

# **Modellbasierte Entscheidungsunterstützung im Umweltbereich mit qualitativen Modellen**

**Ulrich Heller, Peter Struss**

Model-based Systems and Qualitative Reasoning Munich (MQM)

Institut für Informatik, Technische Universität München

Orleansstr. 34, 81667 München

{heller, struss}@informatik.tu-muenchen.de

## **Zusammenfassung**

In den Projekten QUALIDADE (Qualitative Modeling in Domain of Automated Diagnosis and Ecology) und MERMAID (Model-based Environmental Resource Management Aid), die an der TU München koordiniert werden, werden modellbasierte Techniken erweitert und angewendet, um die Entscheidungsunterstützung im Umweltbereich zu verbessern. Dabei werden die Ökosysteme, ein Fluß in Südbrasilien bzw. Mangrovenwälder in Indien, mit qualitativen Methoden repräsentiert, um mit dem notwendig unvollständigen Wissen umgehen zu können. Methodisch stehen die Aufgaben der Situationsbeurteilung, Diagnose und Therapieplanung im Vordergrund.

## **1 Einleitung**

In der Gruppe "Model-based Systems and Qualitative Reasoning" (MQM) an der TU München wird derzeit an entscheidungsunterstützenden Systemen für Umweltprobleme gearbeitet. Ein Projekt hat Probleme der Gewässerverschmutzung in einem südbrasilianischen Fluß zum Gegenstand. In einem zweiten Projekt geht es um das Management von Mangrovenwäldern in Küstenfeuchtgebieten in Südindien. Die Aufgabenstellung umfaßt in beiden Fällen

- Situationsbeurteilung: Erschließen des Systemzustandes aufgrund von Beobachtungen,
- Diagnose: Erschließen der Ursachen von Systementwicklungen, die definierten Zielen zuwider laufen, und
- Therapieplanung: Erschließen von Einflußmöglichkeiten, die auf die erklärten Ziele hinwirken.

Grundlage dafür ist die Anwendung und Erweiterung von modellbasierten Schlußverfahren, insbesondere unter Verwendung von qualitativen Modellierungsverfahren, die geeignet sind, dem notwendig unvollständigen Wissen Rechnung zu tragen. Die Unvollständigkeit des Wissens ist eine Konsequenz der begrenzten Beobachtbarkeit der Phänomene und der hypothetischen Theoriebildung.

## 2 Der Modellierungsansatz

Im folgenden werden die Grundideen der konzeptuellen, der kompositionalen und der qualitativen Modellierung vorgestellt, die aus den Anforderungen aus dem Aufgabenbereich motiviert sind. Es handelt sich um grundlegende Prinzipien zur Erstellung und Verwendung von Modellen im Kontext entscheidungsunterstützender Systeme, die in beiden Projekten zur Anwendung kommen.

### 2.1 Konzeptuelle Modellierung

Beim klassischen Vorgehen der Simulation wird ausgehend vom realen System ein numerisches Modell erstellt. Auf dessen Grundlage werden dann mit einem Simulationsverfahren numerische Ergebnisse (die zukünftige oder hypothetische Zustände darstellen) generiert und müssen dann interpretiert werden, um für den Benutzer bedeutsame Aussagen (beispielsweise alarmierende Entwicklungen oder Hypothesen über deren Ursachen) zu erhalten. Dieses Vorgehen ist in Abb. 1 schematisch gezeigt.

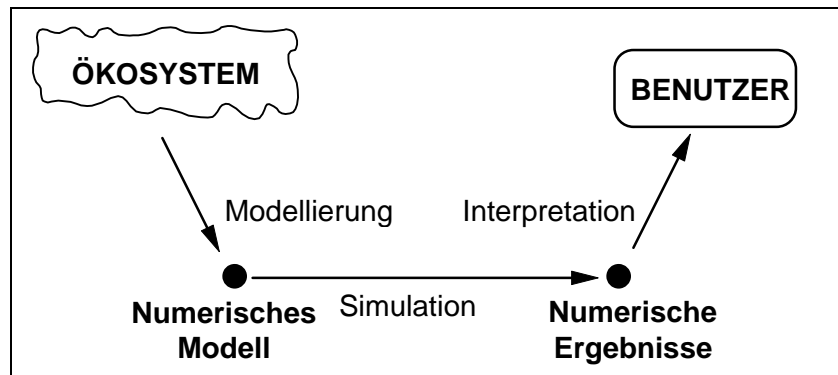
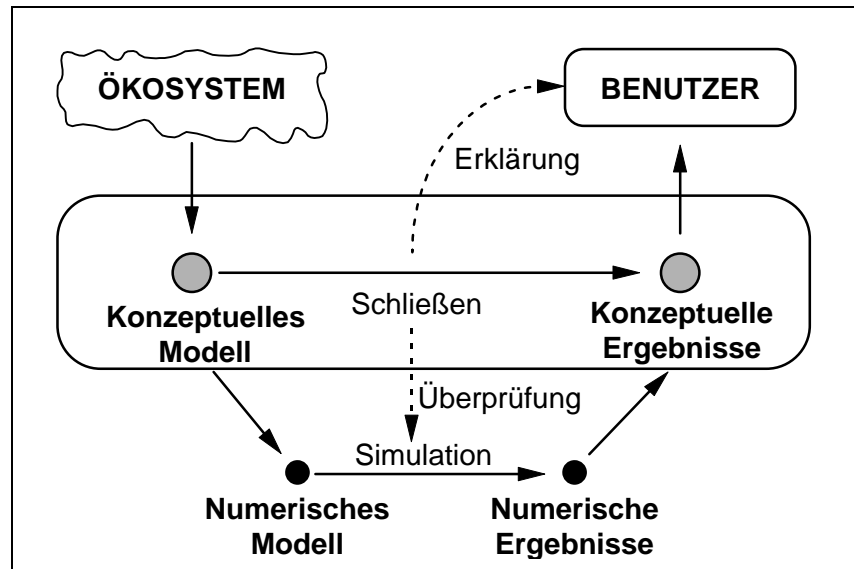


Abb. 1: Numerische Simulation

In unseren Projekten wird eine konzeptuelle Ebene eingeführt, die explizit Konzepte aus der Begriffswelt der Domänen-Experten darstellt und somit an mehreren Stellen dieses Vorgehen unterstützen kann, wie Abb. 2 zeigt.



**Abb. 2: Die konzeptuelle Ebene**

Zum einen wird die Modellierung als solche unterstützt, da im Gegensatz zu numerischen Verfahren intuitive Beschreibungskonzepte benutzt werden können. Wir verwenden Prozesse als Modellelemente, wie in der qualitativen Prozeßtheorie (vgl. Abschnitt 2.2).

Zum anderen wird die Interpretation von Ergebnissen unterstützt, da auch hier wieder Aussagen auf der konzeptuellen Ebene eine Rolle spielen. Weiterhin können viele Schlüsse schon auf der konzeptuellen Ebene geschehen. Dadurch lassen sich schon mit relativ geringem Aufwand wichtige Aussagen gewinnen. Zu den Vorteilen des Ansatzes, Aussagen über ganze Klassen von Situationen oder Zusammenhängen auf diese Weise zu gewinnen, siehe [Heller/Struss 96a].

Möglich wird auch die dynamische Überprüfung der Gültigkeit von numerischen Modellen und eine verbesserte Kommunikation mit menschlichen Experten. Erklärungen der gezogenen Schlußfolgerungen können generiert werden, die es dem Benutzer ermöglichen, die einbezogenen Abhängigkeiten und Annahmen nachzuvollziehen und zu überprüfen.

## 2.2 Kompositionale Modellierung

Die Fähigkeit menschlicher Experten im Umgang mit komplexen Systemen auf der konzeptuellen Ebene ist zum einen in der Wahl der richtigen Abstraktionsebene begründet, zum anderen in der Fähigkeit, die für eine spezielle Aufgabe oder Schlußfolgerung relevanten Aspekte von irrelevanten zu trennen.

Kompositionale Modellierung bildet diesen Vorgang nach, indem zuerst eine "Bibliothek" von (möglichst) kontextfreien Modellfragmenten erstellt wird. Im ökologischen Bereich verwenden wir eine Organisation in Prozess-Beschreibungen (vgl. [Forbus 84]). Dabei können physikalische, chemische und biologische Vorgänge als elementare Einheiten (z. B. chemischen Reaktionen, Transportvorgängen, Aktivität von Mikroorganismen etc.) beschrieben werden.

Das jeweilige Systemmodell wird aufgrund einer "Szenario-Beschreibung" zusammengestellt. Sie besagt, welche Entitäten in einer gegebenen Situation präsent (und relevant) sind und in welchen Beziehungen sie stehen. Die einzelnen Modellfragmente aus der

Bibliothek sind mit Instantiierungsbedingungen versehen, die auf bestimmte Konstellationen von Entitäten(typen) in Szenariobeschreibungen Bezug nehmen.

### **2.3 Qualitative Modellierung**

Das verfügbare Wissen im Umweltbereich ist notwendigerweise beschränkt. Dies gilt in mehrfacher Hinsicht:

- Das Expertenwissen ist zu einem großen Teil charakterisiert durch die Kenntnis prinzipieller Zusammenhänge und Einflüsse, ohne daß die Parameter (z. B. Wirkungskoeffizienten) und funktionale Abhängigkeiten genau bekannt sind.
- Das Wissen über den aktuellen Systemzustand ist durch die eingeschränkte Beobachtbarkeit zwangsläufig unvollständig. Einige relevante Beobachtungen sind inhärent qualitativer Natur, zum Beispiel die Beurteilung des Gesundheitszustands einzelner Fische.

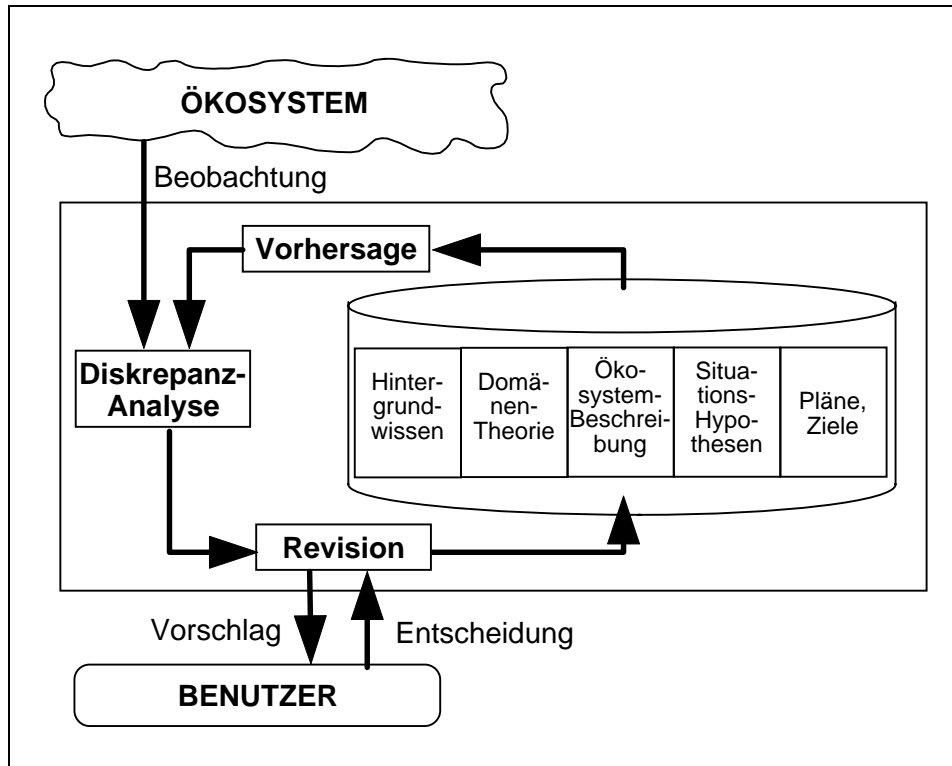
Eine geeignete Abstraktionsebene wird durch qualitative Modellierungstechniken gegeben, wobei die Grundidee ist, ausschließlich die relevanten Unterscheidungen zu treffen, also Klassen von sich gleichartig verhaltenden oder sich ähnlich auswirkenden Fällen zu bilden, über die dann geschlossen wird. Wir verwenden vorwiegend Qualitative Einflußdiagramme (QIDs, vgl. [Heller/Struss 96b]) als Repräsentationsformalismus.

## **3 Schlußtechniken der Entscheidungsunterstützung**

Die Ziele beider Projekte umfassen die Entwicklung einer integrierten Architektur zur modellbasierten Entscheidungsunterstützung. Dabei können konsistenzbasierte Schlußtechniken zur Anwendung kommen, wie in den folgenden Abschnitten beschrieben.

### **3.1 Der grundlegende Modell-Revisions-Zyklus**

Die grundlegende Aufgabe sowohl für Situationsbeurteilung als auch für Diagnose und Therapieplanung läßt sich als Modell-Revision beschreiben, wie in Abb. 3 dargestellt.



**Abb. 3: Der grundlegende Modell-Revisions-Zyklus**

Dabei unterscheidet sich die Revisionsstrategie nach der jeweiligen Aufgabenstellung.

### 3.2 Konsistenzbasierte Schlußtechniken

Wir verwenden eine Generalisierung von Verfahren der konsistenzbasierten Diagnose, die sich in technischen Domänen inzwischen vielfach bewährt haben und weitverbreitet Anwendung finden (vgl. [Hamscher et al. 92]). Eine Generalisierung macht es möglich, die Verfahren nicht nur auf technische Systeme anzuwenden, die meist komponentenorientiert modelliert werden, sondern auch auf Systeme, die in Form von Prozessen repräsentiert sind.

Bei diesem Verfahren werden Revisionen auf der Systembeschreibung (system description SD) durchgeführt (rechts in Abb. 3), die hier als eine Menge von Aussagen (etwa in Prädikatenlogik) aufgefaßt wird. Das Ziel ist dabei, Konsistenz mit anderen Aussagen zu erzeugen. Wir beschreiben die einzelnen Aufgaben in Kurzform.

Bei der **Situationsbeurteilung** werden Annahmen über den momentanen Systemzustand revidiert, sofern Herleitungen aus ihnen den aktuellen Beobachtungen widersprechen. Wir schreiben:

$$SD_{\text{fix}} \cup SD_{\text{revisable}} \cup \text{OBS} \dashv\vdash \perp \quad \rightarrow \quad SD_{\text{fix}} \cup SD'_{\text{revisable}} \cup \text{OBS} \dashv\vdash \perp$$

In diesem Fall umfaßt  $SD_{\text{fix}}$  das Hintergrundwissen, die Domänentheorie, und die Ökosystembeschreibung (evtl. mit Ausnahme einiger unsicherer Annahmen). OBS (observations) sind die Beobachtungen.  $SD_{\text{revisable}}$  besteht aus Annahmen über die Existenz von Objekten und den Werten exogener Variablen ("Situationshypothesen").

Darauf aufbauend kann man **Diagnose** definieren als den Abgleich der gewonnenen Systembeschreibung mit explizit formulierten Zielen (GOALS). Wiederum wird die Systembeschreibung aufgeteilt in einen revidierbaren und einen festen Anteil, allerdings nach anderen Kriterien, und wir schreiben:

$$SD_{\text{fix}} \cup SD'_{\text{revisable}} \cup \text{GOALS} \vdash \perp \quad \rightarrow \quad SD_{\text{fix}} \cup SD''_{\text{revisable}} \cup \text{GOALS} \not\vdash \perp$$

Die Revisionen beziehen sich diesmal auf Annahmen, die als "letzte Ursachen" für die Verletzungen der definierten Ziele gelten können.

Ganz analog kann **Therapieplanung** jetzt dargestellt werden. Falls die "letzten Ursachen" direkt behebbar sind, ist mit dem Diagnoseschritt schon alles geschehen. Andernfalls müssen die Symptome kuriert werden, und wir führen ein neues Revisionsverfahren durch, das ebenfalls auf dem Ergebnis der Situationsbeurteilung aufsetzt:

$$SD_{\text{fix}} \cup SD''_{\text{revisable}} \cup \text{GOALS} \vdash \perp \quad \rightarrow \quad SD_{\text{fix}} \cup SD'''_{\text{revisable}} \cup \text{GOALS} \not\vdash \perp$$

Jetzt allerdings werden die Revisionen neu interpretiert und sollen durchführbaren Aktionen entsprechen, also beschreiben, wie man das System (durch SD repräsentiert) beeinflussen muß, um die Widersprüche mit den Zielen auszuräumen.

Während mit den vorgestellten Ansätzen schon nützliche Ergebnisse erzeugt werden können, sind zwei wichtige Aspekte bisher außer Acht gelassen:

- Für gewisse Garantien (relativ zum Modell) über den Erfolg der Therapie werden über die konsistenzbasierten Strategien hinaus abduktive Schlußtechniken benötigt. Dabei werden wird die Systembeschreibung nicht nur konsistent mit den Zielen, sondern impliziert diese sogar:

$$SD_{\text{fix}} \cup SD'''_{\text{revisable}} \vdash \text{GOALS}$$

- Die dynamischen Aspekte werden bisher vernachlässigt, indem nur Zeitscheiben betrachtet werden. Insbesondere die Trägheit des Systems, das in einen gewünschten Zustand "bewegt" werden muß, ist nicht berücksichtigt.

## 4 Anwendungen in der Praxis

### 4.1 Algenblüten in Brasilien (Projekt QUALIDADE)

Im Projekt QUALIDADE (Qualitative Modeling in the Domain of Automated Diagnosis and Ecology, Partner: Universidade Federal do Rio Grande do Sul), das vom BMBF und vom brasilianischen Forschungsministerium (CNPq) gefördert wird, ist das betrachtete Ökosystem der Rio Guaíba in Südbrasilien, der stark durch industrielle und landwirtschaftliche Abwässer belastet ist.

Das Projekt konzentriert sich auf Studien zu lokalen Algenblüten. Der Hauptfaktor, der untersucht wird, ist die Akkumulation von außerordentlich hohen Konzentrationen von organischen Nährstoffen durch das Zusammenspiel von komplexer Hydrodynamik und räumlich differenzierter Einwirkungen. Dazu gehören sowohl Einwirkungen physikalischer Natur (z. B. Erwärmung in seichtem Wasser) als auch biologischer Natur (z. B. Verteilung von Mikroorganismen).

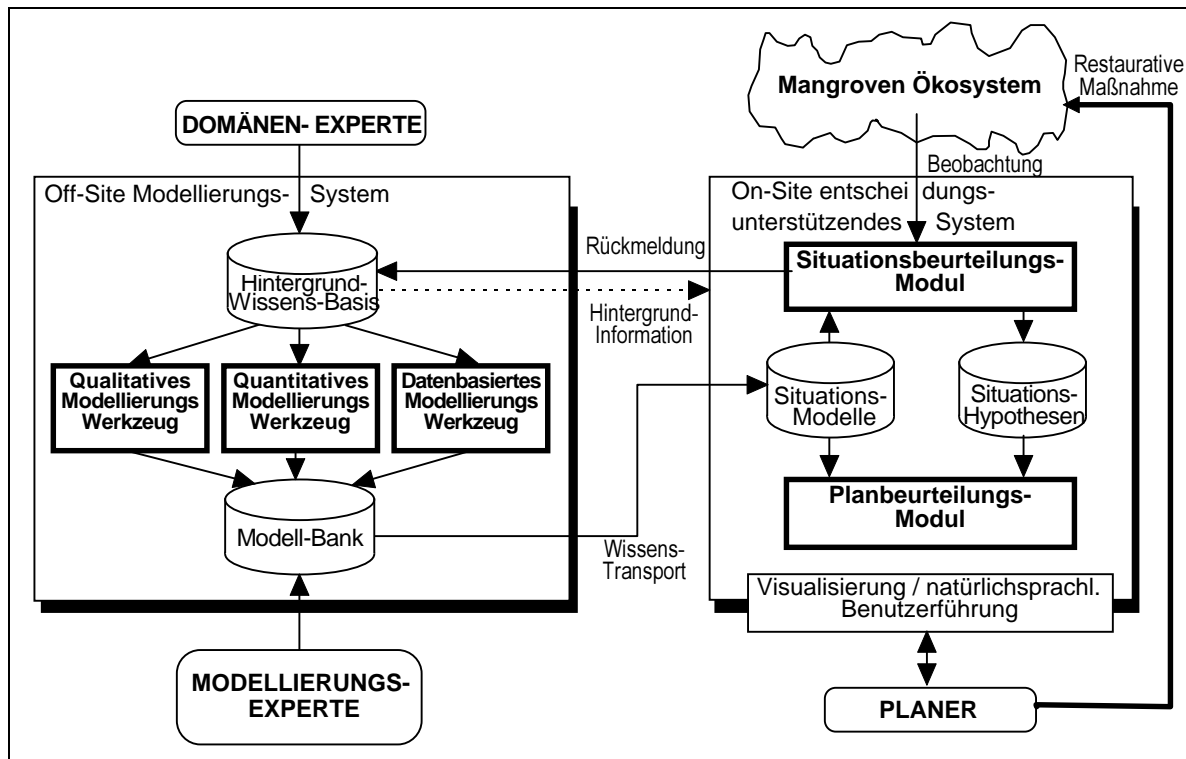
Die Modellierung der beteiligten Prozesse soll durch ein besseres Verständnis ihres Zusammenspiels und durch Unterstützung der Simulation dazu beitragen. Dies ist eines der Hauptziele des konzipierten Systems zur integrierten Entscheidungsunterstützung.

#### **4.2 Mangrovenwälder in Indien (Projekt MERMAID)**

Im Projekt MERMAID (Model-based Environmental Resource Management Aid, Partner: M. S. Swaminathan Research Foundation, Indian Institute of Technology, Tata Research Design and Development Centre) sollen modellbasierte entscheidungsunterstützende Systeme entwickelt und eingesetzt werden, um den lokalen Forest Departments beim Management der bedrohten Mangrovenwälder in Südindien zu Hilfe zu kommen.

In Indien sind etwa 60% der Mangrovenwaldfläche durch Degradation bedroht, wobei neuere Studien gezeigt haben, daß die Veränderung der Muster der gezeitenbedingten Durchspülung (Entwicklung von "Salzpfannen") eine große Rolle spielt. Nutzungspläne, aber auch Bemühungen zur Konservierung und Restauration, die diese Effekte nicht Betracht gezogen haben, hatten erwiesenermaßen fatale Folgen. Daher ist eines der zentralen Probleme beim Management der Mangrovenwälder die Notwendigkeit, Forschungsergebnisse und Expertenwissen zur Entscheidungsunterstützung verfügbar zu machen.

Im Projekt MERMAID werden dazu formale Modellierungsmechanismen (vgl. Abschnitt 2) eingesetzt, entscheidungsunterstützende Systeme entwickelt und an die Bedürfnisse der Forest Departments angepaßt. Dazu gehört z.B. die Benutzerführung in verschiedenen indischen Sprachen. Die geplante Architektur sieht sowohl Unterstützung für die Organisation des Expertenwissens ("Off-Site") als auch für die Kommunikation mit den lokalen Benutzersystemen ("On-Site") vor. Zusätzlich zum qualitativen sollen auch quantitative und datenbasierte Modellierungsparadigmen zur Anwendung kommen. Einen Überblick gibt Abb. 4.



**Abb. 4: Die geplante Architektur für die Anwendung im Projekt MERMAID**

Dieses Projekt ist zur Zeit in der Konzept- und Spezifikationsphase. Die genauen Anforderungen und Randbedingungen werden im wechselseitigen Austausch untersucht.

## Danksagung

Wir danken Prof. Waldir Leite Roque, Dr. Deepak Khemani und Dr. Sachin Patwardhan für ihre wertvollen Beiträge zur Planung der vorgestellten Projekte.

## Literatur

[Forbus 84]

Ken Forbus: *Qualitative Process Theory*. Artificial Intelligence 24 (1-3), 1984.

[Hamscher et al. 92]

Walter Hamscher, Luca Console, Johan de Kleer: *Readings in Model-Based Diagnosis*. Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, 1992.

[Heller et al. 95]

Ulrich Heller, Peter Struss, François Guerrin, Waldir Roque: *A Qualitative Modeling Approach to Algal Bloom Prediction*. In Workshop Notes of "Artificial Intelligence and the Environment" of IJCAI-95, Montreal, Canada, 1995.

[Heller/Struss 96a]

Ulrich Heller, Peter Struss: *Qualitative Modeling for Environmental Decision Support*. 10. Internationales Symposium Informatik für den Umweltschutz (Umweltinformatik-96), Hannover, erschienen in der Reihe "Umweltinformatik Aktuell", Band 10, Metropolis Verlag, Marburg, 1996. (S. 358-367)



[Heller/Struss 96b]

Ulrich Heller, Peter Struss: *Transformation of Qualitative Dynamic Models - Application in Hydroecology*. 10<sup>th</sup> International Workshop on Qualitative Reasoning (QR-96), TR-96-01, AAAI Press, Stanford, 1996. (pp. 83-92)

Dipl.-Inform. Ulrich Heller studierte Informatik an der TU München, wo er zur Zeit eine Stelle als wissenschaftlicher Mitarbeiter innehat. Er betreut unter anderem die Projekte QUALIDADE und MERMAID in der Gruppe von Dr. habil. Peter Struss und beschäftigt sich mit modellbasierten Methoden für entscheidungsunterstützende Systeme im Umweltbereich.

Dr. habil. Peter Struss ist Dozent an der TU München, wo er die Gruppe Model-based Systems and Qualitative Reasoning leitet, Geschäftsführer der OCC'M Software GmbH und Sprecher der GI-Fachgruppe "Qualitatives und modellbasiertes Schließen". Schwerpunkte seiner Arbeiten sind die Modellierung technischer und ökologischer Systeme und Grundlagen und Anwendungen modellbasierter automatischer Problemlöser, insbesondere für Diagnose, Testen und Therapie.