzt werden, wozu eine Reihe von Möglichkeiten zur Verfügung steht. Grundsätzlich nützt bereits die Schrift diese Tatsache aus, d.h. Texte, Zahlen und Formeln bedienen sich des visuellen Wahrnehmungssystems und der Mustererkennung. Der wichtige Unterschied liegt jedoch darin, dass diese Aufgaben sehr weit von der "natürlichen", d.h. instinktiven Wahrnehmungen entfernt sind – Verbindungen mit bekannten visuellen Strukturen sind nur indirekt herstellbar, d.h. es müssen erst Assoziationen hergestellt werden, bzw. es muss völlig auf diese verzichtet werden, wenn es sich um sehr stark abstrahierte Informationen handelt. All dies resultiert darin, dass diese Art der Informationsverarbeitung zum Großteil bewusst erfolgen muss, wodurch jedoch der Großteil des Potentials, welches bei der visuellen Informationsverarbeitung prinzipiell zur Verfügung steht, verloren geht.

Geht man nun dazu über diese Strukturen und Zusammenhänge visuell darzustellen, wobei man sich Elementen bedient, welche den natürlichen Wahrnehmungen etwas ähnlicher sind als bspw. Zahlen und Gleichungen, bzw. sich leichter mit anderen Informationen verbinden lassen, so können diese sofort auch instinktiv, d.h. größtenteils unterbewusst beurteilt werden. Gleichzeitig werden bei vielen Darstellungen wie Diagrammen und ähnlichen Darstellungen zusätzlich zu einer generellen Vereinfachung der Wahrnehmung durch die graphische Darstellung, zusätzliche Vereinfachungen vorgenommen da für die meisten Fragestellungen auf viele Detailinformationen verzichtet werden kann. (So muss man bspw. zur Erkennung von Trends nicht unbedingt absolute Zahlen ablesen können – meist ist es ausreichend ungefähre Größen zu erkennen, insofern die Verhältnisse der Werte untereinander korrekt sind. Daher ist für eine solche Aufgabe auch ein Histogramm ausreichend – so die Zahlen zum Nachschlagen verfügbar sind)

nicht auf diese Stimuli reagierten, wodurch diese Regionen als „Silent Cortex“ bezeichnet wurden, was von anderer Seite als inaktive Bereiche fehlinterpretiert wurde [Wanjek].

Nachdem auch Einstein einmal eine humorvolle Bemerkung zu diesem Thema machte und die zehn Prozent erwähnte, hielt sich dieses Gerücht noch hartnäckiger. Weiter verstärkt wurde dieser Effekt durch die ersten Computertomographien des menschlichen Gehirns, welche erstmals versuchten die aktiven Bereiche des menschlichen Gehirns abzubilden, tatsächlich Bilder lieferten auf welchen nur ein kleiner Teil des Gehirns Aktivität zeigten. Interessant ist nun hierbei, dass heute selbstverständlich bekannt ist, dass dies lediglich eine Folge dessen war, dass die Untersuchungskammer (Röhre) dunkel war (und darüber hinaus noch lautlos), weshalb die respektiven Bereiche für visuelle und audible Datenverarbeitung im Gehirn zu dieser Zeit scheinbar inaktiv waren. Spätere Untersuchungen mit externen Stimuli zeigten darüber hinaus, dass nicht alle Bereiche des Gehirns gleichzeitig aktiv sind, sondern dass es einige dedizierte Datenverarbeitungs- Regionen gibt. So gibt es große Bereiche für die visuelle Wahrnehmung sowie für die sprachliche Interaktion, welche in der Neurochirurgie bspw. für epilepsiechirurgische Eingriffe auch tatsächlich lokalisiert werden müssen und auch werden können (Speziell da diese nicht bei jeder Person gleich lokalisiert sind).

Durch graphische Darstellungen ist es daher auch möglich die Dichte der Informationen, welche auf einem Blatt Papier oder einem Bildschirm gleichzeitig wiedergegeben werden können, drastisch zu erhöhen, wobei die Anzahl der nicht aus Daten resultierenden visuellen Strukturen minimiert werden soll (Unnötige Hilfslinien, Beschriftungen vermeiden), da diese die Sichtbarkeit der tatsächlichen Informationen behindern können.

Analog dazu ist das Ziel der neueren Informationsvisualisierung ein schnelles intuitives Verständnis von Zusammenhängen bzw. (Daten-)Situationen zu ermöglichen, ohne lange Lern- oder Anpassungszeiten zu benötigen, so die Darstellung sorgfältig entwickelt ist und die jeweiligen Informationen in einer passenden und konsistenten Weise dargestellt werden.

Da die Bereiche der Informationsvisualisierung als transdisziplinäres Teilgebiet der angewandten Computergrafik inzwischen seit mehr als zwei Jahrzehnten intensiv bearbeitet werden und bereits große oftmals zufrieden stellende Fortschritte erreicht wurden, sind große Teile der relevanten Wahrnehmungspsychologie³² sowie die bekannten Grundlagen der menschlichen visuellen Wahrnehmung de facto bereits Standardwissen. Es wird in dieser Arbeit daher nur grundlegend auf diese Konzepte eingegangen, ausgehend von der Art der Einschränkung der menschlichen Wahrnehmung und Informationsverarbeitung. Dennoch ist es nötig dabei einige wichtige Begriffe der Informationsvisualisierung zu erklären, welche die Möglichkeiten der Darstellung sowie die Eignung bestimmter Darstellungen für die vorliegende Fragestellung der Visualisierung ökonomischer Modelle betrifft. Dies ist auch deshalb nötig, da die Grundsätze der Darstellung abstrakter Informationen, mittels graphischer Konstruktionen (also in Form von Diagrammen, Netzen, usw.), zwar bereits seit den späten siebziger Jahren bzw. den frühen achtziger Jahren bekannt sind (Vorreiter waren speziell Bertin, und Tufte, wobei letzterer darüber hinaus auch bis heute der kritischste Betrachter vieler Ansätze und der Folgen ihrer Fehler ist), die realisierten Darstellungsarten diesen jedoch nicht immer Rechnung tragen, bzw. diese oft ignorieren. Dies zeigt sich oftmals in der ungeeigneten Wahl der graphischen Metapher und damit der Imposition der Informationen in der Darstellung in Bezug auf eine bestimmte Fragestellung, oder durch schlechte Zuweisung der Informationen zu den verfügbaren visuellen Variablen (den

³² Eine der umfassendsten und relevantesten Arbeiten, welchen den meisten weiteren Betrachtungen der Effektivität und Möglichkeiten der grafischen Darstellungen als Grundlage diente, und noch bis heute Relevanz hat ist die Arbeit von Miller [Miller_1956], welche auch Vergleiche mit der Verarbeitung anderer (audiblen) Stimuli enthält, und erstmals das scheinbare Gesetz der (magischen) Sieben (plus/minus zwei) in der Wahrnehmung etablierte, welches für jede graphische Darstellung abstrakter Zusammenhänge relevant ist.

möglichen visuellen Eigenschaften), was zu einer Reduktion der Lesbarkeit der Darstellung führt und damit dem gewünschten Effekt der Reduktion der Komplexität ebenfalls vermindert.

3.1 Visuelle Datenverarbeitung

Die Wahrnehmung visueller Informationen erfolgt in enger, kaum auseinander zu haltender Interaktion des optischen Systems des Auges, welches bestimmte physische Wahrnehmungsmöglichkeiten hat, welche jedoch im Sehzentrum des Gehirns noch weiter verstärkt werden. Die Möglichkeiten der Wahrnehmung dieses Systems werden in einem späteren Kapitel angesprochen, da sie in letzter Zeit in engem Zusammenhang mit konkreten Möglichkeiten der Darstellung und der Wahl möglicher visueller Elemente in einer solchen untersucht wurden. Diese bezieht sich jedoch hauptsächlich auf die automatische Verarbeitung der wahrgenommen Bildinformationen, was jedoch nicht der letzte Schritt der visuellen Datenverarbeitung des menschlichen Gehirns ist – danach werden die wahrgenommen Informationen weiter verarbeitet, das Gesehene abstrahiert und in Beziehung zu bereits bekannten Informationen gesetzt, was im Folgenden grob betrachtet wird, da hier die große Stärken und Schwächen der menschlichen visuellen Datenverarbeitung ihren Ursprung haben.

Beginnt man diese Analyse mit einer Betrachtung des menschlichen Verstandes an sich, so kann man sehen, dass dieser, im Hinblick auf abstrakte Informationen, relativ begrenzte Möglichkeiten der Verarbeitung und Speicherung hat, und per se nicht zu den Höchstleistungen fähig ist, welche zu den heutigen wissenschaftlichen und technischen Errungenschaften führten [Norman_1993]. Genauer gesagt ist das (durchschnittliche) menschliche Gedächtnis/Gehirn auf sich gestellt (d.h. ununterstützt), weder in der Lage eine große Menge an abstrakten Informationen, noch strukturell sehr komplexe Informationen, auf einmal zu erfassen und zu verstehen, d.h. ein mündlicher Vortrag eines komplexen Themas oder das bloße Hören einer Vielzahl an abstrakten Informationen ist schwer bis gar nicht zu erfassen. So haben bspw. die meisten Personen bereits Probleme damit sich einige Telefonnummern zu merken, da die Zahlen per se kein logisches Muster enthalten (Ausgenommen künstlich strukturierte Telefonnummern, welche etwa Abteilungen bzw. eine

ganze Hierarchie kodieren, wodurch sie jedoch auch nicht mehr rein abstrakt sind. D.h. es handelt sich hier bereits um eine Verknüpfung mit anderen Informationen um die menschliche Kognition zu unterstützen).

Um diese Barrieren zu Umgehen oder Durchbrechen zu können ist es daher nötig externe Hilfsmittel hinzuzuziehen, wobei graphische Hilfsmittel die bei weitem effektivsten sind. Die, vom graphischen Standpunkt aus gesehen, einfachste Form solcher graphischer Hilfsmittel wären bspw. textuelle Notizen, Berechnungen auf dem Papier, usw. So ist bspw. bereits die Multiplikation mehrstelliger nichttrivialer Faktoren (>3 Stellen, wobei die Einer-Stelle nicht gleich null ist) ohne schriftliche Aufzeichnungen oder Lösungshilfen (bspw. alternative Berechnungsalgorithmen wie Trachtenberg) kompliziert bis unmöglich. Das Problem ist hier jedoch, bei Anwendung der üblichen Lösungsmethode, nicht die Komplexität der einzelnen Teilberechnungen, sondern die Speicherung der Zwischenergebnisse (ohne bei jeder zusätzlichen Zwischenspeicherung die vorigen Ergebnisse wieder zu verlieren/löschen). D.h. es findet eine *Externalisierung* der Berechnung (Zwischenspeicherung) statt, bei welcher das Papier als externes zusätzliches Kurzzeitgedächtnis fungiert. Das menschliche Kurzzeitgedächtnis, welches alle bewusst erfassten Informationen passieren müssen, hat generell nur eine sehr stark eingeschränkte Kapazität, wobei die Speicherung abstrakter Daten, welche an sich keine tiefere Bedeutung haben, sondern maximal in Zusammenhang mit anderen Eindrücken stehen, am ineffizientesten ist (Beispiele dafür sind Telefonnummern, Internet Adressen (d.h. IP-Adressen = 12 Stellen, usw.)

Grundsätzlich ist der menschliche Verstand / das Gehirn aufgrund seiner Entstehungsgeschichte dazu ausgelegt (für das individuelle Überleben) wichtige (natürliche) Sinneswahrnehmungen (Bilder, Geräusche, Gerüche), mit anderen ähnlichen Informationen zueinander in Beziehung zu setzen. Schon um einer bereits früher begegneten natürlichen Gefahr ausweichen zu können ist es nötig diese schnell wieder erkennen und richtig zuordnen zu können (Gefahren, Freunde, Personen usw.), was den Menschen durch eine sehr effektive und schnelle Mustererkennung möglich ist. Diese ist jedoch darauf ausgerichtet gerade wahrgenommene visuelle reale Muster (Muster / Bildteile) mit bereits gespeicherten Bildern ungefähr zu vergleichen, was die Erfassung / Speicherung abstrakter Daten zu einer komplexen Aufgabe macht. Möglicherweise auch da sie nicht als „wichtige“ Daten / Erinnerungen erkannt werden (was das Speichern von Informationen welche man sich merken muss, an welchen man aber kein eigentliches Interesse hat, bzw. gar eine gezielte Abneigung

hat, nicht erleichtert – daher fällt Kindern das Lernen von für sie uninteressanten Fächern schwer – es wird umso schwerer je mehr sie sich innerlich dagegen wehren). Eine Reihe von Schnelllern- und Schnellesetechniken benötigt daher oftmals eine „Einstimmung“ in das zu lesende und erfassende Material um auch unterbewusste (bzw. unbewusste) Gegenwehr zu reduzieren, wodurch die Lesegeschwindigkeit und Merkfähigkeit drastisch erhöht werden kann [Scheele_2001].

Der große Vor- und Nachteil der menschlichen visuellen Wahrnehmung (im Vergleich zu künstlicher Wahrnehmung wie bspw. einer digitalen Kamera) ist, dass die Informationen nicht völlig exakt gespeichert werden, sondern dominante Hauptmerkmale erfasst werden, anstatt aller Details, d.h. es wird im Normalfall keine „Bitmap“ aus vielen Punkten exakt gespeichert, (mit Ausnahme einiger Personen → „eidetic memory“) wie dies bei einer digitalen Kamera der Fall wäre. Aus dieser Speicherung ungefährender Merkmale und Zusammenhänge resultieren Probleme bei der Speicherung exakter Merkmale, wie bspw. Zahlenmengen, welche daher auch nur per Externalisierung sinnvoll verarbeitet werden können, aber auch der Vorteil, dass zukünftige Mustererkennungsversuche (erfolgreiche Datenabrufung) schneller funktionieren (weniger Daten zu durchsuchen) und auch bei leicht veränderten Merkmalen (Andere Lichtverhältnisse, Witterung, bzw. bei Menschen: Alterung, Erkrankung) dennoch erfolgreich sind (ähnlich zu [Resnikoff_1987]), eine Fähigkeit welche in der Informatik nachzubilden versucht wird, und für Maschinen nach wie vor eine sehr komplexe Aufgabe ist.

Im Gegensatz zur hohen Komplexität abstrakter Daten, können gelesene Texte, selbst in modernen Sprachen (im Gegensatz zu Zeichensprachen in welchen die Zeichen aus stilisierten Abbildungen der Realität bestehen und somit Worte in „normalen“ Sprachen repräsentieren), leichter sinngemäß erfasst werden, was nur dadurch möglich ist, dass sie nicht als Strings (bzw. Buchstabenfelder), d.h. Folgen an sich abstrakter Zeichen (Buchstaben) gespeichert werden, sondern, so es sich nicht um einen komplexen abstrakten Text handelt, als sinngemäße Bildfolgen (bzw. in enger Anlehnung an Bilder). Diese Art der Speicherung wird normalerweise bereits bei der Textaufnahme (beim Lesen) realisiert, was zur Folge hat, dass ein halbwegs geübter Leser meist ganze Worte auf einmal erfasst (liest), welche im

Normalfall mit gespeicherten Bildern assoziiert werden³³. Je bewusster diese Assoziation mit Bildern geschieht, desto leichter fällt die Speicherung, was auch zur Entwicklung von Memorisierungstechniken geführt hat welche diesen Effekt ausnützen (Immer wieder in populistischen Medien auftretende “Gedächtniskünstler“ nützen diese Technik um eine Reihe von Informationen zu speichern, welche keine besondere Bedeutung für die Person haben – Unbekannte Namen, Telefonnummern, usw.). Auch Personen mit besonders ausgeprägter (perfekter) visueller Speicherung, fertigen von überflogenen gelesenen Texten mentale Fotografien an, wovon sie die Texte bei späterem Abrufen ablesen können – im Normalfall sind dies jedoch Bilder und die Texte nicht notwendigerweise verinnerlicht, da sie nicht in ihren Einzelteilen zerlegt wurden.

Betrachtet man nun Wörter als Ganzes, so erkennt man dass diese weit schneller gelesen und gespeichert werden können, als wenn man absichtlich langsam Buchstabe für Buchstabe lesen würde, bzw. Personen die diese Wahl nicht haben, sind höchstwahrscheinlich auf eine niedrigere Lesegeschwindigkeit beschränkt. So ist dies bspw. bei der Brailleschrift (Blindenschrift) erkennbar, (auch wenn es weitere Probleme geben mag, da im Normalfall die taktile Wahrnehmung erst langwierig aufgebaut werden muss, bzw. nie so genau aufgelöst ist wie visuelle Wahrnehmung), welche im Schnitt das Lesen mit einer Geschwindigkeit von 120 Worten pro Minute ermöglicht, wohingegen man mit visuellem Lesen, eben ganze Worte erkennen kann, wodurch die durchschnittliche Lesegeschwindigkeit zwischen 200-400 Worte pro Minute liegt, aber mittels (herkömmlicher) Schnellesetechniken (Speedreading) noch auf 1.000-1.200 Worte pro Minute angehoben werden kann, bei welchen immer größere Blöcke auf einmal betrachtet werden. Die Photoreading Technik geht noch einen Schritt darüber hinaus und betrachtet nur mehr das Bild der Seite als ganzes, wobei die Informationsaufnahme überhaupt nur mehr unterbewusst geschieht, wobei eine Lesegeschwindigkeit von 25.000 Worten pro Minute angenommen wird, welche jedoch relativ schwer zu erlernen ist und man selbst dann nur ungefähre und oberflächliche Informationen in Erinnerung behält. Interessant sind jedoch die im Umfeld dieser Techniken entwickelten Mind Mapping Techniken, welche durch Zeichnen von Bäumen, den Zusammenhang relevanter Inhalte eines bearbeiteten Gebietes ermöglichen, wodurch nicht

³³ Untersuchungen zeigten auch, dass dies soweit führt, dass Wörter oftmals anhand der Länge des Wortes, sowie des ersten und des letzten Buchstabens erkannt werden, wobei die Interpretation erst im Kontext des vorangegangenen und des nachfolgenden Wortes geschieht, wodurch beim Lesen auch Fehler korrigiert werden können (bzw. nicht erkannt werden), d.h. fehlgestellte Buchstaben, (auch in größerer Zahl) führen normalerweise nicht zur Unlesbarkeit eines Wortes.

nur schnell ein guter Überblick über die Thematiken gewonnen werden kann, sondern auch der Anteil der in Erinnerung bleibenden Informationen gesteigert werden kann. Dies geschieht dadurch, dass das Anlegen der, für die Memorisierung sehr relevanten, Querverbindungen zwischen den neuen Informationen zu bereits gespeicherten Informationen, extern unterstützt wird, da sie graphisch explizit dargestellt werden.

Abstrakte Informationen

Es zeigt sich daher, dass die menschliche Wahrnehmung im Bezug auf konkrete (im Gegensatz zu abstrakten) logisch zusammenhängende Informationen (bspw. Worte die als Sätze in natürlichen Texten zusammenhängen), an sich sehr effizient funktioniert, speziell da die Datenverarbeitung im menschlichen Gehirn zu einem sehr großen Teil visuell orientiert ist. Dadurch sind Steigerungen der Aufnahmekapazität und -geschwindigkeit durch die Betrachtung von / bzw. Verbindung mit visuellen Mustern durchaus möglich, wobei dieser jedoch durch die, für eine bestimmte Fragestellung, benötigte Genauigkeit Grenzen gesetzt sind, d.h. ab einem bestimmten Punkt muss eine Vereinfachung der Informationen erfolgen – entweder intern bei der Speicherung, etwa durch Überfliegen des Textes, oder extern durch eine Veränderung der Darstellung. Bei Texten stellt beispielsweise eine Mindmap lediglich die Verbindungen zwischen relevanten Blöcken dar, und können so nur mehr als Überblick, und zur Reaktivierung bereits gelesener Texte verwendet werden. Eine näher liegende Möglichkeit wäre die schriftliche Zusammenfassung eines Textes um die wichtigsten Punkte in Erinnerung zu behalten, wodurch die Komplexität des Textes an sich fällt, jedoch nicht mehr alle Details enthalten sind. Jedoch ist die Reduktion der Komplexität bspw. durch eine Zusammenfassung sehr stark davon abhängig, wie „gut“ sie geschrieben ist – jeder der bereits versucht hat gute Zusammenfassungen eines eigenen Artikels zu schreiben (Abstract), welcher tatsächlich einen verständlichen und korrekten Eindruck (ein gutes Abbild) des gesamten Textes liefert, weiß dass dies keine triviale Aufgabe ist [Eco_2002].

Tatsächlich muss der menschliche Verstand alle abstrakten Informationen erst in einen sinnvollen Zusammenhang mit bereits verstandenen und gespeicherten Informationen setzen um diese tatsächlich zu verstehen, was bei konkreten Informationen meist eine einfache Aufgabe ist. Im Gegensatz dazu benötigt bspw. das Lesen und Verstehen eines teilweise abstrakten, d.h. eines komplexen Textes, meist viel mehr Zeit, da diese zum Verständnis des

Textes nötigen Verbindungen und Zusammenhänge, erst gefunden werden müssen, d.h. das Lesen eines Textes, bzw. von Informationen ist nicht gleich dem Verständnis dieser. Das Verständnis von Informationen (Texten, Gleichungen, usw.) ist jedoch nötig um diese, über längere Zeit, im Gedächtnis behalten zu können. Ein Negativbeispiel wäre das „Auswendig Lernen“ von Informationen durch Schüler und Studenten für Prüfungen, wobei das Wissen bei vielen oftmals nach einigen Wochen bereits nicht mehr vorhanden ist, da die Informationen nicht (wirklich) verstanden wurden, und daher auch nicht in Relation zu anderen Informationen gesetzt werden konnten, werden diese auch später kaum mehr über Umwege gefunden, da sie nicht vernünftig indiziert worden sind. (Je mehr Verbindungen eine gespeicherte Information besitzt, desto öfter werden sie bei anderen Erinnerungsvorgängen mit abgerufen, und bleiben dadurch länger im Gedächtnis.)

Die visuelle Darstellung von abstrakten Informationen, ermöglicht daher, analog zur Visualisierung von konkreten Informationen, ein schnelleres intuitiveres Verständnis dieser, bzw. ermöglicht es erst das Erkennen von Zusammenhängen, welche speziell in abstrakten Informationen (Daten) umso schwerer zu erkennen sind, je mehr Daten hinzukommen. Die grafische Darstellung unterstützt daher sowohl das Verständnis als auch den Verbleib / fortwährende Verfügbarkeit der Informationen (didaktischer Vorteil) extern.

Darüber hinaus erleichtert eine externe visuelle Kognition mittels Darstellung ebenfalls die Auffrischung der Informationen, d.h. wenn die Barriere des Verständnisses einmal durchbrochen wurde, d.h. die Implikationen des Textes, der Gleichungen usw. einmal verstanden wurden, so reicht oftmals ein einziger Blick auf die Darstellung um das gesamte Thema wieder in Erinnerung zu rufen. Diesen Vorteil würden, analog dazu betrachtete, rein textuelle Zusammenfassungen, bis zu einem gewissen Grad ebenfalls bieten, dennoch dauert das Lesen eines Textes länger, und die Erinnerung ist normalerweise nicht so prägnant wie jene eines Bildes.

Datengrafiken

Gehen wir daher an diesem Punkt davon aus, dass eine günstige Darstellung abstrakter Informationen, einen großen Vorteil beim gesamten Denkprozess bietet, da dieser ohnehin sehr stark visuell orientiert ist, und betrachten wir um dies zu untermauern eine der bekanntesten Methoden der visuellen Darstellung abstrakter Informationen. Dies sind Diagramme, wie beispielsweise Histogramme, Tortengrafiken oder Balkendiagramme, welche in ihrer statischen analogen Form als *Datengrafiken* bezeichnet werden. Um ein kurzes Beispiel der Effektivität einer einfachen Darstellung wie der eines Histogramms zu geben betrachten wir vorerst eine rein textuelle Repräsentation, wie die drei Zeitreihen des bereits erwähnten beispielhaften Modells, welche im Anhang zu finden sind (wobei X und M als exogen angenommen werden, R ist hingegen endogen):

Tabelle 3: Beispiel einer Datentabelle als Datenbasis für Abbildung 24

Jahr	M	X	R
1971	9233,66504	9426,17578	8,68956
1972	10560,0166	10730,43457	8,89297
1973	12042,83301	12155,69434	8,87851
1974	15158,46289	14963,62695	8,84436
1975	15049,67188	15316,01758	8,86909
1976	18174,89453	17314,44727	8,77089
1977	20457,03906	18827,20508	8,69933
1978	20606,30859	20572,58984	8,81018
1979	24365,45703	24011,4668	8,77299
1980	28338,69922	26836,69727	8,67094
1981	30749,69336	29640,85156	8,68746
1982	29902,32813	31174,17578	8,85828
1983	31476,27539	32564,8418	8,83068
1984	35972,90625	36004,95703	8,73442
1985	39672,89844	39757,85547	8,72346
1986	37032,40625	37859,64063	8,76583
1987	38024,39063	38319,29688	8,70858
1988	42807	43288	8,70658
1989	47746	48585	8,71761
1990	51359	52854	8,75168
1991	55036	56019	8,69393
1992	55925	57094	8,68999
1993	55747	56435	8,63303
1994	61030	60387	8,50807
1995	64790	63410	8,42823
1996	69450	67462	8,35732
1997	79189	76367	8,26744
1998	83816	82681	8,37505
1999	91327	89629	8,30549
2000	104649	102690	8,25853
2001	110590	109870	8,32902

Die ungefähre Ähnlichkeit der Größen M und X ist relativ leicht erkannt, um einzelne Ausreißer zu entdecken, welche nicht offensichtlich sind (d.h. sich nicht gleich um ganze Stellen unterscheiden), bzw. um zu erkennen in welchen Jahren, welche der beiden Zahlen größer war, bzw. wie lange einzelne Trends anhielten müssen diese entweder eingehend gelesen werden oder es müssten Hilfsgrößen berechnet werden (wie bspw. Differenzen der beiden).

Eine Vielzahl dieser Fragen kann bereits durch gemeinsame visuelle Darstellung dieser Zeitreihen in Form eines Diagramms beantwortet werden, da diese Berechnungen nun visuell erfolgen und dadurch unterbewusst durchgeführt werden können, insofern die Darstellung korrekt gewählt wurde³⁴:

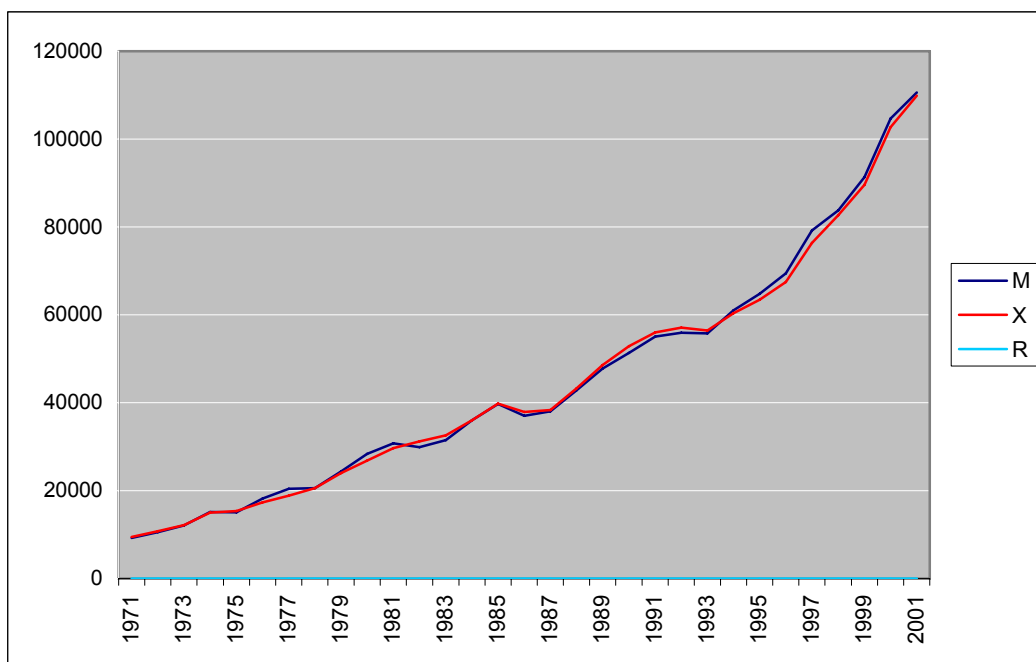


Abbildung 24: Visuelle Kognition mittels Datengrafiken am Beispiel eines Histogramms

Die zuvor gestellten Fragen können nun in Sekundenbruchteilen beantwortet werden, wobei der Vorteil umso größer wird, je länger die Zeitreihen sind, bzw. je mehr Größen beteiligt sind. Bei obigem Beispiel wird anhand der Größe von R jedoch auch sofort klar warum die visuelle Analyse stark heterogener Daten und Strukturen nicht alleine mit Hilfe von

³⁴ Dieser Vorteil der visuellen Kognition, bzw. in dieser Fall der grafischen Berechnung ist, über das Faktum der Offensichtlichkeit hinaus, auch empirisch belegbar, in dem die Zeit gemessen wird die zur Beantwortung bestimmter Fragestellungen anhand von Zahlen bzw. anhand unterschiedlicher Darstellungen bzw. Diagramme benötigt wird. Vgl. bspw. Shneiderman in [Card_1999]

Histogrammen oder ähnlichen Diagrammen erfolgen kann, wenn diese für bestimmte Fragestellungen auch sehr nützlich sind: Unter Umständen sind die absoluten Größen dieser so unterschiedlich, dass manche Werte überhaupt nicht sichtbar sind, d.h. es wäre nötig zusätzliche statistische Vergleichsmethoden zu Hilfe zu nehmen und weitere Hilfsgrößen zur Hilfe zu nehmen. Auch dies würde jedoch nicht sonderlich dabei helfen die komplexen (kurz- bis mittelfristigen) Interaktionen zwischen den einzelnen Größen zu erkennen, welche jedoch von großem Interesse sind (da sie auch in Zukunft gelten sollten) – Implikationen einzelner Politiken sind relativ schlecht zu erkennen, bzw. müssen erst durch manuelles Zusammenstellen einzelner Diagramme sichtbar gemacht werden. Darüber hinaus ist die Sichtbarkeit einzelner Zusammenhänge nicht mehr gegeben sobald die Anzahl der dargestellten Größen zu hoch wird.

Ein wichtiger Punkt, welcher nicht oft genug betont werden kann, dass es nur zu einer Reduktion an Komplexität und damit einem Nutzen der Darstellung kommen kann, wenn das Diagramm die relevanten Zusammenhänge korrekt betont wiedergibt. Ein Negativbeispiel für ein extrem misslungenes Diagramm, welche von Tufte analysiert wurde und seitdem in einer Reihe von wissenschaftlichen Büchern über Informationsvisualisierung aufgezeigt wurde ist das Challenger Dichtungsring Diagramm. Tufte geht sogar soweit, dass es vermutlich mit an der Fehlentscheidung das Space Shuttle Challenger unter den damals extrem niedrigen Umgebungstemperaturen starten zu lassen [Tufte_1997]:

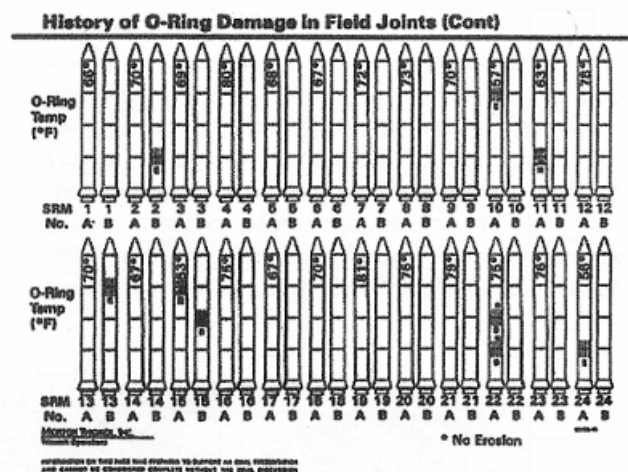


Abbildung 25: Challenger Schadensdiagramm aus [Tufte_1997]

Dieses Diagramm, welches ikonische Repräsentationen der Raketenpaare als Datenpunkte (Flecken) (möglicherweise in Anlehnung an die Neurath'sche Schule der Bildersprache)

darstellt, sollte die historischen Werte der Umgebungstemperaturen mit den Schäden in Verbindung setzen, wobei die absolut dominante visuelle Variable (die visuelle Eigenschaft) der räumlichen Position und Größe eher verschwendet wurde (und darüber hinaus die X-Achse gesplittet wurde). Das Hauptaugenmerk wurde hier wohl lediglich darauf gelegt zu zeigen, dass die absolute Anzahl an bisherigen Schäden an Dichtungsringen wohl niedrig war, auch wenn gezeigt wurde, wie stark die Beschädigung bei den einzelnen Starts war (dafür wurde die Y-Achse innerhalb der Objekte verwendet), wobei die Objekte nach dem Zeitpunkt des Starts aufsteigend entlang der (gesplitteten) X-Achse sortiert wurden, d.h. die räumliche Anordnung versuchte implizit einen Zusammenhang zwischen Zeit und Schaden herzustellen, was jedoch kein Muster erkennen lässt.

Auch wenn die Temperatur wohl im Diagramm enthalten ist, so ist kaum zu erkennen, dass irgend ein kausaler Zusammenhang zu vermuten wäre – man könnte daher möglicherweise sogar soweit gehen, dass dieses Diagramm nur beschwichtigen sollte – in jedem Fall behindert es die Wahrnehmung durch schlechte *Konstruktion* des Diagramms an sich und durch schlechte *Imposition* der Informationen im Diagramm.

In jedem Fall wurde die *Fragestellung* die das Diagramm beantworten soll, welche bei Entwicklung einer Darstellung immer das zentrale Element sein sollte, entweder aus den Augen verloren, oder absichtlich übergangen – eine interessante Frage wäre, welchen Zweck die Darstellung überhaupt erfüllen soll. Um zu zeigen, welche Analyse mit Hilfe eines anderen einfachen Diagramms, welches die selben Informationen auf andere Weise zusammenstellt, und dadurch aktiv die Fragestellung des Einflusses der Temperatur auf Schäden aufzeigt, möglich gewesen wären, erstellte Tufte folgendes Diagramm, welches räumlich gesehen einen Zusammenhang zwischen Temperatur und Schaden aufzeigt:

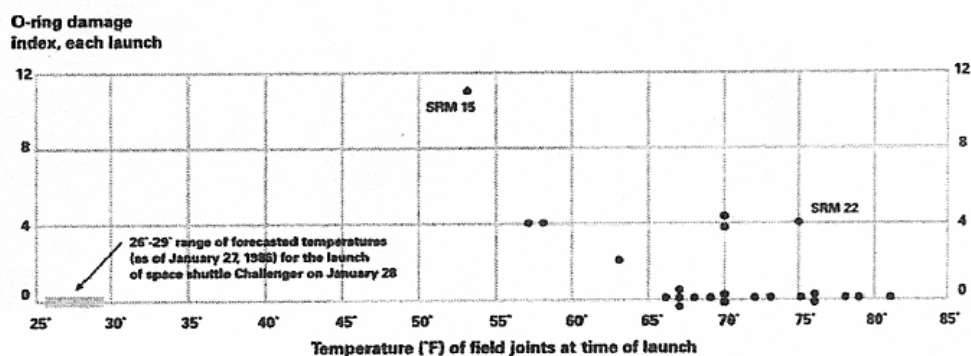


Abbildung 26: Alternatives Challenger Schadensdiagramm aus [Tufte_1997]

Auch wenn die absolute Zahl der Datenpunkte, welche eine Temperatur von unter 65° Fahrenheit anzeigen, sehr gering ist, lässt sich doch erkennen, dass bei niedrigeren Temperaturen praktisch immer ein Schaden entstanden war und noch dazu immer gravierender wurde je tiefer die Temperatur am Morgen des Starts war. Man kann daher sofort erkennen, dass eine zu erwartende Temperatur von 26° F - 29° F weit unter allen bisherigen (schlechten) Erfahrungswerten lag (größer als die Distanz zwischen der bisher höchsten und der bisher niedrigsten Starttemperatur), und müsste als Entscheidungsträger daher mindestens mit einem sehr hohen Risiko rechnen.

Die Konstruktion des Diagramms muss daher sorgfältig erfolgen, was jedoch bei den bisherig gezeigten, manuell erstellten, Darstellungen de facto immer aufs Neue geschehen muss, und daher einen relativ großen Spielraum für Fehler lässt. Ein sorgfältig erstelltes Computerprogramm zur Erstellung von Darstellungen zur Exploration und Analyse von strukturellen Daten könnte auch an dieser Stelle helfen, in dem es diesen Prozess der Analyse, in Form der Visualisierung, normiert und die Überleitung der Informationen in die Grafik automatisiert.

Die, bis zu diesem Punkt gezeigten, Darstellungen können jederzeit ohne Reduktion der transportierten Informationen auf Papier ausgegeben werden, unabhängig davon ob sie am Computer erzeugt wurden oder nicht, wodurch ihr Portabilität hoch ist, sie jedoch nicht so flexibel wie Darstellungen welche computerbasiert sind. Durch interaktive Komponenten kann die Anzahl der gleichzeitig auf einem Bildschirm verfügbaren Informationen von den gleichzeitig dargestellten getrennt werden, d.h. es kann bspw. zwischen unterschiedlichen Ansichten oder Darstellungen der selben Daten/Zusammenhänge gewechselt werden ohne den Betrachter durch gleichzeitige Darstellung aller Informationen zu überlasten, bzw. unterschiedlichen Betrachtern mit generell unterschiedlichen kognitiven Möglichkeiten, verschiedene Sichtweisen ermöglichen. (Darüber hinaus kann auch die Exploration dreidimensionaler räumlicher Strukturen bspw. mittels interaktiver Komponenten, welche eine Bewegung durch den Raum der Darstellung, zumindest grundlegend ermöglicht werden.)

3.2 Informationsvisualisierung

In der Informatik ist der Begriff der Visualisierung sehr spezifisch als computerunterstützte interaktive visuelle Repräsentation von Daten mit dem Ziel die Kognition zu erweitern bzw. zu verstärken, wobei Kognition als Akquisition oder Verwendung von Wissen definiert wird. [Card_1999] Generell ist es daher das primäre Ziel der Darstellung, interaktive Einsicht zu gewähren, welche auf andere Weise langsamer oder gar nicht zu bekommen wären, wobei die graphischen Details der Darstellung dabei nachrangig sind, so sie für die Anwendung geeignet sind. In diesem Sinne sind die Hauptziele der Visualisierung das Entdecken/Erkennen (von Zusammenhängen, Strukturen, Mustern) zu ermöglichen, die Entscheidungsfindung zu unterstützen, sowie Erklärungen für Probleme zu finden.

Die zwei Hauptbereiche der Visualisierung, welche sich in einigen wichtigen Punkten stark voneinander unterscheiden sind jene der Scientific Visualization und der Information Visualization. Der Bereich der Scientific Visualization ist bereits seit längerer Zeit in aktiver Bearbeitung und beschäftigt sich hauptsächlich mit physikalischen (konkreten) Daten, d.h. der Darstellung von räumlichen Gebilden und Strukturen, wie künstlichen Gegenständen (CAD), dem menschlichen Körper (CT), der Erde usw. Auch wenn diese Informationen oftmals umgewandelt und verarbeitet werden, ist der Hauptpunkt dennoch die Darstellung von räumlichen/geometrischen Daten. Die Verwendung der Achsen in der Darstellung steht daher, im Gegensatz zu anderen Darstellungen, normalerweise nicht zu Debatte, höchstens in der Form ob zweidimensionale Schnitte oder die dreidimensionalen Strukturen als Ganzes dargestellt werden sollen.

Der Bereich der Informations-Visualisierung beschäftigt sich hingegen hauptsächlich mit der Darstellung von abstrakten Daten, welche ebenso von der Visualisierung profitieren können wie physikalische Daten, wobei die abstrakteren Daten meist keine offensichtliche räumliche Ordnung haben, diese muss meist erst geeignet ermittelt werden. Eines der Hauptprobleme ist es zu entscheiden welche, der meist zahlreichen vorhandenen Dateneigenschaften und Dimensionen (da meist multivariate Daten vorliegen), Eigenschaften, als räumliche Achsen repräsentiert werden sollen und wie diese anzuordnen sind, wie bereits im letzten Teilkapitel anhand des Challenger Diagrammes gezeigt wurde.

Die Informationsvisualisierung stellt daher eine Art Erweiterung der (analogen) Datengrafiken dar, welche am Computer, mehr oder weniger in Echtzeit, auf Bedarf am Bildschirm gezeichnet werden und interaktiv manipuliert werden können, d.h. es gibt Möglichkeiten die Darstellung, in einem gewissen Rahmen, an einzelne Fragestellungen anzupassen, bzw. einige Parameter der Darstellung, während des Betrachtens zu verändern.

Die erste Problemstellung, welche sich daraus ergibt ist, dass man bereits im Vorhinein (bei Entwurf und Implementierung als Programm) bedenken muss wie sich die Darstellung bei einer variierenden Anzahl, bzw. variierenden Ausprägungen unterschiedlicher Datensätze oder Strukturen verhalten wird. So kann es passieren, dass eine Darstellung, welche in analoger Form, d.h. manuell zusammengestellt sehr gute Ergebnisse liefert, d.h. gute, verständliche Aussagen liefert, jedoch sehr verwirrende Darstellungen liefert, wenn diese unüberwacht und automatisch erstellt werden.

Kognitive Verstärkung

Es wurde bereits erwähnt, dass das primäre Ziel der Informationsvisualisierung eine Verstärkung der kognitiven Fähigkeiten ("cognitive amplification") ist, wobei auch bereits einige Beispiele gegeben wurden, welchen Stellen dies geschehen kann. Eine aktuelle Einteilung [Card_1999] geht davon aus, dass es sechs wichtige Faktoren gibt, welche diese Verstärkung verursachen können, wobei die ersten drei der hier genannten Punkte (A - C) bereits zuvor angesprochen wurden, da sie implizit durch die graphische Darstellung verursacht werden (so die Konstruktion und Imposition erfolgreich war), die drei letzteren (D - F) müssen jedoch explizit im Visualisierungsansatz eingebaut werden:

A) Erhöhte kognitive Ressourcen

- Externalisierung der Speicherung / Verarbeitung
- Parallele Datenverarbeitung des ganzen Bildes vs. Seriellern Lesen

B) Verringerte Suchzeiten ("Suchkosten")

- Hohe Datendichte durch Darstellung vieler Daten auf geringem Raum
- Räumliche Darstellung von Zusammenhängen (logisch nahe Objekte auch räumlich nahe, daher schneller)

C) Verbesserte Mustererkennung (in an sich abstrakten Daten)

- Wiedererkennen statt Erinnern
- Abstraktion und Aggregation (auch als selektive Wiedergabe)
- Visuelle Muster mit logischer Bedeutung (bei sinnvoller Konstruktion)

D) Visuelles Schließen/Folgern

- Graphische Berechnungen (Differenzen, Trends, Zusammenhänge)
- Visuelle Darstellung macht manche Zusammenhänge offensichtlich

E) Visuelles Monitoring (plötzliche Veränderungen erkennen)

- Schnelles Erkennen von plötzlichen Abweichungen in großen Datenmengen (Echtzeitsysteme / Sicherheitssysteme)

F) Manipulierbares/Interaktives Medium des Computers (Exploration)

- Kombination mehrerer Darstellungen
- Selektive Darstellung (Zoomen, Abschnitte zeigen)

Für die in dieser Arbeit realisierte Analysetechnik werden die Vorteile aller Punkte außer E) ausgenutzt werden, und gezielt verstärkt werden, was im Kapitel über die Realisierung betrachtet werden wird. Einige dieser Vorteile konnten bereits bei der exemplarischen Darstellung von Gleichungssystemen als Graphen verfolgt werden, wie bspw. visuelles Schließen bei dem gleichzeitigen Eintreffen unterschiedlicher indirekter Effekte in Abbildung 21. Um all diesen Ansprüchen effizient gerecht werden zu können wird es jedoch, wie bereits angedeutet, nötig sein den unterschiedlichen Frage- bzw. Problemstellungen der gewünschten Analyse mit einigen Komplementärdarstellungen in Form eines Darstellungs- „Paketes“ entgegenzukommen, d.h. eine gezielte Exploration der Struktur der untersuchten ökonomischen Modelle aus unterschiedlichen Blickwinkeln zu ermöglichen (Auch um unterschiedlichen Benutzergruppen entgegenzukommen).

Um nun die Möglichkeiten der Informationsvisualisierung, abseits bzw. zur Erweiterung der standardisierten Darstellungsmethoden wie Histogrammen, Balkendiagrammen, Tortendiagrammen, Scatterplots, usw., ausloten zu können müssen im nächsten Schritt zunächst ermittelt werden, welche Mittel auf der untersten Ebene tatsächlich zur Verfügung stehen, d.h. wie die visuelle Wahrnehmung grob aufgebaut ist und welche visuellen Mittel und Elemente sich daraus ableiten lassen.

Visuelle Wahrnehmung

Die Charakteristika der menschlichen visuellen Wahrnehmung werden durch verschiedene Faktoren gebildet, wie den physikalischen Eigenschaften des Auges, der Verarbeitung dieser erfassten optischen Informationen im Sehzentrum des Gehirns sowie der Extraktion von abstrakten Daten (in diesem Fall sind damit alle nicht rein visuellen Informationen gemeint) aus diesen Bilddaten und der nachfolgenden Speicherung dieser Daten (sowohl konkrete visuelle als auch abstrakte Informationen) im Gedächtniszentrum. Die Funktionsweisen einiger dieser Komponenten des menschlichen Wahrnehmungsprozesses, wie beispielsweise des Auges, sind wohl bekannt, dennoch zeigt sich bei empirischen Untersuchungen, dass externe (optische) Effekte (d.h. visuelle Informationen) unterschiedliche Auswirkungen auf mehrere dieser Bereiche gleichzeitig haben.

Betrachtet man kurz die optischen Möglichkeiten der menschlichen visuellen Wahrnehmung, d.h. die Charakteristika des Auges, so unterscheidet man zwei Arten an Photorezeptoren - ungefähr 6,5 Millionen Farben wahrnehmende Photorezeptoren, sowie 119,5 Millionen Schwarz/Weiß wahrnehmende Rezeptoren. Diese sind in drei ungefähr aufeinander aufbauende Regionen eingeteilt (Retina, Fovea, Foveola), wobei die Dichte der farbigen Rezeptoren im Zentrum der Hinterwand (Retina) des Auges (der Fovea, sowie der Foveola im innersten Zentrum) am größten ist [Resnikoff_1987]. Durch diese viel höhere Dichte und der daraus resultierenden Möglichkeit relativ detaillierter visueller Farb/Muster Wahrnehmung, ist die Foveola für die bewusste Wahrnehmung am wichtigsten, die äußere Bereiche der Retina ermöglicht hauptsächlich peripheres Sehen, d.h. grobe Konturen und Bewegungen zu erfassen um diese bei relevanter Tätigkeit ins Zentrum bewegen zu können.

Der innere Bereich ermöglicht die relativ gute Wahrnehmung der Größe (Kontur) eines Objektes (der zweidimensionalen Projektion von dreidimensionalen Objekten auf der Retina), sowie der Wahrnehmung von Farben (wobei die Kalibrierung der Farben von Individuum zu Individuum relativ stark abweichen kann, d.h. Farben sind kein absolutes Merkmal – ganz abgesehen davon dass die Farbwahrnehmung von der Umgebungshelligkeit abhängt), und Helligkeit (Intensität).

Alle weiteren Möglichkeiten der Wahrnehmung werden nicht mehr im Auge, sondern im Sehzentrum verwirklicht, in welchem einerseits aus den Differenzen der beiden

zweidimensionalen Bildinformationen, welche von den beiden Augen einzeln wahrgenommen wurden, ein gemeinsames dreidimensionales Bild entwickelt wird, und andererseits die hintereinander erfassten Bilder, welche mittels nicht bewusst wahrgenommener Mikrobewegungen leicht unterschiedliche Bilder liefern, zu einem noch höher aufgelösten Bild zusammengesetzt werden³⁵. Dies ist ein Trick die vorhandenen organischen Ressourcen besser auszunützen, da 6,5 Millionen Punkte an sich keine besonders hohe Auflösung sind (Handelsübliche Digitalkameras besitzen bereits diese Auflösung) und für viele Zwecke nicht ausreichend wären. Zusätzlich erfüllen die Mikrobewegungen auch die Aufgabe, den blinden Fleck der Retina zu retouchieren, welcher eigentlich an der Stelle wäre an welcher der optische Nerv mit dem Auge verbunden ist. Zusätzlich ermöglicht die Verarbeitung der Unterschiede zwischen mehreren hintereinander beobachteten Bildern die Wahrnehmung von Bewegungen.

Dieses visuelle Wahrnehmungssystem ist stets automatisch auf der Suche nach relevanten/interessanten optischen Eindrücken, welche bei Auffälligkeiten in den Fokus der Betrachtung gerückt werden um so durch die Foveola genauer analysiert zu werden. Diese Reize werden nun an zwei unterschiedliche Systeme weitergeleitet, wobei ein System speziell die räumlichen Eindrücke, wie Ort, Größe und Ausrichtung verarbeitet, das andere hingegen die objektbezogenen Details wie Form, Farbe und Muster verarbeitet [Kosslyn_1994].

Aus einer Reihe an Gründen werden die räumlichen Strukturen, sowie Veränderungen dieser Strukturen im Raum (Bewegungen) am stärksten wahrgenommen, die anderen werden nur als Zusatzinformationen wahrgenommen – ausgenommen sie bilden durch sehr starken Unterschied von der Umgebung einen sehr starken Reiz (bspw. Signalfarben).

Unabhängig von der sehr großen Zahl an wahrgenommen Bildpunkten (Welche als unterste Schranke mindestens mit $\gg 6,5$ Millionen interpolierten Punkten jede 1/25 Sekunde angenommen werden müssen), kann diese Zahl an Bildpunkten jedoch nicht als einzelne, von einander unabhängige Objekte wahrgenommen werden. Erst Objekte ab einer bestimmten Größe und einem bestimmten Abstand können sinnvoll wahrgenommen werden, was die Anzahl der möglichen Objekte in einer Darstellung (auf einem durchschnittlichen Monitor) auf einige Hundert bis einige Tausend reduziert – bei Darstellungen mit größeren Mengen an gleichzeitig dargestellten Punkten beginnen diese scheinbar ineinander zu fließen und bilden

³⁵ Während dieser Verbindung der Bildinformationen werden auch die beiden, farblich meist voneinander abweichenden, Bilder der Augen, zu einem gemeinsamen Farbbild abgeglichen

so erneut größere Flecken. Ab einer bestimmten Zahl an Punkten können diese überhaupt nicht mehr als einzelne Punkte wahrgenommen werden, sondern nur mehr als gemeinsame Struktur, d.h. es ergeben sich ganze Muster – eine Tatsache welche die Basis aller modernen bildlichen Darstellungstechniken ist, ob nun ursprünglich unbeabsichtigt (bspw. analoge Fotografie) oder beabsichtigt (Fernseher, Monitor, Matrixdruck, ..)

Will man daher einen Überblick über eine sehr große Anzahl an Daten zur gleichen Zeit gewinnen, so kann dies meist nur als Auffinden von einzelnen Abweichungen (großen Fehlern bzw. statistischen Ausreißern), durch einzelne Fehler in Mustern erfolgen. Dies ist jedoch nicht mit der detaillierten Betrachtung komplexer Strukturen vereinbar, wodurch diese auf eine „Flecken“ - Anzahl von max. einigen hundert gleichzeitig beschränkt ist. Eine Erhöhung dieser Zahl ist bei computerbasierten Darstellungen prinzipiell durch Hinzunahme der zeitlichen Dimension möglich, d.h. durch Variation der Darstellung entweder selbstständig (In Form eines Films oder einer Slideshow) oder gesteuert durch Manipulation von interaktiven Steuerkomponenten.

Als Resultat der unterschiedlichen Wahrnehmungsbereiche des Auges und des Sehentrums unterscheidet man daher zwei Arten der Wahrnehmung – die Kontrollierte Verarbeitung, wie bspw. Lesen, welche hauptsächlich das exakte Zentrum der Wahrnehmung (die Fovea) verwendet, und so sehr detaillierte, und wie bereits besprochen aber dafür auch recht langsame (serielle, d.h. Information nach Information) Informationsaufnahme ermöglicht. Die zweite Möglichkeit ist eine Art automatischer Wahrnehmung, welche den gesamten Eindruck eines Bildes verarbeitet, wobei auch die äußeren Regionen der Retina zum Einsatz kommen, welche auch nicht willentlich unterdrückt werden kann. Dadurch, dass die Informationen durch den Gesamteindruck entstehen werden sie gleichzeitig aufgenommen, wodurch die Datenaufnahme und Mustererkennung parallel und in völlig anderen Größenordnungen (betreffend der Datenmenge) erfolgt.

Abhängig davon, welche Zielsetzung eine bestimmte Darstellung verfolgt müssen daher die visuellen Wahrnehmungsmechanismen unterschiedlich angesprochen werden, bzw. am besten kombiniert werden, d.h. dass ein überblicksmäßiger Eindruck gewonnen werden kann, aber darüber hinaus bei auffallenden/interessanten Details eine Fokussierung erfolgt und bei dieser dann weitere Informationen erfolgen. Diese zusätzlichen Details wären bei einem einfachen Diagramm bspw. die Beschriftungen der Datenpunkte oder von Achsabschnitten, wodurch der

Wert von interessanten Konstellationen bei Interesse nachgesehen werden kann – die Beschriftung sollte jedoch nicht den Fokus auf sich ziehen, weil sie sonst dem Überblick entgegenwirkt (Tuftes spricht bei schlechten Darstellungen/Diagrammen, welche hier versagen von einem geringen Data/Ink Ratio, d.h. dass der Anteil der durch Daten verursachten Bildpunkte an den gesamten Bildpunkten des Diagramms zu hoch ist – er demonstrierte dies anhand schlechter Diagramme).

Bei computerbasierten Darstellungen gibt es nun zusätzliche Möglichkeiten wie diese Detailelemente bei Interesse dargestellt/eingebracht werden können, da es nun die Möglichkeit der Interaktion mit dem Computer gibt, wie beispielsweise das Bewegen der Maus über einen interessanten Punkt, was in der Anzeige zusätzlicher Details in einem Zusatzfenster neben dem relevanten Punkt, bzw. in einem parallel angezeigten Statusfenster zu Folge hat. Es gibt hier eine Reihe von Möglichkeiten die Datengrafiken durch Interaktivität zu flexibilisieren, wodurch eine effektive Verringerung der gleichzeitig angezeigten Datenmenge erreicht werden kann, ohne diese Informationen jedoch aus der Griffreichweite zu verlieren, da die Informationen im Gegensatz zu analogen Daten (auf Papier) digital verknüpft werden können.

3.3 Konstruktionsgrundlagen

Auf der höchsten Abstraktionsebene betrachtet besteht, bzw. beschäftigt sich eine konkrete Realisierung einer Visualisierung / Darstellung abstrakter Daten, aus zwei Teilen. Einerseits sind die zu transportierenden / zu visualisierenden Aussagen und Daten mit ihren strukturellen Ausprägungen an sich zu beachten und andererseits müssen diese in Form von (möglicherweise interaktiven) Grafiken realisiert werden, welche eigenen Problemen folgen. Eine erfolgreiche Umsetzung einer Darstellung entsteht, wenn diese Notwendigkeiten gemeinsam betrachtet werden.

Beginnt man die Entwicklung / Analyse von Visualisierungsmethoden vom Blickwinkel einer Bildsprache (in Anlehnung an Otto Neurath), welche sie repräsentiert, so muss man zuallererst ihre Zielsetzung (ihre beabsichtigte Kernaussage) sowie ihre (logischen) Bestandteile definieren. Die Kernaussage einer solchen Darstellung wird als *Invariante* bezeichnet, wobei bestimmte *Komponenten* dargestellt werden, welche Daten transportieren, wobei eine Komponente jeweils eine bestimmte Datendimension repräsentiert.

Betrachtet man die Visualisierungsansätze hingegen aus der Perspektive ihrer Visuellen Strukturen (d.h. auf der Ebene der visuellen Umsetzung) so wird diese visuelle Struktur einer Informationsvisualisierungs- Darstellung nach Bertin [Mackinlay_1986a] hauptsächlich von drei Komponenten charakterisiert:

- dem Darstellungsraum („spatial substrate“)
- den (Daten-) Flecken („marks“)
- den grafischen Eigenschaften dieser Flecken

D.h. die untersuchten Strukturen und Daten (zuvor als *Komponenten* bezeichnet) müssen daher nach spezifizierbaren, eindeutigen Kriterien zu einer deterministisch zuweisbaren visuellen Form in Datenpunkte / Flecken übersetzbar sein, wobei diese Flecken unterschiedlichste Eigenschaften und Ausprägungen haben können (Objekte), und die Anordnung dieser Flecken im Raum (im „spatial substrate“) ebenfalls bestimmt werden muss. Zusätzlich gibt es umgebende Strukturen (Achsen, Beschriftungen, Navigationsmittel), welche selbst keine Daten transportieren, jedoch die Aufgabe haben, die Lesbarkeit zu

erhöhen (speziell die Nachverfolgung einzelner Punkte, d.h. das Ermitteln der Details unterstützt).

Das Ziel ist es nun, dass die graphische Konstruktion dieser Komponenten, die Invariante effizient repräsentiert, wobei schlechte Konstruktionen diese entweder ineffizient, überhaupt nicht, oder scheinbar eine völlig andere Invariante wiedergeben (d.h. andere/falsche Zusammenhänge zeigen) – ein Beispiel eines solchen schlechten Transports war das Challenger Diagramm.

Datentypen

Ein wichtiger Erfolgsfaktor einer Visualisierung ist es daher eine geeignete graphische Repräsentation zu finden, wozu auch die Betrachtung der verschiedenen Möglichkeiten gehört, wie die zu visualisierenden Daten in Flecken umgewandelt werden können. Dies kann, wie bereits erwähnt, nicht unter Vernachlässigung der inneren Strukturen (Metastruktur) der Daten / Strukturen selbst geschehen, da nicht jeder visuelle Reiz gleich aufgenommen wird. Es wurde auch bereits erläutert, dass hierfür sowohl unterschiedliche Regionen der Retina als auch verschiedene Bereiche des Sehentrums zuständig sind.

Betrachtet man in einem ersten Schritt die möglicherweise darzustellenden Daten, so unterscheidet man (nach Mackinlay in Anlehnung an Bertin) die folgenden drei grundlegenden Typen von darzustellenden Variablen (Komponenten)³⁶:

- Komplexität ↓
- Nominale (N) bzw. qualitative Komponenten
 - Ordinale Komponenten (O)
 - Quantitative Komponenten (Q)

Unter nominalen Komponenten versteht man solche, bei welchen lediglich verglichen werden kann ob ihr Wert/ihre Ausprägung mit bestimmten anderen Werten übereinstimmt oder nicht,

³⁶ In diesem Fall wird in der Literatur nur zwischen drei Typen unterschieden, da diese Einteilung mit den Eigenschaften der visuell wahrnehmbaren Komponenten vergleichbar sind, wobei eine genauere Einteilung der visuellen Komponenten nach diesen Kriterien nur schwer realisierbar wäre, auch da die visuelle Wahrnehmung, so wie alle menschlichen Sinneswahrnehmungen, bis zu einem gewissen Grad individuell variieren.

wobei nach Pflüger / Bertin noch zusätzlich unterschieden wird ob die nominale Komponente nur als nicht identisch (\neq) beurteilt werden kann, oder ob sie zumindest als ähnlich / zusammengehörig betrachtet werden können (\equiv).

Diese Komponenten repräsentieren daher meist ungeordnete Mengen (bspw. Namen, wie etwa Variablen - Bezeichnungen der Variablen eines ökonomischen Modells) und sind daher meist in äquidistante Kategorien geteilt. Dadurch können grafische Elemente (Flecken) bezüglich dieser nominalen Dimension auch beliebig angeordnet und umsortiert werden (dies kann bzw. zu Unterstützung einer anderen ordinalen oder quantitativen Komponente in gewissen Fällen die Lesbarkeit der Darstellung erhöhen):

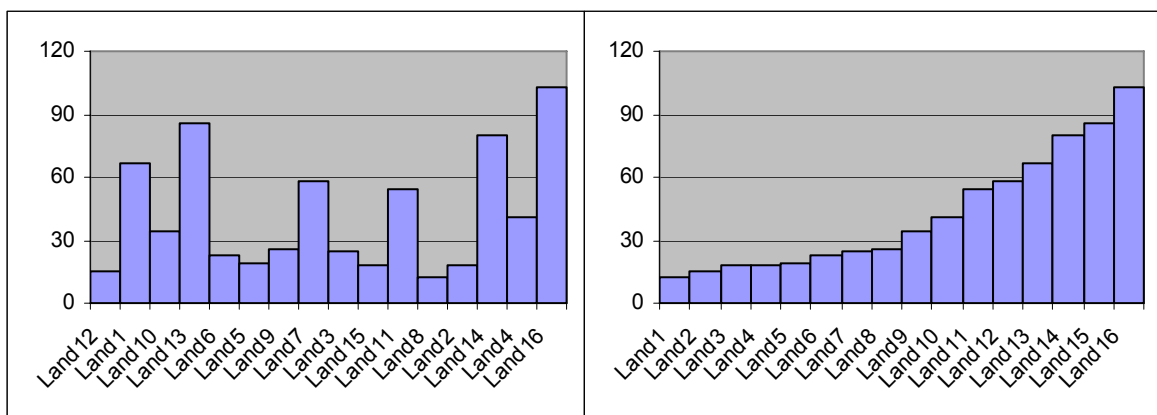


Abbildung 27: Sortierung nominaler Komponenten (N) in Diagrammen

Im Fall des ersten Diagramms sind die nominalen Daten entlang der räumlichen X-Achse aufgereiht, besitzen jedoch keine natürliche Ordnung. Um die Lesbarkeit des gesamten Diagramms zu erhöhen (abhängig von der Invariante) können die Daten innerhalb dieser Komponente daher beliebig umsortiert werden (so Beschriftungen vorhanden sind) – eine Sortierung nach der Höhe der zweiten (quantitativen) Komponente ermöglicht, im Gegensatz zum vorigen Diagramm, das sofortige Erkennen der Größenunterschiede der Werte der Y-Achse (auch ohne Hilfslinien und selbst ohne Y-Achsenbeschriftung, selbst bei sehr ähnlichen Werten).

Man kann daher sehen, dass eine rein nominale Komponente auf einer räumlichen Achse, bei korrekter Ausweisung dieser Vorgehensweise, daher zusätzlich mit einer ordinalen Komponente belegt (“beladen“) werden kann in dem eine Sortierung stattfindet.

In diesem Fall wurde dies getan, aber es wurde dazu eine, eigentlich bereits visuell kodierte quantitative Komponente gewählt, in dem die (quantitativen) Werte der Y-Achse auf eine ordinale Größe transformiert wurden (als Ordnungsmaß wurde der absolute Wert

herangezogen). De facto wurde die Komponente, welche primär der Y-Achse zugewiesen wird, also *redundant visuell codiert*, was eine Verbesserung der Lesbarkeit zur Folge hatte (bzw. weitere visuelle Vergleiche ermöglichte).

Der einzige Unterschied zwischen nominalen und *ordinalen* Komponenten ist, dass bei letzteren (O) eine Ordnungsrelation definiert ist, welche eine einzige eindeutige Reihenfolge der Elemente bzw. Kategorien festlegt, die Abstände sind jedoch ebenfalls nicht messbar sondern äquidistant – d.h. sie repräsentieren meist geordnete Mengen (Kategorien) oder Elemente.

Unter *quantitativen* Komponenten (Q) versteht man in diesem Kontext ebenfalls Elemente oder Mengen (Kategorien), welche durch eine eindeutige Reihenfolge geordnet sind, im Gegensatz zu ordinalen Komponenten sind die Abstände jedoch eindeutig bezifferbar, d.h. sie können durch Maßzahlen angegeben werden. Alternativ definiert Card diese als Daten mit welchen arithmetische Operationen durchgeführt werden können [Mackinlay_1986b].

Die Anzahl der *Kategorien* (bzw. je nach speziellem Typ der Daten: Elemente, Objekte oder Klassen), welche diese hier beschriebenen Komponenten aufweisen wird als *Länge* der Komponente bezeichnet. D.h. eine ordinale Komponente welche bspw. Monate darstellt würde somit eine (endliche) Länge von 12 aufweisen. Analog dazu gilt für eine nominale Komponente dasselbe (im Fall von Daten welche in Klassen einteilbar sind hätte sie also ebenfalls eine Länge gleich der Anzahl der Klassen), im schlimmsten Fall hätte sie eine Länge gleich der Anzahl aller Elemente (d.h. jedes Element wäre de facto eine eigene Klasse). Im Gegensatz dazu weisen quantitative Komponenten, im beispielhaften Fall reeller Zahlen, per se eine unendliche Länge auf, da sie selbst auf einen Intervall unendlich sind. Dies kann selbstverständlich nicht in Form einer Darstellung (ohne Beschriftung jedes einzelnen Datenpunktes mit dem absoluten Wert) realisiert werden, da nur eine endliche Zahl an Bildpunkten zur Verfügung steht, und auch nur eine endliche (relativ kleine Zahl) an Punkten / Flecken visuell wahrgenommen werden kann. Daher wird jede Komponente tatsächlich auf einem Raum mit endlicher Länge abgebildet werden, was bei grundsätzlich quantitativen Komponenten, je nach verwendeter visueller Eigenschaft, entweder implizit geschieht (durch Darstellung auf einem gequantelten (endlich geteiltem) Medium, wie einem Bildschirm oder auch Papier – das Medium bestimmt dann auch die kleinste darstellbare Einheit – das visuelle Wahrnehmungssystem bestimmt hingegen die kleinste wahrnehmbare Einheit) oder explizit, d.h. durch eine Transformation in eine ordinale Größe veranlasst werden muss.

Selbstverständlich können komplexere Daten immer in einfachere transformiert werden, so könnten bspw. quantitative Daten, deren absoluter Wert im Kontext einer bestimmten Fragestellung nicht relevant ist, in Klassen eingeteilt werden, wodurch sie als ordinale Daten repräsentiert werden können (dies wäre eine $Q \rightarrow O$ Transformation). Ebenso könnte die Ordnung einer Menge ordinaler Daten ignoriert werden, wodurch diese als nominale Daten interpretiert werden könnten ($O \rightarrow N$ Transformation). Es gibt auch eine Möglichkeit die Komplexität zu erhöhen, in dem eine Relation definiert würde, welche eine ungeordnete Menge nach bestimmten Kriterien sortieren könnte, wodurch diese zu einer geordneten Variable würde ($N \rightarrow O$ Transformation), diese Umwandlung muss selbstverständlich nicht in jedem Fall ein sinnvolles Ergebnis liefern und kann daher nicht in jeder Situation eingesetzt werden.

Einige bestimmte Untertypen dieser Datentypen haben in der visuellen Repräsentation (selbstverständlich) bestimmte Erfordernisse (Einschränkung der Möglichkeiten der Darstellung), andere dafür bestimmte implizit enthaltene Möglichkeiten (der Transformation oder Darstellung), wie bspw. Q_s (Quantitativ Räumlich) und Q_g (Quantitativ Geographisch), bei welchen es fast unmöglich ist ebene Koordinaten anders zu repräsentieren als wieder auf räumlichen Achsen (wenn auch Höhe/Tiefe auf zweidimensionalen Karten manchmal als Farbe dargestellt wird) – geographische Koordinatenpaare werden daher auch meist nur als eine gemeinsame Komponente (GEO) betrachtet.

Andere wichtige Subtypen sind bspw. Q_t (Quantitativ Temporal) und O_t (Ordinal Temporal), da diese bereits sinnvolle Klassifizierungsrelationen haben (Zusammenfassen zu nächst größeren Einheit: Tage \rightarrow Wochen \rightarrow Monate, usw.).

Visuelle Variablen

Betrachten wir nun erneut die optisch wahrnehmbaren Eigenschaften, welche zuvor besprochen wurden, so lassen sich sieben automatisch wahrnehmbare Eigenschaften visuelle

Reize identifizieren, welche zur Verfügung stehen um die darzustellenden Informationen zu repräsentieren.³⁷

Zur Unterscheidung von Datenflecken stehen daher (nach Bertin) die folgenden Merkmale zur Verfügung, welche in einer Darstellung zu Anwendung kommen können, wobei hier auf Interaktivität bzw. Bewegung im Moment noch nicht eingegangen wird:

- 2-3 Dimensionen der Ebene / des Raumes
 - Lage von Objekten in der Ebene oder im Raum
- 6 Farb/Muster Eigenschaften der Flecken
 - Größe
 - Ausrichtung
 - Helligkeit
 - Farbe
 - Muster
 - Form

Betrachtet man vorerst nur den Fall einer zweidimensionalen Darstellung, so stünden daher acht *visuelle Variable* (d.h. zumindest acht visuelle Dimensionen) zur Verfügung, welche selbst in einer analogen Abbildung der Darstellung (etwa einem Ausdruck auf Papier) noch zu erfassen wären. Prinzipiell könnte nun jeder dieser visuellen Dimensionen einer Dimension der darzustellenden Daten (*Komponenten*) zugewiesen werden (so diese in sinnvollem Zusammenhang stehen), im Normalfall wird jedoch die Verwendung aller zur Verfügung stehenden visuellen Variablen zur gleichen Zeit den Betrachter bei weitem überfordern, da speziell Kombinationen von Helligkeit und Farbe (bei Einsatz des gesamten Farbspektrums) in einem Datenpunkt nicht leicht wahrgenommen werden können.

In jedem Fall muss jedoch die Anzahl der visuellen Variablen, welche in einer Darstellung zur Anwendung kommen, mindestens so groß sein wie die Anzahl der gleichzeitig transportierten *Komponenten* (d.h. mittels interaktiver Funktionalität ausgeblendete

³⁷ Umfassendere Einteilungen erweitern diese Anzahl auf bis zu siebzehn Eigenschaften [Healey_1995], wobei diese zusätzlichen teilweise implizit in den anderen Eigenschaften enthalten sind, bzw. die Verwendung der zusätzlichen Eigenschaften größtenteils ungetestet ist, sowie ihre Effektivität bei der Verwendung in graphischen Darstellungen generell zweifelhaft ist, da nicht sicher ist ob diese überhaupt eindeutig visuell unterscheidbar sind, weshalb diese im Folgenden daher keine Beachtung finden werden.

Datenkomponenten zählen selbstverständlich nicht zu dieser Zahl). Eine Möglichkeit dennoch mehr Komponenten darstellen zu können liegt dann in der Splittung / Überlagerung der räumlichen Achsen, was noch im Folgenden Kapitel über den Raum etwas genauer erläutert werden wird.

Die weiteren Betrachtungen der zur Verfügung stehenden visuellen Elemente erfolgt, analog zur in der Literatur üblichen Weise hauptsächlich anhand von nicht-interaktiven Darstellungen (Möglichkeiten der Interaktivität werden später erläutert), sowie anhand von zweidimensionalen Darstellungsräumen, was auch, wie im Folgenden erläutert wird, im Bezug auf viele Bereiche der Informationsvisualisierung dem State-of-the-Art entspricht.

Raum

Die Verwendung räumlicher Dimensionen ist de facto die wichtigste Frage bei jedem Visualisierungsansatz, da die räumlichen visuellen Variablen, wie die Lage und Größe eines Objekts, die visuell dominantesten Eigenschaften sind und daher den größten Einfluss auf die automatische Wahrnehmung haben. Darüber hinaus sind Lage und Größe eines Objekts im Gegensatz zu anderen visuellen Eigenschaften auch graduell wahrnehmbar, d.h. auch zur Darstellung quantitativer Komponenten geeignet. Die Wahl, welche der darzustellenden Komponenten diesen räumlichen Dimensionen zugewiesen werden ist daher sehr wichtig, speziell auch, da eine Belegung dieser mit nicht prioritären Komponenten eine automatische Wahrnehmung der Zusammenhänge verhindern kann.

Darstellungsraum („Spatial Substrate“)

Die erste Frage der Darstellung ist, in welchen räumlichen Dimensionen die Daten (Flecken) repräsentiert werden, d.h. in welcher Form sie in ein „spatial substrate“ eingebracht werden, wobei in erster Linie eine zweidimensionale oder eine dreidimensionale Umgebung zur Anwendung kommt, wobei auch eine eindimensionale (Punkte entlang einer Linie) vorstellbar wäre, diese Möglichkeit ist jedoch, aufgrund der Unmöglichkeit einer

Beschriftung (Schrift benötigt bekanntlich zwei Dimensionen) oder anderen Markierungen, vernachlässigbar.

In jedem Fall kann, bei Darstellung einer Vielzahl von Objekten (Datenflecken), deren räumliche Positionierung durch mehr als zwei räumliche Dimensionen bestimmt ist, Sichtbehinderungen („occlusions“) zwischen den Objekten nicht ausgeschlossen werden. Dadurch ist ein Überblick nicht mehr auf einen Blick zu gewinnen, und kann so auch nicht mehr rein automatisch geschehen, einerseits da die normalerweise zur Verfügung stehenden Darstellungsmedien (Papier, Monitor) nur zweidimensionale Darstellungen sind, bzw. dreidimensionale Emulationen sind, und andererseits da auch die menschliche Wahrnehmung nur ein, aus zwei versetzten zweidimensionalen Projektionen zusammengesetztes, dreidimensionales Bild ist (vgl. [Hochberg_1986]).

Dies kann, resultierend aus der weiteren Nutzung der räumlichen Dimension bei der Visualisierungsmethodik zu drei sehr unterschiedlichen Problemen der Darstellung und Wahrnehmung führen, welche meist nur einzeln als Argumente angeführt werden:

- Abgewandte Seiten von Objekten können nicht gesehen werden
- Perspektivische Fehlwahrnehmung bzw. Fehlkonstruktion
- Objekte im Vordergrund behindern die Sicht auf dahinter liegende

Erstere Problematik wird nur relevant wenn die dargestellten Flecken / Objekte tatsächlich dreidimensionale Strukturen sind, d.h. wenn die dritte Dimension im Objekt eine Datenkomponente repräsentiert, bzw. ihre Rückseite auf irgend eine Art andere Informationen trägt als die Vorderseite - dann ist zumindest ein Teil (die abgewandte Seite) jedes einzelnen Datenflecks nicht ad hoc einsehbar, und das Diagramm dadurch nicht mehr automatisch verarbeitbar. Auch wenn dies selten so realisiert wird, ermöglicht es theoretisch die Verwendung von ein bis zwei weiteren räumlichen Dimensionen (mehrdimensionale visuelle Form Variable). Ein Beispiel in welchem dieses Problem auftritt ist die 3D-Timewheel Darstellung [Chuah_1997], bei welcher die Objekte innere dreidimensionale quantitative

Achsen verwenden, die Position der Objekte im Raum jedoch nur mehr als eine nominale Achse verwendet wurden:³⁸

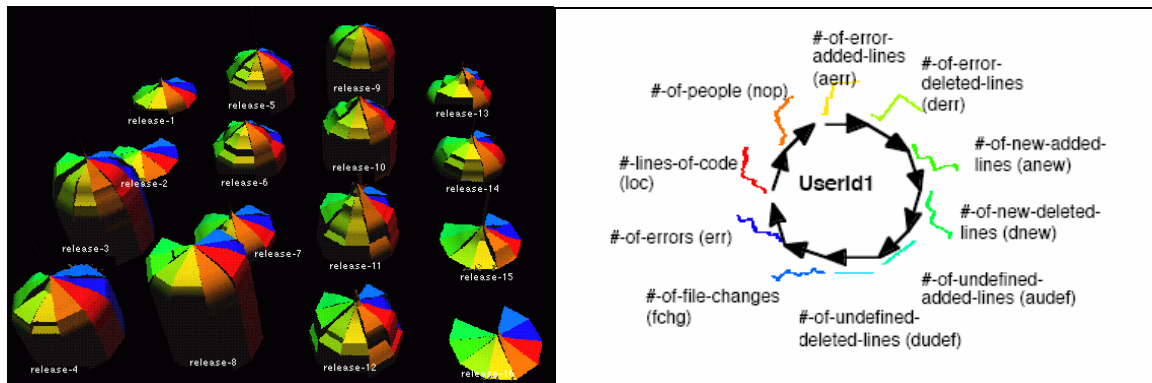


Abbildung 28: Darstellung mit 3 quantitativen Achsen / Alternative durch 2D Zusammenstellung [Chuah_1997]

Die zweite Problematik der perspektivischen Wahrnehmung besteht darin, dass bei Andeutung eines 3D Raumes bzw. angedeuteten Achsen fast zwangsläufig eine perspektivische Interpretation der Strukturen durch das Sehzentrum erfolgt, welche jedoch nicht immer mit der (künstlich erzeugten) visuellen Struktur übereinstimmt [Lind_2002]. Diese Tatsache wurde auch bereits gezielt ausgenutzt (Diagramme in populistischen Medien/Zeitschriften) um die intuitive Wahrnehmung der perspektivischen Größe eines Objekts, welche bei oberflächlicher Betrachtung (dem ersten Eindruck) sogar daneben stehende, exakte Zahlen dominiert ([Pflüger_2003]) – wie bereits erwähnt bleibt dieser visuelle Eindruck auch länger in Erinnerung, als die nebenstehende Zahl.

Neuere experimentelle Analysen von zwei- und dreidimensionalen räumlichen Darstellungen, zeigen dass die menschliche räumliche Tiefenwahrnehmung generell verzerrt ist – um korrekt wahrgenommen zu werden, muss das Größenverhältnis zwischen Objektiefe und Breite zwischen 35% und 50% betragen, um die Unterschiede einer in der Tiefenpositionierung verschiedener Objekte, bzw. Tiefe eines Objekts tatsächlich korrekt wahrnehmen zu können [Lind_2002], wodurch jedoch wiederum die Dimension der Breite verloren geht.

Durch die perspektivische Wahrnehmung (auch in Verbindung mit interaktiven Komponenten) kann es daher, je nach Darstellungsmethode, zu mehr oder wenig starken Fehlwahrnehmungen (bei Position und Größe) kommen, weshalb es sich nicht empfiehlt die

³⁸ Dennoch hat selbst die Autorin diese 3D Visualisierungskomponente bereits im selben Artikel durch eine zweidimensionale alternative Darstellung ergänzt (Timewheel), welche durch Verwendung einer Zusammenstellung (composite visualization) anderer, zweidimensionaler Darstellungen, die selben Daten transportierte, jedoch ohne Okklusionen. (siehe [Chuah_1997])

dritte räumliche Dimension (der Tiefe – so diese als solche interpretiert werden kann) als quantitative Achse zu realisieren.

Die dritte Problematik der hintereinander liegende Objekte, ist von der Platzierung der Objekte und dem Blickwinkel auf die Darstellung abhängig, d.h. die Anordnung der Objekte im Raum (3D Position als 3 Komponenten) verursacht unterschiedlich starke Sichtbehinderungen.

Das Auftreten dieser Probleme kann ohne interaktive Elemente nicht ausgeschlossen werden, bzw. verhindert werden – in der realen Welt genügt dazu bei sehr nahen Objekten die Bewegung des Kopfes um direkt dahinter liegende Objekte sehen zu können, was bei weiter entfernten Objekten keinen Effekt hat, bzw. benötigt eine Bewegung im Raum. Im Gegensatz dazu besteht bei Visualisierungsansätzen die Möglichkeiten den gesamten Darstellungsraum zu drehen um so die Sicht von allen Seiten zu ermöglichen. Doch auch dies kann unzureichend sein, wenn die gesamte visuelle Struktur, welche die Daten im Bild erzeugen, zu viele „Schichten“ hat – in diesem Fall können die Flecken nur mehr durch interaktive Bewegung durch die Struktur betrachtet werden, wozu unterschiedliche, teilweise mäßig erfolgreiche Eingabemethoden zur Anwendung kommen, meist jedoch sind diese ebenfalls ein- bis zweidimensionaler Natur (Maus, Tastatur) und eine Navigation ist daher meist aufwendig bzw. ineffizient. Andere dreidimensionale Eingabemethoden wie 3D Mäuse, Sticks oder Datenhandschuhe (Datagloves) können diese Navigation zwar intuitiver machen, sie sind jedoch einerseits nicht (teilweise nicht mehr) als serienreife Modelle verfügbar, und darüber hinaus ist die Benutzung meist sehr ermüdend, da viele Hand- und Armbewegungen nötig sind.

Generell wirken alle diese Maßnahmen jedoch dem Prinzip des sofortigen Überblicks entgegen, dennoch kann dies bei einigen Fragestellungen / Problemstellungen dennoch ein nützliches Vorgehen sein – auch anderen Techniken, welche Interaktivität beinhalten, verhindern eine gleichzeitige Betrachtungen aller Daten.

Ein Ansatz eines dreidimensionalen Darstellungsraums, welcher so konstruiert werden kann, dass er keine Sichtbehinderungen zur Folge hat ist die Walls & Floors Darstellung [Wright_1995], wobei an den Wänden eines dreidimensionalen Darstellungsquaders eine Zusammenstellung anderer 1-3 dimensionale Darstellungen erfolgte. Beschränkte man sich

hier auf zweidimensionale Darstellungen, so könnten Behinderungen ausgeschlossen werden. Wie bei allen Kombinationen/Zusammenstellungen mehrerer Darstellungsmethoden („composite visualizations“) muss jedoch darauf geachtet werden, ob das resultierende visuelle Gesamtbild den Betrachter nicht überfordert – ein Überblick wird immer schwerer, dennoch ist es möglich sehr viele Dimensionen gleichzeitig darzustellen, wodurch solche Darstellungen eher für serielle Vergleichs- oder Suchaufgaben relevant sind, d.h. wenn immer nur Zusammenhänge einzelner Daten relevant sind und selektive Details das Hauptziel sind – oder dass eine längere Lernphase (incl. Quote der Fehleinschätzungen) der Darstellung akzeptabel ist:

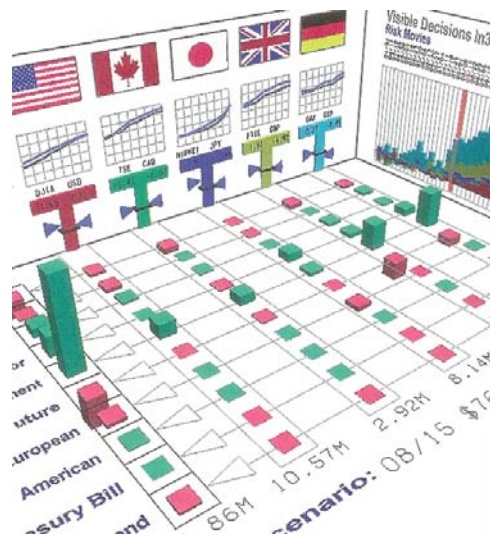


Abbildung 29: Kombination von Darstellungen im 3D Raum (anhand Walls & Floors [Card_1999])

Ein großer Teil moderner Visualisierungsmethoden (selbstverständlich ausgenommen von Scientific Visualization Darstellungen, welche meist dreidimensionale reale Objekte repräsentieren), sowie Anwendungen welche 3D Desktops und verwandte Konzepte mit eindeutig räumlich orientierten *visuellen Metaphern*, verwenden daher dennoch hauptsächlich zweidimensionale Umgebungen (Darstellungsräume), wenn dies auch ein aktuelles Thema der Diskussion bleibt, da es sowohl Vor- als auch Nachteile gibt.

Die dritte räumliche Dimension wird auch tatsächlich nicht derart dringend benötigt, da für computerbasierte, aber auch analoge Darstellungen genügend Alternativen bestehen mehrdimensionale Daten visuell zu kodieren, unter anderem auch durch Kombination von Diagrammen (welche auch in einem zweidimensionalen Darstellungsraum realisiert werden kann), und die Nachteile einer dreidimensionalen Darstellung von abstrakten Informationen daher oftmals überwiegen. Als Basis der weiteren Betrachtungen werden daher Darstellungen in der zweidimensionalen Umgebung (ebene Visualisierungen) verwendet werden.

3.4 Visuelle Dimensionen der Darstellung

Betrachten wir daher unter diesen Voraussetzungen die möglichen visuellen Eigenschaften in der Ebene, so muss erneut betrachtet werden, dass nicht alle gleich wahrgenommen werden, wodurch nicht alle möglichen visuellen Dimensionen die gleiche Anzahl an wahrnehmbaren Abstufungen, d.h. *Variationsstufen*, aufweisen, sowie nicht alle visuellen Variablen eine visuelle Ordnungsrelation besitzen und zusätzlich nicht alle gleich intensiv empfunden werden (bestimmte visuelle Eigenschaften dominieren andere), hauptverantwortlich dafür sind vermutlich auch die unterschiedlichen Verarbeitungsbereiche im Sehzentrum des menschlichen Gehirns.

Dass die Effektivität der Wahrnehmung durch Einsatz unterschiedlicher Mappings (Zuweisungskonfigurationen) von Komponenten zu visuellen Variablen tatsächlich sehr gravierend sein kann, und sich sowohl in Fehlerquote als auch in Wahrnehmungszeit niederschlägt, kann am folgenden Beispiel betrachtet werden:

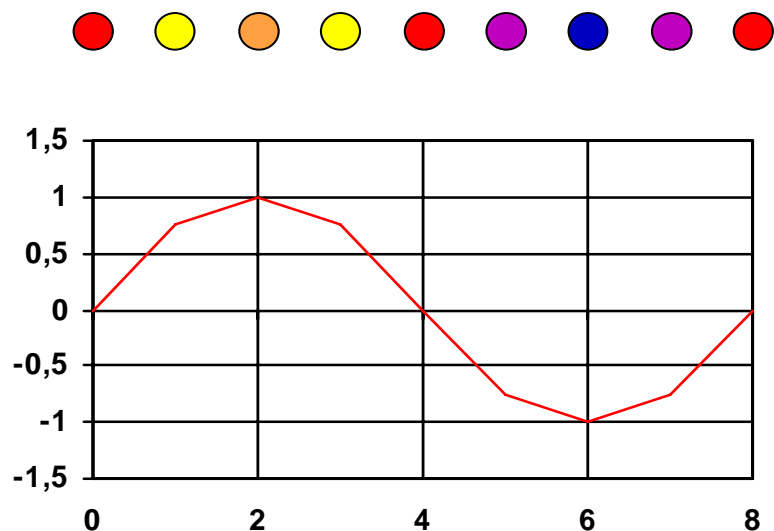


Abbildung 30: Effektivität unterschiedlicher DataMappings (nach Mackinlay in [Card_1999])

Man kann leicht erkennen, dass die Zuweisung der Variablen Farbe, welche ohne bestimmte Voraussetzungen eigentlich nur zur Darstellung ordinaler Dimensionen (O) geeignet ist (betreffend abstrakter Daten), die Wiedergabe der quantitativen Variable (welche der räumlichen Y-Achse im unteren Diagramm entspricht) nicht effizient wiedergibt; die

approximierte Sinuswelle ist daher im Gegensatz zur ersten Darstellung nicht schnell zu erkennen. Auch wenn man in diesem Fall eine bessere Farbaufteilung finden könnte, so ist diese, bei Verwendung des gesamten farblichen Spektrums nicht eindeutig. Es bedarf daher einer eingehenderen Analyse der möglichen Zuweisungen.

Analog zu der Klassifizierung der (Daten) Komponenten, können auch die visuellen Eigenschaften nach ihrer Wahrnehmbarkeit eingeteilt werden (ihrer *Gliederungsstufe*), d.h. man spricht von assoziativ (\equiv), selektiv (\neq), ordinal (O) und quantitativ (Q) wahrnehmbaren visuelle Variablen, wobei die visuelle Interpretation dieser Eigenschaften von Bedeutung für die weitere Analyse ist:

Unter assoziativ versteht man in diesem Zusammenhang wenn alle unterschiedlichen Elemente/Kategorien dieser Variable automatisch erkannt werden können, ohne dass einzelne Elemente besser sichtbar sind als andere. Selektiv bedeutet, dass es möglich ist alle Elemente einer Kategorie als zusammengehörig betrachten zu können und das Muster betrachten zu können, welches nur diese Kategorie erzeugt. Um als ordinal eingestuft zu werden muss es möglich sein, dass eine automatische/unbewusst Beurteilung der Unterschiede zwischen den Elementen / Kategorien erfolgen kann, d.h. die Reihenfolge darf nicht erst über eine Legende eingeführt werden (auch wenn dies schon versucht wurde und in kleinstem Rahmen auch bei nicht ordinalen Variablen möglich ist). Die quantitative Wahrnehmung ist nun analog zu den Komponenten als quantifizierbaren Unterschied zwischen den Elementen gekennzeichnet, wobei Flecken mit zu geringen Unterschieden automatisch zu Gruppen zusammengefasst werden, d.h. es gibt meist Schwellwerte ab welchen eine Unterscheidung erst möglich ist (wodurch wiederum die Zahl Variationsstufen implizit gegeben ist).

Die paarweise Zuweisung von Daten-Komponenten zu einzelnen visuellen Variablen, was auch als Definition einer graphischen Sprache bezeichnet wird [Mackinlay_1986] welche die Basis der Konstruktion von Visualisierungen ist, muss daher unter Beachtung folgender Punkte erfolgen:

- Länge der Komponente \leq Variationsstufen der visuellen Variable
- Typ der Komponente (N,O,Q) mit dem Typ der visuellen Variable kompatibel
- Dominanteste visuelle Variable repräsentieren wichtigste Komponenten

Werden die ersten beiden (harten) Einschränkungen nicht befolgt, so kommt es bei der visuellen Kodierung der Daten jedenfalls zu einem Informationsverlust, welcher von einer kleinen Ungenauigkeit (im Falle $L(K) \sim V(V)$, aber $L(K) > V(V)$), bis zum de facto völligen Verlust der Daten (im Falle $L(K) \gg V(V)$ oder $\text{Typ}(K)$ inkompatibel mit $\text{Typ}(V)$) durch viel zu grobe oder unsortierte Darstellung.

Der dritte Punkt ist nicht so konkret bestimmbar wie die beiden davor, und steht hauptsächlich in Verbindung mit der Aussagekraft der resultierenden Darstellung und kann bei neuen Darstellungen bzw. Variationen teilweise nur durch Austesten verschiedener Zuweisungen empirisch genähert werden; dazu später einige Details.

Eine erste Einteilung der Eigenschaften der visuellen Variablen, mit der Zielsetzung danach den Typ und die maximal zur Verfügung stehenden Variationsstufen dieser zu ermitteln erfolgt einerseits nach dem Kriterium der räumlichen im Gegensatz zu den objekt-bezogenen Eigenschaften, sowie graduell bzw. differentiell wahrnehmbaren Eigenschaften:

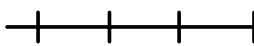






	Räumlich	Objektbezogen
Graduell	Position  Größe 	Helligkeit 
Differentiell	Ausrichtung 	Farbe  Muster  Form 

Abbildung 31: Klassifizierung visueller Variablen (nach Bertin in [Card_1999])

So bilden, wie bereits erwähnt jene räumlichen Eigenschaften, welche einem absoluten eindeutigen geordneten Maß unterliegen und graduell wahrgenommen werden können (Position und Größe eines wahrgenommenen Objekts), die visuell dominantesten Eigenschaften. Da sie, im Gegensatz zu den meisten anderen visuellen Variablen, selbst bei schlechtesten Lichtverhältnissen zumindest rudimentär wahrnehmbar bleiben, (abgesehen von

Signalelementen wie Warnfarben, etc.) den intensivsten optischsten Reiz. Alle anderen (objektbezogenen) Eigenschaften werden eher nachrangig wahrgenommen und sind auf gewisse Weise auch von den räumlichen Variablen abhängig - so können alle objektbezogenen Variablen erst ab einer gewissen Größe des Flecks (des Datenobjekts) wahrgenommen werden, darunter verschwimmen sie mit dem Objektrands oder verschwinden komplett – spätestens wenn der Fleck nur mehr die Größe eines Punktes hat. Dies, d.h. die Eigenschaft, dass sich die Sichtbarkeit des Flecks (d.h. und damit der anderen visuellen Variablen) bei Variation der visuellen Variablen ändert, wird als dissoziativ bezeichnet, was nur bei der Helligkeit und der Größe der Fall ist, alle anderen visuellen Variablen werden daher als assoziativ eingestuft.

Differentielle Variable sind, außer in Ausnahmesituationen, grundsätzlich nur voneinander als nicht gleich (\neq) bzw. als ähnlich (\equiv) unterscheidbar, d.h. es existiert keine allgemeingültige Ordnungsrelation, und können daher normalerweise nur zur Repräsentation von nominalen Komponenten (N) eingesetzt werden. Bei graduellen Variablen ist eine genauere Betrachtung der einzelnen Variablen nötig, sie sind jedoch prinzipiell in der Lage zumindest geordnete Komponenten (O) darzustellen.

Die nicht vorhandene Ordnungsrelation der differentiellen Eigenschaften kann, im Gegensatz zur Norm bei abstrakten Daten, in einigen Situationen doch vorhanden sein, wie bspw. bei der Repräsentation von bereits assoziierten Ordnungen, welche entweder durch einen Zusammenhang mit natürlichen Eigenschaften eindeutig ist, bzw. im soziologischen Kontext als Ordnung definiert ist (welche jedoch in unterschiedlichen ethnischen Gruppen variieren kann – selbst die Leserichtung von rechts oben nach links unten ist nur lokal festgelegt). So besitzen bspw. Farben, als Repräsentation einer willkürlichen Dimension, keine Ordnung, und können daher in dieser Verwendung meist nur sinnvoll als Klassifizierungsmerkmal mit einer kleinen Anzahl an eingesetzten Farbwerten, welche nicht zu farblich „nahe“ beieinander liegen dürfen, eingesetzt werden. (Als Repräsentation von Temperaturwerten wäre jedoch bspw. ein relativ sinnvoller Einsatz der Farbe mit einem Spektrum von Blau (kalt) nach Rot (warm) möglich, welche in unserem Kulturkreis häufig eingesetzt wird und daher bereits unbewusst erkannt wird und auch automatisch eingesetzt werden kann)

Räumliche visuelle Variable

Position im Raum (in der Ebene)

Geht man nun von lediglich zwei räumlichen Dimensionen aus, so wird die Darstellung in einer Ebene angeordnet, welche stetig ist und homogen wahrgenommen wird, wodurch die 2D Position, die am differenzierteste visuelle Eigenschaft ist, d.h. jene mit dem meisten *Variationsstufen* ist, und daher sehr fein geteilt (gequantelt) werden kann, wodurch die Position sehr gut geeignet ist Daten-Komponenten von hoher Länge abzubilden.

Da die räumlichen Achsen ebenfalls bei Anzahl vieler Variationsstufen eine eindeutig quantifizierbare Ordnungsrelation besitzen, ist sie am besten in der Lage quantitative Komponenten (Q) darzustellen, wobei auch alle anderen Komponentenarten (N), (O) darauf abgebildet werden können – wenn auch meist automatisch eine Art der Ordnung vermutet wird, da dies ein Charakteristikum der räumlichen Wahrnehmung ist. Es wurde bereits zuvor demonstriert, dass dieser Umstand auch dazu ausgenutzt werden kann die Position zusätzlich zu einer nominalen Komponente (N) auch mit einer (O) Komponente doppelt zu belegen (zu überladen).

Betrachtet man kurz erneut die Möglichkeit der Verwendung einer dritten räumlichen Dimension – der Tiefe – so ist zu beachten, dass diese laut neuen empirischen Analysen *nicht* die gleichen visuellen Eigenschaften besitzt, da die menschliche Tiefenwahrnehmung in ihrer Wahrnehmung – speziell der Quantifizierung von Tiefen verzerrt ist [Lind_2002]. Sie kann daher nur zur Darstellung nominaler und ordinaler Komponenten eingesetzt werden.

Darüber hinaus wäre die räumliche Tiefe bei tatsächlicher Realisierung einer perspektivischen Darstellung ebenfalls eine dissoziative visuelle Variablen, da die Größe des Flecks mit zunehmender Entfernung abnimmt – ohne perspektivische Darstellung wäre sie zwar nicht dissoziativ, aber die Wahrnehmung der separaten visuellen Variable der Größe des Flecks wäre beeinträchtigt.

Objektgröße

Die Variation der Objektgröße entspricht der Veränderung des Flächeninhalts eines Fleckes, wobei davon ausgegangen wird, dass diese visuelle Variable eine Länge etwas unter zwanzig Stufen ermöglicht, so das Verhältnis des maximalen zum minimalen Flächeninhalt bei zehn zu

eins liegt, und die Stufen äquidistant sind. Selektiv wahrnehmbar sind jedoch lediglich vier bis fünf Kategorien, wobei, wie bereits erwähnt die Größe dissoziativ ist und darüber hinaus visuell nicht abstrahierbar ist, d.h. größere Flecken werden immer als wichtiger wahrgenommen als kleinere – enthält das Diagramm einige viel größere Flecken und sonst nur kleine, so ist es schwer die kleinen Flecken überhaupt zu beurteilen, da sie absolut von den anderen dominiert werden (abgesehen davon, dass sie eben kleiner sind als alle großen). Ein spontane Selektion ist jedoch abseits der Größe kaum / nicht mehr möglich, da von der Größe kaum abgesehen werden kann – abgesehen von der Position im Raum, sind andere Sortierungsmerkmale wie Ausrichtung oder Form kaum zu erkennen (d.h. sie können nur mehr als Detailinformation abgelesen werden, sobald eine kleine interessante Nachbarschaft identifiziert wurde, was jedoch bei der folgenden Verwendung von nur drei Abstufungen relativ sinnlos scheint):

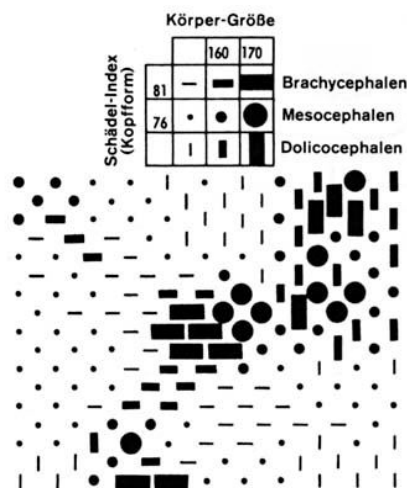


Abbildung 32: Dominanz der Fleckengröße – Negativbeispiel einer Darstellung (aus [Pflüger_2003])

Die Verwendung der Größe als visuelle Variable muss daher sehr vorsichtig geschehen, möglichst nur wenn sie die einzige Ordnung darstellt, bzw. wenn tatsächlich nur die größten Flecken gefunden werden sollen (Kleine Strukturen sind eine Möglichkeit der Defokussierung von Informationen).

Ausrichtung

Der visuelle Stimulus ist die Winkeldifferenz zwischen Feldern paralleler Zeichen, wobei diese visuelle Variable keine sehr differenzierte Wahrnehmung zulässt, obwohl innere Winkel zwischen anliegenden Kanten gut beurteilt werden können. Dennoch neigen große Anhäufungen an Zeichen mit schräger Lage dazu, im Gegensatz zu senkrechten und

waagrechten Zeichen zu ähnlich auszusehen, weshalb empfohlen wird, nur vier Richtungen mit 30° und 60° Neigung (zusätzlich zu 0° und 90°) einzusetzen.

Der Vorteil ist, dass einzelne anders ausgerichtete Flecken meist sofort auffallen, wodurch eine selektive Wahrnehmung in aller Regel sehr leicht möglich ist und speziell für die Darstellung in großen nahe anliegenden Feldern geeignet ist, da der Winkel einer Schrägung ohne nahe Vergleichsobjekte nur schwer einzuschätzen ist – daher in schwach besetzten Diagrammen am besten nur senkrecht/waagrecht zu verwenden (darüber hinaus gibt es symmetrische Fleckenformen welche die Betrachtung des Winkels überhaupt unmöglich machen, wie bspw. Kreise, bzw. ähnlich symmetrische Muster).

Objektbezogene visuelle Dimensionen

Helligkeit

Die Helligkeit eines Punktes “ohne“ Farbanteile, welches als Verhältnis von Schwarz- und Weißanteilen auf einer bestimmten Fläche definiert werden kann, wird durch die Darstellung von Grauwerten, welche entweder gemischt werden (diese sind durch gleichen Anteil der einzelnen RGB-Farben charakterisiert), bzw. durch Schraffuren oder durch Rasterung erreicht werden können. Die höchste Stufe der Helligkeit ist hier schwarz, da es auf einem weißen Untergrund am intensivsten wahrgenommen werden kann.

Hierbei ist zu beachten, dass Graustufen, welche von ihrer Deckung gleich weit voneinander entfernt sind (bspw. 0%, 20%, 40% Schwarzanteil usw.) nicht als visuell äquidistant wahrgenommen werden. Man geht davon aus, dass bei selektiver Wahrnehmung ca. 6-7 Helligkeitsstufen unterschieden werden können, wobei die Anzahl der Variationsstufen mit der Größe der Flecken abnimmt. Dennoch können die Helligkeitsunterschiede graduell wahrgenommen werden und es existiert eine klare Ordnung der Stufen, wodurch ordinale Komponenten abgebildet werden können.

Zusätzlich ist, analog zu der visuellen Variable der Größe von Flecken, die Helligkeit eines Fleckes, die einzige weitere dissoziative visuelle Variable, welche alle anderen dominiert. Bei abnehmender Helligkeit des gesamten Flecks, verringert sich die Anzahl der verfügbaren Variationsstufen aller anderen visuellen Variablen, bis zu dem Punkt der geringsten Helligkeit (Weiß) an welchem der Fleck überhaupt nicht mehr wahrgenommen werden kann.

Ebenso wie die Größe eignet sich die Helligkeit sehr gut um einen Teil nicht relevanter Informationen zu de-fokkussieren (bzw. graduell auszublenden), was jedoch auch geschieht wenn es nicht beabsichtigt wird, d.h. die Helligkeit muss ebenfalls sehr vorsichtig eingesetzt werden, da Flecken mit schwacher Helligkeit sonst übersehen werden.

Farbe

Betrachtet man die visuelle Komponente der Farbe unabhängig von der Helligkeit, so steht nur eine stark begrenzte Zahl an farblichen Abstufungen zur Verfügung. Dies ist jedoch nicht ganz einfach, da Skalen der reinen Farbtöne aus einer Mischung von Farb- und Helligkeitsvariationen bestehen, diese dafür bezüglich der beiden Teile des Spektrums geordnet sind, dann können sie jedoch nicht sinnvoll in Verbindung mit der Helligkeit als separater visueller Variablen dargestellt werden..

Betrachtet man Farben, welche tatsächlich den gleichen Helligkeitswert haben, so ist die Farbvariation jedenfalls nicht geordnet, die Zahl der selektiv wahrnehmbaren Variationsstufen ist stark vom Helligkeitswert abhängig und maximal in der Nähe von gesättigten Farben. Zusätzlich ist die Zahl der Stufen selbstverständlich auch von der Größe der Flecken abhängig, und wird umso geringer je kleiner diese sind.

Trotz allem sind Farben gute selektive Variable und können gut mit anderen visuellen Variablen kombiniert werden, speziell um bestimmte Merkmale zu betonen. Darüber hinaus ist bekannt, dass die Verwendung von Farben in Diagrammen (die „Buntheit“) eine unterbewusste Verstärkung des Interesses, bzw. der Motivation, zur Folge hat (eine gewisse Anziehungskraft ausübt).

Zu beachten ist jedoch, dass speziell Farben kulturell stark geprägt sind und bestimmte Kulturkreise unterschiedliche Assoziationen mit unterschiedlichen Farben verbinden, wie bspw. Rot/blau zur Darstellung von Heiß/Kalt, welche aufgrund der kulturellen Einbettung bereits automatisch wahrgenommen werden. Dies kann zwar zur Darstellung ausgenützt werden, jedoch muss auch beachtet werden, dass diese nur mehr in bestimmten soziologischen Kreisen gleich belegt sind.

Darüber hinaus muss die Problematik von Farbsehstörungen bei Verwendung von Rot/Grün Unterscheidungen beachtet werden (wobei noch einige andere sogenannte „Farbblindheiten“ existieren, welche jedoch viel seltener sind, als die Rot/Grün „Blindheit“, wovon etwa 5% der Bevölkerung betroffen sind), welche speziell bei Farben gleicher Helligkeitsstufe relevant sind, da sie dann für manche Personen tatsächlich nicht unterschieden werden können.

Muster

Trägt die nicht uniforme Farb/Helligkeitsverteilung eines Daten- Flecks Informationen in Form von Mustern, so kann ab einer bestimmten Größe, je nach Art der Implantation folgende Anzahl selektiver Variationsstufen unterschieden werden:

- Flächenhafte Implantation: 4-5 Stufen
- Linienhafte Implantation: 3-4 Stufen
- Punkthaft: 2-3 selektive Stufen

Da eine Variation in der Dichte eines Musters ebenfalls eine Auswirkung auf die Helligkeit hat, ist die Zahl der zur Verfügung stehenden Muster nicht so groß. Eine Ordnungsrelation der unterschiedlichen Muster ist im Normalfall nicht gegeben, wodurch nur eine Selektion möglich ist..

Form

Bei der Form ist der visuelle Stimulus das Erkennen des Gleichartigen, wobei die Variation der Form grundsätzlich assoziativ ist. Prinzipiell sind unbegrenzte Variationen (in Zusammenhang mit den durchschnittlich verfügbaren Bildpunkten des Flecks) möglich sind, die menschliche Wahrnehmung jedoch, speziell bei der Form, automatisch nach sinnhaften Bildern sucht. Such- und Identifikationsaufgaben können durch Verwendung realer bzw. bekannter Muster, d.h. durch eine symbolische Verwendung, stark erleichtert werden – die Verwendung von Legenden zur Identifikation von nominalen Kategorien muss, bei sinnvoller Verwendung, nur einmal bzw. oftmals auch gar nicht erfolgen. Speziell bei sinnhaften Symbolen muss jedoch auf die Bedeutung des Symbols in der Zielgruppe (Bildungsgruppe / Kulturkreis, usw.) geachtet werden – d.h. es gibt wenig allgemeingültige Symboliken (sowohl

Form-, als auch Farbsymboliken) – mit Fehlinterpretation muss daher jedenfalls gerechnet werden.

Verwendungsmöglichkeiten visueller Variablen

Betrachtet man daher die Möglichkeiten der Verwendung (die Gliederungsstufen) der zuvor betrachteten visuellen Variablen so ergibt sich folgendes Bild, wobei die Zeichen weiterhin anzeigen welche Art der Wahrnehmung möglich ist – assoziative (\equiv), dissoziative ($!\equiv$), selektive (\neq), ordinale (O) und quantitative (Q):

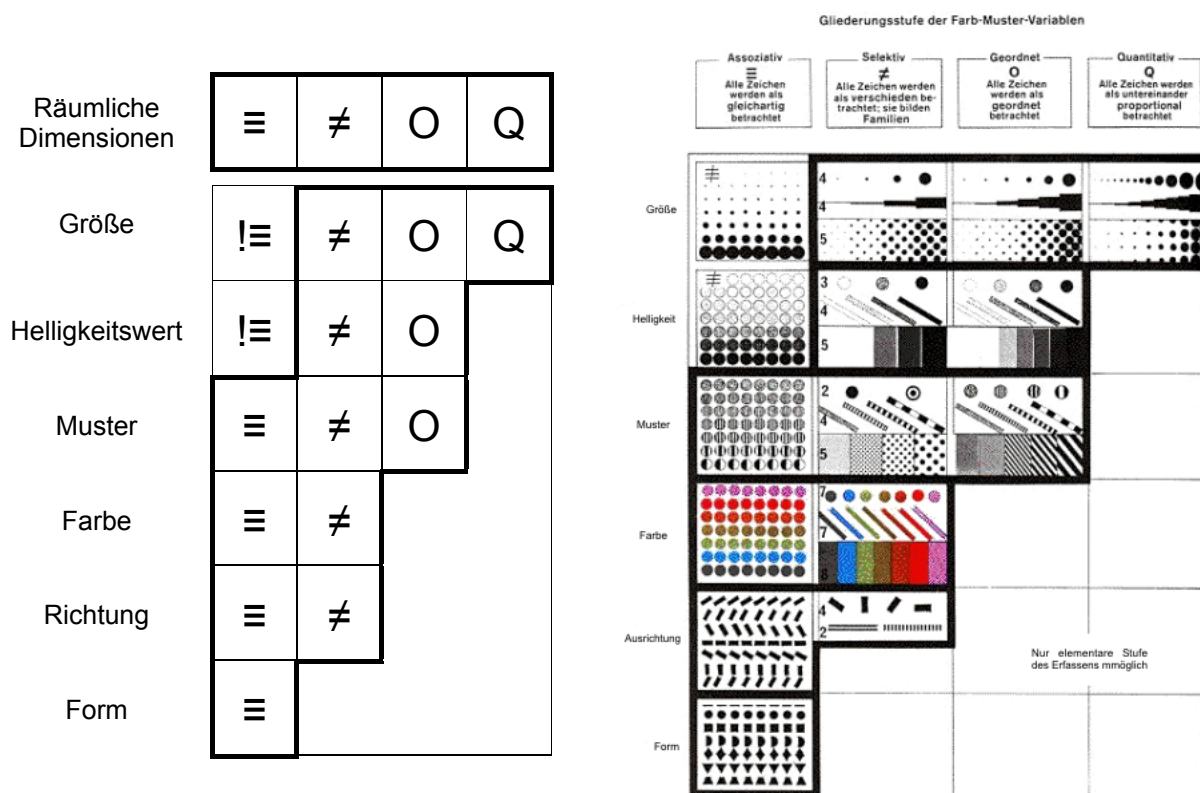


Abbildung 33: Gliederungsstufen visueller Variablen (nach Bertin aus [Pflüger_2003])

Aus dieser Aufstellung können alle sinnvoll möglichen Zuweisungen (Kandidaten) von visuellen Variablen zu Komponenten beurteilt werden, wobei zur Durchführung einer effizienten Zuweisung auch die weiteren zuvor genannten Punkte (wie Anzahl der darstellbaren Kategorien usw.) beobachtet werden müssen.

Die Ordnungsrelation der Effektivität der dargestellten visuellen Variablen, wurde bereits vor längerer Zeit, bezüglich der Wahrnehmungszeit und Fehlerfrequenz beim Einsatz der visuellen Variablen Farbe (in diesem Fall jedoch als Helligkeit verwendet), Form und Größe

empirisch erhoben (etwa [Mackinlay_1986], sowie [Christ_1984]), aber in neueren Analysen [Nowell_2002] fast in gleicher Form bestätigt, wobei unterschieden wurde ob die visuelle Variable als Träger nominaler oder quantitativer Daten diene (wobei eine größere Zahl schlechter ist: d.h. eins ist die effektivste Größe):

Eigenschaft	Nominale Verwendung		Quantitative Verwendung	
	Erkennungszeit	Fehlerrate	Erkennungszeit	Fehlerrate
Helligkeit (F)	1	1	1	1
Form	3	2	n/a	n/a
Größe	2	3	2	2

Tabelle 4: Effektivität visueller Variablen in unterschiedlicher Verwendung

Auch wenn dieser empirischen Tests meist die gleichen Ordnungsrelationen lieferten, so zeigte sich doch, dass es trotz ähnlicher Verwendung der Komponenten zu Unterschieden kommen kann, da die Gesamtkonstruktion des Diagramms, selbst bei minimalistischen Diagrammen, ebenso Einfluss auf Wahrnehmbarkeit hat, welche sich jedoch nicht nur aus der Summe der einzelnen Zuweisungen ergibt.

Visuelle Strukturen

Die Methode wie die räumlichen Achsen genau genutzt werden und welche visuellen Parameter in welcher Form zum Einsatz kommen charakterisieren den primären Anteil der graphischen Darstellung an einer Visualisierungsmethode, welche zusätzlich noch durch die interaktiven Komponenten sowie mögliche temporale Komponenten (Animationen) ergänzt wird, was zusätzlich zu der konstanten, automatischen Vorgehensweise bei der visuellen Kodierung der Eingangsdaten, welche eine schnelle Reaktion auf verändernde Daten ermöglicht (heutzutage praktisch in Echtzeit), den großen Vorteil der computerbasierten Visualisierung gegenüber analogen/händischen Darstellungsmethoden ausmacht.

Klassifikation von ebenen Darstellungen

Eine Klassifikation der üblichen Darstellungsarten, welche häufig immer noch die Basis vieler Visualisierungsansätze ist, kann nun anhand der Art der Beziehungen der räumlichen Dimensionen mit den Komponenten in der Darstellung, d.h. der Impositionsgruppen der Ebene, erfolgen. Werden beiden räumlichen Dimensionen unterschiedliche Komponenten zugeordnet und ist es dabei möglich die Beziehungen zwischen allen Elementen der beiden unterschiedlichen Komponenten darzustellen so wird dies als *Diagramm* bezeichnet (Balkendiagramme, Histogramme, usw.). Können hingegen nur Beziehungen zwischen allen Elementen der gleichen Komponenten dargestellt werden so ist dies ein *Netz* (Bäume, Graphen, usw.). Ist es möglich/nötig die Beziehungen zwischen allen Teilen der selben Komponente eines Netzes, entsprechend ihrer Lageparameter darzustellen, d.h. werden GEO Informationen (eine Komponente, welche eine bestimmte räumliche Anordnung – eine geographische Ordnungsrelation – definiert) dargestellt, so wird dies als *Karte* bezeichnet (dies umfasst auch gewöhnliche Landkarten ohne zusätzliche Informationen). Stellt die Metrik der Ebene eines Netzes eine (inhaltliche) Entfernung dar, d.h. wird eine Raummetapher eingesetzt so bezeichnet man dies als *Informationsraum*.

Mit Vorsicht sind die umgangssprachlichen Bezeichnungen von diversen Darstellungen zu

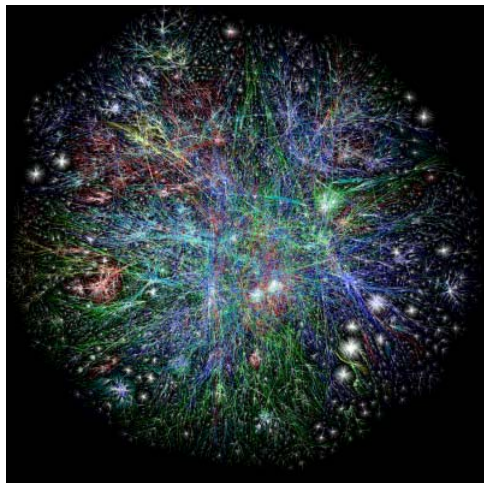


Abbildung 34: Netz als "Karte" des Internet (aus [Optel])

betrachten, da diese oftmals die Invariante (also den Zweck/Inhalt der Grafik) als Bezeichnung tragen, nicht jedoch die Impositionsgruppe beschreiben, wie etwa nebenstehende "Karte" des Internets [Optel], welche von ihrer Impositionsgruppe her eindeutig ein Netz (vom Untertypus Feld) ist (d.h. ein ungerichteter Graph welcher Internet-verbindungen darstellt), wobei die Farbe den Aufenthaltsort (Kontinent) des Knotens (Ziel-computers) kodiert – d.h. die räumlichen Achsen werden nicht verwendet um eine tatsächliche räumliche Entfernung

darzustellen, sondern meist die Zahl der zwischen den jeweiligen Knoten (Ausgangscomputer und Zielcomputern) liegenden Knoten („Routern“), bzw. völlig frei verwendet (d.h. nur um eine effiziente Verteilung der Knoten und Verbindungen am Bildschirm zu ermöglichen).

Das zweite Klassifizierungsmerkmal von ebenen grafischen Darstellungstechniken ist der Impositionstypus, welcher angibt auf welche Art die räumliche Positionierung der Flecken im

Diagram geschieht. So kann die Positionierung wahlfrei in einem *Feld*, geschehen (d.h. de facto keine (deterministische) Zuweisung von Darstellungsdimensionen zu räumlichen Koordinaten).

Weiters kann eine eindimensionale Zuweisung der räumlichen Koordinaten – entweder geradlinig oder kreisförmig – erfolgen, wobei die zweite räumliche Dimension wiederum wahlfrei zugewiesen wird, oder überhaupt nicht informationstragend zur Anwendung kommt. Eine weitere, häufige angewandte Möglichkeit ist jene der Nutzung beider Dimensionen der Ebene, entweder rechtwinkelig unter Anwendung kartesischer Koordinaten, bzw. einer Mischform, d.h. unter Verwendung von Polarkoordinaten.

Die Kombinationen der Impositionstypen und -gruppen bilden eine Reihe bekannte Darstellungen:

		Impositionstypus →				
		Feld	Geradlinig	Kreisförmig	Rechtwinkelig	Polar
Impositionen- gruppen ↓	Diagramme					
	Netze					
	Karten					
	Symbole					

Abbildung 35: Klassifizierung bekannter Impositionsvarianten (nach Bertin [Bertin_1977])

Die räumliche Struktur der Zeichenflecken an sich, welche bspw. in obige Darstellungen eingebracht (implantiert) werden, kann nun in ähnlicher Weise, den Raum auf unterschiedliche Weise nutzen, wobei, je nach Interpretation der Zusammenhänge, zwischen den Folgenden Arten der Implantation unterschieden wird:

- Punkthafter Implantation
- Linienhafter Implantation
- Flächenhafter Implantation

Der Normalfall ist meist die punkthafte Implantation von Flecken, welche die Verwendung aller visuellen Variablen (Größe, Helligkeit, Muster, Farbe, Richtung und Form) zur Variation des Flecks, unabhängig von ihrer Lage ermöglicht, d.h. die Positionierung in der Ebene hat keinen deterministischen Zusammenhang mit den anderen eingesetzten Dimensionen und so keinen Einfluss auf das Aussehen des Flecks. (Bspw. Balkendiagramme, oder Orte in Karten, welche nicht nach ihrer tatsächlichen geographischen Ausdehnung sondern einer abstrakten Größe – etwa ihrer Einwohnerzahl – in der Größe variieren)

Ein linienförmiger Fleck ist hingegen bezüglich seines Verlaufs in der Ebene festgelegt, er kann nur mehr bezüglich seiner Breite (statt zweidimensionaler Größe) sowie den weiteren visuellen Variablen variiert werden (etwa Flüsse in Karten).

Ein flächiger Fleck repräsentiert nun eine konkrete zweidimensionale Struktur, ein Großteil der visuellen Variablen (Größe, Form und Richtung) und kann daher nicht mehr mit abstrakten Daten belegt werden, lediglich Helligkeit, Form und Farbe können noch abstrakt verwendet werden. (diverse natürlich repräsentierte Elemente (nicht Symbole) in Karten)

Verwendung visueller Variablen

Die, abhängig von der Art der Implantation, noch zur Verfügung stehenden visuellen Variablen können nun zusätzlich belegt werden, wobei man nicht mehr einsetzen sollte als nötig, und generell versuchen muss eine gute gesamte Lesbarkeit der Darstellung zu

ermöglichen. Die variierende Darstellung des daten-/bedeutungstragenden Flecks zusätzlich zur räumliche Positionierung kann dabei verwendet werden um:

- Werte einer zusätzlichen Komponente (des selben Datenpunktes) anzuzeigen
- Redundante Kodierung von Komponenten

Die zweite Möglichkeit kann eingesetzt werden wenn nicht alle miteinander kompatiblen visuellen Variablen zur Darstellung der vorhanden Komponenten eingesetzt wurden. Es ist dann, wie zuvor erwähnt, möglich die (noch nicht verwendete) visuelle Variable zur redundanten Darstellung einer, bereits visuell kodierten, Komponente einzusetzen. Dies kann dazu dienen bestimmte Eigenschaften (auch von Beschriftungen) zusätzlich zu betonen um so etwa wichtige Unterscheidungen (positive / negative / null Werte) oder Werteverläufe zusätzlich betonen, wodurch die Fehlerrate in der Erkennung sinkt und die Lesbarkeit weiter verstärkt werden kann.

Neuere empirische Untersuchungen [Nowell_2002] zeigten dabei, dass auch die redundante Verbindung von bestimmten visuellen Variablen wie Helligkeit, Form und Größe tatsächlich Unterschiede hat, wobei folgende Ordnungsrelation beobachtet wurde:

Helligkeit & Form \leq Helligkeit & Größe \leq Helligkeit & Form & Größe $<$ Form & Größe

Der Normalfall der redundanten Zuweisung ist jedoch meist, dass eine der visuellen Variablen zusätzlich zu einer der räumlichen Dimensionen redundant kodiert wird.

Unbeabsichtigte Variation von Flecken

Generell sollte bei allen graphischen Darstellungen darauf geachtet werden, dass nicht verwendete visuelle Variable nicht unabsichtlich zum Einsatz kommen, d.h. dass der Fleck nur sinnhaft variiert wird, denn sonst wird eine visuelle Klassifizierung durchgeführt, welche nicht den dargestellten Daten entstammt, wodurch die Darstellung jedenfalls nicht mehr informationstreu ist. Dies bedeutet, dass für alle zuvor aufgeführten visuellen Eigenschaften (Farbe, Helligkeit, Form, usw.), überprüft werden muss/sichergestellt werden muss ob/dass die Datenflecken sich tatsächlich nicht unnötig unterscheiden, d.h. wenn die Balken

(punktförmige Implantation) eines Balkendiagramms eine Farbe bekommen um einen Kontrast zum Hintergrund zu bilden, so müssen alle Balken die selbe Farbe bekommen (so die Farbe nicht als visuelle Variable, also als Unterscheidungsmerkmal zum Einsatz kommt), da sonst automatisch angenommen wird, dass die Farbe Bedeutung hat, bzw. bereits vor diesen gezielten Überlegungen eine unbewusste automatische visuelle Selektion stattfindet – in diesem Fall jedoch nach einem nicht existentem Kriterium.

Geschieht dies doch, so kann erneut zu Fehlwahrnehmungen, Irrtümern und vermutlich generell längeren Interpretations-/Betrachtungszeiten kommen, was manchmal wohl auch absichtlich geschieht – es wurde bereits erwähnt, dass die Größe von Flecken (speziell in Verbindung mit übervereinfachten Darstellungen, d.h. nur einige wenige eindimensionale Zahlen werden mit mehreren visuellen Variablen überbestimmt (bzw. gezielt fehlbestimmt)) selbst einige nebenstehende absolute Zahlen dominieren kann, welche oftmals überhaupt nicht mehr gelesen werden kann.

Gezielte Zuweisung

Die Zuweisung (*Mapping*) von darzustellenden Datenstrukturen zu bestimmten visuellen Variablen bildet, wie bereits erwähnt, die visuellen Strukturen. Betrachtet man die einsetzbaren Eigenschaften, so gibt es bei abstrakten Daten nicht in jedem Fall eine (im Normalfall meistens keine) einzig richtige Zuweisung der Daten zu bestimmten visuellen Variablen (zumindest nicht objektiv), wodurch es selbst bei ähnlichen Darstellungskonzepten meist einige alternative Möglichkeiten gibt. Dennoch gibt es bessere und schlechtere Darstellungen, welche das Hauptziel – alle bedeutenden (für eine Fragestellung entscheidenden) Daten, Strukturen und Zusammenhänge wiederzugeben, ohne dem Betrachter nicht existente Zusammenhänge zu suggerieren – unterschiedlich gut erfüllen [Mackinlay_1986b].

Diese Effektivität der Darstellung kann, falls diese zur Debatte steht, wie beispielsweise wenn zwischen zwei alternativen Darstellungen, welche zu Beantwortung der gleichen Fragestellung dienen, empirisch geschätzt werden, in dem die durchschnittliche Dauer erhoben wird, welche zur Beantwortung verschiedener Fragestellungen durch unterschiedliche repräsentative Benutzer benötigt werden, bzw. wie viele Fehler sie bei der

Beantwortung machten. Solche *Usertests* kommen hauptsächlich bei der Entwicklung neuer, stark von der Norm abweichender Darstellungsmethoden zur Anwendung (einerseits da ihre Eigenschaften ungetestet sind und andererseits da die Benutzer noch nicht gelernt haben damit umzugehen – das Interpretieren von Standarddiagrammen kann heutzutage bereits praktisch als Allgemeinwissen eingestuft werden), sind jedoch ohne Referenz zu bereits bestehenden Ansätzen in Bezug auf die benötigte Zeit, weniger aussagekräftig, da die Effektivität (abgesehen von der Fehlerquote) eigentlich nur im direkten Vergleich verschiedener Darstellungsansätze, betreffend bestimmter vergleichbarer Testsituationen und Testfragen, sinnvoll messbar ist.

Darstellung von multivariaten Daten

Betrachtet man die Anzahl der, mit den eben vorgestellten Mitteln, tatsächlich gleichzeitig darstellbaren Datendimensionen (bei räumlich zweidimensionalen Darstellungen), so liegt diese, selbst im besten Fall – der punkthaften Implantation – bei maximal sechs Dimensionen (den assoziativen visuellen Variablen) welche zur gleichen Zeit zur Verfügung stehen (wobei sich das Merkmal der Ausrichtung generell schlecht eignet). Realistisch liegt sie jedoch bei Darstellungen mit wenigen Elementen noch niedriger – darüber hinaus ist die Anzahl der unterscheidbaren Stufen bei den meisten dieser Größen ohnehin relativ gering.

Bei manchen Fragestellungen, welche mittels Visualisierung beantwortet werden sollen, sind die zu betrachtenden Daten oftmals hochdimensional, wobei jedoch oftmals nicht bekannt ist, welche Datendimension die wichtigsten sind, da die Daten alle gleich bedeutend sind, bzw. Unterschiede in der Bedeutung nicht eingeschätzt werden können (d.h. es existiert keine logische Ordnung der Dimensionen) da diese von stark heterogener Natur sind und dadurch nicht zu vergleichen sind.

Dies ist häufig der Fall bei der Untersuchung / Betrachtung von, in elektronischen Datenbanken erfassten, abstrakten Daten, deren Analyse eine der Hauptantriebsquellen bei der Weiterentwicklung der Visualisierung im letzten Jahrzehnt war, da immer größere Datenmengen mit immer mehr Dimensionen teilweise vollautomatisch erfasst werden, deren schiere Anzahl eine detaillierte Betrachtung aller Datensätze in vielen Anwendungsfällen praktisch unmöglich macht. Daher wurde nach Möglichkeiten gesucht einzelne interessante

bzw. problematische Fälle aus der Summe heraus erkennen zu können bzw. lokale Gruppierungen von ebensolchen Elementen erkennen zu können. (Fehlersuche bzw. Chancenanalysen).

Um diese weiteren Dimensionen dennoch darstellen zu können stehen der computerbasierten Visualisierung nun unterschiedliche Methoden zur Verfügung:

- Interaktivität
- Animation (Temporale Variable hinzunehmen)
- Zusätzliche räumliche Dimensionen
 - Dritte Dimension
 - Splittung der räumlichen Dimensionen
- Kombination von Darstellungen

Wobei die ersten beiden Möglichkeiten zwar eine Erhöhung der in der Visualisierung wahrnehmbaren Dimensionen ermöglichen, im Gegensatz zu den beiden letzteren Möglichkeiten jedoch nicht zur gleichen Zeit, d.h. diese können auf einem etwaigen Ausdruck nicht wiedergegeben werden.

Interaktive Elemente ermöglichen die Darstellung von zusätzlichen Dimensionen durch eine Reihe von Möglichkeiten, welche später noch genauer erläutert werden. Die Animation von Elementen benötigt zur sinnvollen (abstrakten) Darstellung meist ebenfalls interaktive Komponenten um den Lauf der Animation steuern zu können und eignet sich jedenfalls am besten zur Repräsentation einer temporalen Dimension, wobei der visuelle Reiz im Entdecken von Veränderungen liegt, wobei einzelne Veränderungen der Position am besten wahrgenommen werden können. Die zeitlich hintereinander gelegte Darstellung (Animation) von stark voneinander abweichenden Daten, d.h. auch bei Betrachtung von stark variierenden Daten (d.h. welche weite visuelle Sprünge durchführen) ist hingegen nicht sehr effizient wahrnehmbar. Das Kriterium ist hierbei, dass speziell die räumliche Position der Datenflecken (aber auch der Wert der anderen visuellen Variablen) nicht in zu vielen Elementen zu stark vom vorigen Bild abweicht, da in diesem Fall die Veränderungen nicht mehr automatisch zu erkennen sind, da die Verbindung (und damit die Ähnlichkeiten) zwischen den beiden Bildern sonst nicht erkannt werden können. Die zeitliche Dimension (ungesteuert laufend) ist daher zur Abbildung einer abstrakten Datenkomponente außer in Ausnahmesituationen, etwa der

Untersuchung von Echtzeitdaten die normalerweise nahe verbunden sind (und nach Extremwerten gesucht werden soll), schlecht geeignet.

Die Nutzung der dritten räumlichen Dimension als visuelle Variable wurde bereits als in vielen Situationen schlecht geeignet besprochen, falls sie dennoch benutzt wird können Flecken entweder in ihrer dreidimensionalen Position im Raum oder durch eine dreidimensionale Form, bzw. dreidimensionale Größe variiert werden, welche jedoch oft nicht korrekt wahrgenommen werden können.

Multivariate räumliche Darstellungen

Die interessanteste Alternative ist die Teilung (Splitting) von räumlichen Achsen, wobei eine der zur Verfügung stehenden räumlichen Achsen nicht dazu verwendet wird um eine konkrete Position anzugeben sondern geopfert wird um weitere Achsen aufzunehmen und so theoretisch beliebig viele räumliche Dimensionen anzugeben. Die Interpretation der dargestellten Daten ist dabei nicht mehr so intuitiv möglich wie bei einer gewöhnlichen Verwendung der Achsen, speziell auch da jede Achse ihre eigene Metrik haben kann, d.h. es wird darauf geachtet, dass jede Achse nach dem jeweiligen Werteintervall der abgebildeten Komponente ausgerichtet wird. Dennoch sind solche Darstellungen für einige Aufgabenstellungen, speziell der Suche nach Elementen (Datensätzen) mit Extremwerten (welche in abweichenden visuellen Profilen resultieren) sehr gut geeignet, dies hängt jedoch oftmals auch von der Zusammenstellung geeigneter Variablen ab.

Dies kann bspw. bei der Klasse der Diagramme, analog zu den Klassifizierungen entweder in linearer oder radialer Form geschehen, wobei auch weitere Aufteilungen realisierbar sind. Die bekannteste dieser Darstellungen, die Parallelkoordinaten Darstellung reiht, die räumlichen Achsen dabei linear auf, d.h. die X-Achse selbst gibt nominal an welcher Wert auf einer bestimmten Y-Achse aufgetragen wird. Diese Darstellungsmethode scheint in der gegenwärtigen wissenschaftlichen Literatur oft auf, speziell in Verbindung mit neuen Methoden der Hervorhebung von bestimmten Daten und Zusammenhängen etwa um Extremwerte noch deutlicher zu machen, da diese Diagramme oftmals scheinbar chaotische visuelle Strukturen liefern:

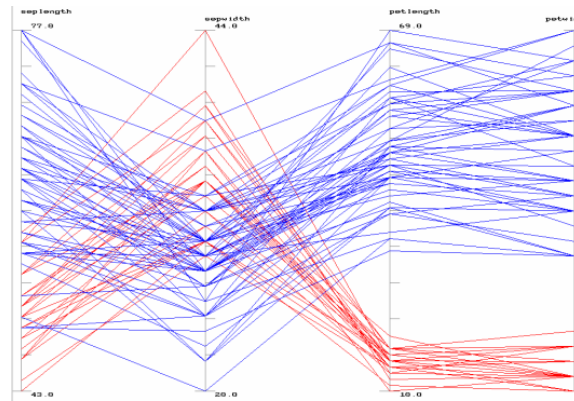


Abbildung 36: Mehrdimensionale Darstellung mittels Parallelkoordinaten (aus [Tegarden_1999])

Eine weitere Möglichkeit, welche dem selben Prinzip folgen, die Achsen jedoch radial um einen Mittelpunkt anordnet, meist jedoch zur Darstellung eines bzw. weniger Datensätze, eingesetzt wird, taucht in der Literatur immer wieder als Neuheit auf, wenn sie meist dennoch dem selben Prinzip folgt, wobei diese als Spinnengraphen, Kiviat Diagramme [Tegarden_1999] bzw. in ähnlicher, aber interaktiver Form als Stardiates [Lanzenberger_2003] (Stardiates ermöglicht das Hervorheben einzelner Datensätze mittels Interaktion) bezeichnet wurden:

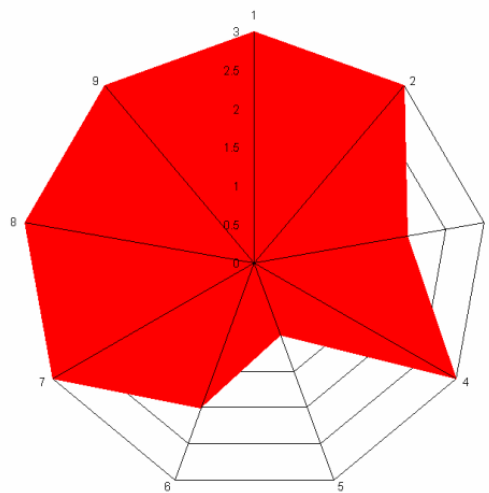


Abbildung 37: Mehrdimensionale radiale Darstellung als Kiviat Diagramm (aus [Tegarden_1999])

Diese Darstellung soll die Wahrnehmbarkeit räumlicher Muster noch weiter unterstützen indem die Achsen so belegt werden, dass dadurch das Entstehen von charakteristischen und (hoffentlich) bedeutsamen visuellen Mustern ermöglicht wird – dies hängt jedoch sehr stark von der günstigen Zuweisung der Komponenten zu den Achsen ab (und der generellen Eignung der Daten zu einer derartigen Darstellung).

Kombination von Darstellungen (composite visualizations)

Eine weitere Möglichkeit der Darstellungen von mehr Dimensionen bzw. Details ist, wie bereits erwähnt die Kombination von Teildarstellungen zu mehreren Darstellungen, welche in logischem visuell sichtbarem Zusammenhang stehen, was auch (durch konkrete oder imaginäre Verbindungslinien etc.) sichtbar gemacht werden sollte bzw. wobei die Teildarstellungen eine gemeinsame visuelle Struktur bilden, welche als Gesamtbild interpretiert werden kann. Die Konstruktion solcher Darstellungen ist jedoch meist aufwendig und bei zu komplexen Kombinationen kann der Benutzer oftmals sowohl visuell als auch logisch überfordert werden, wodurch entweder gar keine oder fehlerhafte Daten und Zusammenhänge abgelesen werden können. Ein zuvor bereits vorgestelltes Beispiel dieser Technik war die Walls & Floors Darstellung, welche in einem gemeinsamen kubischen Darstellungsraum den Zustand relevanter Aktien auf vielen Börsen ermöglicht, wobei die Interaktion mit vielen Reglern eine wichtige Rolle spielte – die tatsächliche Komplexität der Verwendung und Interpretation dieser Darstellung (speziell in Punkto Lern-/Anpassungsdauer) ist jedoch eine andere (offene) Frage.

Verwendet man generell neue visuelle Elemente, welche der Zielgruppe / den Benutzern noch größtenteils unbekannt sind, so muss man eine, zumindest zeitweilige, Erhöhung der Komplexität der Wahrnehmung in Kauf nehmen. Dies bedeutet, dass die Benutzer einige Zeit benötigen werden um sich an die Elemente zu gewöhnen und sie verstehen zu lernen, was um so schwerer wird je weiter diese Elemente vom bekannten entfernt sind. Werden Elemente, die bekannten Elementen sehr ähnlich sehen (bzw. bereits bekannte Symbole), entgegen ihrer bisherigen Bedeutung missverständlich oder Falsch eingesetzt, so kann dies ebenfalls zu einer weiteren Verlängerung des Lernprozesses, bzw. einer permanent hohen Benutzungs-Fehlerquote bei der Interpretation der Darstellung führen.

Verwendet man im Gegensatz dazu beim Entwurf neuer Darstellungen jedoch eine Konstruktion (composite) aus bereits bekannten Darstellungselementen und setzt diese, in Akkordanz mit ihrer bisherigen Verwendung zu komplexeren Darstellungen zusammen, so ist die Anpassungszeit um diese zu Interpretieren meist viel kürzer.

In der Literatur werden einige solcher Ansätze beschrieben, welche bekannte Elemente wie beispielsweise Histogramme und andere Zeitreihen zu einer neuen Darstellung zusammensetzen, wobei die einzelnen Elemente dann zwar weiterhin ablesbar bleiben, jedoch

entweder sinnvoll verknüpft sind oder gemeinsam eine zusätzliche Form bilden (Symbole bzw. Glyphen), welche eine Interpretation als Gesamtmuster (Gesamtbild) ermöglichen sollen. Ein Beispiel für eine solche Technik sind Chernov Faces, welche trotz langer Existenz (seit den 70'er Jahren) nicht wirklich intensiv genutzt werden, neuere Beispiele solche Strukturen ist etwa die InfoBUG Darstellung von Chuah [Chuah_1997]:

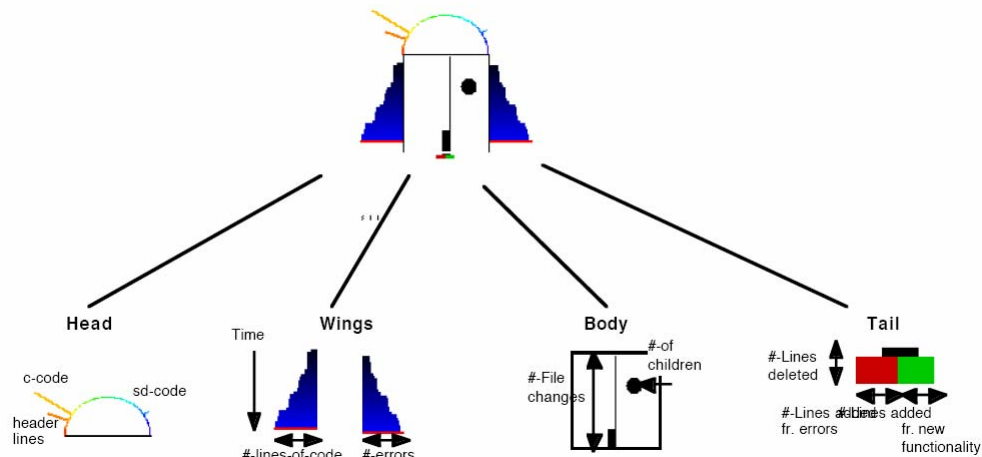


Abbildung 38: Aus Standardelementen zusammengesetzte Darstellung (aus [Chuah_1997])

Die tatsächliche Erkennbarkeit solcher Darstellungen hängt jedoch, wie aus obiger Darstellung zu erkennen ist, nicht nur von bekannten Elementen ab, sondern auch von der sinnvollen, bzw. intuitiven Konstruktion ab.

Nach diesen Kriterien der intuitiveren Darstellung ist die folgende Konstruktion (TimeWheel) wohl einfacher visuell zu beurteilen:

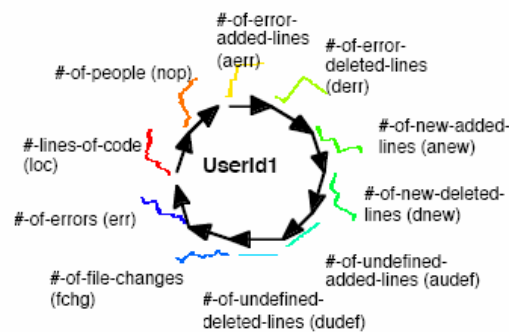


Abbildung 39: Aus Standardelementen zusammengesetzte intuitive Darstellung (aus [Chuah_1997])

Hierbei wurde eine Reihe von zehn unterschiedlichen, aber teilweise in logischer Verbindung stehenden, Zeitreihen, welche als Miniaturhistogramme ausgeführt wurden radial angeordnet wurden, wobei die Farbe benutzt wurde die angezeigte Variable (Dimension) zusätzlich zur konstanten Position der Zeitreihe, zu kennzeichnen (Die Beschriftung der Zeitreihen fällt in der konkreten Darstellung weg). Die Wahl der dargestellten Variablen erfolgte dabei derart, dass teilweise ähnliche Variable gewählt wurden, welche im Normalfall ähnliche/gleiche Trends anzeigen müssten.

Das Ziel ist hierbei, dass Datensätze, welche eine Problemsituation repräsentieren ein anderes Gesamtbild ergeben als durchschnittliche (normale) Datensätze und so in einem ersten Schritt der Benutzung der Visualisierung auffallen (visueller Stimulus ist die Abweichung des Gesamtbildes von anderen gleichzeitig angezeigten TimeWheels, bzw. bei manchen Darstellungen auch asymmetrische innere Strukturen) und in einem späteren Schritt dann charakteristische Muster erkannt werden, welche eine spezifische Problemstellung (oder auch Ausnahmesituation) kennzeichnen – diese Lesung benötigt jedoch Training, sowie visuelle Strukturen, welche diese Lesung ermöglichen.

3.5 Möglichkeiten computerbasierter Visualisierung

Die bisher vorgestellten Techniken sind theoretisch alle auch manuell erstellbar, jedoch in Anbetracht der Menge an Daten bzw. des oftmals häufig wiederholten Durchführens der Darstellungen nicht effizient, weshalb auch diese Diagramme meist automatisch erstellt werden, wobei es in der Visualisierung zusätzliche Methoden der Darstellung gibt welche die manuelle Erstellung des Diagramms de facto unmöglich machen, wie bspw. dem Zeichnen abstrakter 3D Diagramme.

Darüber hinaus gibt es einige Möglichkeiten der computerbasierten Visualisierung, welche im allgemeinen überhaupt nicht auf analoge Medien reduziert werden können, d.h. nur bei einer Betrachtung bzw. Benutzung eines Computers zum Tragen kommen, wie bspw. Animation oder der Reaktion / Veränderung des Diagramms auf Interaktion während der Laufzeit des Programms.

Interaktivität

Die Möglichkeiten der Variation von Darstellungen in Reaktion auf Entscheidung, d.h. Eingaben des Benutzers zum Zeitpunkt der Betrachtung sind praktisch unbegrenzt und nicht klassifizierbar – auch dies ist eine sehr aktives Feld der Forschung. Dies beginnt bereits damit, dass einfache Scroll- bzw. Navigationsbalken eingesetzt werden können, welche bspw. die angezeigten Dimensionen in einer Darstellung variieren können, bzw. etwa die Sortierkriterien einer Achse nach bestimmten Gesichtspunkten ändern (ein Beispiel einer solchen Darstellung ist bspw. der FilmFinder, welcher „Data Visualization Sliders“ einsetzt siehe [Ahlberg_1994]). Eine Klassifizierung der Möglichkeiten der Einflussnahme auf eine Visualisierung wurde von Card. et.al. [Card_1999] durchgeführt, und identifizierte drei qualitativ unterschiedliche Möglichkeiten der Zielsetzung / Folgen der Interaktion:

- Modifikation der Datentransformation
- Modifikation der Visuellen Zuordnung
- Modifikation der Anzeige Transformation

Moderne Ansätze, welche speziell auch eine weitere, situativ durch den Benutzer anpassbare, Reduktion der visuellen Komplexität, meist in Verbindung mit Interaktivität, ermöglichen, werden dabei in folgende beiden Bereiche eingestuft:

- Überblick und Detail
- Fokus und Kontext

Beide Gruppen sollen es ermöglichen in einer Darstellung zu einem, vom Benutzer selbst bestimmten Zeitpunkt, nur jene Daten zu sehen die für die aktuelle Fragestellung tatsächlich relevant sind.

Überblick und Detail

(Overview + Detail)

Eine allgemein nützliche Methode, welche eine gezielte Exploration / Bewegung in Darstellungen ermöglicht, jedoch nur eine Detailansicht ohne zusammenhängender Übersicht liefert, ist bspw. in den meisten logischen Computer Desktopsystemen (und die meisten Programme) bereits implizit enthalten, welche eine Möglichkeit bietet Darstellungen zu betrachten, welche nicht auf den gesamten Bildschirm passen. Dies ist möglich da logische Arbeitsflächen definiert sind, welche in ihrer Länge und Breite theoretisch unbegrenzt sind (meist gibt es jedoch eine Maximallänge, welche dennoch einem vielfachen des normalen Bildschirms entspricht), wobei mit Hilfe von Scrollbalken zwischen den Bereichen navigiert wird. Diese Fähigkeit kann eingesetzt werden wenn gleichzeitig eine sehr detaillierte Betrachtung gewünscht wird, man zur Navigation in der gesamten visuellen Struktur jedoch nicht in die Übersicht zurückkehren will – das wäre speziell bei komplexen / hoch vernetzten visuellen Strukturen bzw. Zusammenhängen der Fall, welche über den Rand der detaillierten Darstellung in mehreren Richtungen fortgesetzt sind. Dadurch wird eine benutzergesteuerte Exploration der Struktur möglich.

Das Grundprinzip der moderneren Übersicht + Detail Methoden ist es in einer Darstellung sowohl einen Überblick über alle relevanten Daten und Zusammenhänge geben zu können, wobei das Optimum in Techniken liegt, welche eine gleichzeitige Betrachtung des Überblicks

und der Details ermöglichen. Beispiele dafür sind die Darstellung von mehreren Darstellungsfenstern, wobei beim Zoomen (in mehreren Stufen) erkenntlich bleibt in welchen Teil der Darstellung man sich befindet (bpsw. Lifelines [Plaisant_1996]), oder eine überlappende Darstellung, in welcher der gezoomte Bereich den Gesamtüberblick visuell überlappt (d.h. der Gesamtbereich schwach im Hintergrund sichtbar bleibt). Diese Detailansichten müssen jedoch nicht notwendigerweise vergrößerte Bildausschnitte einer Darstellung sein, sondern sie können auch nur logisch gesehen eine detailliertere Ansicht darstellen, bzw. beim Zoomen von Bereichen Informationen anzeigen, welche davor nicht angezeigt wurden. Dennoch können diese Arten der Darstellung auch visuell verwirrend sein, bzw. benötigen sie teilweise einen großen Darstellungsplatz, welcher auch von der Größe / Einstellung / Auflösung der Anzeige (des Bildschirms) abhängig ist.

Eine weitere sehr effektive Methode der Detailanzeige die es ermöglicht den Überblick nicht zu verlieren, welche eigentlich eine Abstraktion der vorigen Methode der kaskadierten bzw. nebeneinander angezeigten, verknüpften Darstellungsfenster ist, ist der Einsatz von semiautomatischer kontextsensitiver Einblendung von Detailinformationen. Diese Technik wurde bisher hauptsächlich in modernen elektronischen Anleitungen verwendet und diente dazu ergänzende Hilferklärungen bei Bedarf (durch Anklicken oder darüber schweben (hovering) mit einer Maus) anzuzeigen, wobei diese Erklärungen jedoch einem Großteil der Benutzer bereits bekannt sind, weshalb sie nicht direkt im Text integriert sind, aber nicht komplex genug sind um eine eigene Hilfeseite einzurichten (Speziell auch da dies die Kontinuität des Lesevorgangs kaum unterbricht – Im Gegensatz zum Verfolgen eines Hyperlinks, welcher eine völlig neue Seite anzeigt). Auch wenn dies in anderen Bereichen noch nicht sehr etabliert ist, kann diese Technik effektiv eingesetzt werden um Detailinformationen zu bestimmten Elementen einer Darstellung erst dann zur Verfügung zu stellen, wenn sich ein Element, bzw. eine Nachbarschaft, aufgrund seiner / ihrer visuellen Eigenschaften als Kandidat für eine weitere Analyse zeigt. Eine Bewegung der Maus über die jeweilige Struktur (nur bei ausreichenden Abständen von einigen Pixeln zwischen den Flecken, bzw. wenn zumindest Teile des Flecken nicht von anderen Flecken geschnitten werden) so kann die Anzeige von weiteren Daten entweder in einem, Nahe des Mauszeigers einblendeten, Fenster, bzw. in einer fixen Anzeigefläche (etwa Statusbar bei Browsern) erfolgen, ohne dass der Überblick verloren geht.

Weiters kommen öfter auch Kombinationen von Darstellungen auf hierarchisch unterschiedlichen Ebenen zum Einsatz, welche bei guter Integration eine ähnliche Wirkung haben können – eine Übersicht der gegenwärtigen Position (logisch oder visuell), im Sinne einer Navigationshilfe bzw. einer logischen Karte ist jedoch immer hilfreich.

Fokus und Kontext

(Focus + Context)

Diese Gruppe der Darstellungserweiterungen versucht die Komplexität der Darstellung weiter zu reduzieren in dem nur ein Teil der angezeigten Informationen in den visuellen Vordergrund gestellt wird, bzw. anderen Informationen in den Hintergrund gestellt werden. Neuere Methoden mit spezifischen Zielsetzungen versuchen dies auf eine Weise zu tun, welcher bestimmte Informationen zwar betont, aber nicht völlig entfernt um eine ungefähre Einordnung in die Umgebung weiterhin zu ermöglichen. Interaktive Komponenten ermöglichen es hierbei den Ort bzw. jedes andere Selektionsmerkmal (abhängig von der Defokussierungstechnik) bestimmen, welches die zu defokussierenden Elemente auswählt. Dennoch sind auch sehr oft Methoden in Verwendung, welche lediglich den Fokus verändern ohne jedoch den Kontext zu behalten (etwa Filtern), was teilweise bei Darstellungen zur Anwendung kommt, bei welchen die defokussierten Daten bzw. Strukturen nach wie vor visuell zu dominant sind, bzw. zu viel Platz benötigen (und dadurch einen Überblick behindern).

Nach Card et al [Card_1999] kann nun grundsätzlich zwischen folgenden Strategien der *selektiven Reduktion* von Daten (Methoden der Defokussierung) unterschieden werden (wobei auch andere Einteilungen nach anderen Kriterien – etwa nach räumlichen, dimensional und visuellen Methoden bekannt sind).

- Filtern von Informationen

Dabei werden gezielt Informationen vor der Darstellung entfernt, wobei die Kriterien entweder manuell (auch stufenweise) eingegeben werden³⁹ oder nach

³⁹ Eigene empirische Erfahrungen bestärken dabei, dass es speziell bei interaktiven Filtertechniken sehr sinnvoll ist, die räumliche Position der verbleibenden Elemente beizubehalten, um einen effizienten Vergleich des

vorbestimmten Kriterien erfolgen können (etwa irrelevante bzw. eindeutig fehlerbehaftete Daten sofort exkludieren)

- Selektive Aggregation von Daten

Hierbei werden nicht fokussierte Daten zu neuen Kategorien zusammengefasst, d.h. grober dargestellt als andere.

- Mikro/Makro Betrachtungen

Dies betrifft den unterschiedlichen Informationsgehalt der Gesamtstrukturen im Gegensatz zu Einzelinformationen bei genauerer Betrachtung, was sich jedoch automatisch durch geeigneten Entwurf der Darstellung ergibt.

- Highlighting (Betonung)

Hierbei werden bestimmte bedeutsame Informationen etwa durch Verwendung von Signalfarben oder hellerer Darstellung in den Vordergrund gestellt, wodurch einerseits die Elemente selbst, als auch die Relationen zwischen ihnen (gemeinsame Muster), theoretisch besser wahrgenommen werden können – Dies kann jedoch auch den umgekehrten Effekt haben, da die Darstellung auch überfordern kann. In dezenterem Maß kann dies auch verwendet werden um Zusammenhänge zwischen den Daten zu betonen, welche sonst nicht erkennbar wären. (etwa visuelles Zusammenfassen unterstützen)

- Visuelle Zurückstellung

Die Umkehrung des Highlighting, d.h. anstatt bestimmte Informationen zu betonen, werden die zu defokussierenden Informationen schlechter sichtbar gemacht, (speziell durch starke Reduktion der Helligkeit der Datenflecke) was meist bessere Effekte liefert als Highlighting, da das visuelle System nicht überbeansprucht wird.

- Verzerrung

Hierbei wird die Zahl der Pixel von defokussierten Daten tatsächlich reduziert (Fisheye [Furnas_1986] / Perspective Walls Darstellungen, welche einen 3D Darstellungsraum benötigen um 2D Daten verzerrt abzubilden) bzw. Blurring – auch als SDOF (Semantic Depth of Field) bezeichnet, was auch auf 2D Darstellungsräume anwendbar ist (d.h. nicht relevante Bereiche werden unschärfer

Zustands (vor bzw. nach bestimmter Filterung) zu ermöglichen, um Veränderungen der visuellen Erscheinung des Gesamtbildes beobachten zu können. Dadurch wird es möglich durch die interaktive Filterung eine weitere Datendimension hinzuzufügen, bzw. meist um eine redundante Verstärkung einer visuellen Eigenschaft zu erreichen.

dargestellt, d.h. tatsächlich defokussiert – kann ein verwirrender Anblick sein, wenn der scharfe Bereich nicht zusammenhängend in der Mitte liegt)

Dennoch sind diese derart detaillierten Klassifizierungen relativ schnell überholt, bzw. nicht immer passend, da der Vorstellung kaum Grenzen gesetzt sind und sich nicht alle neuen Methoden so detailliert einordnen lassen, wie etwa folgende Technik, welche eine visuelle Aggregation von Daten (clustering), nach hierarchischen Gesichtspunkten durchführt (dazu wurden intern Clusterbäume erstellt), wobei jede Farbe des Clusters (des umgebenden “Blobs“) für einen anderen Teilbaum steht, welche nach obiger Einteilung unter Highlighting fallen würde:

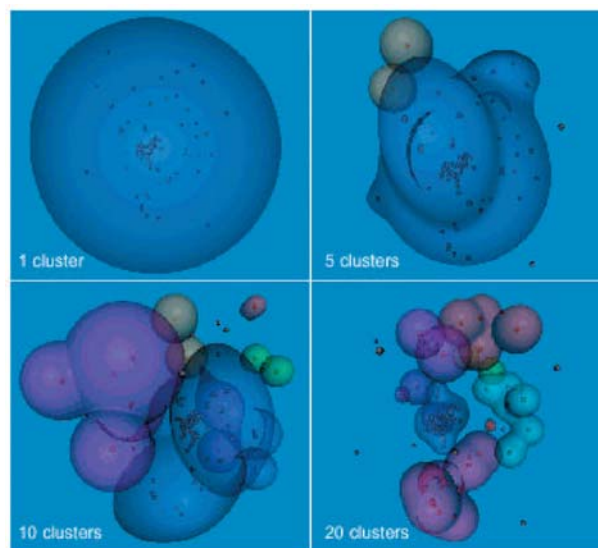


Abbildung 40: Visuelle Aggregation von Daten in Form von Clustering (aus [Oliveira_2003])

Generell zeigten eigene empirische Erfahrungen, dass sich die Kombination von Überblick + Detail Techniken sowie Fokus + Kontext Techniken durchaus erfolgreich bei der Reduktion der Komplexität einsetzen lässt, weshalb diese Strategie auch in der vorliegenden Arbeit realisiert wurde. Speziell auch da sich einige visuell einfache (wahrnehmbare und realisierbare) Techniken als dennoch sehr hilfreich erwiesen haben.

3.6 Visuelle Metaphern

Die Grundlage jeder guten visuellen Repräsentation ist es eine möglichst passende visuelle Metapher⁴⁰, d.h. eine korrekte bildliche Darstellung, für die Problemstellung – betrachteten Daten oder Strukturen, zu finden bzw. zu entwickeln. Existiert für die gezielte Fragestellung bereits eine effiziente gut anwendbare Darstellung bzw. Visualisierungsmethode, so hat man kaum Probleme, dennoch könnten neue bzw. variierte oder erweiterte Visualisierungsmethoden diese Fragestellungen möglicherweise besser beantworten.

Um ein gutes Verständnis der Darstellung zu ermöglichen ist es nötig, dass diese aus entweder allgemein bekannten und gleich interpretierten Elementen besteht oder, falls die Darstellung für eine bestimmte Zielgruppe / Benutzergruppe entwickelt werden soll, aus Elementen besteht, welche innerhalb dieser Gruppe bekannt sind und gleich verstanden werden. Eine komplett identische Interpretation über alle Regionen hinweg kann, zumindest gegenwärtig und in naher Zukunft, nicht einschränkungslos gewährleistet werden, da dazu die kulturell bedingt unterschiedliche Symbolinterpretation und –Verständnis zu unterschiedlich sind. Es ist daher sinnvoll sich auf bestimmte Benutzergruppen zu konzentrieren, so dies mit dem Programmaufgaben vereinbar ist.

Probleme der computerbasierten Visualisierung

Die Verwendung computerbasierter Methoden zur Darstellung bringt jedoch auch Probleme mit sich, welche entstehen sobald es sich nicht mehr lediglich um eine statische (d.h. in ihrem

⁴⁰ Aus dem Bereich der Informatik kennt praktisch jedermann bereits viele visuelle Metaphern, wie beispielsweise jene des Papierkorbs („Trashbin“), welcher in der Anfangszeit der graphischen Benutzeroberflächen in den 80’er Jahren zu Missverständnissen führte. Die visuelle Metapher des Papierkorbs dient grundsätzlich dazu Dateien jeder Art (Programme, Dokumente, usw.) zu entfernen. Ursprünglich sollte der Papierkorb eine vereinfachte visuelle Darstellung des Löschbefehls sein und zerstörte die Dateien nach dem in den Papierkorb werfen („Drag n’ Drop“ einer Datei in den Korb). Dies führte zu einer Reihe an Datenverlusten, da einige durchschnittliche Anwender, die sich auf die Bedeutung des Papierkorbs in der realen Welt bezogen, annahmen, dass Dinge aus dem Papierkorb auch wieder entfernt werden können. Diese zusätzliche Funktionalität existierte dann auch parallel auf anderen Computerbetriebssystemen und führte zu Missverständnissen. Eine bessere Repräsentation für die eingeschränkte Funktionalität wäre daher ein Symbol, welches einen Dokumentvernichter darstellt, gewesen. Eine ebenso missverständliche Repräsentation gibt es noch heute auf dem Betriebssystem der Macintosh Computer, wobei das Diskettensymbol, welches diverse Operationen mit dem Diskettenlaufwerk ermöglicht, in den Papierkorb geworfen werden muss um die reale Diskette aus dem Laufwerk auszuwerfen. Wenn nun ein Macintosh Benutzer, der sich an diese sehr missverständliche Methode gewöhnt hat, dasselbe beim weiter verbreiteten Windows Betriebssystem versucht, so wird er die Diskette jedoch löschen anstatt auszuwerfen.

endgültigen Aussehen festgelegte) nicht-interaktive visuelle Darstellung handelt, bzw. solange die Darstellung nur semi-automatisch erfolgt (d.h. beaufsichtigt wird und beeinflusst werden kann). Speziell bei Darstellungen welche direkt auf ein Printmedium (Papier) übertragbar wären, bzw. überhaupt nur auf Papier – d.h. einmalig und endgültig – dargestellt werden sollen hat man kaum Probleme, da man das Ergebnis immer steuern kann. Der Unterschied zwischen einmaligen, fixen Darstellungen und auf Abruf automatisch erstellten Darstellungen ist sehr groß und liegt vor allem darin, dass bei Letzteren alle eventuell möglichen Sonderfälle bedacht werden müssen, die die Darstellung „sprengen“ könnten, was speziell durch die variierende Anzahl an (oder die Größe der) darzustellenden Elemente, geschehen könnte.

Aus diesem Grund sind viele automatisch generierte Darstellungen entweder als *raumfüllende* visuelle Strukturen entworfen (speziell bei Baumstrukturen relevant – bspw. gelöst mittels Treemaps [Johnson_1991]), oder die Anzahl der Kategorien, welche auf den Achsen aufgetragen werden können sind bei Entwicklung des Programms bereits fixiert (z.B.: Stardinates [Lanzenberger_2003]), oder sie verwenden eine Art automatisches Zoomen (je nach Bedarf der aktuellen Darstellung hinein oder hinaus) relevanter Regionen, bzw. Abschneiden irrelevanter (leerer) Regionen der Darstellung, wodurch nur Abschnitte angezeigt werden, in welcher sich der überwiegende Teil der Datenflecken befindet (bzw. alle Datenflecken befinden).

Letztere Methode kommt in letzter Zeit bei vielen automatisch (und unbeaufsichtigt) arbeiteten Echtzeit Visualisierungssystemen wie bspw. internetbasierten Börsenkursen usw. zur Anwendung, wodurch zwar gewährleistet ist, dass die Daten immer angezeigt werden und darüber hinaus meist auch immer zentriert sind (d.h. der Ursprung des Koordinatensystems ist bei schwach schwankenden Datenreihen meist nicht, bzw. praktisch niemals sichtbar) Dies führt in vielen Fällen jedoch dazu, dass die tatsächlichen Entwicklungen der Datenreihe nicht mehr beobachtbar sind, da die räumlich scheinbar großen Variationen auf den ersten Blick selbst die Beschriftung visuelle dominieren:



Abbildung 41: Automatisch generierte Überblicke des Zustands der Börsen BA-CA Website

Die Diagramme, welche auf der Website der BA-CA praktisch in Echtzeit erzeugt angezeigt werden, sind auch im Original direkt nebeneinander aufgestellt, wodurch ein visueller Vergleich der Diagramme nicht zu verhindern ist. Visuell sind die angezeigten Achsenabschnitte der ersten drei Diagramme so dargestellt, das die Histogramme mind. 90% der Y-Achse ausnützen und sollen absolute Werte darstellen (siehe Achsenbeschriftung). Dieser großen visuellen Schwankung (visuell wird als erster Eindruck die prozentuale Höhe/Breite wahrgenommen, wobei die Höhe automatisch eng mit der absoluten Zahl verbunden wird) steht dieser jedoch, wie etwa beim zweiten Diagramm (DAX), nur eine tatsächlichen prozentuellen Differenz (zwischen der obersten und der untersten Hilfslinie) von etwa 7 Promillen (0,007) gegenüber, was jedoch nur anhand der Beschriftung erkannt werden kann und dadurch nicht visuell berechnet werden kann (der Höhenunterschied jedoch schon). So sieht es so aus als wären die beiden nebenstehenden Börsen im Tagesverlauf ebenso stark geschwankt wie die erste (wenn auch mit anderem Ausgang und Verlauf), die prozentuelle Differenz der beiden beträgt jedoch 1 Prozent (0,01) für den DAX und 3,8 Promille (0,0038) für den DOW JONES, füllen aber ebenso den gleichen Raum – einzig die Zahl der Hilfslinien scheint mit der tatsächlichen Differenz ungefähr korreliert zu sein – es existiert jedoch keinerlei Hinweis ob oder dass dies tatsächlich der Fall ist. Beim Vergleich mit einem Diagramm eines anderen Tages, welcher unter Umständen ein ähnliches grafisches Muster zeigt, könnte der Abfall bspw. viel schneller passiert sein ohne einen grafischen Unterschied erkennen zu lassen, wie auf folgendem künstlich (konstruierten) Beispiel, das lt. Beschriftung eine Wertedifferenz von 10% aufweist:

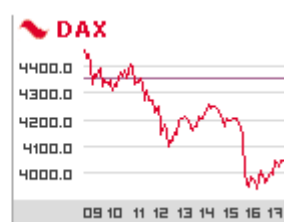


Abbildung 42: Nicht unterscheidbare Muster in graphischen Darstellungen (künstlicher Mockup)

Allein durch die dynamische Anpassung des Achsenabschnitts hat sich daher die tatsächlich transportierte Komponente implizit geändert – das Diagramm scheint auszusagen, dass es die Entwicklung des absoluten Preises/Zählerpunkten in einer bestimmten Zeitperiode wiedergibt (was die Zahlen am Rand auch tatsächlich angeben) – die graphisch dargestellte Linie (welche die Beschriftung dominiert) gibt jedoch in Wirklichkeit einen über die Extremwerte des Tages normierte Entwicklung der Zähler.

Ohne zusätzliche redundante graphische Kodierung des tatsächlichen Werts der Y-Achse – etwa Helligkeitswerten oder Farbwert der Kurve – ist die tatsächliche Schwankung nur schwer einzuschätzen. Es wäre fast besorgniserregend, wenn solche Diagramme, in dieser Form tatsächlich zur schnellen Echtzeit Entscheidungsunterstützung eingesetzt würden, da die visuelle Variable der Position/des sich daraus ergebenden Wertes, immer mehr die Oberhand über die Beschriftung gewinnt, je kürzer die Betrachtungszeit ist. Dennoch tritt bei häufiger Benutzung sicherlich ein Gewöhnungseffekt ein welche nach einiger Zeit eine intuitiv richtige Beurteilung ermöglicht (Diese ist selbstverständlich nur in Verbindung mit dem Lesen der Beschriftung möglich). Zusätzlich kann angenommen werden, dass Entwicklungen, welche sich tatsächlich in einer völlig anderen Größenordnung bewegen (in für Investoren gefährlichen Regionen) vermutlich auch einen monotoneren Trend hätten (steilere Kurve) und möglicherweise auch nur mehr kleine bis kaum gegenläufige Trends aufweisen würden – dennoch müssen diese Punkte bei Analysen dieser (verbesserungswürdigen) Darstellungen in Betracht gezogen werden.

Eine weitere Ausprägung dieses Problems kann bei Betrachtung des folgenden Diagramms erkannt werden, wobei die absolute und relative Wertedifferenz eine vernachlässigbare Größe ist, visuell jedoch einen sehr hohen Unterschied der Werte suggeriert:

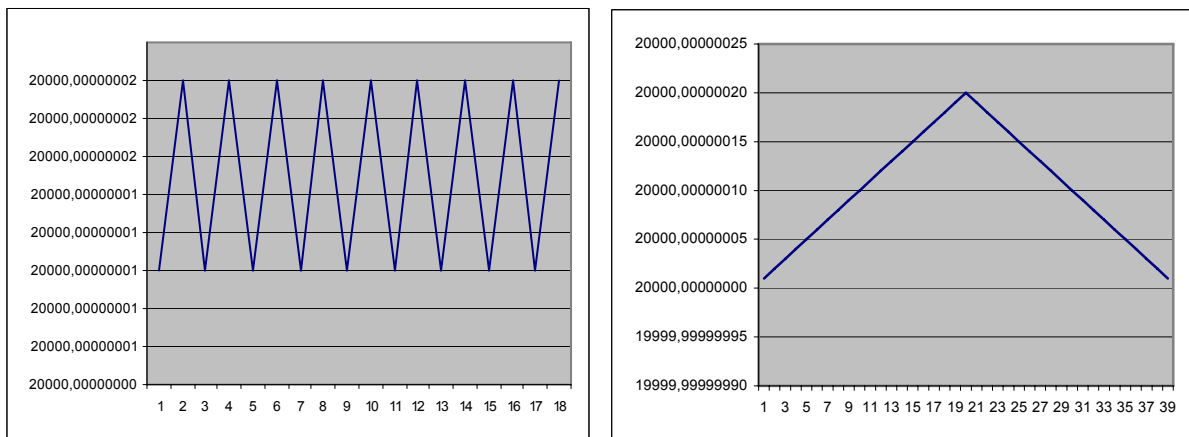


Abbildung 43: Beispiele großer visueller Differenzen durch automatisches Zoomen

Ein ähnliches Beispiel entstand während des Projekts beim Testen in automatisch arbeitenden Programmbibliotheken (obiges Beispiel war übrigens das Ergebnis eines von MS Excel aus den Daten automatisch erstellten Diagramms), wobei das linke Diagramm das Resultat einer Rundungsdifferenz von 0,00000001 mit einer relative Differenz von 0,00000000005 %

zwischen dem größten und dem kleinsten absoluten Wert war und eine de facto konstante Größe repräsentieren sollte.

Faustregeln der guten Darstellungskonstruktion

In jedem Fall sollte daher nach (Tufté [Tufté_1990]) bei der Auswahl, bzw. der Konstruktion der graphischen Darstellung beachtet werden, dass sie die folgenden Kriterien erfüllt, welche die Grundsteine einer möglichst gut lesbaren und informationstreuen Darstellung sind:

- Möglichst nur die Daten zeigen
Bei quantitativen Daten nur möglichst selten aggregieren, wenn dies auch visuell möglich ist. (bei abstrakten Aggregationskriterien schwer möglich)
- Der Benutzer soll über die Substanz der Grafik nachdenken können
D.h. nicht über die Anordnung und die Grafik selbst sondern die transportierten Daten sollen im Zentrum der Betrachtung liegen (nach Möglichkeit soll Intuitivität Vorrang vor Innovation der Darstellung haben)
- Unnötige Dekorationen sollen vermieden werden
Diese reduzieren die Wahrnehmbarkeit der transportierten Daten und lenken den Betrachter ab. (bei visuell intensiven Dekorationen sind können diese auch die gesamte Aufmerksamkeit auf sich ziehen und die Informationen überlagern)
- Möglichst viele Informationen auf möglichst kleinem Raum transportieren
Wenn die Abstände zwischen den Datenflecken klein genug sind, dann kann leichter die Illusion größerer Muster (Haufen an Punkten – “chunks“) entstehen [Miller_1956] - Speziell bei vielen logisch verknüpften, quantitativen Komponenten sinnvoll.
- Darstellung soll visuelle Vergleiche zwischen Strukturen ermöglichen
Gelingt es, dass die visuelle Struktur der Grafik visuell sinnvolle Muster ergibt, so können diese besser beurteilt werden (was nicht immer möglich ist)
- Die Darstellung bzw. das Paket soll unterschiedliche Sichtweisen auf die Daten ermöglichen
Dies kann speziell gut bei computerbasierten Visualisierungen durch interaktive Variation der angezeigten bzw. betonten Daten erfolgen.

Generell ist es nicht immer möglich alle die automatische Erfüllung all dieser Empfehlungen, aufgrund der dynamischen Natur der variierenden Daten, zu garantieren, dennoch sollte

versucht werden möglichst viele umzusetzen, was jedoch auch von der Struktur der betrachteten Daten abhängt.

3.7 Schlüsse

In diesem Kapitel wurde gezeigt warum bereits eine analoge graphische Darstellung ein vielfaches der Daten und Strukturen transportieren kann und vom Betrachter tatsächlich auf einen Blick erfasst werden kann (auch wenn sich gezeigt hat, dass es so etwas wie einen einzelnen Blick nicht gibt, da scheinbar wahrgenommene Einzelbilder in Wirklichkeit immer aus vielen Teilen zusammengesetzt wurden) – die Informationsaufnahme erfolgt hier parallel statt seriell wie beim Lesen von Texten oder Formeln. Darüber hinaus besitzt das menschliche visuelle Wahrnehmungssystem einige Automatismen (exzellente Muster- (wieder) -erkennung betreffend Form, Farbe, Muster, ...), welche diverse kognitive Aufgaben unterstützen können, wodurch effektiv gesehen eine Externalisierung von Teilen des Denkprozesses und der Speicherung geschieht. Je unspezifischer die dabei verwendeten Symboliken sind desto besser können die Daten auch von Laien beurteilt werden, d.h. Personen mit einem niedrigen E_U (siehe Kapitel 2 - Komplexität) Koeffizienten. Dies wird darüber hinaus umso effektiver je näher die Darstellung einer intuitiven, natürlichen Wahrnehmung kommt, wodurch eine unbewusste, automatische Beurteilung der dargestellten Daten möglich wird, wovon auch Personengruppen mit geringem I_U Koeffizienten profitieren, da die bewusste Kognition zur visuellen Analyse umgangen wird. Auf diese Weise wird die Komplexität der Datenerfassung und –Verarbeitung, speziell bei großen Datenmengen sprunghaft und massiv reduziert, d.h. die Komplexität der graphischen Darstellung $C_H(\text{Graphisch})$ ist kleiner als etwa $C_H(\text{Gleichungssystem})$ – jedoch haben graphische Darstellungen bei schlechter Konstruktion selbst wieder einen gewissen Grad an Komplexität, bzw. bleibt bei sehr komplexen Daten/Strukturen, bzw. sehr großen Datenmengen teilweise ein immer noch zu hoher Grad an Komplexität über, welcher speziell durch computerbasierte Visualisierung weiter reduziert werden kann.

Diese Vorteile kommen jedoch nur zu Tragen wenn die Darstellung der Daten und Strukturen, auf eine den jeweiligen Komponenten angemessene Weise geschieht, d.h. die visuellen Variablen und die räumliche Konstruktion dieser auch tatsächlich mit den Daten kompatibel ist. Dies betrifft auch die Kombination von visuellen Variablen, welche sich gegenseitig überlagern können und so Zusammenhänge fast unsichtbar machen können, auch wenn die einzelnen Komponenten mit den visuellen Variablen kompatibel wären.

Es war dazu nötig einige sinnvolle klassifizierende Betrachtungen von Darstellungsmöglichkeiten, wie der Verwendung räumlicher Achsen sowie ergänzender Dimensionen erneut zu betrachten und teilweise zu überarbeiten, speziell da deren tatsächliche Möglichkeiten und Einschränkungen in der Realität nicht immer beachtet werden (Auch durch die führende Rolle der schnellen Produktentwicklung gegenüber der wissenschaftlichen Forschung auf dem Gebiet der Informatik).

Selbst bei erfolgreicher Übersetzung ist zu beachten, dass selbst wenn auch Laien manche Zusammenhänge in einer gut entworfenen Darstellung verstehen können und Unterschiede in Strukturen erkennen können (da diese visuell relativ eindeutig sind) so bedeutet dies noch nicht, dass sie deshalb alle Implikationen der dargestellten Zusammenhänge verstehen können.

Daher kann es oft nötig werden, dass selbst für die besten Darstellungen, Möglichkeiten der Vereinfachung / Ausblendung von Daten, bzw. alternative, aber dennoch verbundene Darstellungen entwickelt werden um eine weitere Reduktion der Komplexität zu erreichen. Allerspätestens an diesem Punkt kann die Visualisierung (als computerbasierte Darstellung) ihre großen Vorteile gegenüber analogen Darstellungen einbringen, da sie auf interaktive Kommandos des Benutzers eingehen kann und so einige Parameter der Darstellung (wie visuelle Eigenschaften, Selektion oder Sortierung bestimmter Daten, usw.), heutzutage bereits auf jedem Personal Computer de facto in Echtzeit (bzw. minimalen Verzögerungen), anpassen kann.

Dadurch können, je nach Fragestellung, Informationen durch Interaktion selektiv in den Hintergrund gerückt bzw. andere in den Vordergrund gestellt werden, bzw. andere betont werden, um so die Sichtbarkeit bestimmter Elemente zu erhöhen, wodurch die Komplexität der Darstellung weiter gesenkt werden kann (d.h. $C_t(\text{Visualisierung}) < C_t(\text{Graphisch})$). Ein weiterer Vorteil der Visualisierung ist, dass zusammenhängende Daten auf dem Computer weiterhin verbunden bleiben, wodurch eine Exploration eines bestimmten Faktums, wie bspw. einer bestimmten dargestellten Relation oder Variable, in unterschiedlichen Darstellungen und Ansichten möglich wird, ohne diese lange suchen zu müssen, bzw. das kontextabhängige Zusatzinformationen automatisch angezeigt werden können. Grundsätzlich ist es auch möglich die Darstellungen derart zu konstruieren, dass sie auf Wunsch eine Komplexitätsreduktion auf ein fixes Maß ermöglichen, d.h. nur eine bestimmte Anzahl an Elementen (etwa die magischen 7 [Miller_1956]) im Vordergrund bleiben, wodurch die

Komplexität des Modellverständnisses C_U auf ein fixes Maß reduziert werden kann, wodurch tatsächlich ein Großteil aller möglichen Benutzergruppen, welche als Gruppen mit ähnlichen (E_U, I_U) Kombinationen betrachtet werden können, diese erfassen kann – was der Benutzer nun mit den visuell verstandenen Zusammenhängen anfangen kann ist dabei jedoch eine andere Frage, welche jedoch auch von den weiteren Komponenten der Software abhängt. So kann etwa die Visualisierung eines ökonomischen Modells zwar die Zusammenhänge und Wirkungsflüsse der einzelnen Größen aufzeigen, wodurch diese Relationen von den meisten Benutzern erfasst werden können, im Endeffekt bleiben jedoch logische Aussagen, deren Implikationen zu verstehen möglicherweise immer noch, zumindest rudimentäres, Fachwissen benötigen.

4 Modell-Visualisierung

Die letzten drei Kapitel analysierte Teilgebiete der für die vorliegende Darstellung relevanten Teilgebiete der Ökonomie, diskreten Mathematik, sowie relevanter Kapitel der Informatik, speziell der Informationsvisualisierung. Zusätzlich zu einem Überblick der verfügbaren Methoden, sowie der Ermittlung der Anforderungen der darzustellenden Modelle, wurden bereits direkt in den letzten Kapiteln Schlussfolgerungen gezogen und faktenbasierte Entscheidungen getroffen, welche die Möglichkeiten/Anforderungen de facto bereits recht genau spezifizierten. Im folgenden Kapitel werden diese Schlussfolgerungen nun so konsequent wie möglich umgesetzt, eine erneute Begründung der Entscheidungen erfolgt jedoch meist höchstens als Verweis auf das Kapitel, in welchem diese, meist bereits eingehend, behandelt wurden.

Die Forderung einer möglichen prototypischen technischen Implementierung, welche im Rahmen eines durch die Österreichische Nationalbank geförderten Forschungsprojekts abgewickelt wurde, erforderte eine realitätsnähere kritische Betrachtung der technischen Möglichkeiten und vor allem der technischen Notwendigkeiten, d.h. es wurde bei Alternativen die effektivste und im Kontext der Darstellung sinnvollsten Darstellungselemente und -Techniken gewählt, anstatt die visuell beeindruckendsten Methoden zu wählen (nach dem Grundsatz der Visualisierung „The purpose of visualization is insight – not pictures“ [Card_1999] ⁴¹). Gab es an einigen Stellen dennoch sehr gute Alternativen, so werden diese in aller Regel, als Möglichkeiten zukünftiger Ergänzungen, zumindest kurz aufgezeigt.

Die Analyse einiger Arten ökonomischer und ökonometrischer Modelle im ersten Kapitel über ausgewählte ökonomische Modellierung zeigte, dass die, in unterschiedlicher Form angegebenen Relationensysteme, im Zentrum einer Analyse makroökonomischer Modelle stehen sollten. Da das Ziel der Darstellungen (der visuellen Analysetechniken) ist, eine Vielzahl unterschiedlicher Modelle vergleichen zu können, weshalb es nötig war sich auf jene strukturellen Gemeinsamkeiten der Modelle zu konzentrieren, welche für die dargestellten Modelle unausweichlich sind. Das bedeutet, dass eine kleinste gemeinsame Menge an

⁴¹ Diese Aussage wurde analog zu der bekannten Aussage von Hamming (1973) getroffen, welche meinte, dass der Sinn der Informatik Einsicht ist, nicht Zahlen: („The purpose of computation is insight, not numbers“). Nichts desto trotz mag es dennoch mathematische Teildisziplinen geben deren erwünschte Einsicht tatsächlich Zahlen sind, welche von dieser Aussage möglicherweise auszunehmen sind.

Elementen gesucht wurde die möglichst keine Modellierungstechnik, bei welcher eine visuelle Darstellung sinnvoll ist (d.h. deren Zielsetzung eine bewusste Abbildung von ökonomischer Theorie ist, unabhängig ob diese aus primär Daten gewonnen wurden oder nicht, d.h. solange das Modell nicht atheoretisch ist) und gewünscht sein könnte, auszuschließen. Als solches wurde die Spezifizierung eines ökonomischen Relationensystems mittels der General Function Form identifiziert, welches aus einer Strukturform extrahiert werden muss, wobei unter anderem eine zusätzliche Angabe der Eigenschaften von Modellvariablen (Instrument / Ziel) bzw. in möglicherweise auch des ökonomischen Typs der Gleichungen als empfehlenswert identifiziert wurde. Außerdem wurde die hohe Bedeutung der Instrument – Ziel Beziehungen von Entscheidungsunterstützungs- (Policy Evaluation-) Modellen identifiziert, welcher Rechnung getragen werden muss.

Im dritten Kapitel wurden die Vorteile der Visualisierung bei der Wahrnehmung im Allgemeinen sowie komplexer abstrakter Informationen und Zusammenhänge im Speziellen erläutert, wobei die Basis aller Überlegung die (zumindest einem Großteil der Bevölkerung) definitive Grenze der direkten unabhängigen menschlichen kognitiven Fähigkeiten ist, welche nicht durchbrochen, sondern nur mittels externer Kognition elegant umgangen werden kann. Danach wurden die wichtigsten Möglichkeiten und Grundsätze bei der Konstruktion von graphischen Darstellungen (wie etwa Diagrammen und Netzen) anhand von kritischen Analysen der eingesetzten visuellen Elemente, sowie auch deren Konstruktion zu Diagrammen erläutert. Es wurde hier anhand kritischer Betrachtung existierender Ansätze, sowie neuester (und zeitlose korrekter) Erkenntnisse der Wahrnehmungspsychologie, eingehend erläutert warum ein zweidimensionaler Darstellungsraum für die vorliegenden Aufgaben der interaktiven explorativen visuellen Analyse der komplexen Zusammenhänge von ökonomischen Modellen, einem dreidimensionalen vorzuziehen ist. Daher wurden auch im weiteren Vorgehen zweidimensionale Darstellungen betrachtet und in diesem Kapitel entwickelt, was sich auch mit dem Vorgehen anderer Wissenschaftler aus dem Bereich der Informationsvisualisierung deckt, bei welchen die Reduktion der Komplexität der Daten, anstatt dem krampfhaften Einführen von neuen grafischen Effekten, im Vordergrund steht (diese kommen meist aus angewandten Disziplinen der Informatik bzw. völlig anderen wissenschaftlichen Disziplinen (d.h. transdisziplinäre Ansätze der Darstellung sind), statt der algorithmischen Computergrafik).

Weiters wurde ein Überblick über die gezielte kritische Entwicklung von grafischen Darstellungen, welche auch manuell erzeugt werden könnten, gegeben wobei jedoch auch erwähnt wurde, dass dies jedoch nicht effizient ist, speziell auch da bspw. die Datenbasis computerbasierter Darstellungen in Echtzeit (bzw. in Sekunden) verändert oder angepasst werden kann. Speziell diese Möglichkeiten der interaktiven Veränderung der Visualisierung, betreffend der Sichtbarkeit bzw. Sortierung der gleichzeitig angezeigten Elemente, wurden als wichtiges Potential zur weiteren Komplexitätsreduktion ermittelt (etwa Überblick + Detail, bzw. Fokus + Kontext Methoden).

Darüber hinaus wurde die Notwendigkeit einer Anpassung der Darstellungen an die Fähigkeiten unterschiedlicher Benutzergruppen, bzw. der Möglichkeit den selben Benutzergruppen unterschiedliche Sichten für unterschiedliche Zwecke zu gewähren, ermittelt, welcher unter anderem mit der Konstruktion von Komplementärdarstellungen und einer Reihe interaktiver Elemente begegnet werden sollte.

Die Zielsetzung für das weitere Vorgehen wurde daher ungefähr als, die Entwicklung von Methoden zur Visualisierung, welche sowohl der Zielgruppe der Experten ein besseres Beurteilen der Strukturen und Abläufe von ökonomischen Modellen ermöglicht, als auch Laien ein generelles Verständnis der in den Modellen angegebenen Zusammenhänge ermöglichen soll, formuliert.

Die Visualisierung von Abläufen und Strukturen, mit dem Ziel diese einem breiteren Publikum verständlich zu machen hat, speziell durch Otto Neurath, im deutschsprachigen Raum bereits eine längere Geschichte. Seit geraumer Zeit jedoch werden diese Methoden der Visualisierung entgegen ihrer ursprünglichen gedachten Verwendung immer öfter reduziert und populistisch aufbereitet und erst präsentiert wenn sie eine ganz bestimmte gewünschte Aussage stützen, auch wenn diese oft jener des zugrunde liegenden Systems widerspricht.

So lange die Aussagen von ökonomischen Modellen manuell aufbereitet werden müssen um für Laien verständlich zu sein, gibt es die Möglichkeit diese Aussagen wissentlich oder unwissentlich falsch zu interpretieren, bzw. zu fälschen. Bereits die Präsentation eines Ausschnitts einer Zeitreihe ohne Darstellung der Basislinie sowie ohne zugehörige Achsenbeschriftungen, ist eine Verfälschung welche häufig eingesetzt wird um Schwankungen von Zeitreihen viel größer erscheinen zu lassen als sie tatsächlich sind. Es ist daher empfehlenswert eine standardisierte Methode anzuwenden, welche jedes Modell nach den gleichen Kriterien betrachtet.

Die Bedeutung der Notwendigkeit des Modellverständnisses der Laien, sowie deren speziellen Bedürfnisse in Punkten wie Verständlichkeit, darf nicht unterschätzt werden. Speziell unter Berücksichtigung der Tatsache, dass der Großteil der politischen Entscheidungsträger, welche diverse volkswirtschaftliche Steuerungsfunktionen erfüllen, gleich ob sie dies in vollem Umfang realisieren oder nicht ökonomische Laien sind. Darüber hinaus wird es über kurz oder lang generell nötig sein volkswirtschaftliche Zusammenhänge einer viel größeren Zahl an Personen näher zu bringen, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Methoden werden diese jedoch nur begrenzt können, da dies ein zu breites Spektrum für diese Arbeit wäre.

Aus der obigen Zielsetzung leitet sich nun die Notwendigkeit ab, verständliche Darstellungsmöglichkeiten zu entwickeln, welche verschiedene Aspekte ökonomischer Modelle untersuchen und darstellen. Würde man versuchen die Anforderung zu erfüllen die verschiedenen Aspekte der Modelle in einer Darstellung zu verbinden, bzw. auf einem Bildschirm darzustellen, so hätte entweder die Möglichkeit dies in Form eines graphischen Modellindikators (etwa als Glyphe [Chuah_1997]) zu tun oder mehrere Diagramme auf einem Bildschirm zu verbinden (etwa Walls&Floors).

Die Verwendung von Gesamtindikatoren oder ähnlichen Konzepten, welche versuchen ein komplettes Modell, d.h. mehrere Informationen in einem ikonischen Darstellungsobjekt (Glyphen, Chernov Faces), zu verbinden hat den Vorteil den Gesamtzustand auf einmal beurteilen zu können, verlangt jedoch einen noch höheren Grad an Aggregation der Daten und eignet sich dadurch schlecht zur Darstellung von strukturellen Zusammenhängen.

Die Verbindung mehrerer Darstellungen zu einer Gemeinsamen in Form eines Gesamtzustandsdiagramms, scheint hier schon eher angebracht. Das Problem dabei ist jedoch, dass eine solche Darstellung zwar möglicherweise die Komplexität des Modells in ähnlicher Weise reduziert wie die einzelnen Darstellungen, das Erfassen der Darstellung selbst jedoch wieder zur komplexen Aufgabe wird. Sehr leicht wird dadurch der Nutzen der Visualisierung wieder reduziert, wenn nicht gar negiert, da es bei komplizierten Darstellungen leicht zu einer Reizüberflutung der Benutzer kommt, wie etwa bei der folgenden Darstellung:

Auch wenn dieses Beispiel extrem scheint; die Gesamtheit dieser selbst auferlegten Voraussetzungen in einer Darstellung zu erfüllen, wäre ein Ansatz welcher den Prinzipien der Komplexitätsreduktion mittels Visualisierung generell eigentlich entgegenwirkt und daher

verworfen wurde, was durch den eigenen Wunsch, unterschiedlichen Zielgruppen einen Vorteil zu verschaffen noch bestärkt wurde.

Im Folgenden werden daher einige unterschiedliche Konzepte vorgestellt, welche einen ersten Schritt in die angedeutete Richtung machen eine Vielzahl von Modellen nach gleichen Kriterien beurteilen zu können, und zwar auf eine Art und Weise, dass sowohl Experten als auch Laien einen Nutzen daraus ziehen können. Diese Darstellungskonzepte wurden in Form eines gemeinsamen Computerprogramms implementiert, welches im folgenden auch kurz vorgestellt werden wird.

4.1 Gesamtkonzept des Darstellungspakets

Das hier nur in seinen wichtigsten Elementen vorgestellte Programm (für Details siehe die Anleitung [Unterluggauer_2004]) wurde als integriertes Gesamtkonzept einer Reihe von Darstellungen und interaktiver Elemente entwickelt, um gleichzeitig mit der Darstellung auch eine effiziente Verwaltung, Manipulation und Steuerung der Betrachtung ökonomischer Modelle, Modellrelationen, Daten sowie der Ergebnisse durchgeführter Simulationen zu ermöglichen. Die Integration aller für ein Modell relevanten Informationen an einem vernetzten Ort – in einem Programm mit der selben Benutzerschnittstelle, bedeutet, dass alle Informationen schnell und direkt zugänglich sind, da alle logischen Verbindungen zwischen ihnen (Etwa die Gleichung zu einer endogenen Variable oder den Daten zu einer exogenen usw.) tatsächlich enthalten sind und auch verfolgt werden können (Reduktion der Suchzeit – eine Hauptaufgabe auch der Visualisierung) – einem großen Vorteil, welcher etwa auch bei integrierten ökonometrischen Paketen, wie etwa EViews [EViews] zu Tragen kommt.

Dies dient zusätzlich dazu um eine bei Durchführung einer explorativen Analyse verfolgte Fragestellung nicht, durch Wechseln zwischen unterschiedlichen Programmen aus den Augen zu verlieren (nicht nur sprichwörtlich), bzw. durch eine Diskontinuität des Erscheinungsbildes von Benutzerschnittstellen [Card_1999] nicht ebenso Einbußen in der Effektivität der Analyse zu erleiden – Aber auch um den Kontext des Programms in Richtung der externen Realität verlassen zu müssen, etwa um die Bedeutung einer Variablen in einer Beschreibung

nachzuschlagen (etwa auf einem Blatt Papier, welches erst mühevoll aus einem umfangreichen Bericht herausgesucht werden muss).

Diese Maßnahmen bedienen sich so, (speziell durch eine Navigationskomponente, welche das Zentrum der gegenwärtig analysierten Strukturen immer anzeigt), gezielt einer logisch abstrahierten Form des Fokus + Kontext Prinzips, welches eine gezielte manuell kontrollierte Analyse von Fragestellungen ermöglicht (Fokussierung auf eine Fragestellung mittels Betrachtung verschiedener Ansichten einer bestimmten Relation), ohne den Kontext des gerade betrachteten Modells, bzw. der betrachteten Relation zu verlieren - der Vorteil dieser Integration darf dabei nicht unterschätzt werden, da er eine nahtlosen intuitiveren Analysevorgang ermöglicht und kognitive Reibungsverluste auf diese Weise minimiert.

Durch diese Integration mit der dualen Navigationskomponente (DualNavBar) wird auch der Vergleich zwischen zwei Modellen möglich, ohne dabei die Strukturen aus den Augen zu verlieren. Durch Entwicklung als fensterbasierte Anwendung mit skalierbarer Fenstergröße ist darüber hinaus auch eine Darstellung von mehreren Programminstanzen nebeneinander bzw. überlappend möglich, wodurch eine gleichzeitiger visueller Vergleich verschiedener Modelle in allen Darstellungsmodi ermöglicht wird (Falls das verwendete Bildschirmsystem dafür geeignet ist – d.h. hoch genug aufgelöst ist, bzw. eine Multidisplay Konfiguration zum Einsatz kommt).

Eingesetzte Software

Die Implementierung des Programms fand dabei gezielt in der gegenwärtig vermutlich flexibelsten Programmiersprache Java2 (v1.4) statt, einerseits um die Lauffähigkeit des Programms auf einem Großteil aller relevanten Systeme für längere Zeit zu ermöglichen (Windows (praktisch alle Versionen), Linux, Unix, usw.) sowie eine etwaige spätere Erweiterung des Programms zu ermöglichen – dies wurde speziell für die Verwendung mit berechnungstechnisch sehr komplexen (etwa sehr umfangreichen Gleichungssystemen, bzw. computerbasierten, rechenintensiven Modellen) vorgesehen, welche dann (bei Unterstützung des Simulationsprogramms) auch auf Großrechner lauffähig wären, bzw. eine Teilung des Programms in eine reine Interaktionskomponente (ein „Frontend“ welches auf einem Desktop

läuft) und eine die Berechnungen startende und verwaltende Komponente, welche gemeinsam mit dem Simulationsprogramm etwa auf einem Großrechner läuft.

Um diese Flexibilität (nebenbei auch die Finanzierbarkeit des Programms) weiterhin zu erhalten, wurden zur konkreten visuellen Darstellung der Modelle keine externen Visualisierungssoftwarepakete eingesetzt, sondern die relevanten Visualisierungen wurden im Zuge des Projekts direkt in Java programmiert – lediglich zur ergänzenden Darstellung von Standarddiagrammen wurde eine völlig in den Programmablauf (auch in die Fensterstruktur des Programms) integrierte günstige Visualisierungsbibliothek eingesetzt (zur Darstellung von gewöhnlichen Histogrammen).

Die eigentlichen Hauptgründe für die Entscheidung waren jedoch ebenfalls strategischer Natur, da sich die Anwendbarkeit (erwartungsgemäß) bzw. Erweiterbarkeit verfügbarer Visualisierungspakete als nicht zufrieden stellend erwies, aber vor allem da dies bei den meisten Paketen einen Verlust der visuellen Kontinuität der Darstellung bedeuten würde (kurzzeitiger Programmwechsel bzw. vordergründige Vollbilddarstellung des externen Visualisierungsprogramms), was wiederum einen Ablenkung bedeuten würde.

Als Teil der Proof-of-Concept Implementierung kommt bei diesem Programm, zur Durchführung von Simulationen von Modellen welche als Gleichungssystem vorliegen, das einschlägig verwendete (ökonometrische) Simulationspaket TSP (v4.5) [TSP] in seiner Kommandozeilenversion (d.h. nicht TSP through the Looking Glass) zum Einsatz. Dieses wird von dem hier vorgestellten Darstellungspaket im Hintergrund automatisch aufgerufen um Modellsimulationen durchzuführen, welche dazu dienen die Modellstrukturen genauer evaluieren zu können – dies wird im folgenden Kapitel noch eingehender erklärt werden – der Benutzer bekommt diese Vorgänge (im Idealfall, d.h. unter Windows98, WindowsXP, sowie Linux) jedoch nicht störend mit – es erfolgt eine visuelle Bestätigung sobald alle nötigen Berechnungen durchgeführt wurden.

Zur genaueren Exploration von Modellen exotischerer Natur, welche sich nicht automatisch mit TSP berechnen lassen, bzw. in algorithmischer Form vorliegen, benötigen selbstverständlich externe Programme, für welche eine Schnittstelle im Programm vorgesehen (spezifiziert) werden muss, so diese nicht die selben Programmaufrufmöglichkeiten (Parameter) und das selbe Dateneingabe/-ausgabe Format wie TSP verwenden, welches Textdateien mit Gleichungen, Eingabedaten sowie Berechnungsaufrufen bestimmten

Formates einliest und als Resultat Textdateien mit Ergebniswerten sowie etwaigen standardisierten Fehlermeldungen zurückliefert.

Modelldaten

Die Eingabe der makroökonomischen Modelle, welche mit der Hilfe des Analysepaketes einer genaueren (anderen) Betrachtung unterzogen werden sollen, erfolgt, wie bereits erwähnt in mehreren Stufen. Absolute unverzichtbar sind hierfür (analog zu den im ersten Kapitel ermittelten grundlegendsten Strukturen eines ökonometrischen Relationensystem):

- Liste aller Modellvariablen
- Gleichungen in intertemporärer General Function Form
(abgeleitet aus der Strukturform – siehe Kapitel 1)

Anhand dieser beiden Elemente ist es bereits möglich eine rudimentäre Darstellung zu erreichen, der Vorteil der Darstellung ist hierbei jedoch nicht sehr groß. Optional können weitere Informationen wie Variablenbeschreibung, Typ, Einheit, Quelle usw. mit der Liste der Variablen übergeben werden, welche (abgesehen von dem Variablentyp: Instrument/Ziel) hauptsächlich in textuellen Exploration des Modells zur Anwendung kommen. In jedem Fall können diese Informationen jedoch auch erst im Analyseprogramm interaktiv eingegeben werden und abgespeichert werden.

Um jedoch die erweiterten Funktionen der visuellen Analyse nutzen zu können, werden bei den vorigen Informationen hinaus, zusätzlich noch folgenden Informationen bzw. Komponenten benötigt:

- Komplette Strukturform der Gleichungen
- Zeitreihen (Daten) für alle exogene Variable
- Startwerte für die vorbestimmten Variablen der ersten Perioden

Alternativ zu der Strukturform der Gleichungen, welche im Standardfall mittels TSP simuliert werden, ist theoretisch die Möglichkeit der Verwendung externer Simulationsprogramme vorgesehen, welche ebenfalls per Kommandozeile aufrufbar sind (bei Windows würde dies

bedeuten, dass sie im DOS Fenster lauffähig sind) und dabei mit Parametern (Dateiname der Datendatei) aufgerufen werden können, welche die Spezifikation der zu verwendenden Eingabedaten, sowie der durchzuführenden Simulationen ermöglicht. Zusätzlich muss eine Ausgabe der Ergebnisse der Simulation in Form von Textdateien möglich sein um die Ergebnisse der Simulationen in das Analysepaket zurück übernehmen und so verarbeiten zu können. Geschieht dies nicht in einer mit TSP identischen Form (andere Schreibweise, bzw. Positionierung), so ist für diesen Fall die Spezifikation, d.h. Entwicklung von weiteren Schnittstellen vorgesehen, welche andere Dateiformate einlesen können.

Das Einlesen aller dieser Informationen erfolgt in der Referenzimplementierung der TSP Schnittstelle jedenfalls in Form von Textdateien, wobei die Gleichungen im TSP Format (ähnlich dem Format von EViews – für allgemeine Informationen zu diesem Format siehe [TSP], bzw. siehe im Anhang für ein Beispiel eines Modells in TSP Schreibweise) spezifiziert werden – Details zur Spezifikation der zu übergebenden Gleichungen und Daten (welche noch weitere, zusätzliche Informationen akzeptieren wie Variablen -Bezeichnungen, -Einheit, usw.) sind in der Anleitung des Analysepakets (VMMM) [Unterluggauer_2004] zu finden.

Visuelle Komponenten

Das Darstellungspaket besteht nun konkret aus den folgenden grundlegenden interaktiven Komponenten, welche selbst zur Laufzeit eine große Zahl an Veränderungen zulassen ohne beim Benutzer zu einem Kontextverlust zu führen:

- A) Permanent sichtbare Komponenten
 - A0) Hauptmenü (Menubar)
 - A1) Kontextsensitives Menü / Filtereinstellungen
 - A2) Hierarchische Modellkomponenten-Navigation (DualNavBar)
 - A3) Darstellungsauswahl (Tablist)
 - A4) Kontextsensitive Statusleiste (Statusbar)
- B) Alternativ wählbare Komponenten im Hauptfenster
 - B1) Modellelement Detailansicht (Anzeigen/Bearbeiten)
 - B2) Dynamische Analyse* (dynamische Struktur)
 - B3) Statische Analyse* (statische Struktur)
 - B4) Instrument-Ziel Analyse* (Instrument-Ziel)
 - B5) Elastizitäten/Multiplikatoren Diagramme
 - B6) Kennzahlen Auflistung

Um einen Eindruck der Zusammenstellung der Komponenten zu bekommen hier ein Screenshot der Struktur der Programmoberfläche direkt nach dem Programmstart:

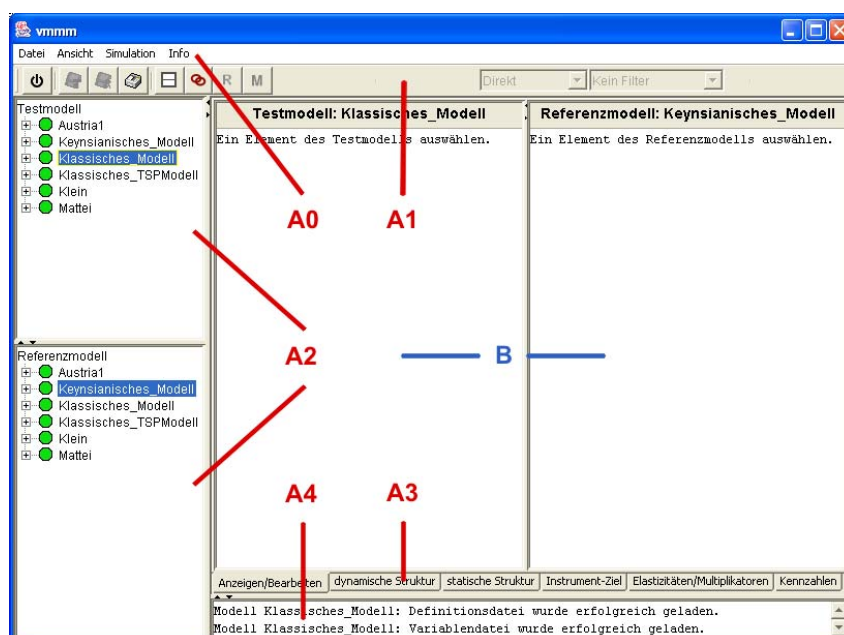


Abbildung 44: Permanente Hauptinteraktionselemente des VMMM Programms

Die permanenten Komponenten (A0-A4) wurden dabei nun mit rot detailliert gekennzeichnet, der Behälter für die alternativen Darstellungen wurde mit blau gekennzeichnet (B).

Permanente Komponenten (Kommunikationskomponenten)

Die Komponenten A1-A3 bilden die primären interaktiven Komponenten des Programms, welche den logischen Kontext der gegenwärtigen Darstellung im Hauptfenster definieren und eine gezielte Exploration des Modells ermöglichen – deren Funktion wird im Folgenden Teil beschrieben. Das Hauptmenü (A0) hat hingegen nur allgemeine Aufgaben, wie das Programm zu verlassen bzw. Änderungen am Modell zu speichern u.ä. (Detaillierte, vollständige Funktionsbeschreibungen des Programms sind generell in der Anleitung zu finden [Unterluggauer_2003]). Der Statusbalken (A4) zeigt Meldungen bezüglich erfolgreichem Laden der Modelle, bzw. Problemen bei durchgeführten Simulationen u.ä. Informationen an, so man etwa ein bestimmtes Modell im Navbar (A2) auswählt. Die Darstellungsauswahl (A3)

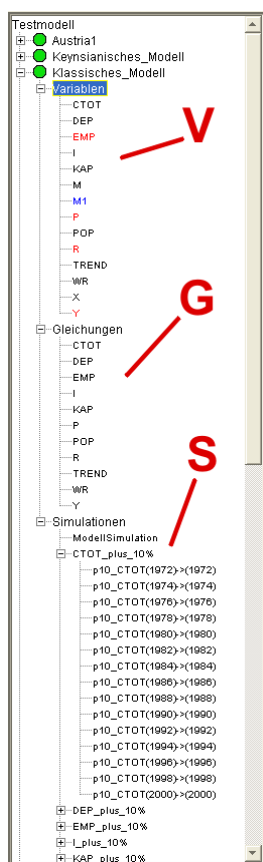


Abbildung 45: NavBar des VMMM Programms

ermöglicht ein Umschalten zwischen den unterschiedlichen Darstellungen (B1-B6), die zentralen Elemente der jeweiligen Analyse werden dabei mittels der Modellkomponenten-Navigation (A2) ausgewählt (die Implikationen der Auswahl werden bei der folgenden Komponente erläutert, die Form der jeweiligen Darstellung wird im nächsten Kapitel erläutert).

Die DualNavBar Komponente (A2) besteht aus zwei identischen nebeneinander abgebildeten kontextsensitiven NavBar Komponenten (eine für das Testmodell und eine für das Referenzmodell – dies sind jedoch einfach zwei beliebige Modelle), und ist eine der wichtigsten Komponenten welche Einfluss auf alle Darstellungen und Visualisierungen hat (B1-B6). Einerseits zeigt der NavBar (nebenstehende Abbildung) immer welche ökonomische Einheit (Variablen, Gleichungen, Simulationen) sich gerade im Fokus der Analyse befindet, wodurch jederzeit eine Orientierung im Modell möglich ist und andererseits kann dieser Fokus gezielt durch anklicken verändert werden, wobei diese Komponenten dann in der mittels der

Darstellungsauswahl (A3) selektierten Darstellung angezeigt wird, so diese Komponente in der besagten Darstellung sinnvoll angezeigt werden kann – ist dies nicht der Fall so wird im Hauptbildschirm (B) statt der Darstellung eine Fehlermeldung zurückgeliefert, welche den Benutzer informiert, welche Elemente in dieser Darstellung angezeigt werden können. Auf der obersten hierarchischen Ebene werden die zu analysierenden Modelle aus der Liste der verfügbaren Modelle ausgewählt (diese Liste wird extern definiert, wobei Unterverzeichnisse auf der Festplatte erstellt werden, welche Modelldefinitionsdateien, Datenreihen sowie alle mit dem Modell verbundenen Daten enthält). Dabei wird vor dem Modellnamen ein farbiges Indikatoricon verwendet, welches den Status der Integrität der benötigten Modellinformationen anzeigt, wobei rot anzeigt, dass noch Daten geladen werden, die für eine grafische Darstellung unbedingt benötigt werden (D.h. Bei roter Anzeige kann keinerlei grafische Darstellung erfolgen). Ein oranges Kreissymbol zeigt hingegen an, dass im Hintergrund noch Simulationen am laufen sind, aber bereits einige grundlegende Strukturen, anhand der vorliegenden Informationen betrachtet werden können. Grün signalisiert, dass alle spezifizierten Informationen erfolgreich geladen wurden, wobei alle möglichen Simulationen durchgeführt wurden. Im Fall einer Störung kommen noch zusätzlich ein Symbol in Form eines roten Rufzeichens – im Fall eines schweren Fehlers (Daten konnten nicht gelesen werden oder Simulationen nicht durchgeführt werden), bzw. ein grünes Rufzeichen – im Fall einer Warnung oder eines leichten (nicht kritischen) Fehlers, zur Anwendung.

Nach Auswahl eines Modells können nun drei verschiedene Elementtypen ausgewählt werden, welche ebenso wie die Modelle in separaten (interaktiv einklappbaren) Teilbäumen des Auswahlbaumes untergebracht sind – dies sind Variablen (V), Gleichungen (G) und Simulationen (S). Dabei sind die Variablen in der Übersicht zusätzlich farblich kodiert, wobei ein roter Variablenname anzeigt, dass diese Variable als Zielvariable definiert wurde, ein blauer hingegen anzeigt, dass es sich um ein Instrument handelt, wodurch die Suche nach diesen, für die meisten Modelle wichtigen Variablen, visuell stark beschleunigt wird. (Technisch gesehen wird die nominale Eigenschaft des Variablentyps welche Werte aus der Menge {Ziel, Instrument, Normal} annehmen kann der visuellen Variablen der Farbe mit den Farben {Rot, Blau, Schwarz} zugewiesen)

Gegenwärtig haben alle Gleichungsbezeichnungen die selbe Farbe – es wird hier aufgrund der unterschiedlichen Klassifizierungen (siehe Kapitel 1) nicht zwischen verschiedenen Typen unterschieden – in einer Ausbauversion könnte dies jedoch berücksichtigt werden, speziell

falls bestimmte Gleichungstypen für erweiterte Analysen benötigt würden (siehe etwa in [Rengs_2003] – diese Arbeit ist aufgrund der hohen Verknüpfung mit der hier vorliegenden Arbeit auch im Anhang zu finden)

Die Auflistung der durchgeführten Simulationen dient dazu bestimmte tatsächlich interessante Teilergebnisse nachzukontrollieren, bspw. wenn eine Modelproblemanalyse mittels der graphischen Darstellungen zu einem bestimmten Datensatz verweist (bei einer Fehlersuche war der letzte Schritt davor vermutlich das Elastizitäten/Multiplikatoren Diagramm (B5)) wodurch Fehlerquellen sowohl in den Daten als auch den Gleichungen bzw. den Simulationsläufen aufgespürt werden können.

Die Art der mit dem Navbar ausgewählten Komponente ist nun, wie bereits erwähnt, für alle Darstellungen relevant, da nicht alle Elemente in allen Darstellungen sinnvoller Fokus sein können. So ist die Detailansicht (B1) die einzige, welche eine Auswahl aller drei Elemente gestattet, wobei zusätzlich auch die Elementklassen (d.h. die Überschriften welche hierarchisch direkt unter dem Modell stehen) – Variablen bzw. Gleichungen – ausgewählt werden können (die Auswahl dieser beiden führt zu einer Auflistung aller im Modell enthaltenen entsprechenden Elemente, wobei Variablen nach ihrer Klassifikation {endogen, exogen Instrument, Ziel} gruppiert sind). Die Auswahl der anderen Elemente führt zur Anzeige aller über dieses Element verfügbaren Informationen und gestattet einige Eigenschaften zu ändern (bspw. die Instrument/Ziel Eigenschaft einer Variablen zu entfernen/zuzuweisen – wobei die Auswahl auf sinnvolle Zuweisungen geprüft wird / beschränkt ist, d.h. ob die Variable exogen respektive endogen ist)

Die graphischen Darstellungen B2-B4 verlangen hingegen, dass eine Variable aus der Liste ausgewählt wird, welche dann im Zentrum der visuellen Analyse steht – was bei den verschiedenen Darstellungen jedoch leicht unterschiedliche Bedeutungen hat. Bei der Instrument-Ziel Darstellung (B4) ist es darüber hinaus nur zulässig eine Instrumentvariable aus der Liste zu wählen.

Die Darstellungen B5-B6 hingegen benötigen nur die Auswahl eines (sowohl für Test- als auch für Referenzmodell) Modells, was bereits durch Auswahl eines beliebigen Elements erreicht werden kann, da die Darstellung (B5) Informationen bezüglich mehrerer, separat in der Darstellung spezifizierbarer Variablen anzeigt, bzw. die Kennzahlen Darstellung (B6),

welche modellspezifische Informationen, wie etwa verschiedene Kennzahlen bezüglich der Gleichungen und der Variablen, anzeigt.

Die letzte permanente Interaktionskomponente, welche noch nicht vorgestellt wurde, ist das kontextsensitive Menü (A1), welches einerseits Funktionen wie Speichern und Drucken erneut zur Verfügung stellt (als ikonische Auswahlknöpfe), aber auch zusätzliche Funktionen wie dem Umschalten der, bei der Berechnung der Darstellungen dynamische Struktur (B2) und statische Struktur (B3) angewandten, Gewichtungsmasse Multiplikator vs. Elastizität (Erklärungen folgen bei der Beschreibung der jeweiligen Komponenten). Zusätzlich steht bei dieser Komponente (während Benutzung der Darstellungen B2 und B3) ein Auswahlfeld zur Verfügung, welches eine Variation des angewendeten Filters zur Laufzeit ermöglicht.

Darstellungskomponenten

Die alternativ wählbaren Komponenten (Darstellungskomponenten) werden in einem großen Hauptrahmen (Frame) – B – angezeigt, welches je nach Darstellungsart entweder zweigeteilt ist (um einen Vergleich der beiden auswählbaren Modelle zu ermöglichen, wie bspw. bei B1) bzw. ein komplettes Bild anzeigt, wenn mehr Platz für die Darstellung benötigt wird (B2-B4). Generell können die Darstellungen in die folgenden Kategorien eingeteilt werden:

- Textuelle Darstellungen
 - B1) Modellelement Detailansicht (Anzeigen/Bearbeiten)
 - B6) Kennzahlen Auflistung
- Netzwerkähnliche Darstellungen (Grafische Darstellungen)
 - B2) Dynamische Analyse* (dynamische Struktur)
 - B3) Statische Analyse* (statische Struktur)
 - B4) Instrument-Ziel Analyse* (Instrument-Ziel)
- Histogramme
 - B5) Elastizitäten/Multiplikatoren Diagramme

Vom Standpunkt der Visualisierung sind lediglich die Darstellungen B2-B4 interessant, da sie neu sind, bzw. noch nicht in diesem Kontext eingesetzt wurden, und auch neue Elemente enthalten, weshalb ihr Aufbau, Funktionsweise und ihre Möglichkeiten im weiteren Verlauf noch genauer spezifiziert werden. Die anderen Darstellungen werden nun im folgenden kurz skizziert werden, da ihre Funktionsweise zwar relevant ist und im Kontext des gesamten Darstellungs-/Analysepaketes wichtige Elemente sind, sie jedoch keine grafischen interessanten Elemente enthalten. Gegen Ende dieses Kapitels werden einige beispielhafte integrierte Analysefolgen skizziert werden, welche erläutern welche Zusammenhänge zwischen den einzelnen Darstellungen bestehen und bei welchen Fällen (Use Cases) diese eingesetzt werden können, bei welcher auch Beispiele für die Histogramm Darstellung (B5) gegeben werden.

Textuelle Darstellungen

Die Zielsetzung der Detailansicht wurden bereits bei der Navigationskomponente, dem DualNavBar (A2) kurz skizziert, hier folgen nun einige exemplarische Abbildungen um einen Eindruck der Möglichkeiten dieser Komponenten zu gewinnen. Generell hat diese Darstellung eine zweigeteilte Arbeitsfläche, wobei eine ein ausgewähltes Element des Testmodells (oberer NavBar) einem ausgewählten Element des Referenzmodells gegenübergestellt wird um detaillierte Vergleiche zu ermöglichen (etwa bei sehr ähnlichen Modellen). Dabei sind folgenden Elemente auswählbar: Variablen(liste), einzelne Variablen, Gleichungen(liste), einzelne Gleichungen, einzelne Simulationen (sowohl der Referenzlauf mit unveränderten Daten, als auch die abweichenden Simulationen – diese werden noch besprochen), wobei diese Elemente aus zwei verschiedenen oder auch dem gleichen Modell ausgewählt werden können. Der erste Screenshot zeigt den Fall einer Auswahl einer Kategorie, wobei in diesem Fall die Variablenliste der Gleichungsliste (in diesem Fall des selben Modells) gegenübergestellt wird um etwa die Beschreibung mit dem modellierten Inhalt vergleichen zu können:

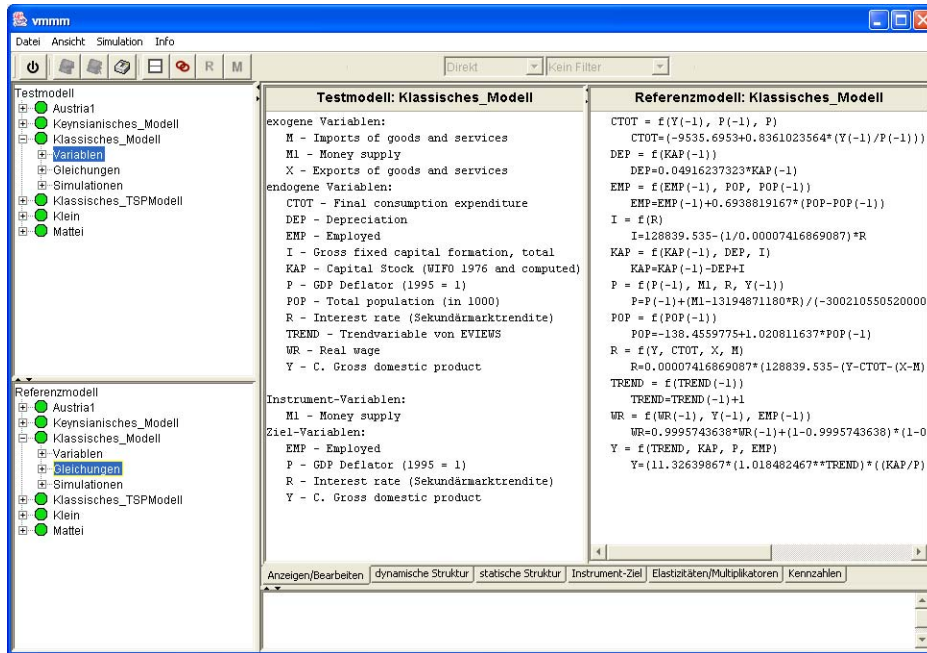


Abbildung 46: Modellelement Detailansicht – Variablenlisten- vs. Gleichungslistenübersicht

Bei Auswahl einer Variablen in der Detailansicht können nun, wie bereits bei der Spezifikation der Eingabe der Modelldaten erwähnt, einige Daten (bzw. Metadaten) der Variablen geändert werden, welche auch wieder abgespeichert werden können. Der Screenshot der Auswahl einer Variablen sowie eines Simulationslauf sieht dabei so aus:

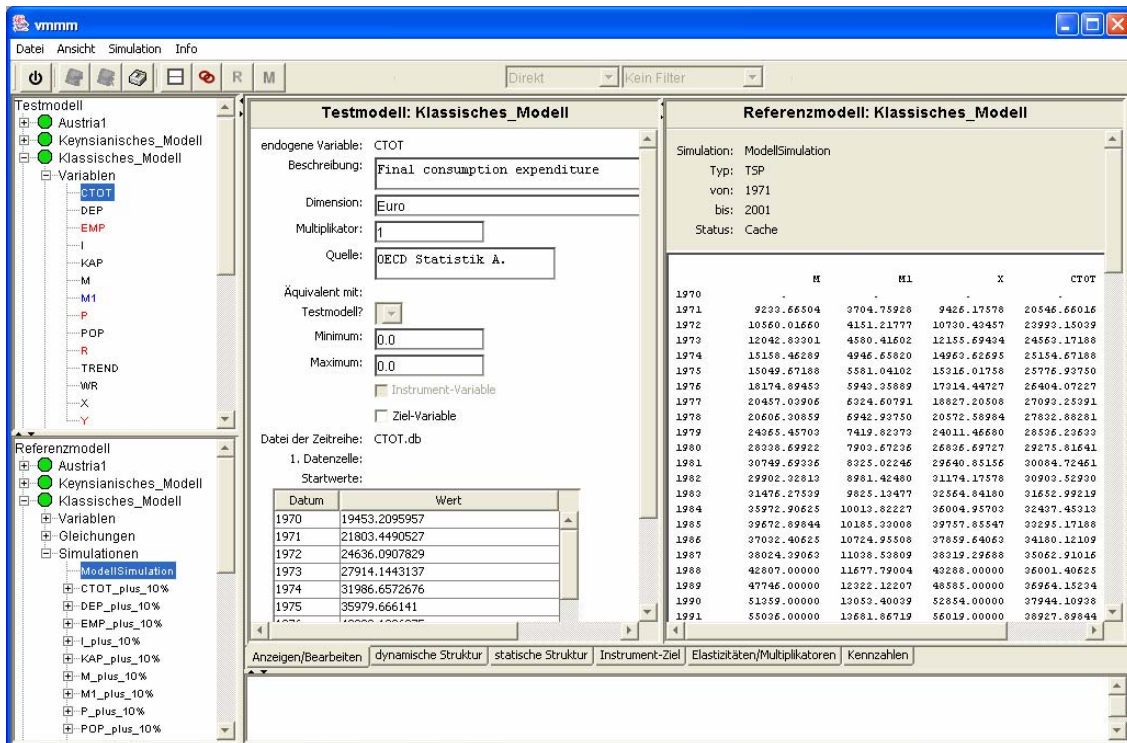


Abbildung 47: Modellelement Detailansicht – Variable- vs. Simulation

Diese Abbildung skizziert nun tatsächlich keinen häufigen Analysefall, sondern wurde nur aus Platzspargründen in dieser Kombination ausgewählt – dennoch ist es möglich etwa die bei der Variable gespeicherten empirisch erhobenen Daten mit den Ergebnissen eines bestimmten Simulationslaufs zu vergleichen – diese hypothetische Verwendung wäre nur für den Fall der Fehlersuche in den Daten / bzw. dem Modell selbst, relevant (etwa durch den Modell Entwickler selbst) – im Normalfall erfolgt diese Analyse ja visuell mittels der grafischen Visualisierungskomponenten.

Die Darstellung B6 dient der Darstellung von allgemeinen lediglich auf das Modell bezogene aggregierte strukturelle Daten (betreffend der Komplexität des Modells), wird hier jedoch nicht gezeigt, da sie weder visuell relevante Komponenten enthält (eine Kombination der Daten zu einer grafischen Glyphe schien in diesem Zusammenhang nicht sinnvoll, da die absolute Zahl der angezeigten Zahlen die magischen 7 nicht überschreitet, wodurch diese auch problemlos wahrgenommen werden können), noch interaktive Elemente, welche den Ablauf der weiteren Analysen, bzw. die Anzeigoptionen oder das Erscheinungsbild der anderen Darstellungen verändern oder beeinträchtigen würden. (Bei Interesse siehe Benutzerhandbuch VMMM)

4.2 Grafische Darstellungen

In diesem Teil werden nun jene Darstellungen des Analysepakets (VMMM) vorgestellt, welche die Aspekte der Informationsvisualisierung am deutlichsten einsetzen – die grafischen Darstellungen. Diese wurden als komplementäre Darstellungen, und ergänzen sich daher untereinander (die grafischen Darstellungen), und werden darüber hinaus auch von den textuellen Darstellungen ergänzt. Dabei betrachten die verschiedenen Darstellungen die untersuchten Modelle auf unterschiedlichen Vereinfachungsstufen, welche innerhalb der jeweiligen Darstellung noch weiter durch Filtern bzw. Clustern reduziert werden können, die Hierarchie der aus der Darstellung resultierenden Komplexität (im Vergleich zu einer Darstellung auf analogem Medium) wurde dabei so geplant, dass sich folgendes Bild ergibt:

Restkomplexität der Wahrnehmung	Darstellung	Grad der Komplexitäts- Reduktion	durch
	Textuelle Detailansicht	Kaum für Gesamt Hoch für Suchaufgaben	Datenverknüpfung, Exploration
	Histogramme	Merklich für Details Kaum für Gesamt	Visualisierung, Interaktion
	Dynamische Struktur	Merklich für Details Kaum für Gesamt (Hoch für Gesamt durch Filtern)	Visualisierung, Interaktives Filtern, Exploration, Kontext
	Statische Struktur	Hoch für Gesamt (Sehr Hoch für Gesamt durch Filtern) Nicht alle Details erkennbar	Visualisierung, Aggregation (Strukturdaten), Interaktives Filtern, Exploration, Kontext
	Zielanalyse	Extrem für Instrument – Ziel (Gesamt und Details nicht mehr erkennbar)	Visualisierung, Aggregation (Strukturdaten)

Tabelle 5: Methoden und Grad der Komplexitätsreduktion der visuellen Analysetechnik

Zusätzlich zu den hier skizzierten Effekten, welche in Kapitel 3 bereits vorgestellt wurden, entstehen durch die Integration der einzelnen Darstellungen zu einem Gesamtpaket noch weitere synergetische Effekte, welche größtenteils ebenfalls erwähnt wurden, wie etwa jenem des Kontext trotz Fokus (Focus+Context). Der Fokus wird hier durch die Darstellungen gebildet, wobei der Kontext, bis zu einem gewissen Grad, auch bei Wechseln der Darstellung, durch die interaktive Navigationskomponente erhalten bleibt. Zusätzlich wird eine intuitive Analyse ermöglicht, wobei bei den Darstellungen begonnen werden kann, welche die stärkste Reduktion der Komplexität ermöglichen und nach Bedarf der Fragestellung einzelne Effekte, welche interessant scheinen – etwa als inkorrekt vermutet werden, oder von der üblichen Formulierung abweichen – in den detaillierteren Darstellungen weiter verfolgt werden kann, bis man quasi in fünfter Instanz die Gleichungen und Daten betrachten kann. Dies ist darüber hinaus noch im selben System möglich, d.h. das Programm muss dazu nicht verlassen werden und die Analyse kann auch nach Abklärung dieser Fragestellung wieder an der alten Stelle fortgesetzt werden – was durch die visuelle Kontinuität der gemeinsamen Oberfläche leichter fällt.

Zu beachten ist dass einige der oben aufgezeigten Funktionen bzw. Vorteile welche die Komplexität teilweise sehr stark reduzieren, nicht eingesetzt werden können wenn das betrachtete Modell nur als Minimalversion angegeben wurde (d.h. nur mit Variablenliste und GFF), da ohne Daten und Simulationen unter anderem keine deterministischen (bzw. faktenbasierten) Gewichtungen der Teilstrukturen vorgenommen werden können (d.h. keine Filterung) – eine eingehendere Exploration der Strukturen ist dann auch nur bis zu einem gewissen Grad zielführend, da die untere Grenze die übergebenen Strukturen und Daten sind. (d.h. diese bilden die atomaren Strukturen/Informationen des Modells).

Netzwerkdarstellungen

Ein wichtiger Teil der vorgestellten Analysetechnik wird von den Darstellungstechniken dynamische und statische Strukturanalyse, sowie nachrangig auch der Zielanalyse, gebildet welche wie zuvor erwähnt, relativ stark voneinander abweichende Zielsetzungen und Aussagekraft haben. Dennoch haben sie einige Gemeinsamkeiten, beginnend damit, dass sie auf dem ähnlichen Grundkonzept der grafischen Repräsentation des ökonomischen Relationensystems beruhen – der Darstellung als Graph (=Netzwerk). Da die Grundlagen einer Betrachtung von ökonomischen Modellen als Graphen bereits im Kapitel 2, inklusive der Betrachtung vieler möglicherweise bei der Darstellung auftretender Probleme, sehr ausführlich demonstriert wurde, wird an dieser Stelle nur mehr äußerst kurz auf diese Entscheidung und ihre Folgen eingegangen.

Aus unterschiedlichen Gründen, welche teilweise bereits erläutert wurden (unterschiedliche Ziel-/Benutzergruppen, Komplexitätshierarchie der Analyse – Prinzip der komplementären Darstellungen), wurden die folgenden Netzwerkdarstellungen entwickelt:

- Dynamische Strukturanalyse (Intertemporale Relationen)
 - Zielanalyse (indirekte Intertemporale Relationen)
- Statische Strukturanalyse (Transtemporale kumulierte Relationen)

Die dynamische Strukturanalyse, welche die höhere Restkomplexität der Darstellung aufweist gibt, solange kein Filter zur Anwendung kommt, die Modellrelationen exakt, d.h. so an wie sie aus der intertemporalen General Function Form extrahiert wurden, wieder. Dadurch können die von ihr visuell wiedergegeben Abläufe und Strukturen nach wie vor mit ihren tatsächlich modellierten kurzfristigen intertemporären Implikationen relativ detailliert betrachtet werden – bei Verwendung der Simulationsergebnisse jedoch nicht in jedem fall ganz exakt⁴².

⁴² Die Struktur der Relationen (GFF) kann weiterhin eindeutig erkannt werden, die Wirkung der Relationen kann jedoch aufgrund der Art der Ermittlung (durch Simulation) nicht mehr exakt betrachtet werden, da dies nur eine numerische Näherung der Relationsintensität ermöglicht, da das Wirken von indirekten Effekten nicht ausgeschlossen werden kann (siehe dazu Kapitel 2 – speziell Abbildung 21: Kumulation von messbaren Effekten in Modellen), d.h. betrachtet man die Gewichtung der Kanten in der resultierenden Analyse so beschreiben

Die statische Strukturanalyse vereinfacht die angezeigten Strukturen hingegen, in dem die kurzfristigen intertemporalen Relationen ersetzt werden und nur mehr genäherte mittelfristige transtemporale (d.h. zeitlich transitive) Relationen – ohne einzelne temporale Instanzen der Variablen – erkannt werden können, eine detailliertere Erklärung folgt bei der Beschreibung der jeweiligen Darstellung.

Die Zielanalyse führt eine weitere (extreme) Vereinfachung durch, welche alle direkten Effekte ausblendet und nur mehr den Einfluss der Instrumente auf die Ziele im Lauf der Zeit darstellt. Dabei können kaum mehr Details erkannt werden, da die dargestellten Kanten nur mehr temporal und logisch indirekte Relationen abbilden, es ist jedoch sofort erkennbar wie (numerisch) effektiv ein Instrument bei der Erreichung der vorgegeben Ziele ist.

Die grundlegende visuelle Metapher ist in allen drei Fällen die Repräsentation von Variablen als Knoten (visuellen Entitäten) sowie der Relationen als Kanten (Verbindungen) zwischen diesen Knoten, welche aus der Zerlegung der Relationen, welche durch die General Function Form des Modells angegeben sind, gewonnen werden – dies geschieht analog zu der in Kapitel 2 aufgezeigten Methode zur Extraktion der Relationen aus dem Gleichungssystem und der Umwandlung in einen Graphen.

Dabei kommt eine Reihe von visuellen (Kantenfärbung, Filtern) und interaktiven (Exploration, Kontextanzeigen) Verbesserungen (Verstärkungen) zur Anwendung, deren konkrete Ausprägung von der jeweiligen Darstellungsmethode abhängig ist.

Unabhängig von dieser nicht gerade revolutionären Art der gewählten Metapher sei jedoch angemerkt, dass diese Metapher intuitiv sehr gut geeignet ist, auch da sie in unserem Kulturkreis generell verbreitet ist, etwa in Form ähnlich aussehender Flussdiagramme (meist eigentlich Netze), welche bereits seit längerem in Wirtschaft und Wissenschaft, zur Darstellung von teilweise hoch vernetzten Wirkungskreisläufen aller Art, etabliert sind.

Verschiedene ebenfalls ähnlich aussehende Pfeil-, bzw. Blockdiagramme zur Erläuterung unterschiedlicher ökonomischer Zusammenhänge, lassen sich in der ökonomischen Literatur und Lehrliteratur bereits seit Tinbergen [Morgan_1990] finden, und wurden danach auch weiterhin mehr oder weniger am Rande verwendet (bspw. in [Kleinewefers_1983], [Intrilligator_1996]).

diese für den Fall einer Relation welche in einen interdependenten Kreislauf eingebunden ist, ebenfalls nur mehr transtemporale (kumulierte) Gewichte – die Kanten stellen jedoch weiterhin die exakten intertemporalen Beziehungen, d.h. die Wirkungspfade dar.

Darüber hinaus entstanden in den letzten Jahren eine Reihe an Systemmodellierungs-Programmen, welche praktisch die gleiche Metapher wählen um Größen mit Einflüssen zu verbinden, wobei diese jedoch nicht analytischen Methoden dient, wie es die vorliegende Arbeit zum Ziel hat (also keinen bottom-up Ansatz), sondern die Entwicklung neuer Relationensysteme aus dem Nichts („from scratch“) ermöglichen soll (also einen top-down bzw. drill-down Ansatz). Beispiel für solche Programme sind bspw. Powersim [Powersim] (ein ausführliches Beispiel eines damit entwickelten komplexen dynamischen Modells ist in [Unterluggauer_2002] zu finden) oder auch günstigere Programme wie etwa DynaSys [DynaSys]. Die Begründung dieser Programme die Modellierung mit einer Grafik zu beginnen war speziell auch Laien einen Zugang zur angewandten System- und Modelltheorie zu ermöglichen, aber auch um Experten die Verwaltung eines Modells zu vereinfachen, da auch hier alles an einem Ort ist und fehlende oder überschüssige logische Verbindungen sofort erkannt werden können. Die vorliegende Methodik ermöglicht es nun, unter vielen anderen Anwendungsmöglichkeiten auch , diese Vorteile der effizienteren Fehlersuche, auf nicht visuell entwickelte Modell anzuwenden – im Extremfall theoretisch auch wenn diese nicht einmal als Gleichungssystem verfügbar sind.

Als weiteres bestärkendes Element kommt hier hinzu, dass sich im wissenschaftlichen Umfeld der Netzwerk- und Graphentheorie, eine Vielzahl an neuen Anwendungsmöglichkeiten aufgezeigt wurden (siehe Kapitel 2), bzw. oftmals auch nur das (krampfhaft) Bedürfnis vorhanden war diese Techniken auf die eigenen Forschungen zu übertragen, was jedoch nicht immer gelänge (für eine Reihe interessanter Ansätze siehe. [Buchanan_2002], bzw. [Barabasi_2003] oder für mathematischer fundierte Grundlagen [Reka_2002]).

Als letztes Kommentar zur Begründung der Auswahl der visuellen Metapher ist zu sagen, dass die Möglichkeiten einer alternativen visuellen Darstellung der Wirkungszusammenhänge auf Basis modellierter Strukturen nicht gerade groß sind. Dies liegt auch an der komplexen (weniger an der dynamischen) Natur der makroökonomischen Modelle, welche zur Folge hat, dass viele Visualisierungsmethoden, welche auf anderen hierarchische Strukturen wie etwa Bäumen (technisch gesehen sind das zyklusfreie gerichtete Graphen – siehe Kapitel 2) beruhen (etwa raumfüllende Visualisierungen: Treemaps, bzw. 3D Darstellungen: ConeCams, usw. siehe [Card_1999]), hier nicht anwendbar sind, da die Modelle Zyklen (interdependente bzw. blockrekursive Modelle) nicht die Ausnahme sind, sondern meist mehrfache Zyklen die Regel sind (wenn auch ein einziger Zyklus bereits genug wäre).

Andere Visualisierungsmethoden, welche sich hauptsächlich mit der Darstellung von großen Datenmengen beschäftigen, haben darüber hinaus meist das Ziel bisher unbekannte Zusammenhänge in multidimensionalen Daten darzustellen. Dies deckt sich jedoch eher selten mit den Anforderungen der Analyse von bereits ausformulierten ökonomischen Modellen, denn zwar könnte man auch lediglich alle Simulationsdaten des Modells in Form von Scatterplots oder multiplen Histogrammen angeben um die Zusammenhänge und Aussagen des Modells aus den Daten heraus visuell zu erraten (wobei eine vernünftige Darstellung aufgrund der starken Heterogenität der makroökonomischen Daten generell zweifelhaft wäre – siehe Kapitel 3 – Abbildung 24), würde damit aber einen unnötigen Arbeitsschritt durchführen (wenn auch visuell und dadurch - falls bei solch extrem heterogenen Daten überhaupt möglich – dann wenigstens effizient), da hier ja nicht unbekannte Zusammenhänge, sondern explizit formulierte Relationen analysiert und verstanden werden sollen. Aus diesem Grund ist es besser sich auf die Exploration und Darstellung der tatsächlich angegebenen Relationen zu konzentrieren, da es nicht das Ziel dieser Arbeit ist Informationen und Zusammenhänge zu erfinden, welche nicht der Wahrheit entsprechen – auch wenn die hier vorgestellte Technik auf einer wissenschaftlich Konferenz von einem übereifrigen Hörer aufgrund eines anfänglichen Missverständnisses als Novum in Form einer „Model Mining“ Technik (im negativen Sinn) bezeichnet wurde – dies ist jedoch nicht das Ziel – vielmehr ist das Ziel analog zu Tufte’s Hauptaussage „*simply show the data*“ frei neu formuliert als „*simply show the model*“. (D.h. ein möglichst großer Teil des kognitiven Analysevorganges soll externalisiert und automatisiert werden, so dies möglich ist.)

Relationsintensität der modellierten Variablen

Auch wenn die Konstruktionsdetails der beiden Visualisierungsmethoden, abgesehen von der grundsätzlichen Darstellung als netzwerkähnliche visuelle Struktur, voneinander abweichen, so verwenden beide jedoch prinzipiell gemeinsame Methodik der Bewertung ihrer Kanten, welche nicht ohne Simulationsdaten angewendet werden kann – d.h. bei minimalen Modelldaten nicht aktiv ist. Diese wird sowohl für die visuelle Kodierung des berechneten Effekts der Kanten, als auch für die Anwendung von Filtern benötigt.

Die für die Netzwerkdarstellungen entscheidende Grundidee ist dabei, dass die gerichteten Kanten zwischen den Knoten angeben, in welcher Weise und wie intensiv der Einfluss des einen Knotens auf seine Nachbarn ist, wozu jedoch nicht die Koeffizienten/Parameter der Gleichungen herangezogen werden (was bei den umgekehrt arbeitenden top-down Techniken wie Powersim der Fall ist – bzw. generell etwas anders funktioniert). Statt dessen wird mit Hilfe der Simulation und der Daten der (indirekte) Einfluss der Variablen aufeinander genähert berechnet, wozu jedoch die separate Simulation des Einflusses jeder Variablen auf jede benachbarte Variable (siehe Kapitel 2 für den Begriff der Nachbarschaft in gerichteten Graphen) erforderlich ist – dafür kann diese Art der Analyse jedoch auch bei algorithmischen oder anderen exotischeren Modellen erfolgen, jedenfalls wenn ein entsprechendes Simulationsprogramm verfügbar ist.

Dennoch stellt sich an dieser Stelle die Frage anhand welcher Größe nun dieser Einfluss einer Variablen auf eine anderen sinnvoll möglich ist – das Hauptproblem ist hierbei die extrem hohe Heterogenität der Daten. Dies resultiert darin, dass Zusammenhänge zwischen absoluten Größen von einigen Prozent (mit für die Simulation relevanten Schwankungen im Promillebereich), bis zu absoluten Größen im Bereich vieler Milliarden möglich sind.

Die Messung des Einflusses kann daher sinnvollerweise nur anhand eines dimensionslosen Maßes geschehen, wozu als Basisinformation die Änderungsraten der endogenen Variablen in Bezug auf eine einmalige prozentual konstante Erhöhung (z.B.: Faktor $f = 0,01 = 1\%$) einer anderen Variablen, welche auf sie wirkt, also theoretisch einen transitorischen Schock, herangezogen werden. Danach werden diese Änderungen entweder in Form eines numerisch genäherten Multiplikators, oder alternativ als numerisch genäherte Elastizität betrachtet, welche dann das Gewicht der jeweiligen Verbindung darstellt – dabei muss, wie bereits mehrmals erwähnt wurde darauf geachtet werden, dass diese beiden berechneten Größen nicht in jedem Fall ausschließlich die direkten Verbindungen wiedergeben:

In diesem Sinne ist auch die Darstellung die indirekten Effekte als einzelne Verbindungen (ihrer Gewichtung) bei allen drei Darstellungen sehr sinnvoll, sie muss jedoch korrekt interpretiert werden, da sie (außer in Ausnahme Situationen) eben nicht den direkten Effekt einer Variable auf eine andere darstellt, sondern das Verhalten des gesamten Modells in Reaktion auf Veränderungen einer bestimmten Variablen und deren modellweiten Implikationen für eine andere (in diesem Fall benachbarte) Variable beschreibt, wenn auch

aus logischen Gründen der Effekt auf direkt benachbarte Variablen höchstwahrscheinlich größer ist als auf indirekte, da der Wirkungskreislauf einer Variablen ja nur über tatsächlich existierende Verbindungen gehen kann. Je kürzer die zeitliche Breite des Beobachtungsfensters (je kleiner der Zeitraum) ist, desto weniger (temporal) indirekte Effekte kommen zu tragen und desto mehr können die direkten Effekte beobachtet werden. Bei der dynamischen Analyse (welche eine Betrachtungsbreite von einer Simulationsperiode hat) können daher im Idealfall einer nicht-interdependenten Relation (von der Art $X_t \rightarrow Y_t$, wobei auch indirekt keine Bahn (im Graphen) von Y_t zurück auf X_t führt – d.h. die kausale Länge der indirekten Bahn $Y_t \rightsquigarrow X_t$ gleich null) tatsächlich nur die direkten Effekte betrachtet werden.

Bewertungsalgorithmus

Möchte man daher die Beziehung zwischen zwei benachbarten Variablen, d.h. Variablen die durch eine Relation verbunden sind – bspw. $X \rightarrow Y$ (zur Erinnerung: dies bedeutet, dass im Modell eine Relation der Form $Y = f(X, \dots)$ vorkommen muss.) – bewerten, so wird in der (bezüglich der Relation) unabhängigen Variablen eine einmalige Erhöhung durchgeführt und später die Auswirkungen dieser Veränderung auf die abhängigen untersucht:

$$X' = X \cdot (1 + f) \text{ also im Fall von 1\%: } X' = X \cdot 1,01.$$

Diese Art der Erhöhung mag dem ökonomisch geschulten Beobachter sicherlich bekannt vorkommen, da die Betrachtung transitorischer Schocks, welche mittels Veränderung (Erhöhung/Verringerung) exogener Variablen in das System eingebracht werden, ein häufig eingesetztes Analyseinstrument für makroökonomische Modelle ist. Damit die Netzwerk-Darstellungen visuell nützliche Ergebnisse liefern, ist es jedoch nötig dass die Bewertung der Kanten nicht nur für Relationen des Typs $X_t \rightarrow Y_t$ (wobei X exogen ist) erfolgt (da sonst nur diese sinnvoll evaluiert werden können), sondern dass alle Relationen des Modells evaluiert werden. Das Hauptproblem ist dabei auch, dass wenn nur ein Teil der Kanten visuell gekennzeichnet wird, die anderen Kanten automatisch in den Hintergrund gerückt würden, was eine Überbetonung des Einflusses des exogenen Variablen bedeuten würde – was dadurch erschwert wird, dass bei ökonometrisch geschätzten Modellen viele der eigentlich vom System nicht näher beschriebenen Variable, aus unterschiedlichen Gründen (etwa Effizienz, automatische Fortschreibung, über sehr lange Perioden linear nur von sich selbst abhängige Variable, etc.) dennoch endogen repräsentiert werden und die Anzahl der exogenen Variablen oft gering ist – im Extremfall sind nur mehr die Instrumente exogen. Es ist daher

ratsam diese Analyse auch auf alle anderen Variable zu erweitern, was jedoch selbstverständlich nicht in jedem Fall einfach möglich ist, bzw. auch gar nicht möglich ist.

Es müssen daher bei der technischen Umsetzung dieser Berechnungen zwei Fälle der Umsetzbarkeit unterschieden werden:

- Exogene Variable (Unproblematisch)
 - Exogene (laufend, verzögert, vorlaufend)
- Endogene Variable (Nur bedingt umsetzbar)
 - Endogene verzögerte
 - Endogene laufende
 - Endogene vorlaufende

Ist es das Ziel die Auswirkungen der Erhöhung exogener Variable (auf endogene Variable) zu untersuchen so muss lediglich ihr Wert in der Zeitreihe kurzfristig (für diese Simulation) durch den erhöhten (veränderten) Wert ausgetauscht werden (noch vor Simulationsbeginn). Die Frage ist nur in welcher Periode der Wert ausgetauscht werden muss und hängt nun von der konkreten (temporalen) Verwendung der Variablen ab. Handelt es sich um eine verzögerte Relation $X_{t-i} \rightarrow Y_t$ mit $i > 0$ so muss die exogene Variable in Zeitreihe selbstverständlich an der korrekten Position der vergangenen Periode ersetzt werden, d.h. in diesem Fall in der Periode $t-i$ aber nur dort. Handelt es sich um eine Relation mit einer exogenen unabhängigen Variablen der Form $X_t \rightarrow Y_t$, so ist hingegen die Variable in t zu erhöhen: $X_t = X_t' = X_t \cdot (1 + f)$ um eine Auswirkung von X_t auf Y_t an Y_t erkennen zu können, bzw. für exogene vorlaufende: $X_{t+i} \rightarrow Y_t$ mit $i > 0$ in der Periode $t+i$.

Die Durchführbarkeit der Erhöhung anderer Variabler hängt nun von dem zur Anwendung kommenden Simulationsprogramm ab – für endogene laufende und vorlaufende Variable muss dabei entweder im Programm eine Möglichkeit vorgesehen werden (etwa bei Artificial Life Programmen) oder die Möglichkeit bestehen die Gleichungen für einen Simulationslauf zu verändern (etwa bei TSP möglich). Bei verzögerten endogenen Variable würde es jedoch ausreichend sein, wenn man zwischen den Simulationsschritten die endogen verzögerte Variable ($Z_{t-i} \rightarrow Y_t$ mit $i > 0$), welche erhöht werden soll mit dem erhöhten Wert auszutauschen – in einem Sonderfall wäre dies auch ohne Unterstützung durch die Software

möglich: Wird nur der Effekt auf die erste überhaupt berechnete Periode betrachtet ($t = 0$) so kann der Wert von $Z_{t=i}$ leicht ausgetauscht werden, da er Teil der Startwerte ist.

Da jedoch zur Überprüfung des mittelfristigen Verhaltens des Modells (in der statischen Darstellung), sowie der weiteren Entwicklung dieser berechneten Änderungsraten (nicht-lineare Systeme können oftmals sowohl Wendepunkte als auch Knicks aufweisen wodurch diese Änderungsraten keineswegs konstant sein oder linear verlaufen müssen), mehrere Simulationsläufe in unterschiedlichen Perioden durchgeführt werden müssen, wird jedoch auch für die endogenen verzögerten Variablen eine andere Methode angewendet.

Für Modelle welche mit dem TSP Programm simuliert werden können, wurde daher eine einfache, aber effektive Umgehungsmethode für alle endogenen Variablen entwickelt, bei welcher die Formel, in welcher die Relation der Form $Z_t \rightarrow Y_t$ bzw. $Z_{t-1} \rightarrow Y_t$ bzw. Z_{t+1} , enthalten ist vollautomatisch umgeschrieben wird, wobei die endogene in der Relation aber unabhängige Variable Z_t (respektive Z_{t-i} , Z_{t+i}), durch $(Z_t + DZ_t)$ ersetzt würde, d.h. etwa

$$Y_t = a + b \cdot Z_t + X_t$$

für einen Simulationslauf durch die Gleichung

$$Y_t = a + b \cdot (Z_t + DZ_t) + X_t$$

ersetzt, wobei DZ_t (Delta-Z) eine neu eingeführte exogene Hilfsvariable ist, welche mit einer Zeitreihe übergeben wird, welche in allen Perioden null ist, außer in der einen Periode in welcher die Erhöhung stattfinden soll – in dieser Periode ist ihr Wert (DZ_t) dann gleich der Differenz zwischen Z_t und dem erhöhten Z_t' also gleich $Z_t \cdot f$, d.h. im Fall von $f = 1\%$ wäre $DZ_t = Z_t \cdot 0,01$, wodurch der neue erhöhte Wert von $Z_t' = Z_t + DZ_t = Z_t \cdot (1+0,01)$ wäre.

Durch diese Methode wird das System künstlich in einen leicht veränderten Zustand versetzt, welcher jedoch aufgrund der geringen relativen Abweichung, trotz dem einmaligen Eingriff in den Wert der endogenen Variablen, keine Folgen haben sollte, welche nicht im Modell vorgesehen wurden. D.h. das Modell bleibt in einer lokalen Umgebung um eine bekannte Lösung, welche keine unbeabsichtigten Folgen haben sollten, außer das Modell ist generell sehr instabil im Hinblick auf jegliche Veränderungen – dies ist dann jedoch auch eine Tatsache die in dem Modell begründet ist und daher auch wiedergegeben werden sollte. Falls sich eine Variabilität dieses Erhöhungsfaktors f (d.h. durch den Benutzer zu steuernd) als interessant erweisen sollte, könnte dies in einer zukünftigen Version der Software

möglicherweise realisiert werden, wobei dies jedoch nicht empfehlenswert scheint, da zu große Erhöhungen (bzw. Verminderungen) das System möglicherweise tatsächlich aus der Bahn werfen könnten - die in der Software gegenwärtig getesteten Einstellungen von $f = 1\%$ und $f = 10\%$ haben sich bisher hingegen als sehr erfolgreich, unproblematisch und realistisch erwiesen.

Auch hier stellt sich nun die Frage, in welcher Periode die Veränderung (Erhöhung) der, in der Relation unabhängigen Variablen, zu geschehen hat, was jedoch logischerweise analog zu der Erhöhung der beeinflussenden Variablen im exogenen Fall funktioniert (s.o.) – die Variable muss also einfach in jener Periode verändert werden, welche von der Berechnung der abhängigen Variablen auch berücksichtigt wird – würde die Anpassung der Variablen zu früh erfolgen, wie etwa in der Periode $t = -3$ bei der Relation $Y_t = f(X_{t-2})$ wobei Simulations-Beginn in der Periode $t = 0$ wäre, so würde die Veränderung, aufgrund des Laufs der Zeit, in dieser Relation niemals beobachtbar sein, da sie eine Periode zu früh erhöht wurde.

Berechnungen der dynamischen Analyse

Bei der dynamischen Analyse wird nun für jede im Modell vorkommende Relation eine separate Simulation durchgeführt, wobei jeweils nur die eine Variable erhöht wird, welche gerade betrachtet wurde und in einem ersten Schritt die Differenz(en) zwischen dem, bei einem unveränderten Simulationslauf erhaltenen Wert, und dem neuen Wert der von ihr direkt abhängigen Variable(n) berechnet wird (in der Software geschieht dieser Prozess selbstverständlich optimiert – d.h. alle direkt beeinflussten Variablen werden gleichzeitig evaluiert). Im dynamischen Fall wird daher bei jeder Simulation nur eine Periode lang simuliert, d.h. ein Simulationsschritt durchgeführt, wodurch, wie bereits erläutert, indirekte Beeinflussungen minimiert werden und eine detailliertere Analyse möglich ist.

Da es sich jedoch bei vielen untersuchten Modellen um nicht-lineare sowie ökonometrisch geschätzte Modelle handelt, kann davon ausgegangen werden, dass diese Effekte der gegenseitigen Beeinflussung von Variablen (simulierte (bzw. numerisch genäherte) kurzfristige direkte Relationen), nicht in jedem Fall über die Gültigkeitsdauer des gesamten Modells konstant sein werden (modellierete Strukturbrüche, ungenaue bzw. zu grobe ökonometrische Schätzung des Modells). Aus diesem Grund werden bspw. bei der dynamischen Analyse zusätzliche Simulationen durchgeführt, welche jedoch einige Perioden später angesetzt werden, welche wiederum nur eine Periode simulieren, wobei die Erhöhung

des Wertes der in der spezifischen Relation unabhängigen Variablen, parallel mit dem Beginn der Simulation (um die selbe Anzahl an Perioden) verschoben wird. Auf diese Weise wird die gesamte, für das Modell definierte, Spannweite des Gültigkeitszeitraum, mit Abständen der durchgeführten Simulationen, analysiert (Für sehr detaillierte Analysen könnte auch jede mögliche Periode analysiert werden, die Anzahl der dafür nötigen Simulationen steigt dadurch jedoch noch weiter an – in diesem Extremfall müssten bei effizienter Programmierung bereits mindestens Anzahl der Variablen im Modell mal der Anzahl der gültigen Perioden durchgeführt werden – für ein mittleres Modell also etwa $150 \cdot 30 = 4500$ Simulationsaufrufe, welche selbst jedoch viele einzelne Berechnungen durchführen müssen - im Idealfall so viele Berechnungen wie Gleichungen (=Zahl der endogenen Variablen in der Strukturform) – im schlimmsten Fall gleich noch mehrere Berechnungen (Iterationen) pro interdependenter Relation, bei Annahme von $2/3$ endogener Variablen also mind. 100, d.h. $4500 \text{ Simulationen} \cdot 100 \text{ Gleichungen} = 450\,000 \text{ Berechnungen}$ – was bei Durchführung mit einem externem Programm (bspw. wie TSP, aber auch jedem anderen) bereits eine recht hohe Zahl ist, d.h. meist >60 Minuten Berechnungen auf PC's).

Berechnungen der statischen Analyse

Die statische Darstellung (welche komplementär zu der dynamischen Darstellung gedacht ist – nicht als möglicher Ersatz) versucht nun mit sehr ähnlichen Methoden einen anderen Blickwinkel auf die selben Zusammenhänge zu bekommen. Dabei interessiert sie sich jedoch für den mittelfristigen Einfluss welchen die Variablen aufeinander haben, d.h. sie versucht den Blick von den detaillierten kurzfristigen und direkten Zusammenhängen abzuziehen und die, in der Gesamtheit der Struktur (also der Interaktion der unterschiedlichen Gleichungen) versteckten indirekten Effekte (vor allem die temporal indirekt wirkenden Effekte) zu betrachten. So wäre es möglich, dass eine bestimmte Modellvariable bei Betrachtung der direkten Beziehungen, bzw. der indirekten aber kontemporären Beziehungen (d.h. indirekt aber noch in der selben Simulationsphase beobachtbaren) einen stark positiven (d.h. steigernden) Einfluss auf einen andere benachbarte Variable hätte, d.h. eine Steigerung der unabhängigen Variable (wir untersuchen immer prozentuale Steigerungen – bspw. also 1%) verursacht eine prozentuell (große) Steigerung der abhängigen Variable. Dennoch könnte dieser Effekt durch andere, indirekt zeitlich verzögerte Effekte bereits ein bis zwei Perioden später wieder abgeschwächt oder verschwunden sein.

Die statische Analysedarstellung will nun genau diese indirekten Effekte, welche Näherungen der mathematisch formulierten Aussagen des Gesamtmodells repräsentieren, untersuchen. Dazu betrachtet sie nun einfach die Auswirkungen eines transitorischen Schocks über einen längeren Zeitraum als die dynamische Analyse, was dadurch erreicht wird, dass wie schon zuvor bei der dynamischen Analyse, eine einmalige Erhöhung der jeweiligen unabhängigen Variablen durchgeführt wird. Abweichend zur vorigen Methode wird nun mit diesem Szenario nicht nur eine einzelne Periode simuliert, sondern eine Anzahl an Perioden, beginnend mit der ersten Periode, ab welcher die Erhöhung zu tragen kam (wie auch bei der dynamischen Analyse). Dadurch werden alle indirekten Effekte, welche die Veränderung der Variablen über den Zeitraum einer Anzahl an Perioden, in der benachbarten Variable auslöst, bereits dadurch logisch kumuliert, dass nur der neue Wert der letzten simulierten Periode mit dem seinem ursprünglichen Wert verglichen wird. D.h. das System bestimmt selbst etwaige Verstärkungen, Abschwächungen oder Diskontierungen im Lauf der Zeit, wodurch auch vermieden wird eine künstliche Wertung der Zeit einzubringen, welche nichts mit dem Modell selbst zu tun hat. (Die Daten der dazwischen liegenden Perioden werden dabei zwar auch erfasst, aber im Moment nicht direkt verwendet – dies könnte in einer späteren Ausbaubversion jedoch möglicherweise überlegt werden.)

Konkret wird also wieder für jede vorkommende Relation des Modells eine Variable erhöht, eine Simulation durchgeführt, bei welcher eine für alle Modelle konstante Zahl an k Schritten simuliert wird – dabei wird die Differenz des Wertes in der letzten Periode festgehalten mit dem Wert in einem unveränderten Simulationslauf verglichen.

Die Frage wie viele Perioden simuliert werden müssen um alle indirekten Effekte erfassen zu können wurde bereits im Kapitel 2 eingehend besprochen (siehe etwa bei Abbildung 19: Mehrfach indirekte temporale Effekte in Graphen und Abbildung 21: Kumulation von messbaren Effekten in Modellen). Bei komplexen dynamischen Modellen mit intertemporalen Schleifen (d.h. Rückkoppelungen, welche erst nach einigen Perioden wieder ankommen) können niemals alle Effekte betrachtet werden, da es kein Ende gibt (strukturelle Zyklen), dadurch kann lediglich eine Größe, der temporale Breite des Zeitfensters, gewählt werden, welche zufriedenstellend erscheint. Dabei scheint die indirekte temporale Tiefe des Modells, welche der längsten temporalen Bahn im Repräsentationsgraphen des Modells entspricht, eine gute Basis zu sein, da sie angibt, wie viele Perioden es dauert bis alle Variablen, welche eine

indirekte Auswirkung haben können diese erstmals ausgeübt haben (zu diesem Zeitpunkt haben andere bereits mehrmals gewirkt – aber dies ist auch die Struktur des Modells welche wiedergegeben werden soll). Gegenwärtig ist diese Größe aus Gründen der besseren Verständlichkeit im Programm jedoch fix vorgegeben. Im VMMM Prototypprogramm werden hierbei meist Betrachtungsfenster (k) von 5 Jahren gewählt, d.h. 5 Perioden bei Jahresdaten, bzw. 20 Perioden bei Quartalsdaten, bzw. 60 Perioden bei einem Modell mit Monatsdaten simuliert – diese Zahl kann jedoch bei Bedarf geändert werden – dann müssen jedoch die Simulationen aller Modell neu durchgeführt werden, da diese sonst nicht mehr direkt vergleichbar wären.

Durch diese adaptive Betrachtung des selben Zeitfensters (immer in einer Anzahl an Jahren fixiert) ist es dadurch auch möglich die Implikationen von Modellen, welche sonst inkompatible Zeiträume betrachten (Jahre und Monate) gleichzeitig zu betrachten ohne alle Daten bzw. Strukturen aufzusummieren – was bei Quartals, bzw. Monatsdaten ohnehin nicht wirklich möglich wäre, da diese meist auf unterschiedliche saisonale Schwankungen eingehen, welche erst entfernt werden müssten um mit akkumulierten Jahresdaten umgehen zu müssen – einem in diesem Kontext sinnlosen Unterfangen, welches einen viel zu tiefen Eingriff in die Modelle darstellen würde, was mit Absicht nicht das Ziel der Arbeit ist, da dies keine neutrale Analyse der Modelle wäre – das Motto bleibt: „simply show the models“!.

Aus den selben Gründen wie bereits bei der dynamischen Analyse werden auch bei der statischen Analyse mehrere zeitlich verschobene Simulationsläufe gestartet, welche die sich möglicherweise im Lauf der Zeit ändernden Relationen erfassen sollen. Der Abstand zwischen den Startpunkten dieser Simulationsläufe wird dabei, unter der Voraussetzung ausreichender langer Datenreihen, derart gewählt, dass eine Anzahl von zehn Simulationsläufen gewährleistet ist. Als Alternativen könnte aber auch eine andere Zeitspanne, wie etwa die Simulationsdauer (k), oder eine noch kürzere Zeitspan gewählt werden, dies geschieht jedoch aus Gründen der Beschränkung der anfallenden Datenmengen und damit auch der Effizienz des Programms, sowie der leichteren Interpretierbarkeit der Ergebnisse, gegenwärtig nicht.

Eine weitere mögliche Entwicklungsstufe des Analysesystems könnte versuchen dem Benutzer die Möglichkeit zu geben diese mittelfristigen Auswirkungen auch für andere Szenarien als nur transitorische Schocks, d.h. von möglicherweise auch variablen Erhöhungen

über mehrere Perioden (d.h. mittelfristigen politischen Strategien), zu prüfen, was möglicherweise speziell für die Instrumente von Interesse wäre – diese Funktionalität würde jedoch ein vielfaches! der bereits für diese Version nötigen Berechnungen durchführen und ist daher nicht ratsam, und darüber hinaus einen erheblichen Aufwand in der Programmierung erzeugen, weshalb dies im Prototypen nicht vorgesehen werden konnte – aber für eine Erweiterungsprojekte theoretisch denkbar wäre.

Verwertung der Ergebnisse

Sowohl die statische als auch die dynamische Analyse verwenden nun die jeweils für sie simulierten Daten, welche zwar auf unterschiedliche Art gewonnen wurden und auch unterschiedliche Bedeutung – aber die strukturell gleichen Daten zurückliefern – auf die gleiche Weise. Dabei kommen zwei ähnliche Methoden zur Anwendung, welche grundsätzlich ökonomische Standardanwendungen sind, zum Einsatz, wenn diese aufgrund der Gewinnung der Informationen (Extraktion aus den Simulationen) selbstverständlich nur als, logisch verwandt mit den Methoden nach welchen sie benannt wurden, betrachtet werden können:

- Simulierte (transtemporale) Elastizitäten
- Simulierte (transtemporale) Multiplikatoren

Die Berechnung der (simulierten) Elastizitäten erfolgt dabei wieder separat für jede einzelne Relation (in der Form $X_{t\pm i} \rightarrow Y_t$ also aus einer Gleichung der Form $(Y_t = f(X_{t\pm i}, ..))$ nach folgender simplen Formel:

$$\varepsilon = \frac{Y'_t - Y_t}{Y_t \cdot f}$$

wobei Y'_t die simulierte beeinflusste Variable nach Erhöhung ist, Y_t die simulierte beeinflusste Variable vor Erhöhung (der Wert des unveränderten Simulationslaufs (des Referenz- durchlaufs)) und f der Faktor um welchen die Variable $X_{t\pm i}$ erhöht wurde.

Diese Elastizität ε gibt daher die dimensionslose Reaktion der abhängigen Variable Y_t auf eine Änderung von $X_{t\pm i}$ um den Faktor f an, wobei analog zu der allgemeinen Definition der Elastizität folgende Werte für ε möglich sind:

$0 < |\varepsilon| < 1$ Eine Änderung von X um 100 % bewirkt eine Y_t Änderung von unter 100 %,

$|\varepsilon| = 1$ Eine Änderung von X um 100 % bewirkt eine Y_t Änderung von exakt 100 %,

$|\varepsilon| > 1$ Eine Änderung von X um 100 % bewirkt eine Y_t Änderung von über 100 %,

Wobei ein positives Vorzeichen eine Erhöhung und ein negatives Vorzeichen eine Verringerung von Y_t bedeutet.

Die dynamische Analyse bedient sich nun dieser Ergebnisse direkt, wobei die statische Analyse aufgrund ihres eingeschränkten Blickwinkels und Zielsetzung jedoch nicht mehr zwischen einzelnen intertemporalen Instanzen unterscheiden kann sondern (ähnlich aber nicht gleich der in Kapitel 2 vorgestellten Methode) diese in einer gemeinsamen intertemporalen Variablen kumuliert. D.h. alle Instanzen einer Variablen $X_t, X_{t-1}, X_{t-2}, \dots$ werden in einer gemeinsamen Variablen X repräsentiert – dies ist unumgänglich, da nur mehr mittelfristige (transitive) Verbindungen betrachtet werden.

Die Berechnung der (simulierten) Multiplikatoren erfolgt dabei wieder separat für jede einzelne Relation (in der Form $X_{t\pm j} \rightarrow Y_t$ also aus einer Gleichung der Form ($Y_t = f(X_{t\pm j}, \dots)$) nach folgender simplen Formel:

$$m = \frac{Y'_t - Y_t}{X_{t\pm j} \cdot f}$$

wobei Y'_t die simulierte beeinflusste Variable nach Erhöhung ist, Y_t die simulierte beeinflusste Variable vor Erhöhung (der Wert des unveränderten Simulationslaufs (des Referenz- Durchlaufs)) und f der Faktor um welchen die Variable $X_{t\pm j}$ erhöht wurde.

Dieser Multiplikator m gibt daher das Verhältnis der absoluten Änderung von Y_t und der absoluten Änderung von $X_{t\pm j}$ um den Faktor f an., d.h. der Anzahl an Einheiten um welche sich Y_t bei Änderung von X um eine Einheit ändert – diese Maß ist daher nicht dimensionslos.

Diese in diesem Teilkapitel vorgestellten indirekten Einflüsse können auf diese Weise auch für nicht direkt benachbarte Variablen berechnet werden, d.h. es könnte für jede Variable ermittelt werden, welchen modellierten Einfluss sie auf jedes endogene Element des Systems - (jede endogene) Variable hat. Eine solche Methode ist in dem Artikel [Rengs_2003] im

Anhang zu finden, welche zusätzlich dazu die benachbarten Beziehungen zu evaluieren auch die Bedeutung der Variablen (als „system significance“ bezeichnet – wobei „significance“ nicht mit der statistischen Signifikanz sondern der Bedeutung für das System übersetzt wird), dies wird hier jedoch nicht durchgeführt, da die Betrachtung der benachbarten Relationen bereits sehr gute Ergebnisse liefert, kann jedoch in einer etwaigen späteren Fortsetzung des Projekts umgesetzt werden.

Der wichtigste Faktor dieser Ermittlung der Relationsintensität durch Simulation ist, dass dadurch sofort und ohne Umschweife auf einen Blick beurteilt werden welche mathematisch modellierten Aussagen ein Model (unabhängig von Beschreibungstexten oder Interpretation) über die Effektivität und den Sinn der einzelnen Variablen macht – und dies lediglich anhand der Fakten, d.h. der Ergebnisse welche die Simulation des Modells tatsächlich liefert.

Erläuterung der Hauptdarstellungen

Da der Großteil des funktionalen Prinzips der beiden Darstellungen „dynamische Strukturanalyse“ sowie der „statischen Strukturanalyse“ bereits im vorigen Teilkapitel (Netzwerkdarstellungen) erklärt wurde folgt hier nun nur noch eine kurze Erläuterung ihres Aufbaus und ihrer Möglichkeiten unter dem Gesichtspunkt der Visualisierung – analog zu den in Kapitel 3 vorgestellten Grundprinzipien, welche hier jedoch nicht erneut aufgezählt werden. Für eine eingehendere Beschreibung der Bedienung der Komponenten siehe in die Beschreibung des Prototypen [Unterluggauer_2003].

4.3 Dynamische Strukturanalyse

Inhaltliche Grundlagen der Darstellung

Zielsetzung

Die dynamische Strukturdarstellung soll eine interaktiv explorative visuelle Analyse der intertemporalen kausalen Strukturen (deshalb dynamische Darstellung) eines makroökonomischen Modells Elemente von Entscheidungsunterstützenden Modellen beachtet werden und erkenntlich sein. Zusätzlich zu der Übersicht soll hierbei eine interaktive

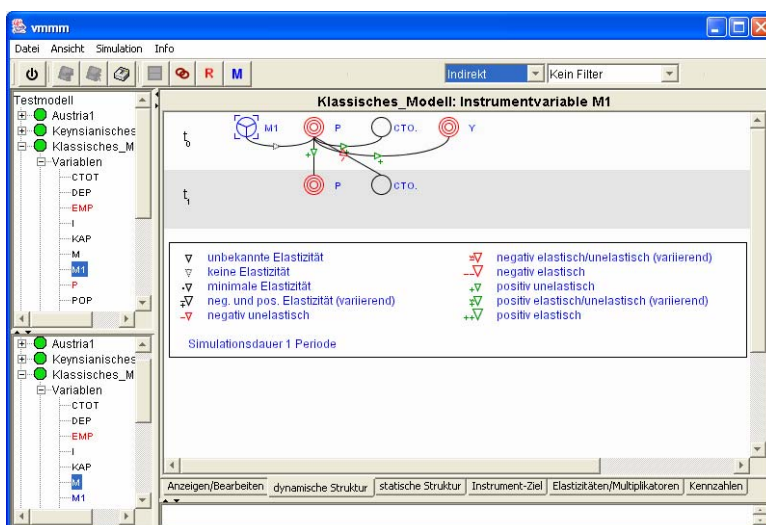


Abbildung 48: Dynamische Strukturdarstellung - VMMM Prototyp

Erklärung einzelner Relationen möglich sein. In einem weiteren Schritt soll es möglich sein die Zahl der angezeigten Relationen schrittweise interaktiv zu reduzieren um so die am stärksten wirkenden Größen identifizieren zu können – ohne jedoch dabei den Kontext zu verlieren.

Zielgruppe

Die dynamische Strukturanalyse ist für die Gruppe der Experten entwickelt, welche die genauen Zusammenhänge eines Modells erfassen möchten, dennoch ist sie als nachgelagerte Darstellung 2. oder 3. Instanz einzustufen (vgl. Beschreibung eines Benutzungsszenarios im vorigen Teilkapitel) . Die Eignung der Darstellung für Laien ist grundsätzlich eher gering und lediglich bei Verwendung der höchsten Filtereinstellung überhaupt empfehlenswert.

Invariante (visuelle Aussage)

Die Invariante der dynamischen Strukturdarstellung ist die detaillierte Abbildung der allgemeinen intertemporalen kausalen Strukturen eines makroökonomischen Modells.

Komponenten (transportierte Daten)

Zur vollautomatischen Erstellung der dynamischen Strukturdarstellung kommen die folgenden Datenkomponenten zur Anwendung:

- Intertemporale Variablen
 - Variablenname (immer angezeigt)
 - Variablentyp (immer angezeigt)
 - Variablenbeschreibung (nur als Kontextdarstellung)
- Gerichtete intertemporale und statische Relationen
 - Relationen
 - Art und Stärke der relationalen Beeinflussung
 - Textuelle Beschreibung der Gleichungen
- Zeit
 - Diskrete Zeitkomponente (relative Periodendifferenz)

Konstruktionsgrundlagen der Darstellung

Imposition

Um den kurzfristigen diskreten Lauf der Zeit in dynamischen makroökonomischen Modellen im Sinne einer konstante Differenz der Perioden zwischen den Variablen (durch Lags und Leads) vernünftig abbilden zu können wurde die dynamische Strukturanalyse so konstruiert, dass sie zwar aussieht wie ein Netz, und die üblichen Elemente eines Netzes verwendet, von der Verwendung der räumlichen Achsen her jedoch als Impositionsgruppe Diagramm zu klassifizieren ist. Dabei werden die beiden räumlichen Achsen als ordinale Zeitdimension der relativen Periodendifferenz zwischen den verbundenen Variablen (nach Mackinlay's Notation: Modellzeit $\rightarrow O_Y$) und als nominale Auflistung der Modellvariablennamen (X-Achse: Variablenname $\rightarrow N_X$) in einer rechtwinkligen Konstruktion eingesetzt, d.h. der Impositionstypus ist rechtwinkelig. (Selbstverständlich könnten die Variablennamen aufgrund der alphanumerischen Sortierbarkeit als ordinal betrachtet werden, diese repräsentiert jedoch keine Sortierung aufgrund von Modelllogik, weshalb sie weiterhin als nominal eingestuft bleiben – tatsächlich erfolgt die Positionierung aufgrund eines heuristischen Algorithmus welcher die Zahl der Überschneidungen zu minimieren versucht.)

Es kommen zwei verschiedene Fleckentypen zur Implantation, analog zu den Komponenten eines Netzwerks, d.h. die Knoten werden als punktförmige Flecken realisiert, die Kanten werden als ebenfalls punktförmig implantiert, da ihr Ausgangs- und Endpunkt zwar deterministisch von der Position der beiden Knoten abhängt die sie verbinden, ihr Verlauf jedoch theoretisch frei festgelegt werden kann (gerade Verbindungen, halbelliptische Verbindungen kommen zum Einsatz – möglich wären aber auch unregelmäßige, freihängig gezeichnete Verbindungen, welche jedoch aufgrund der Darstellung in Echtzeit (sehr rechenintensiv), sowie der Übersichtlichkeit und Nachvollziehbarkeit der Darstellung, nicht in Frage kommen.) und zur Darstellung einer weiteren Dimension verwendet werden könnte, was jedoch aufgrund der bei großen Modellen möglichen hohen Anzahl an Verbindungen nur bedingt realisiert wurde, da sie nur mehr verwirren würde – der Verlauf der Kanten soll jedoch intuitiv richtig mit den verbundenen Knoten assoziiert werden können. (Bei einigen aktuellen und auch bereits Netzwerkdarstellungen in der Praxis ist dies schon aufgrund der hohen Zahl der Knicke in den Linien nicht mehr der Fall, ob wohl diese die Lesbarkeit vereinfachen wollen (zur Vermeidung von Kantenüberschneidungen) jedoch darin resultieren

dass die Linie bewusst statt intuitiv nachverfolgt werden muss – deshalb wurden in dieser Darstellung nur gerade, bzw. max. halbelliptische Kanten verwendet)

Visuelle Betonung der Imposition

Zusätzlich zu einer Beschriftung der Achsen (Variablennamen, relativer Zeitabschnitt) wird die visuelle Identifizierbarkeit der logisch äquidistanten Zeitschritte durch Variation der Hintergrundfarbe erreicht. D.h. die diskreten Zeitpunkte auf der Y-Achse bilden durch abwechselnde dezente Helligkeitsvariation des Hintergrundes (weiß, hellgrau, weiß, hellgrau, weiß,..) eine Art Fenster dieser relativen temporalen Periode, in welcher die in dieser Periode gleichzeitig ablaufenden modellierten Beeinflussungen erkennbar sind. Diese Unterstützung war auch deshalb sinnvoll, da die logisch gleich breiten Zeitabschnitte (in diesem Fall gleich hohen), bei Darstellung unterschiedlicher Abläufe komplexer Modelle, unter Umständen unterschiedlich hoch dargestellt werden müssen und so für den ungeübten Beobachter sonst möglicherweise nicht automatisch als eine gemeinsame Einheit wahrgenommen werden könnten – dies ist jedoch sehr unwahrscheinlich, da die Knoten eines Zeitabschnittes (einer Periode) dennoch immer in einer Linie durch den gleichen räumlichen Y-Achsenabschnitt aufgereiht sind. Die Variation der Höhe der Zeitfenster ist trotz möglicher aber unwahrscheinlicher Fehlwahrnehmung (keine Indikation dafür in den Tests – darüber hinaus Darstellung auch für Fachleute entworfen), leider unumgänglich, da es vorkommen kann, dass einzelne Perioden komplexere Abläufe haben (etwa die t_0 Periode, wenn die Variable als laufende zum Einsatz kommt einige statische bzw. auch interdependente Relationen vorkommen) – würden alle Perioden etwa mit dieser größten Höhe (auf der räumlichen X-Achse – die wohlgermerkt nur als ordinale Achse verwendet wird – nicht als quantitative) dargestellt, so würde die gesamte Darstellung viel zu groß sein, und darüber hinaus eine viel zu hohe Anzahl an Leerräumen aufweisen (welche ebenfalls zu vermeiden sind). Daher wurde dieser Kompromiss (der Helligkeitsvariation des Hintergrundes) gewählt, um die erreichbare Übersichtlichkeit zu maximieren.

Visuelle Eigenschaften der Flecken

Wie bereits besprochen kommen zwei qualitativ unterschiedliche Fleckentypen zum Einsatz – Kanten und Knoten – welche mit unterschiedliche visuelle Ausprägungen versehen wurden, wobei selbst die Variation der Fleckenmuster nicht willkürlich sondern unter Beachtung der visuellen Eigenschaften, im Hinblick auf eine Maximierung der korrekten Wahrnehmbarkeit der Abläufe des Modells, untersucht und gezielt entwickelt wurde.

Visuelle Metapher Knoten

Zur Beschreibung der dynamischen Strukturen kommt die visuelle Metapher des Netzwerks (Graphen) zur Anwendung, wobei die Variablen grundsätzlich als Kreis dargestellt werden, die gerade im Fokus der Analyse befindliche Variable ist dabei dezent visuell durch eine Umgebendes Teilrechteck markiert, welches die selbe Farbe wie der restliche Knoten hat.

Die effektive visuelle Variable der Farbe kommt dabei in Verbindung mit jener des Musters zur Anwendung um den Variablentyp redundant visuell zu kodieren, wobei gezielt geeignete visuelle Metaphern (Icons) mit geeigneten assoziierten Variablen zum Einsatz kamen, welche ein intuitives Verständnis ermöglichen:

	Endogene Variable	Standardfall	Keine Betonung
	Exogene Variable	Häufiger Fall	Intuitive Ikonisierung des sprachlich markanten X in eXogen
	Zielvariable	Seltener Fall Wichtige Variable	Zielscheiben Metapher Zusatzbetonung mittels roter Farbe
	Instrument	Sehr Seltener Fall Wichtige Variable	Lenkrad Metapher Nachrangige Betonung blauer Farbe
	Ausgewählte Variable	Eine Variable Nicht Prior	Dezente Umrandung der gerade fokussierten Variable (Zusatz)

Tabelle 6: Knotenelemente in den Graphendarstellungen

Durch den Einsatz der Signalfarbe rot in Verbindung mit der Zielscheibenmetapher als einzige derart hervorstechenden Knotentyp erfolgt eine gezielte unterbewusste (d.h. automatische) Fokussierung auf die entscheidenden Zielvariablen, wodurch auch eine selektive Wahrnehmung sehr effizient möglich ist.

Visuelle Metapher Kanten

Die visuelle Kodierung der Modellelemente der Relation, welche einseitig beeinflussende Verbindungen zwischen den Variablen repräsentieren, erfolgt nun als Kante, welche je nach temporaler Entfernung entweder direkt oder gebogen ist. Ein Nebenprodukt der effizienten Darstellung der Kanten ist, dass kontemporäre Relationen (laufende unabhängige Variable) zwischen Variablen als Halbellipse dargestellt werden müssen (sie schneiden sonst andere Variablen), intertemporäre Relationen (Lags, Leads) hingegen als gerade Striche dargestellt werden, d.h. die visuelle Variable Form der Kante (gerade, halbeliptisch) kodiert die nominale Komponente des temporalen Typ der Relation (kontemporär, intertemporär) (d.h. Relationstyp $\rightarrow N_{\text{Form}}$) – dies ist eine redundante Kodierung, da diese Eigenschaft auch bereits durch den Verlauf der Linie bezüglich der logischen Y-Achse – welcher durch den Helligkeitsunterschied des ausgehenden und eingehende Zeitfensters noch verstärkt wird.

Die zuvor aus der Simulation (tausenden Simulationsläufen) für jede einzelne Relation (und damit Kante) und für mehrere versetzte Perioden berechnete Elastizität bzw. Multiplikator wird nun mittels einer Heuristik in ein Gewicht umgewandelt, welches dem gemittelten Wert der einzelnen zeitlichen verschobenen Elastizitäten/Multiplikatoren der selben Relation entspricht insofern diese nicht zu stark schwankten. War die Standardabweichung dieses Mittelwerts zu hoch, d.h. fiel der Wert im Lauf der Zeit in mehrere, der für die Elastizitäten/Multiplikatoren definierten 7 Bereiche ($(-\infty; -1,01]$, $[\sim -1]$, $[-0,99; -0,01]$, $[\sim 0]$, $[0,01 - 0,99]$, $[\sim 1]$, $[1,01; \infty)$), so wurde dieser, so das Vorzeichen nie schwankte, in den Bereich eingestuft in dem sein Mittelwert lag – schwankte jedoch auch das Vorzeichen, so wurde er als variierend eingestuft.

Diese Einteilung bildet nun die Gewichtung der Kanten, welche anhand der hier identifizierten Kategorien visuellen Elementen – ikonischen Pfeilrepräsentationen – in die Darstellung integriert wurden.

Um dies Gewichte visuell zu kodieren wurde erneut Farbe in Verbindung mit einer Mustervariation, jedoch diesmal in zusätzlicher Verbindung mit der Größe gewählt, wobei

wieder gezielt geeignete visuelle Metaphern (Icons = Symbole) welche kleine Pfeile symbolisieren die auf dem Mittelpunkt der Linien aufgebracht werden und so gleichzeitig Richtung und Gewichtung der Kanten (Relationen) abbilden. Dabei wurde die Bedeutung bei Betrachtung von Elastizität oder Multiplikator möglichst vergleichbar gewählt um nur einen Satz an Elementen verstehen zu müssen (sonst Verwirrung vorprogrammiert):

<ul style="list-style-type: none"> ▽ unbekannte Elastizität ▽ keine Elastizität •▽ minimale Elastizität ±▽ neg. und pos. Elastizität (variierend) -▽ negativ unelastisch 	<ul style="list-style-type: none"> ≠▽ negativ elastisch/unelastisch (variierend) --▽ negativ elastisch +▽ positiv unelastisch ±▽ positiv elastisch/unelastisch (variierend) ++▽ positiv elastisch
<ul style="list-style-type: none"> ▽ unbekannter Multiplikator ▽ keine Multiplikatorwirkung •▽ minimale Multiplikatorwirkung ±▽ neg. und pos. Multiplikatorwirk. (variierend) -▽ $-1 \leq \text{Multiplikator} < 0$ 	<ul style="list-style-type: none"> ≠▽ Multiplikator < 0 --▽ Multiplikator < -1 +▽ $0 < \text{Multiplikator} \leq 1$ ±▽ $0 < \text{Multiplikator}$ ++▽ $1 < \text{Multiplikator}$

Abbildung 49: Legende der auf Kanten eingesetzten Pfeile im VMMM Prototyp

Dabei wurde die Anzahl der unterscheidbaren Ausprägungen mit zehn Elementen möglichst gering gehalten, was zwar etwas mehr als die magischen 7 ($\pm 2 = \text{max. } 9$) sind, den wird jedoch durch die logische Kombination von Farbe, Größe und logischer Form (eindeutiger Symbolik) derart entgegengewirkt, dass die tatsächliche Wahrnehmbarkeit viel einfacher ist, als die Unterscheidung zwischen zehn unterschiedlichen Elementen ist.

Die Farbe kodiert dabei den Anteil des Vorzeichens der Gewichtung (Positive (=Grün) oder Negative (=Rot) Elastizität/Multiplikator) zusätzlich zu einem plus oder minus Zeichen neben dem Pfeil (Formvariation), wobei die Richtung des Pfeils auf der Kante die Wirkungsrichtung angibt (d.h. ob nun $A \rightarrow B$ oder $B \rightarrow A$ repräsentiert wird). Zusätzlich sind nicht (Form = Punktiert) oder nur sehr schwach wirkende, bzw. Relationen deren Elastizität im Lauf der Zeit variiert, mit der Standardfarbe schwarz gefärbt um die schwachen oder uneindeutigen Wirkungen visuell zu defokussieren.

Die Höhe des Betrags der Elastizität/ des Multiplikators wird nun durch die Größe des Pfeils repräsentiert, wobei nur 3 Abstufungen zum Einsatz kommen welche mit der Einteilung der Elastizität korrelieren (elastisch/einheitselastisch/unelastisch).

Zusätzlich ist sowohl das Vorzeichen als auch der Betrag nochmals in der Form des Pfeils mit den dafür korrespondierenden Zeichen kodiert, wobei etwa zwei Plus ++ eine stark positive Wirkung angeben.

Die Verwendung von Rot und Grün gemeinsam ist in dieser Hinsicht nicht als problematisch zu sehen, da die Helligkeitswerte sich unterscheiden, wodurch selbst Personen mit Rot/Grün Wahrnehmungsschwäche diese unterscheiden können.

Interaktive Elemente

Ein entscheidender Teil der Darstellung wird von den folgenden interaktiven Komponenten gebildet, deren Funktionalität selbstverständlich nicht (mit vertretbarem Zeitaufwand) auf analogen Medien reproduziert werden kann:

- Kontextsensitives Detailfenster
- Stufenweiser Kantenfilter
- Stufenweiser Knotenfilter

Kontextsensitives Detailfenster

Eine der hilfreichsten interaktiven Strukturen wird von dem kontextsensitiven Detailfenster gebildet, welches alle für eine Kante (Relation) relevanten Informationen in der Darstellung verfügbar macht ohne diese jedoch permanent anzeigen zu müssen:

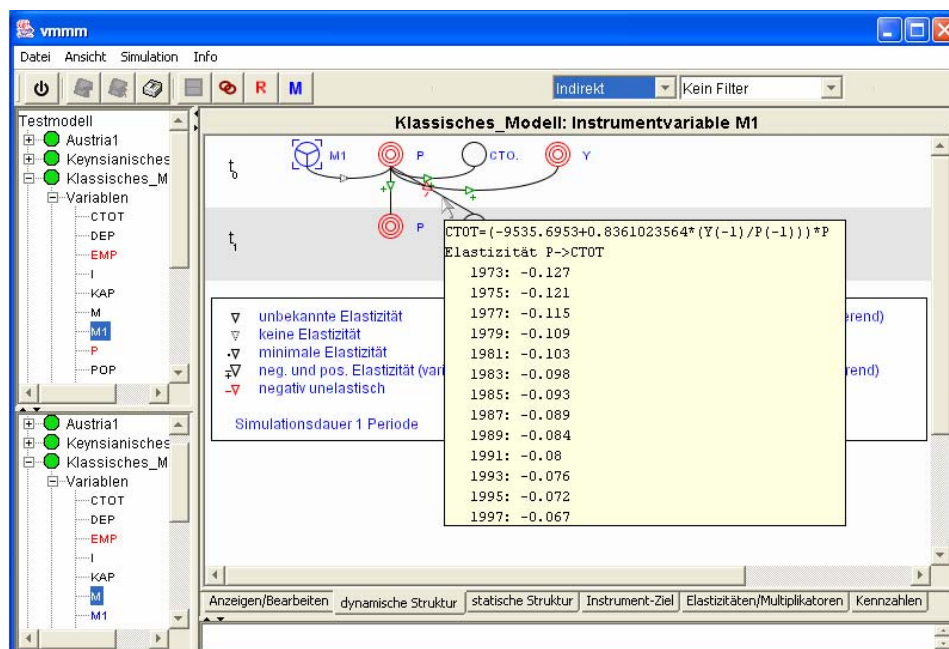


Abbildung 50: Kontextsensitive Detailanzeige in der dynamischen Strukturanalyse

Sobald sich der Benutzer einige Sekunden still mit der Maus über einer beliebigen Kante verharret, wird knapp neben der Maus und dadurch der Kante eine Detailanzeige eingeblendet, welche sowohl anzeigt, aus welcher Gleichung die Relation entstammt, als auch alle Werte der Elastizitäten/Multiplikatoren, welche zu der akkumulierten Bewertung der Kante geführt haben. Dadurch kann eine sehr hohe Zahl an Informationen zur ständigen Verfügung gehalten werden ohne jedoch bei deren Anzeige die Übersicht (Überblick&Detail) oder den Fokus zu verlieren.

Als mögliche Erweiterung in einer zukünftigen Ausbauphase wurde angedacht, dass diese kontextsensitive Detaildarstellung statt der textuellen Auflistungen der zeitlichen Entwicklung der Elastizitäten/Multiplikatoren diese Zeitreihe als Histogramm grafisch darstellt, wodurch die Zusammenhänge auch in der explorativen Nutzung noch leichter visuell dargestellt und dadurch noch leichter beurteilt werden könnten. Leider ist die Darstellung graphischer Elemente in einer solchen eingeblendeten Box aus softwaretechnischen Gründen jedoch nicht in dieser Version realisierbar, da es eines enormen, in keinem (linearen) Verhältnis zum Effekt stehenden, programmiertechnischen Aufwandes bedürfte, welcher gegen eine Realisierung im VMMM Prototyp sprach.

Stufenweiser Kantenfilter

Da aus großen Modellen auch große Darstellungen resultieren, und nicht für jede Fragestellung die Betrachtung aller Knoten bzw. Kanten nötig ist – auch bei einer gewöhnlichen Modellanalyse werden nicht immer alle Gleichungen und Datenreihen auf einmal betrachtet – kann es nötig werden die Anzahl der angezeigten Kanten zu reduzieren. Etwa um die stärksten (positiven oder negativen) Einflüsse sehen zu können – ohne sich dabei von den für die Fragestellung nicht relevanten Größen ablenken zu lassen. Daher stand eine Reihe von Defokussierungstechniken zur Debatte – es zeigte sich jedoch, dass alle Techniken (selbst SDOF), welche die Verbindungen nicht völlig ausblenden, bei komplexen Modellen immer noch einen zu intensiven visuellen Eindruck hinterließen, da der Grad Vernetzung der Variablen sowie die Zahl der Verbindungen (d.h. die Komplexität) zu hoch ist.

Aus diesem Grund wurde entschieden eine stufenweise Interaktive Filterung (im Sinne der Entfernung) der Kanten auf Basis der Gewichte der Kanten zu ermöglichen. Dabei werden jedoch nur die Kanten entfernt, die Knoten verbleiben um einen etwaigen Kontextverlust durch die komplette Entfernung der Knoten durch visuelle Ähnlichkeit der vorher/nachher Situation zu ermöglichen – auch die Position der verbleibenden Knoten bleibt dadurch konstant. Die möglichen Einstellungen ergeben sich daher aus den Gewichtungsstufen:

- Kein Filter
 - Alle Verbindungen anzeigen
- Keine Wirkung
 - Verbindungen ausblenden die keine oder wechselhafte Wirkung haben
- Minimale Wirkung
 - Zusätzlich Verbindungen ausblenden die nur minimale Wirkung haben
- Keine Starke Wirkung
 - Nur mehr Verbindungen mit starker Wirkung anzeigen

Sieht eine Darstellung vor der Anwendung des Filters etwa so aus:

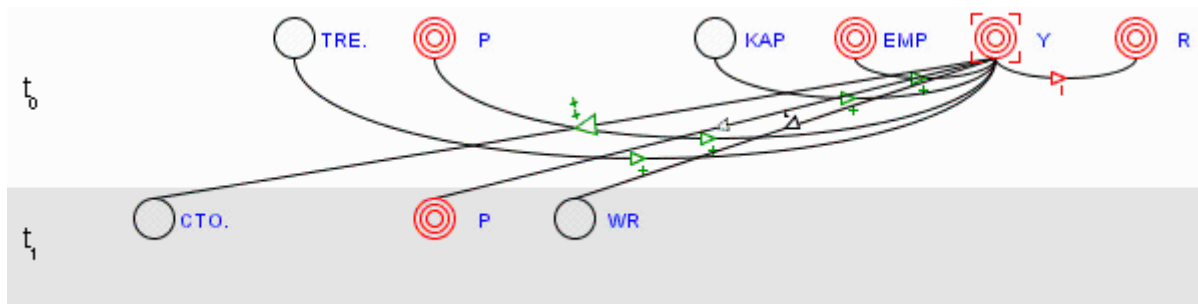


Abbildung 51: Kein Filter in Anwendung (vorher)

So ergibt sich nach Anwendung des stärksten Filters folgendes Bild:

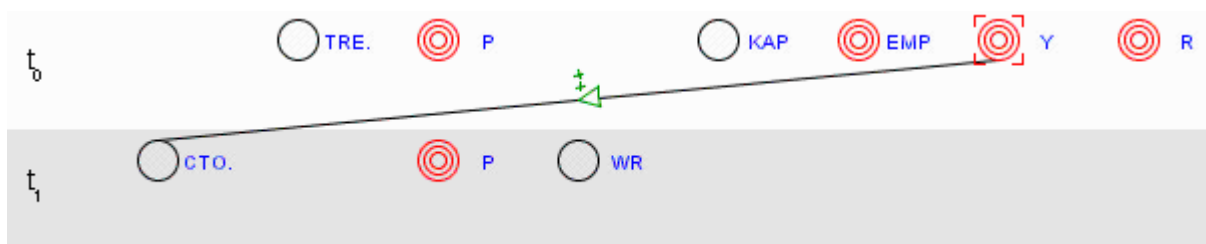


Abbildung 52: Stärkste Filtereinstellung lässt nur stark wirkende Variablen über

Die Anzahl der Filterstufen noch weiter zu unterteilen um den Auswahlprozess noch detaillierter zu gestalten, wäre zwar eine theoretische Möglichkeit, die jedoch verworfen wurde da eine feinere Filterung visuell sonst nicht direkt nachvollziehbar wäre (der implizite Einsatz der temporalen Dimension der Darstellung, d.h. dem visuellen Stimulus der Bildänderung bei Betätigung des Filters, wurde vorerst als nicht ausreichend eingestuft, da der Bildaufbau nach Filterung nur bei mittleren Modellen ohne zeitliche Verzögerung geschieht – könnte jedoch in einer zukünftigen Version zum Einsatz kommen, da theoretisch viel versprechend), d.h. da die Pfeile nur vier Gewichtungsstufen repräsentieren, und auch die gesamte Gewichtungsheuristik bereits auf diese Abstufungen ausgerichtet wurde, daher auch vier Filtereinstellungen.

Stufenweiser Knotenfilter

Bei einigen Fragestellungen sind jedoch nicht einmal alle Knoten relevant, d.h. müssen nicht alle Variablen angezeigt werden, weshalb eine weitere Möglichkeit entwickelt wurde nur eine Teilmenge der Knoten anzuzeigen. Daher werden auch keine Platzhalter für die Variablen benötigt, wodurch die Größe der Darstellung generell auf das nötige Maß reduziert werden kann, und so ein leichter Überblick selbst über ausgewählte detaillierte Abläufe gewonnen werden kann. Die Darstellung wird daher immer im Kontext der fokussierten (d.h. in der Navigation ausgewählten) Variable angezeigt und um sie herum aufgebaut. Dabei kann nun in Stufen entschieden werden, wie weit die zu der Variablen führenden Verbindungen und Knoten zurückverfolgt werden sollen, woraus die möglichen Einstellungen des Filters resultieren:

- Direkt
Nur Knoten und Verbindungen werden angezeigt, die direkt mit dem fokussierten Knoten in Verbindung stehen.
- Indirekt sowie 2*Indirekt
Nur Knoten und Verbindungen werden angezeigt, deren kausale Entfernung (im Graphen des Modells) eins, respektive zwei beträgt. (d.h. ein, resp. Zwei Knoten dürfen dazwischen liegen)
- Gesamtmodell
Alle Knoten und Verbindungen werden angezeigt

- Instrument/Ziel

Nur die Knoten und Kanten des Gesamtmodells werden angezeigt, welche Instrumente und Ziele, und deren Verbindung zur gerade fokussierten Variablen, sowie ihre direkten Nachbarn

Hier nur ein kurzes Beispiel einer neu arrangierten (knotengefilterten) Darstellung im Modus Instrument/Ziel (r2) mit Fokus auf CTOT, aus dem klassischen Modells (Anhang):

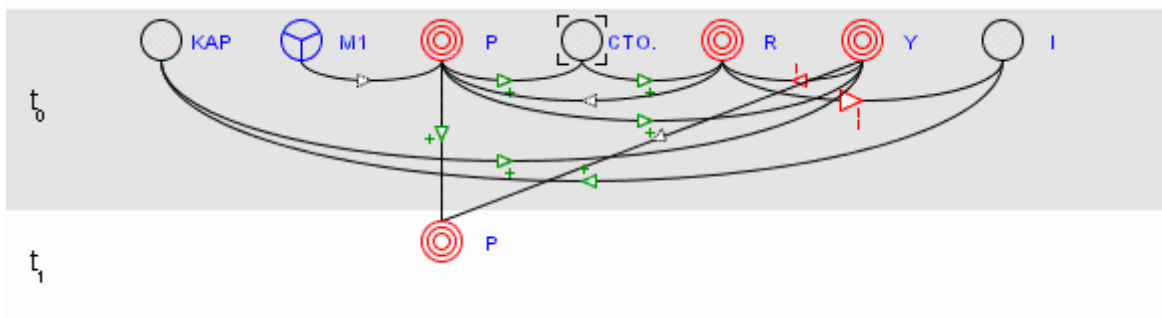


Abbildung 53: Knotenfilter im Modus Instrument-Ziel (r2) mit Fokus auf CTOT

Erläuterungen

Um bei visuellen Suchaufgaben (selektive Wahrnehmung) in der Darstellung auch eine serielle „Lesbarkeit“ zu gewährleisten zeigt die Darstellung unter dem letzten Zeitabschnitt immer auch eine Legende an, welche jedoch nur sofort (ohne scrollen) sichtbar ist wenn die Darstellung nicht zu groß ist, bzw. bei Exploration großer Strukturen der Bildausschnitt gerade in dem unteren Bereich der Darstellung liegt. Dies wurde auf diese Weise realisiert um einen Ausdruck (auf Papier) zu ermöglichen ohne die Legende zu verlieren, sodass zumindest ein Teil der Informationen ausgedruckt werden kann – denn die Darstellung auf Papier kann die wichtigen interaktiven Elemente nicht zur Verfügung stellen, wodurch die Effizienz der Darstellung extrem eingeschränkt ist.

Zur Beurteilung der in dieser Darstellung entstehenden (elementaren) visuellen Muster, können und sollen die Erklärungen möglicher ökonomischer Strukturen im speziellen jene anhand der Netzwerkdarstellungen (Graphen) ökonomischer Modelle aus Kapitel 2 herangezogen werden. Dennoch ist eine korrekte Interpretierbarkeit der Darstellungen für Fachleute auch intuitiv möglich, im schlimmsten Fall, d.h. bei vorheriger Unkenntnis von

Netz Darstellungen wie etwa Flussdiagrammen oder Graphen ist eine kurze Anpassungszeit nötig, welche durch diese Erläuterungen jedoch sehr schnell überwunden werden können.

Um einen besseren Eindruck über das Aussehen zu bekommen betrachten wir daher kurz das Beispiel der direkten Verbindungen der Variablen *EMP* im klassischen Beispielmodell (siehe Anhang), wobei unter anderem *EMP* und *Y* als Ziele definiert wurden:

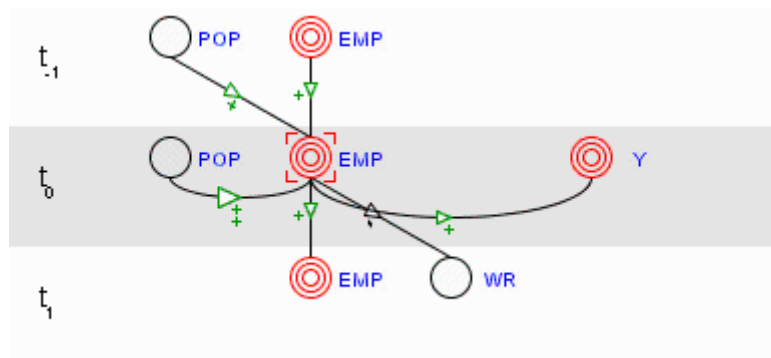


Abbildung 54: Beispiel der direkten Einflüsse von *EMP* in der dynamischen Analyse

Die visuelle Aussage dieses Modellausschnitts ist daher einfach zu erkennen: das im Fokus befindliche EMP_t wird positiv beeinflusst von POP_{t-1} , sich selbst in der Vergangenheit EMP_{t-1} , sowie stark beeinflusst vom gegenwärtigen POP_t (d.h. wegen des Vorkommens von POP_{t-1} und POP_t vermutlich durch den Zuwachs von *POP* zwischen $t-1$ und t). EMP_t selbst übt nun einen positiven Einfluss auf Y_t aus und hat theoretisch einen Einfluss auf WR_{t+1} , welcher jedoch selbst prozentuell gesehen (in WR_{t+1}) vernachlässigbar ist (Wobei WR_{t+1} ein normaler Lag ist (Richtung beachten) aufgrund dessen, dass er jedoch auf EMP_{t-1} blickt, d.h. durch eine Gleichung der Form $WR_t = f(EMP_{t-1})$ repräsentiert, erst eine Periode nach EMP_t davon beeinflusst wird. D.h. alle Zeitindizes der Achse müssen immer kausal relativ zum Fokus der Betrachtung gesehen werden). Kurz gesagt wird also die Beschäftigung in diesem sehr einfachen Modell durch einen Zuwachs der Bevölkerung erhöht, wobei sie auf ihrem Vorjahreswert aufbaut (d.h. *EMP* ist vermutlich eine Stockgröße), wobei ein Anstieg der Beschäftigung das BIP (*Y*) bereits im gleichen Jahr erhöht und im nächsten Jahr einen winzigen (praktisch null) Einfluss auf *WR* hat – egal wie die Formel auch aussehen mögen – faktisch, d.h. bei Berechnung der Formeln ergibt sich oft ein anderes Bild als der erste Eindruck der Formeln wäre – der Mensch ist kein Computer und kann eben nicht alle Implikationen sofort abschätzen (auch wenn Experten dies wahrscheinlich schon beim manuellen Durchlesen der Gleichungen und Daten des Modells sehen könnten) – diese Darstellung externalisiert diese Vorgänge und zeigt was das Modell nun mathematisch

tatsächlich aussagt. Im Falle von unterschiedlichen, möglichen detaillierten Interpretationsmöglichkeiten, wie etwa der Frage ob nun bei der Bevölkerung nun tatsächlich das Wachstum ($POP_t - POP_{t-1}$ also ΔPOP) betrachtet wird oder ob hier ein anderer, möglicherweise auch nichtlinearer Zusammenhang besteht, müsste nun bei einer analogen Darstellung (einem Ausdruck) erneut die Liste der Gleichungen betrachtet werden (diese kann bei großen Modellen sehr lang sein), bzw. gar eine textuelle Beschreibung eines Modells durchsucht werden (welche möglicherweise noch viel länger ist) in der die Formeln nur sporadisch zwischen dem Text eingebaut sind. Hier kommt der Vorteil der Interaktivität nun erneut zu tragen, da eine einfache Bewegung der Maus genügt:

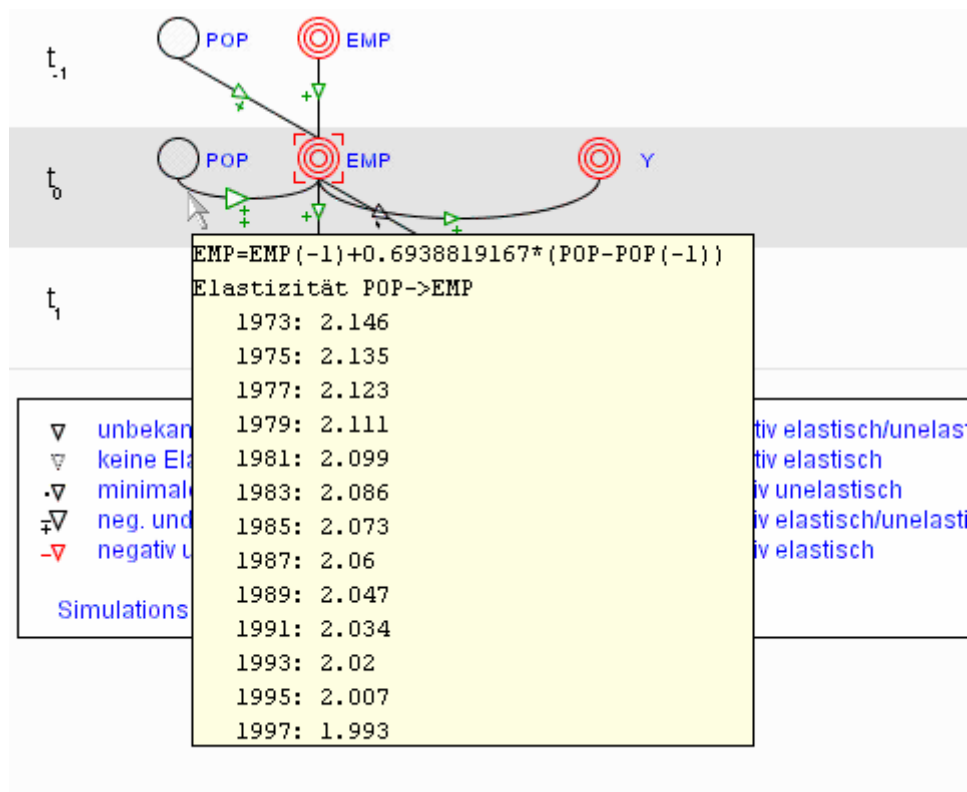


Abbildung 55: Minimierung der Suchzeiten von Details ohne Kontextverlust im VMMM

Womit die Frage sofort beantwortet ist – es wird tatsächlich der Bevölkerungszuwachs betrachtet und die Beschäftigung ist tatsächlich eine selbstabhängige Stockgröße – ohne jedoch den Kontext der restlichen Analyse jemals zu verlieren. (Die Schreibweise der Formeln ist hier wieder im TSP Format) Zusätzlich kann auch die konstante Natur der Relation der Variablen mittels der Angabe der Simulationsergebnisse der Elastizität – auch bei Modellen bei welchen keine Gleichungen verfügbar wären – leicht erkannt werden – wobei diese speziell für die Relation zwischen den beiden Variablen POP_t und EMP_t errechnet ist.

Die elementare Erkenntnis dieses Beispiels ist nun, dass unabhängig davon ob die Aussagen des Modells in obigen Beispiel nun für sinnvoll befunden werden, etwa ob die Beschäftigung tatsächlich derart stark vom Bevölkerungsanstieg abhängt oder nicht, das Verständnis der Behauptung des Modells, selbst für begabte Laien, aber jedenfalls für Experten intuitiv und sofort möglich ist. Daher ist auch eine Kritik an den Aussagen im groben (allgemeine Modellweite Aussagen) sofort und intuitiv möglich.⁴³

⁴³ An dieser Stelle muss erneut angemerkt werden, dass die Aussagen des hier dargestellten Modells nicht Inhalt dieser Arbeit sind, sondern lediglich als Beispiel von Prof. Hanappi zusammengestellt wurden.

4.4 Statische Strukturanalyse

Die in der statischen Strukturdarstellung verwendeten Elemente (Interaktive Elemente) sowie die visuellen Elemente (Kanten/Knoten) sind mit jenen der dynamischen Analyse identisch, lediglich die Zusammensetzung und Zielsetzung der Darstellung, sowie ihre Interpretation ist eine andere. Deshalb wird die Beschreibung der statischen Analyse diese Elemente nur dort erneut ansprechen wo sie andere Bedeutungen haben und auch sonst nur mehr einen allgemeinen Überblick über die Darstellung geben.

Zielsetzung

Die statische Strukturdarstellung soll eine interaktiv explorative visuelle Analyse der allgemeinen mittelfristigen (transtemporalen) kausalen Strukturen eines makroökonomischen Modells ermöglichen, welche als zeitlose quasi-statische angesehen werden könnte (deshalb statische Darstellung – treffender wäre jedoch transtemporale Analyse – dieser Begriff würde jedoch kaum jemandem Aufschluss über die Funktion geben). Dabei sollen auch die zentralen (aber dennoch nur die grundlegendsten) Elemente von Entscheidungs- unterstützenden Modellen beachtet werden und erkenntlich sein. Zusätzlich zu der Übersicht soll hierbei eine

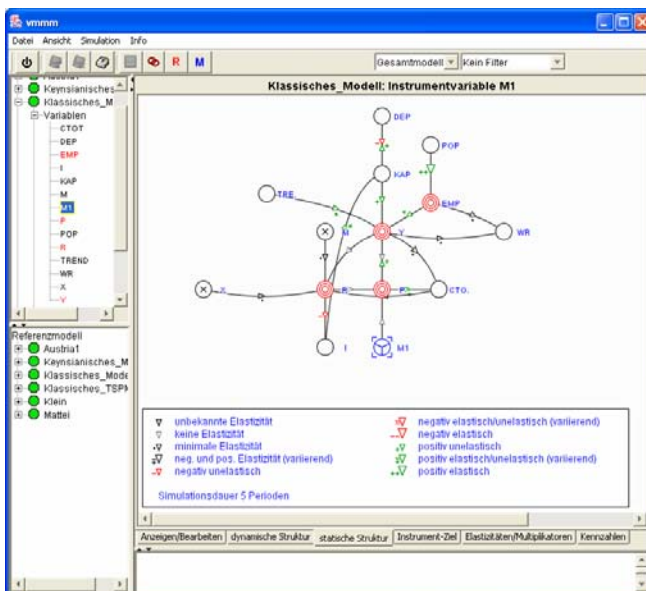


Abbildung 56: Statische Strukturdarstellung - VMMM

interaktive Erklärung einzelner Relationen möglich sein. In einem weiteren Schritt soll es möglich sein die Zahl der angezeigten Relationen schrittweise interaktiv zu reduzieren um so die am stärksten wirkenden Größen identifizieren zu können – ohne jedoch dabei den Kontext zu verlieren.

Auch wenn transtemporale Relationen bereits erklärt wurden (der Name stammt aus der Kombination von transitiv temporal), hier nochmals eine

kurze Zusammenfassung: Die dargestellten Kanten repräsentieren nun keine direkten in den Gleichungen vorkommenden Relationen mehr, sondern die Summe aller direkten und indirekten Einflüsse die ein Modell bei Veränderung einer Variablen vorsieht, wobei jedoch

nur zwischen jenen Knoten Verbindungen eingezeichnet werden, welche im kurzfristigen Relationensystem (in den Gleichungen) auch tatsächlich Verbindungen hatten. Dabei werden jedoch alle intertemporalen Instanzen zu einer gemeinsamen Variablen zusammengefasst (bbspw. werden die intertemporäre Relation $X_{t-1} \rightarrow Y_t$ und die kontemporäre Relation $X_t \rightarrow Y_t$ zu der neuen transtemporären Relation $X \rightsquigarrow Y$ kombiniert), da durch die Betrachtung der Änderungen in einem mittelfristigen Zeitraum alle kurzfristigen Änderungen ohnehin nicht mehr sichtbar wären – eine Repräsentation dieser (als Gewichtung, bzw. Effekt der Beeinflussung) mit den Daten der mittelfristigen Elastizitäten oder Multiplikatoren wäre daher missverständlich und falsch (siehe Kapitel 2 sowie die vorangegangenen Teilkapitel).

Zielgruppe

Die statische Strukturanalyse ist für die Gruppe der (geschulten) Laien und Experten entwickelt, welche die allgemeinen Aussagen eines Modells erfassen möchten, sie als Darstellung 1. oder 2. Instanz einzustufen (vgl. Beschreibung eines Benutzungsszenarios im vorigen Teilkapitel).

Invariante (visuelle Aussage)

Die Invariante der dynamischen Strukturdarstellung ist die Abbildung der allgemeinen kausalen Aussagen eines makroökonomischen Modells.

Komponenten (transportierte Daten)

Zur vollautomatischen Erstellung der dynamischen Strukturdarstellung kommen die folgenden Datenkomponenten zur Anwendung:

- Transtemporale (temporal aggregierte) Variablen
 - Variablenname (immer angezeigt)
 - Variablentyp (immer angezeigt)
 - Variablenbeschreibung (nur als Kontextdarstellung)
- Gerichtete transtemporäre Relationen

- Relationen (nur mehr transtemporäre)
- Art und Stärke der relationalen Beeinflussung
- Textuelle Beschreibung der Gleichungen
- Zeit
 - Diskrete Zeitkomponente (relative Periodendifferenz)

Konstruktionsgrundlagen der Darstellung

Imposition

Da es keine unterschiedlichen temporalen Instanzen der Variablen mehr gibt ist eine Repräsentation der Zeit als Achse nicht mehr sinnvoll. Die Darstellung verwendet daher die ebene Position nun nur mehr um die einzelnen Knoten besser im Raum unterbringen zu können und dadurch die Gesamtgröße der Darstellung deutlich zu reduzieren, wodurch ein Überblick schneller und leichter möglich ist. Diese Darstellung gehört daher nun tatsächlich zur Impositionsgruppe der Netze, wobei der Impositionstypus des Feldes zum Einsatz kommt, d.h. theoretisch freie Anordnung der Flecken in der Darstellung, tatsächlich wird dabei eine von innen nach außen gehende Radialanordnung mit mehreren (unvollständigen) Ringen verfolgt, diese erfolgt jedoch heuristisch und nicht deterministisch, da sie völlig der Kollisionvermeidung zwischen Kanten und Knoten untergeordnet ist.

Es kommen zwei verschiedene Fleckentypen zur Implantation, analog zu den Komponenten eines Netzwerks, d.h. die Knoten werden als punktförmige Flecken realisiert, die Kanten werden als ebenfalls punktförmig implantiert, da ihr Ausgangs- und Endpunkt zwar deterministisch von der Position der beiden Knoten abhängt die sie verbinden, ihr Verlauf jedoch theoretisch frei festgelegt werden kann. In der statischen Darstellung hat die Form der Verbindung (der Kante) nun keine Bedeutung mehr, es wird lediglich versucht Kollisionen zwischen Knoten und Kanten zu vermeiden. Deshalb ist es auch nötig die Position in der Ebene dieser Aufgabe zu opfern, wozu ein Algorithmus zu Anwendung kommt, der hier nicht weiter erläutert wird. (Dennoch kann in manchen Situationen eine Überschneidung einer Kante mit einem Knoten auftreten)

Visuelle Eigenschaften der Flecken

Die visuellen Elemente der statischen Analyse sind, bis auf das Faktum dass die Kanten nun als kumulierte transtemporale Relationen interpretiert werden müssen, identisch – sowohl Icons (Symbole) der Flecken als auch die Legende sind gleich. So würde etwa die statische Darstellung des gesamten im Anhang befindlichen klassischen Modells nun so aussehen:

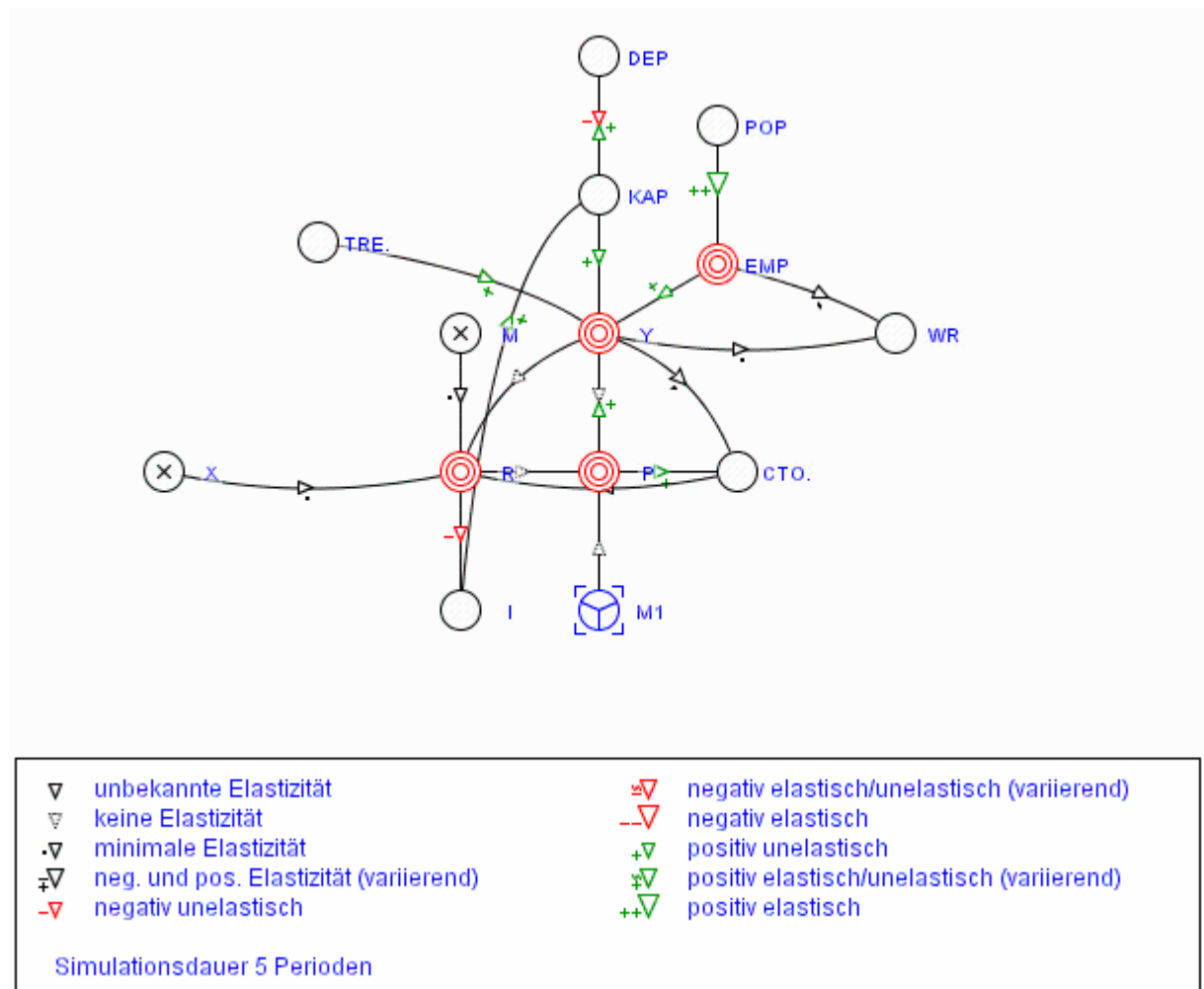


Abbildung 57: Statische Gesamtmodell Darstellung des Beispielmodells

Der einzige Zusatz ist die Anzeige der Simulationsdauer in der Legende um zu wissen, was die Kanten nun genau anzeigen, d.h. welche temporale Breite das zeitliche Betrachtungsfenster hatte.

Interaktive Elemente

Die statische Analyse hat die selben interaktiven Elemente wie die dynamische Analyse, lediglich die zugrunde liegenden Daten sind andere – d.h. alle Elemente verwenden und zeigen nun nur mehr die transtemporäre Elastizität und Multiplikatoren an:

- Kontextsensitives Detailfenster
- Stufenweiser Kantenfilter
- Stufenweiser Knotenfilter

So würde nun etwa der Einsatz des Kantenfilters auf die Gesamtansicht des zuvor gezeigten Modells (siehe Abbildung 57: Statische Gesamtmodell Darstellung des Beispielmodells) mit der Einstellung „minimale Kanten ausblenden“ folgendes Ergebnis liefern:

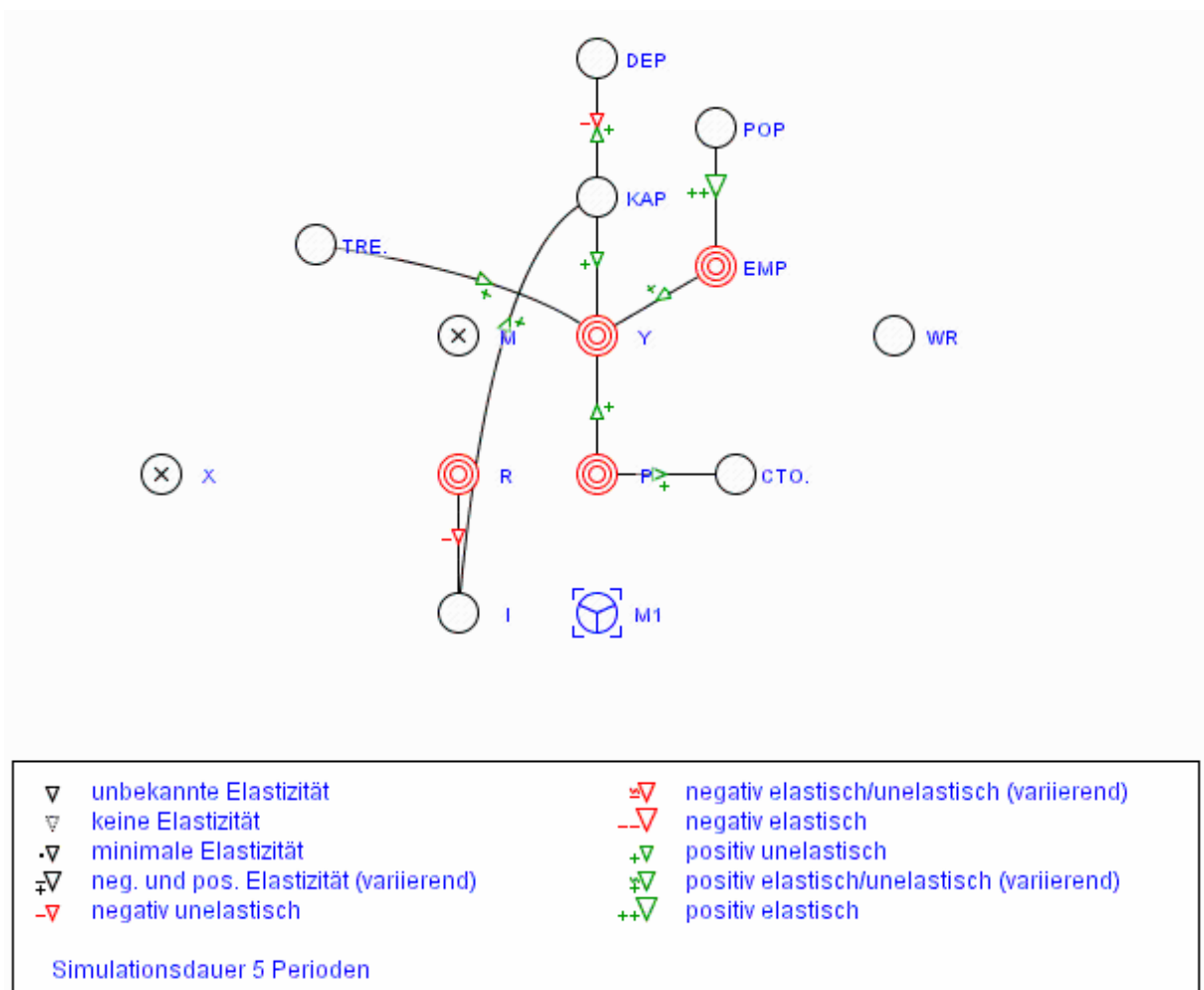


Abbildung 58: Statische Darstellung mit Kantenfilterung

Die Aussagen des Modells sind damit klar erkennbar, und würden bei obiger Darstellung beispielsweise folgende Aussage treffen (erneut ohne die wirtschaftspolitischen Aussagen des Modells selbst in irgend einer Weise zu bewerten, da diese nicht Inhalt der Arbeit sind), dass mittelfristig gesehen keine der drei exogenen Variablen (wovon als Test *M1* als Instrument definiert wurden – diese können im Programm jederzeit geändert werden – selbstverständlich können Instrumente nur unter den exogenen gesucht werden) und daher auch keines der Instrumente einen starken Einfluss auf das restliche System hat. (da sie keine angezeigte Kante mehr haben) Verfolgt man diese visuelle Aussage zurück – erst zu einer anderen Filtereinstellung – wie etwa in Abbildung 57, so kann man erkennen, dass die Kanten bereits dort, als mit fast vernachlässigbarer bzw. unbekannter Wirkung gekennzeichnet wurden (zumindest mittelfristig), d.h. dass sich die einmalige Einflussnahme nicht im Lauf der Zeit selbst fortsetzt (eine weitere mögliche Entwicklungsstufe des Analysesystems könnte versuchen an dieser Stelle anzusetzen und dem Benutzer die Möglichkeit zu geben diese mittelfristigen Auswirkungen auch für andere Szenarien als nur transitorische Schocks zu prüfen, was möglicherweise speziell für die Instrumente von Interesse wäre – diese Funktionalität würde jedoch ein vielfaches! der bereits für diese Version nötigen Berechnungen durchführen und ist daher nicht ratsam – aber für eine Erweiterung möglich).

Eine weitere Analyse mit den vorliegenden Methoden würde daher an dieser Stelle zur nächsten Instanz der Analyse zur detaillierteren dynamischen Analyse führen um die kurzfristigeren Auswirkungen zu betrachten. Auf diese Weise könnte etwa ermittelt werden ob eine Strategie der stetigen Erhöhung eines Instruments etwa erfolgreich sein könnte – was zumindest wahrscheinlich wäre wenn die kurzfristige Analyse ein anderes Bild zeigt, d.h. wenn die Instrumente dort einen eindeutig wahrnehmbaren Einfluss haben – was durchaus der Fall sein kann, weshalb dies auch ein Komplettanalysepaket mit komplementären (statt rein alternativen) Darstellungen ist.

4.5 Weitere Darstellungen

Die folgenden beiden Darstellungen sind Teil des Analysepakets, sowie eines integrierten Analysevorganges, bilden aber nicht den Kern dieser Arbeit, sondern dienen der Verstärkung der anderen beiden, zuvor vorgestellten Methoden. Aus diesem Grund wurden sie bewusst nicht gemeinsam mit den anderen Darstellungen vorgestellt, sondern hier unter der Rubrik der weiteren Darstellungen. Dennoch soll dies nicht bedeuten, dass sie in der Analyse keinen Nutzen haben, es reflektiert lediglich das geringere Ausmaß an Arbeit, welches, aufgrund der Einfachheit der Instrument-Ziel Darstellung, bzw. der Verwendung einer Standardkomponente zur Erstellung von Histogrammen, von diesen Darstellungen ausging.

4.5.1 Instrument-Ziel Darstellung

Bei der Instrument-Ziel Darstellung wird der Einfluss der einmaligen Änderung einer Instrument-Variable auf die Zielvariablen angezeigt, um der großen Bedeutung dieser Variablentypen für den gesamten Analyseprozess von Entscheidungsunterstützungsmodellen erneut zu betonen, was auch bereits durch die Betonung der Knoten und die Filtermöglichkeiten in den Hauptdarstellungen geschah. Die Darstellung bedient sich in ihrem gesamten Aussehen (auch durch Hintergrund-Helligkeitsvariation), in Analogie zu der visuellen Darstellung der Zielvariablen in der dynamischen und statischen Analyse, wieder der visuellen Metapher der Zielscheibe.

Allgemein gesprochen ist es dadurch mehr oder weniger gut möglich die intertemporale Effektivität der einmaligen Intervention mittels eines Instruments (welches aus der Hauptnavigationskomponente ausgewählt werden muss) im Hinblick auf die im Modell definierten Ziele zu betrachten. So ist es sofort möglich die Aussagen dieses Modells im Hinblick auf kurzfristige wirtschaftspolitische Maßnahmen, sowie ihre Nachhaltigkeit darzustellen. (Auch an dieser Stelle wäre die Möglichkeit der Definition von Entscheidungsstrategien interessant, um nach dem Verständnis und der Analyse des Modells auch gezielte wirtschaftspolitische Versuche mit dem Modell unternehmen kann – was eine neue Anwendungsmöglichkeit des Prototypen wäre, die zwar über die gegenwärtige

Aufgabenstellung hinausgeht, aber einen interessanten Ansatzpunkt für die Zukunft – für etwaige Ausbaumodule – liefert)

In der gegenwärtigen Konfiguration bietet die Darstellung nun die Möglichkeit die Änderung eines Instruments auf alle definierten Ziele zu betrachten, wozu ebenfalls eine Netzwerkanalogie zu Einsatz kommt, vom Standpunkt der Imposition wieder ähnlich der dynamischen Darstellung eigentlich ein Diagramm, wobei jedoch keine rechtwinkelige Ausrichtung der Achsen sondern eine polarkoordinatige Darstellung (ähnlich einem Kiviatdiagramm (siehe Kapitel 3), jedoch als Netzwerk), in welcher die diskrete Zeit der Höhe entspricht, der Winkel entspricht dabei der Zielvariablen. (Die Knoten und Kanten sind wieder punktförmig implantiert, wobei nur gerade Kanten zum Einsatz kommen) Dennoch ist die Darstellung (aufgrund der verwendeten Datenkomponenten) völlig anders als die dynamische Darstellung, da hier nur mehr rein transitive Kanten dargestellt werden, ähnlich den transtemporären aus der statischen Darstellung, aber doch anders. Die Kanten dieser Darstellung repräsentieren die kumulierten Änderungen welche das gesamte System an einer Zielvariablen, bei einmaliger Erhöhung der im Fokus befindlichen Instrumentalvariablen bewirkt. Das bedeutet jedoch auch, dass in dieser Darstellung auch eine Kante zwischen der Instrument und der Zielvariablen existiert wenn diese nicht einmal eine indirekte Wirkung auf sie hätte (bei Graph Betrachtungsweise wären das zwei Knoten welche kein Weg im Graphen verbindet, Länge des Wegs = 0). Dennoch ist in dieser Darstellung ersichtlich, dass diese Variable dann keinen Einfluss aufeinander haben, da wieder gewichtete Kanten angezeigt werden, mit der selben farblichen Kodierung wie in den anderen Netzwerkanalyse, die Kante würde daher als „keine Wirkung“ angezeigt werden.

Grafisch gesehen wird dabei nun das ausgewählte Instrument ins Zentrum gestellt und die Zielvariablen werden entlang vom Mittelpunkt sternförmig ausgehenden Achsen aufgereiht. Dabei wird die Ebene der diskreten Modellzeit in konzentrischen Kreisen rund um den Mittelpunkt aufgetragen (analog zur dynamischen Analyse sind diese wiederum mit Variationen der Helligkeit des Hintergrundes -grau, weis- deutlich gemacht – wodurch sich der Gesamteindruck der Zielscheibe ergibt), wobei im inneren Kreis, in welchem sich sowohl die Instrumentvariable als auch die Ziele der selben Periode befinden, der Zeitpunkt t_0 herrscht, d.h. der Zeitpunkt in welchem die Erhöhung Veränderung durchgeführt wird, und alle weiteren Kreise um jeweils eine Simulationsperiode später sind (t_1, t_2, \dots, t_5).

Der Knoten im Zentrum ist daher die auslösende Instrumentvariable, alle anderen Knoten stehen für die Zielvariable, deren Bezeichnung an der Winkelachse abzulesen ist, wobei die Entfernung gleich der zeitlichen Periode ist, in welcher der (möglicherweise) veränderte Wert abgelesen wurde.

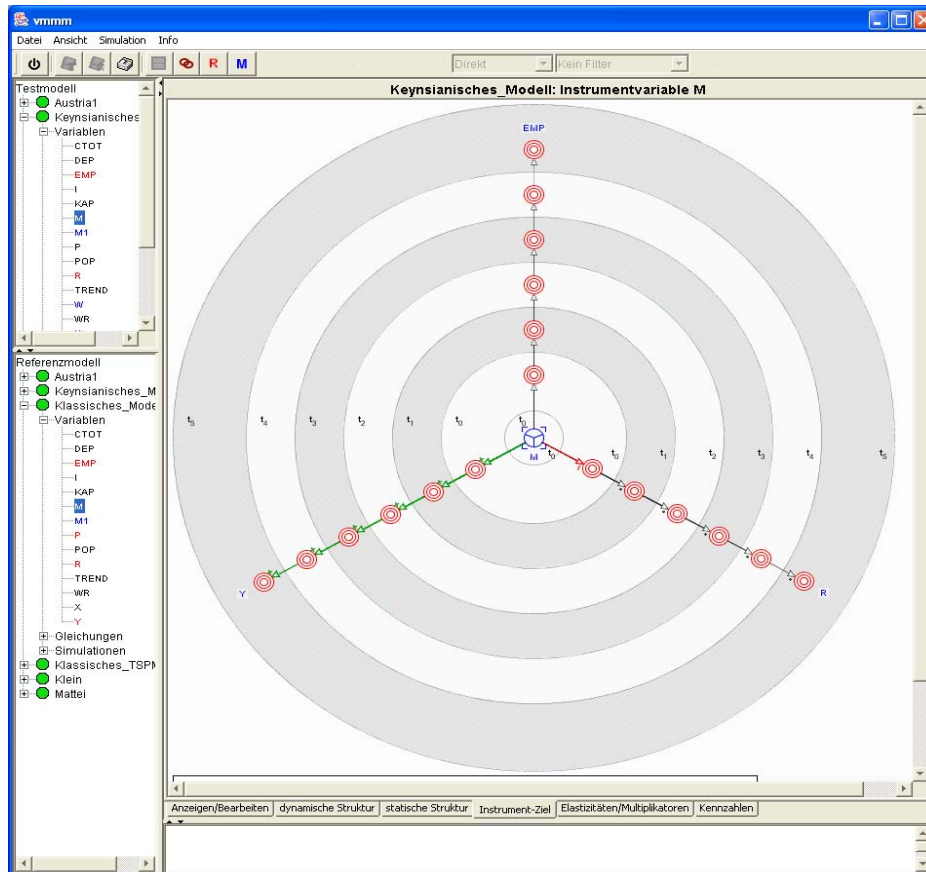


Abbildung 59: Instrument-Ziel Darstellung anhand eines keynesianischen Modells

So bedeutet obiges Beispiel (Zentrum M) bspw. für die Kante, welche zu einem Knoten auf der Achse Y führt und sich im Ring t_2 befindet, dass sie die Stärke des transitiven Einflusses der Änderung des Systems durch eine Änderung von M in t_0 auf Y in t_2 darstellt. Also den transitiven (Rest-) Effekt des transitorischen Schocks von M auf Y nach zwei Perioden.

So kann etwa bei obiger Darstellung sehr leicht abgelesen werden, dass ein transitorischer Schock von M nachhaltig positiv auf Y wirkt, der kurzfristige negative Effekt von M auf R , jedoch sehr schnell abgebaut wird (Erneut ist zu sagen dass die wirtschaftspolitische Aussage des untersuchten Modells nicht Teil der Arbeit ist).

Die Darstellung kann nun auf zwei Arten in den kompletten Modellanalyse Prozess eingebunden werden, da sie aufgrund der geringen Anzahl angezeigter Elemente einen sehr

schnellen und einfach verständlichen Überblick bietet (auch für Laien) und andererseits da sie die Effekte, welche sie anzeigt auch kurzfristig anzeigt (und zwar für eine Anzahl an Perioden gleich der temporalen Breite des Betrachtungsfensters der statischen Analyse), wodurch sie auch geeignet nachzukontrollieren aus welchem Grund ein bestimmtes Instrument in der statischen Analyse als mittelfristig ineffektiv aussah – und dem Experten so ein weiteres Mittel zu integrierter Modellanalyse als Teil des Gesamtpaketes bietet.

4.5.2 Elastizitäten/Multiplikatoren Diagramme

Wie zuvor bereits angedeutet, ist die Darstellung der Elastizitäten bzw. Multiplikatoren im Kontext eine sehr nützliche Darstellung, welche die zusätzliche Exploration der Eigenschaften ausgewählter Variablen – der ihres intertemporären Anpassungsverhaltens, welches aus der Simulation gewonnen wurde – ermöglicht, und dadurch eine detailliertere Analyse von in den anderen Darstellungen uneindeutigen Zusammenhängen ermöglicht. Da es sich jedoch um eine Standardkomponente (aus einer Programmbibliothek) zur Darstellung von Histogrammen handelt (mit all ihren Vor- und Nachteilen), wird auf die Details ihrer Darstellung nur ganz oberflächlich eingegangen.

Zur Auswahl und Integration einer Komponente wie des Histogramms für dieses Analysepaket kam es hauptsächlich da versucht wurde eine Darstellungskomponente zur Verfügung zu stellen, welche hohen Wiedererkennungswert hat und dadurch von praktisch jedermann bedient werden kann, aber vor allem auch um das Vertrauen der Anwender bzw. die Geschwindigkeit der Anpassung an die neuen Methoden zu erhöhen – dies ist auch durch die nahtlose Integration in die restliche Benutzeroberfläche möglich, wodurch selbst bei Rückkehr/Umschalten zu einer der neuen Komponenten die Assoziation des Vertrauten erhalten bleibt. Ein weiterer Hauptgrund war jedoch, dass ein Histogramm für den hier angedachten Verwendungszweck einfach am besten geeignet ist.

Ziel der Darstellung ist es den Verlauf der aus den Simulationsergebnissen berechneten, um einige Simulationsperioden verschobenen, Elastizitäten bzw. Multiplikatoren der gleichen Variablen darstellen zu können – entweder nur um den Verlauf zu analysieren, bzw. auch um ihn mit dem Verlauf der Elastizitäten (respektive Multiplikatoren) anderer Relationen des gleichen Modells, aber auch den Relationen eines anderen Modells darstellen zu können. (Für eine detailliertere Beschreibung siehe Prototypbeschreibung [Unterluggauer_2003])

Auf diese Weise soll es möglich sein ein in den Darstellungen beobachtetes uneindeutiges Verhalten von Relationen zu erklären – bspw. auch im Kontext einer Fehlersuche in Daten oder Gleichungen Aufschluss geben zu können.

Die Anzeige der Verläufe einiger Elastizitäten vergleichbarer Größen in zwei ähnlichen, aber dennoch unterschiedlichen geschätzten Modellen sieht nun als Beispiel so aus:

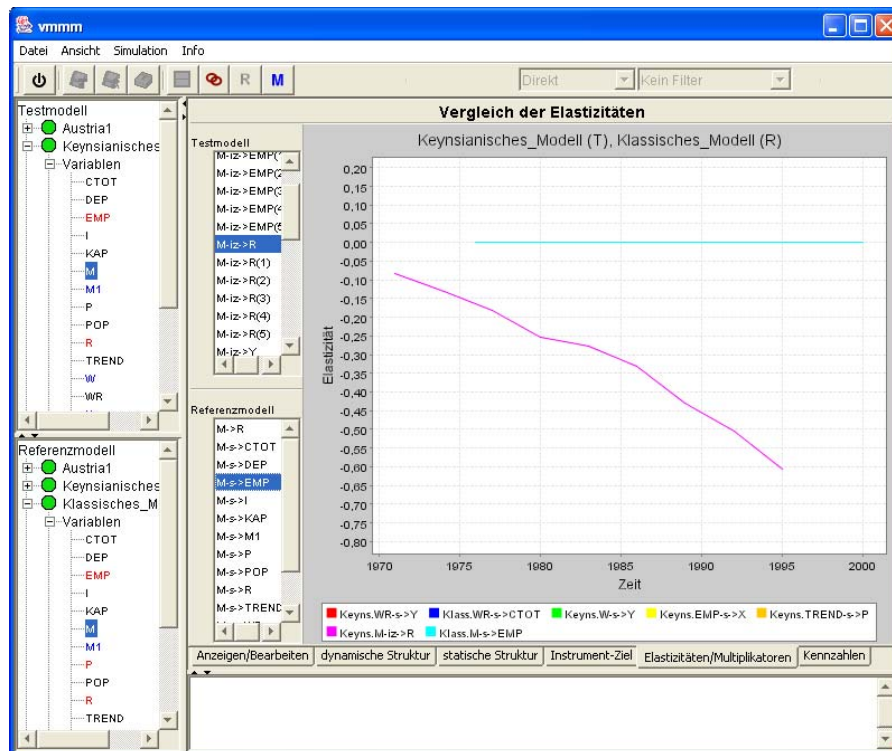


Abbildung 60: Elastizitäten/Multiplikatoren Diagramm des VMMM Prototyp

Die internen Bedienungselemente dieser Darstellung wurden dabei mit der jeweiligen Auswahl in der Hauptnavigationskomponente verbunden, wodurch bei einer Auswahl einer bestimmten Variablen nur mehr die, von ihr ausgehenden Effekte, angezeigt werden, um die Anzahl der gleichzeitig auszuwählenden Elemente zu reduzieren.

4.6 Schlüsse und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Analysemethodik mit mehreren Bestandteilen vorgestellt, welche dazu dient, makroökonomische Modelle visuell analysieren zu können, wobei unterschiedliche Zielgruppen ermittelt wurden, für welche die jeweilige Darstellung speziell geeignet sind. Im Detail wurde dazu eine Mischung aus bekannten und teilweise neuen visuellen Elementen gewählt, welche mit den dargestellten Abläufen und Größen vereinbar sind (visuelle Metaphern). Die Verwendung bekannter visueller Elemente fördert dabei die Intuitivität der Bedienung, erhöht die Verständlichkeit der Darstellungen und verkürzt etwaige Lern- bzw. Anpassungsphasen.

Bereits in frühen Testläufen zeigte sich, dass die Verwendung des Analysepakets zu schnellen Einsichten der Abläufe führt. Das Analysieren und etwaiges Kritisieren eines kleinen makroökonomischen Modells, kann damit in wenigen Sekunden geschehen, sobald die intuitive Darstellung kurz erläutert wurde. So geschah es, dass bei der ersten Demonstration der Methodik, binnen weniger Sekunden die Aussagen des dargestellten Modells angezweifelt wurden. Nach kurzer Aufklärung der Testpersonen, dass dieser Fehler absichtlich in das Modell integriert worden war, um zu Demonstrieren mit welcher Geschwindigkeit ein, in den Gleichungen nicht so offensichtlicher Fehler, bei geeigneter graphischer Umsetzung gefunden werden kann.

Dennoch zeigte sich, dass die tatsächliche Umsetzung der Methodik in einigen Aspekten technischen Limitationen unterliegt, d.h. etwa sehr große Modelle in der umfangreichen Detaildarstellung den Rahmen der Darstellung sprengen können, wenn keine Selektionen und Filter zur Anwendung kommen. Dies ist jedoch ein technisches Problem, welches in einer ungünstigen Umsetzung begründet ist, welche in weiteren Schritten noch verbessert werden könnte, ohne die zugrunde liegenden Darstellungen zu verändern.

Auch kann die Simulation von umfangreichen Modellen immer noch einige Zeit in Anspruch nehmen kann (Minuten bis Stunden bei extrem komplexen Modellen mit mehreren hundert Modellen). Diese Tätigkeit kann jedoch im Vorhinein durchgeführt werden, d.h. bevor ein Entscheidungsträger oder Student mit dem jeweiligen Modell konfrontiert wird. Es ist daher möglich, trotz größter Modelle eine Darstellung in Echtzeit zu erhalten, insofern eine Vorbereitungszeit vorhanden ist.

Alles in allem handelt es sich bei der vorliegenden Arbeit um einen bereits jetzt brauchbaren Ansatz, welcher jedoch, speziell von Seiten der tatsächlichen technischen Implementierung, noch großes Potential für zusätzliche funktionale Erweiterungen bietet, wie etwa die Verteilung der Rechenarbeit – etwa bei sehr großen Modellen – auf verschiedene Computer, wie etwa einem Großrechner, wodurch die Vorbereitungszeit bei großen Modellen reduziert werden kann. Diese Anpassung wäre theoretisch ohne größere Probleme möglich, da das Programm in einer Programmiersprache geschrieben wurde, welche auf jeder bekannten Plattform verfügbar ist, und darüber hinaus auch verteilte Berechnungen und Abläufe unterstützt (JAVA).

Andere größere Erweiterungen und Änderungen, speziell an der graphischen Umsetzung, wären gravierendere Eingriffe in die Methodik, welche in Folgeprojekten neu entwickelt werden müssten. D.h. würde etwa ein ansprechenderes Erscheinungsbild gewünscht um auch eine jüngere Generation mit den dargestellten Modellen ansprechen zu können (etwa als didaktisches Unterrichtsmittel für Schulen) – etwa in Form von dreidimensionalen Darstellungen, bzw. Animationen oder anderen visuellen Spezialeffekten – so würde sich auch die Lesbarkeit der Darstellung stark verzerren, wie im dritten und vierten Kapitel bereits erläutert. Eine solche Veränderung wäre im bestehenden System daher vermutlich nur mit sehr kleinen Modellen, bzw. einer hoch aggregierten Darstellung sinnvoll.

5 Anhang

5.1 Literaturliste

- Ahlberg C., 1994, [Ahlberg_1994], Visual Information Seeking using the FilmFinder, CHI'94 ACM Conf. On on Human Factors in Computing Systems
- Amman H., Kendrick, 1996, [Amman_1996], Handbook of Computational Economics, Elsevier Science Publishing
- Arthur, Brian, 1997, [Arthur_1997], The Economy as an Evolving Complex System II, Addison-Wesley
- Axelrod, R., 1997, [Axelrod_1997], The Complexity of Cooperation. Agent Based Models of Competition and Collaboration, Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Reka Albert, Barabasi Albert-Laszlo, 2002, [Reka_2002], Statistical Mechanics of Complex Networks, arXiv:cond-mat/0106096 v1
- Barabasi Albert-Laszlo, 2002, [Barabasi_2003], Linked: How Everything Is Connected to Everything Else and What It Means for Business, Science, and Everyday Life, Perseus Books Group
- Bertin, J., 1977, [Bertin_1997], Graphics and Graphic Information Processing, de Gruyter Press, Berlin
- Bissel C., 2001, [Bissel_2001], Inventing the 'black box': mathematics as a neglected enabling technology in the history of communications engineering,
- Boucekkine Raouf, 1995, [Boucekkine_1995], An alternative methodology for solving nonlinear forward-looking models, Elsevier Journal of Economic Dynamics and Control
- Bronstein I. N., 2001, [Bronstein_2001], Taschenbuch der Mathematik, Verlag Harri Deutsch
- Buchanan Mark, 2002, [Buchanan_2002], Nexus: Small Worlds and the groundbreaking Science of Networks, W.W. Norton & Company, Inc.
- Card Stuart K., 1999, [Card_1999], Readings in Information Visualization: Using Vision to Think, Morgan Kaufmann Publishers

- Casti John L., 1998, [Casti_1998], *Would-Be Worlds: How the New Science of Simulation Is Breaking the Complexity Barrier*, Wiley
- Chaitin Gregory J., 1998, [Chaitin_1998], *The Limits of Mathematics*, Springer Verlag
- Christ R.E., 1984, [Christ_1984], *Research for evaluating visual display codes: an emphasis on colour coding*. In R. Easterby and H. Zwaga (Eds), *Information Design: The Design and Evaluation of Signs and Printed Materials*, New York: John Wiley and Sons
- Chuah Mei C., 1997, [Chuah_1997], *Glyphs for Software Visualization*, International Workshop on Program Comprehension 1997
- Dynasys [Dynasys]: *Modellierung und Simulation dynamischer Systeme*,
<http://www.ham.nw.schule.de/projekte/modsim/dynasys/beschreibung.htm>, abgerufen am 30.08.2003
- E-Views [EViews], <http://www.eviews.com/eviews4/eviews4/eviews4.html>, abgerufen am 14.10.2003
- Eco Umberto, 2002, [Eco_2002], *Wie man eine wissenschaftliche Abschlußarbeit schreibt* 9.Auflage, UTB Uni-Taschenbücher Verlag
- Epstein Joshua M., Axtell Robert, 1996, [Epstein_1996], *Growing Artificial Sciences: social science from the bottom up*, The MIT Press
- Fair Ray; Taylor John, 1983, [Fair_1983], *Solution and maximum likelihood estimation of dynamic nonlinear rational expectations models*, *Econometrica* 51
- Fair, R. C., 1992, *The Cowles Commission Approach, Real Business Cycle Theories, and New-Keynesian Economics*, In: Belongia, M. T.; Garfinkel, M. R. (Hrsg.), *The Business Cycle. Theories and Evidence*, Federal Reserve Bank of St. Louis.
- Ferreira de Oliveria M.C., 2003, [Oliveria_2003], *From Visual Data Exploration to Visual Data Mining: A Survey*, *IEEE Transact. on Visualization and Computer Graphics* Vol. 9
- Furnas G.W., 1986, [Furnas_1986], *Generalized Fisheye Views*, *Human Factors in Computing Systems, CHI`86 ACM Conf. On on Human Factors in Computing Systems*
- Haber Gottfried, 2000, [Haber_2000], *AMOD1: ein makroökonomisches Modell für Österreich*, Dissertation - Wirtschaftsuniversität Wien
- Hanappi H., 1994, [Hanappi_1994], *Evolutionary Economics*, Avebury - Ashgate Publishing

- Hanappi, Gerhard, 2000, [Hanappi_2000], Economics & computer science: on complex evolutionary dynamics with model-building entities, ZIF- The sciences of complexity Symposium October 2000
- Hanappi H., 2000, Socioeconomic Evolution in a World with temporary Social Institutions, paper for the 3rd Biennial Conference of the European Society for Ecological Economics (ESEE 2000), Vienna, 3-5 of May
- Hanappi H.; Hanappi-Egger E., 2001, [Hanappi_2001], Visual Dynamics. A framework for making complex models comparable, Registered Publication Nr.2001/055, Zentrum für Interdisziplinäre Forschung Bielefeld (ZIF-Complexity)
- Hanappi H., 2001, [Hanappi_2001a], Macroeconomic Simulation Studies – Results and Problems, in: Ökonomie in Theorie und Praxis (eds. G.Chaloupek et al.), Springer Verlag
- Healey C.G., Booth K.S., Enns, J.T., 1995, [Healey_1995], High-Speed Visual Estimation Using Preattentive Processing, ACM Transactions of HCI 3(2)
- Hendry David F., 1997, [Hendry_1997], Dynamic Econometrics, Oxford University Press
- Hochberg Julian, 1986, [Hochberg_1986], Visual Perception of Real and Represented Objects and Events, in Behavioural and Social Science: 50 Years of Discovery
- Intrilligator Michael D., 1996, [Intrilligator_1996], Econometric models, techniques, and applications
- Johnson B., 1991, [Johnson_1991], Tree-maps: A Space filling Approach to the Visualization of Hierarchical Information Structures, Proc. of IEEE Visualization '91 Conf.
- Kaboudan M. A., 2001, [Kaboudan_2001], Short-term Compumetric Forecast of Crude Oil Prices, IFAC SME 2001 Conference
- Klein Lawrence R., 1986, [Klein_1986], Macroeconomic Modeling and Forecasting, Behavioral and Social Science
- Kleinewefers H., 1983, [Kleinewefers_1983], Einführung in die volkswirtschaftliche und wirtschaftspolitische Modellbildung, Verlag Vahlen
- Kosslyn S.M., 1994, [Kosslyn_1994], Image and Brain: The Resolution of the Imagery Debate, MIT Press

- Lanzenberger M., 2003, [Lanzenberger_2003], The Stardimates - Visualizing Highly Structured Data, Proc. of the IV03, 7th International Conference on Information Visualisation
- Lind Mats, 2002, [Lind_2002], The Illusion of Percieved Metric 3D Structure, Proc. of the IEEE Symp. on Information Visualization 2002
- Lucas, R. E., 1976, [Lucas_1976], Econometric Policy Evaluation: A Critique, In: Brunner, K.; Meltzer, A. H. (Hrsg.), The Phillips Curve and Labor Markets, Amsterdam.
- Mackinlay J.D., 1986, [Mackinlay_1986a], Automatic Design of Grapical Presentations, Disseration Stanford University
- Mackinlay J.D., 1986, [Mackinlay_1986b], Automating the Design of Graphical Presentations and Relational Information, ACM Transactions on Graphics
- Miller George A., 1956, [Miller_1956], The Magical Number Seven, Plus or Minus Two, The psychological Review vol. 63
- Morgan Mary S., 1990, [Morgan_1990], The history of econometric ideas, Cambridge University Press
- Müller R., 2000, [Müller_2000], Modellgeschichte ist Kulturgeschichte, 13th Internatl. Conf. On History and Philosophy of Science
- Neurath Otto, 1991, [Neurath_1991], Gesammelte Bildpädagogische Schriften / Otto Neurath, Hölder-Pichler-Tempsky Wien
- Nguyen Quang Vinh, 2002, A Space-Optimized Tree Visualization, Proc. of the IEEE Symp. on Information Visualization 2002
- Norman D.A., 1993, [Norman_1993], Things that make us smart, Addison-Wesley
- Nowell Lucille Terry, 1997, Graphical Encoding for Information Visualization: Using Icon Color, Shape, and Size To Convey Nominal and Quantitative Data, Disseration Virginia State University
- Nowell Lucy, 2002, [Nowell_2002], Graphical Encoding for Information Visualization: An Empirical Study, Proc. of the IEEE Symp. on Information Visualization 2002
- Opte Project, [Opte], <http://www.opte.org/>, abgerufen am 18.11.2003

Pflüger Jörg, [Pflüger], Vorlesung Informationsvisualisierung,
http://igw.tuwien.ac.at:16080/igw/lehre/visualisierung_03/, abgerufen am 16.04.2003

Plaisant C., 1996, [Plaisant_1996], Lifelines: Visualizing Personal Histories, CHI '96 - ACM
 Conf. On on Human Factors in Computing Systems

Powersim Softwarepaket, [Powersim], <http://www.powersim.com/>, abgerufen am 20.11.2003

Rengs Bernhard, 2003, [Rengs_2003], Visual Representation of Economic Systems, EAEPE
 Conference 2003

Resnikoff H.L., 1987, [Resnikoff_1987], The Illusion of Reality, Springer Verlag

Romer David, 2000, [Romer_2000], Keynesian Macroeconomics without the LM Curve,
 NBER Working Paper No. 7461, NBER Working Paper Series

Scheele Paul R., 2001, [Scheele_2001], PhotoReading, Verlag Junfermann

Sims, C. A., 1980, [Sims_1980], Macroeconomics and Reality, Econometrica, 48, 1–48.

Simulink Simulationspaket, [Simulink], <http://www.mathworks.com/products/simulink/>,
 abgerufen am 16.11.2003

Tegarden David P., 1999, [Tegarden_1999], Business Information Visualization,
 Communications of the Association for Information Systems

Tinbergen Jan, 1981, [Tinbergen_1981], The Use of Models: Experience and Prospects, The
 American Economic Review, Volume 71, Issue 6

TSP International, [TSP], <http://www.tspintl.com/>, abgerufen am 04.05.2002

Tufte Edward R., 1990, [Tufte_1990], The Visual Display of Quantitative Information,
 Graphics Press

Tufte Edward R., 1997, [Tufte_1997], Visual Explanations, Graphics Press

Unterluggauer A., 2002, [Unterluggauer_2002], Ein Systemdynamikmodell des monetären
 Bereichs, Diplomarbeit, Technical University of Vienna

Unterluggauer A., 2004, [Unterluggauer_2004], Beschreibung des VMMM Prototypen,
 Projektbericht

Watts D.J., Strogatz S.H., 1998, [Watts_1998], Collective dynamics of 'small-world'
 networks, nature

Watts, D. J., 1999, [Watts_1999], Small Worlds: The Dynamics of Networks between Order and Randomness (Princeton University Press, Princeton, New Jersey).

Weyerstraß, 2001, [Weyerstaß_2001], SLOPOL1: A Macroeconomic Model for Slovenia, IFAC SME 2001 Conference

Wright W., 1995, [Wright_1995], Information Animation Applications in the Capital Markets, Proc. of the IEEE Symp. on Information Visualization 1995

Obige Literaturliste ist als Liste jener wissenschaftlicher Bücher, Artikel und Vorträge zu verstehen, welche direkten Einfluss auf die Entstehung der vorliegenden Arbeit hatten. Andere, in den betroffenen Bereichen bedeutende Arbeiten, welche im Zuge der Arbeiten bearbeitet wurden, jedoch keine direkte Verwendung fanden sind daher nicht inkludiert, um die Verwendbarkeit der Literaturliste aufgrund ihrer Länge nicht noch weiter einzuschränken

5.2 Beispiel eines ökonomischen Modells

Das im Folgenden beschriebene Modell wurde von Prof. Hanappi für das ÖNB Projekt zusammengestellt und für Österreich (Zeitraum 1970-2001) geschätzt. Jegliche ökonomischen Eigenschaften des Modells sowie ökonomische Aussagen dieses speziellen Modells sind ausdrücklich nicht Inhalt dieser Arbeit. Das Modell dient in dieser Arbeit lediglich dazu die Eigenschaften mathematischer ökonomischer Modelle für den Leser beispielhaft aufzuzeigen und zu zeigen wie die hier vorgestellten Methoden mit den Eigenschaften solche Modelle umgehen.

Gleichungen

Die Gleichungen des Modells in Strukturform (mit unbestimmten Parametern) wurden wie folgt gewählt:

Produktionsfunktion: Cobb-Douglas Produktionsfunktion mit eingesetzten Koeffizienten zur Schätzung des exogenen technischen Fortschritts:

$$(1) Y_t = (\alpha_{1,1} \cdot (\alpha_{1,2}^{TRENDE})) \cdot ((KAP_t / P_t)^2) \cdot (EMP_t^{(1-2)}) \cdot P_t$$

Definitionsgleichung Kapitalstock:

$$(2) KAP_t = KAP_{t-1} - DEP_t + I_t$$

Lineare Abschreibungsfunktion:

$$(3) DEP_t = \alpha_{3,1} \cdot KAP_{t-1}$$

Lineare Investitionsfunktion: (Verhaltensgleichung):

$$(4) I_t = \alpha_{4,1} - (1 / \alpha_{4,2}) \cdot R_t$$

Arbeitsnachfragefunktion: Dynamisierte Arbeitsnachfrage mit eingesetzter Grenzproduktivität des Kapitals (langsame Anpassung).

$$(5) WR_t = \alpha_{5,1} \cdot WR_{t-1} + (1 - \alpha_{5,1}) \cdot (1 - 2) \cdot (Y_{t-1} / EMP_{t-1})$$

Arbeitsangebot: (im hier angenommenen Gleichgewicht gleich der Beschäftigung) linear abhängig von der Bevölkerungsentwicklung:

$$(6) EMP_t = EMP_{t-1} + \alpha_{6,1} \cdot (POP_t - POP_{t-1})$$

Konsumfunktion: In diesem einfachen Modell wird diese keynesianische Konsumfunktion verwendet, welche nicht zwischen privatem und staatlichem Konsum unterschieden wird:

$$(7) CTOT_t = (\alpha_{7,1} + \alpha_{7,2} \cdot (Y_{t-1} / P_{t-1})) \cdot P_t$$

Zinssatz: Die Gleichung wurde aus der invertierten Sozialproduktidentität mit eingesetzter linearer Investitionsfunktion abgeleitet:

$$(8) R_t = \alpha_{8,1} \cdot (\alpha_{8,2} - (Y_t - CTOT_t - (X_t - M_t)))$$

Preisniveau: Die Gleichung wurde aus der invertierten Gleichgewichtsbedingung des Geldmarkts, mit eingesetzter linearer Geldnachfragefunktion, abgeleitet:

$$(9) P_t = P_{t-1} + (M1_t + \alpha_{9,1} \cdot R_t) / (\alpha_{9,2} + \alpha_{9,3} \cdot (Y_{t-1} / P_{t-1}))$$

Bevölkerungswachstum: Die Bevölkerung wird lediglich linear fortgeschrieben:

$$(10) POP_t = \alpha_{10,1} + \alpha_{10,2} \cdot POP_{t-1}$$

Hilfsfunktion: Misst den Fortschritt der Zeit (t) – wird aus Simulationstechnischen Gründen benötigt:

$$(11) TREND_t = TREND_{t-1} + 1$$

Der Parameter 2 (in den Gleichungen (1) und (5)) entspricht dem Kapitalquote des BIP („Capital share“), wodurch 1-2 der Lohnquote („Labour share“) entspricht. Der Parameter 2 wird meist mit 1/3 angenommen, bzw. in einem Bereich rund um 1/3.

Die Gleichungen Y_t (1), WR_t (5) sowie EMP_t (6) bildet den realen Teil des Modells, wobei die exogene Variable POP_t (10) endogenisiert wurde (Zusätzlich kommt die Hilfsvariable $TREND_t$ zum Einsatz).

Die Gleichungen $CTOT_t$ (7), R_t (8), I_t (4) sowie P_t (9) ergänzen das Modell, wobei die Gleichgewichtsbedingungen des Güter und Geldmarktes bereits implizit in den Gleichungen enthalten sind, und daher etwa R_t (8) keine reine Verhaltensgleichung darstellt.

Bei obigem Modell kamen folgende Variable zum Einsatz

Variable	Dimension	Beschreibung
CTOT	EUR	Final consumption expenditure
DEP	EUR	Depreciation
EMP	in 1000	Employed
I	EUR	Gross fixed capital formation, total
KAP	EUR	Capital Stock
M	EUR	Imports of goods and services
M1	EUR	Money supply M1
P		GDP Deflator (1995 = 1)
POP	in 1000	Total population (in 1000)
R	%	Interest rate
WR		Real wage
X	EUR	Exports of goods and services
Y	EUR	Gross domestic product (GDP - PPP)

General Function Form Gleichungen

Zur Darstellung in General Function Form sind die Parameter der Gleichungen nicht relevant, da sie nicht erkennbar sind. Daher kann auch ein ungeschätztes Modell in GFF dargestellt werden, und eine grundlegende (wenn auch nicht aussagekräftige) Darstellung wäre bereits möglich:

$$(1) Y_t = f(TREND_t, KAP_t, P_t, EMP_t)$$

$$(2) KAP_t = f(KAP_{t-1}, DEP_t, I_t)$$

$$(3) DEP_t = f(KAP_{t-1})$$

$$(4) I_t = f(R_t)$$

$$(5) WR_t = f(WR_{t-1}, Y_{t-1}, EMP_{t-1})$$

$$(6) EMP_t = f(EMP_{t-1}, POP_t, POP_{t-1})$$

$$(7) CTOT_t = f(Y_{t-1}, P_{t-1}, P_t)$$

- (8) $R_t = f(Y_t, CTOT_t, X_t, M_t)$
 (9) $P_t = f(P_{t-1}, M1_t, R_t, Y_{t-1}, P_{t-1})$
 (10) $POP_t = f(POP_{t-1})$
 (11) $TREND_t = f(TREND_{t-1})$

Gleichungen in TSP Schreibweise

Wie erwähnt wird für die Simulation / Lösung von „normalen“ mathematischen Modellen, welche in Form von Gleichungssystemen und Datenreihen vorliegen, die Software TSP verwendet. Die Eingabe (Übergabe an das Programm) von Modellen zur Simulation erfolgt in Form von unformatierten Textdateien, welche jeweils eine Gleichung pro Zeile erfordern. Die TSP Schreibweise des obigen Modells sieht daher folgendermassen aus (wobei hier bereits die geschätzten Koeffizienten⁴⁴ eingesetzt wurden:

- (1) $Y = (11.32639867 * (1.018482467 ** TREND) * ((KAP / P) ** 0.2295072952) * (EMP ** (1 - 0.2295072952))) * P$
 (2) $KAP = KAP(-1) - DEP + I$
 (3) $DEP = 0.04916237323 * KAP(-1)$
 (4) $I = 128839.535 - (1 / 0.00007416869087) * R$
 (5) $WR = 0.9995743638 * WR(-1) + (1 - 0.9995743638) * (1 - 0.2295072952) * (Y(-1) / EMP(-1))$
 (6) $EMP = EMP(-1) + 0.6938819167 * (POP - POP(-1))$
 (7) $CTOT = (-9535.6953 + 0.8361023564 * (Y(-1) / P(-1))) * P$
 (8) $R = 0.00007416869087 * (128839.535 - (Y - CTOT - (X - M)))$
 (9) $P = P(-1) + (M1 - 13194871180 * R) / (-30021055052000000 + 109713317600000 * (Y(-1) / P(-1)))$
 (10) $POP = -138.4559775 + 1.020811637 * POP(-1)$
 (11) $TREND = TREND(-1) + 1$

⁴⁴ Die Parameter wurden mit dem E-Views Programm für Österreich, Zeitraum 1970-2001, geschätzt, wobei ein einfaches Least-Squares Schätzverfahren mit Abbruchkriterium 0,0001 (mit max. 500 Iterationen) gewählt wurde. (Die Schätzungen wurden einzeln pro Gleichung durchgeführt, nicht als Systemschätzung)

5.3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Tinbergen's Diagramm ökonomischer Verzögerungen aus [Morgan_1990]	20
Abbildung 2: Ein System als Blackbox.....	29
Abbildung 3: Modelle mit kaskadierten Blackboxen.....	30
Abbildung 4: Modelle mit variierender Modellierungstiefe	31
Abbildung 5: Blockrekursive Modelle.....	51
Abbildung 6: Blockdiagonale Modelle	51
Abbildung 7: Elementare Modellbeziehungen als Graph (M)	72
Abbildung 8: Einfache Kausalität als Bogen eines Graphs.....	73
Abbildung 9: Inputverzweigung als Graph	74
Abbildung 10: Outputverzweigung als Graph	74
Abbildung 11: Kausalkette als elementare Bahn eines Graphs.....	75
Abbildung 12: Wechselwirkung in Graphen.....	76
Abbildung 13: Kausale Schleife.....	76
Abbildung 14: Endogene, exogene und isolierte Variablen in Graphen.....	78
Abbildung 15: Blockrekursive Modelle in Graphen	79
Abbildung 16: Verzögerte Selbstbeeinflussung als Schlinge im Graph (M')	81
Abbildung 17: Direkte zeitliche Verzögerungen in Modellen (Graph N)	82
Abbildung 18: Temporale Länge von Bahnen in Graphen / Temporale Entfernung.....	83
Abbildung 19: Mehrfach indirekte temporale Effekte in Graphen	84
Abbildung 20: Konstante intertemporale Modellrelationen mit mehrfachen Einflüssen in Graphen.....	85
Abbildung 21: Kumulation von messbaren Effekten in Modellen	87
Abbildung 22: Lediglich selbstbeeinflusste Variablen in Graphen	89
Abbildung 23: Netzwerk Topologie aus [Watts_1999]	93
Abbildung 24: Visuelle Kognition mittels Datengrafiken am Beispiel eines Histogramms..	117
Abbildung 25: Challenger Schadensdiagramm aus [Tufté_1997].....	118
Abbildung 26: Alternatives Challenger Schadensdiagramm aus [Tufté_1997].....	119
Abbildung 27: Sortierung nominaler Komponenten (N) in Diagrammen	130
Abbildung 28: Darstellung mit 3 quantitativen Achsen / Alternative durch 2D Zusammenstellung [Chuah_1997]	136
Abbildung 29: Kombination von Darstellungen im 3D Raum (anhand Walls & Floors [Card_1999]).....	138
Abbildung 30: Effektivität unterschiedlicher DataMappings (nach Mackinlay in [Card_1999])	139
Abbildung 31: Klassifizierung visueller Variablen (nach Bertin in [Card_1999]).....	141
Abbildung 32: Dominanz der Fleckengröße – Negativbeispiel einer Darstellung (aus [Pflüger_2003])	144
Abbildung 33: Gliederungsstufen visueller Variablen (nach Bertin aus [Pflüger_2003]).....	148
Abbildung 34: Netz als "Karte" des Internet (aus [Opté])	150
Abbildung 35: Klassifizierung bekannter Impositionsvarianten (nach Bertin [Bertin_1977])	151
Abbildung 36: Mehrdimensionale Darstellung mittels Parallelkoordinaten (aus [Tegarden_1999]).....	158
Abbildung 37: Mehrdimensionale radiale Darstellung als Kiviat Diagramm (aus [Tegarden_1999]).....	158
Abbildung 38: Aus Standardelementen zusammengesetzte Darstellung (aus [Chuah_1997])	160
	251

Abbildung 39: Aus Standardelementen zusammengesetzte intuitive Darstellung (aus [Chuah_1997])	160
Abbildung 40: Visuelle Aggregation von Daten in Form von Clustering (aus [Oliveira_2003])	167
Abbildung 41: Automatisch generierte Überblicke des Zustands der Börsen BA-CA Website	169
Abbildung 42: Nicht unterscheidbare Muster in graphischen Darstellungen (künstlicher Mockup)	170
Abbildung 43: Beispiele großer visueller Differenzen durch automatisches Zoomen	171
Abbildung 44: Permanente Hauptinteraktionselemente des VMMM Programms	186
Abbildung 45: NavBar des VMMM Programms	187
Abbildung 46: Modellelement Detailansicht – Variablenlisten- vs. Gleichungslistenübersicht	192
Abbildung 47: Modellelement Detailansicht – Variable- vs. Simulation	192
Abbildung 48: Dynamische Strukturdarstellung - VMMM Prototyp	211
Abbildung 49: Legende der auf Kanten eingesetzten Pfeile im VMMM Prototyp	217
Abbildung 50: Kontextsensitive Detailanzeige in der dynamischen Strukturanalyse	218
Abbildung 51: Kein Filter in Anwendung (vorher)	220
Abbildung 52: Stärkste Filtereinstellung lässt nur stark wirkende Variablen über.....	220
Abbildung 53: Knotenfilter im Modus Instrument-Ziel (r2) mit Fokus auf CTOT	222
Abbildung 54: Beispiel der direkten Einflüsse von EMP in der dynamischen Analyse.....	223
Abbildung 55: Minimierung der Suchzeiten von Details ohne Kontextverlust im VMMM	224
Abbildung 56: Statische Strukturdarstellung - VMMM	226
Abbildung 57: Statische Gesamtmodell Darstellung des Beispielmodells	229
Abbildung 58: Statische Darstellung mit Kantenfilterung.....	230
Abbildung 59: Instrument-Ziel Darstellung anhand eines keynesianischen Modells.....	234
Abbildung 60: Elastizitäten/Multiplikatoren Diagramm des VMMM Prototyp	237

5.4 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einteilung makroökonomischer Modelle.....	25
Tabelle 2: Komplexität von ökonomischen Relationen	99
Tabelle 3: Beispiel einer Datentabelle als Datenbasis für Abbildung 24.....	116
Tabelle 4: Effektivität visueller Variablen in unterschiedlicher Verwendung.....	149
Tabelle 5: Methoden und Grad der Komplexitätsreduktion der visuellen Analysetechnik ...	194
Tabelle 6: Knotenelemente in den Graphendarstellungen	215

5.5 Detailliertes Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	3
Abstract	4
Inhaltsverzeichnis.....	5
Einleitung	7
Einleitung	7
Motivation & Zielsetzung	7
Aufbau der Arbeit.....	8
1 Makroökonomische Modelle.....	11
1.1 Der Modelbegriff.....	11
1.1.1 Was ist ein Modell?.....	11
1.2 Makroökonomische Modelle.....	13
1.2.1 Mathematische makroökonomische Modelle.....	19
1.2.2 Einteilung ökonomischer Modellierungstechniken.....	24
1.2.3 Gemeinsamkeiten makroökonomischer Modelle.....	27
1.3 Ökonomisch strukturelle Modelle.....	29
Algebraische Modelle	33
DSE Modelle	33
Variablenklassifizierung.....	35
Parameter.....	40
Gleichungen	43
Modelldarstellungen.....	47
CGE Modelle.....	54
Algorithmische Modelle.....	56
Multiagenten Modelle	56
Single Agent Type vs. Multiple Agent Type	57
1.4 Statistische Modelle	59
Algebraische Modelle	59
VAR Modelle	59
Computational Economics Modelle.....	61
1.5 Fokus der weiteren Analysen	63
2 Alternative Sichtweisen ökonomischer Modelle.....	65
2.1 Ökonomische Strukturen aus graphentheoretischer Sicht.....	72
Kausalität.....	73
2.2 Intertemporäre Kausalität.....	80
2.3 Komplexität.....	91
Komplexität des untersuchten Systems.....	91
Komplexität des abgebildeten Systems.....	96
2.4 Schlüsse.....	104
3 Informationsvisualisierung.....	107
3.1 Visuelle Datenverarbeitung.....	110
Abstrakte Informationen	114
Datengrafiken.....	116
3.2 Informationsvisualisierung.....	121
Kognitive Verstärkung	122
Visuelle Wahrnehmung.....	124
3.3 Konstruktionsgrundlagen	128

Datentypen	129
Raum	134
3.4 Visuelle Dimensionen der Darstellung	139
Räumliche visuelle Variable	143
Objektbezogene visuelle Dimensionen	145
Verwendungsmöglichkeiten visueller Variablen	148
Visuelle Strukturen.....	149
Darstellung von multivariaten Daten	155
3.5 Möglichkeiten computerbasierter Visualisierung	162
Interaktivität	162
Überblick und Detail	163
Fokus und Kontext	165
3.6 Visuelle Metaphern	168
3.7 Schlüsse.....	174
4 Modell-Visualisierung.....	177
4.1 Gesamtkonzept des Darstellungspakets	181
Eingesetzte Software	182
Modelldaten.....	184
Visuelle Komponenten.....	186
Permanente Komponenten (Kommunikationskomponenten)	187
Darstellungskomponenten	190
4.2 Grafische Darstellungen.....	194
Netzwerkdarstellungen.....	196
Relationsintensität der modellierten Variablen	199
Erläuterung der Hauptdarstellungen.....	211
4.3 Dynamische Strukturanalyse.....	211
Inhaltliche Grundlagen der Darstellung	211
Konstruktionsgrundlagen der Darstellung	213
Visuelle Eigenschaften der Flecken	215
Interaktive Elemente	218
Erläuterungen	222
4.4 Statische Strukturanalyse	226
4.4 Statische Strukturanalyse	226
Konstruktionsgrundlagen der Darstellung	228
Visuelle Eigenschaften der Flecken	229
Interaktive Elemente	230
4.5 Weitere Darstellungen.....	232
4.5.1 Instrument-Ziel Darstellung	232
4.5.2 Elastizitäten/Multiplikatoren Diagramme	236
4.6 Schlüsse und Ausblick	238
5 Anhang.....	241
5.1 Literaturliste	241
5.2 Beispiel eines ökonomischen Modells	247
Gleichungen	247
General Function Form Gleichungen.....	249
Gleichungen in TSP Schreibweise	250
5.3 Abbildungsverzeichnis.....	251
5.4 Tabellenverzeichnis.....	252
5.5 Detailliertes Inhaltsverzeichnis	253
5.6 Lebenslauf.....	255