Globale Anfragebearbeitung mit verteilten und heterogenen Datenquellen

Ulf Leser[1]

Technische Universität Berlin, Fachbereich 13
Einsteinufer 17, D-10587 Berlin
Email: leser@cs.tu-berlin.de.

1. Einleitung

Im Rahmen des Berlin/Brandenburger Graduiertenkolleg „Verteilte Informationssysteme“ (GKVI[2]) arbeiten zur Zeit 15 Stipendiaten an verschiedenen Aspekten der Konzeption, Erstellung und des Betriebs von Informationssystemen in verteilten und heterogenen Umgebungen. Die prinzipiell interdisziplinäre Ausrichtung des GKVI, die eine fruchtbare Verbindung zwischen Wirtschaftsinformatik, Datenbanktechnik und Aspekten der Softwaretechnik sucht, schafft ein breites Themenspektrum, das von Internet-Pricing [20] und Indexstrukturen [8] über objektorientierte Middleware [6] bis zur Modellierung von Benutzerschnittstellen [15] reicht.

Einen großen Raum nimmt die Forschung über verschiedene Aspekte der Informationsintegration ein. Die Bedeutung dieses Gebietes hat seit dem Erfolg des World Wide Web nicht nur erheblich zugenommen, sondern sich auch in ihrem Charakter verändert. Während man es in den 80er Jahren typischerweise mit einer relativ überschaubaren Menge von wohlstrukturierten Datenquellen zu tun hatte, ist man heute an der Entwicklung von Systemen interessiert, die eine weit größere Anzahl von heterogenen, vollständig autonomen und potentiell weltweit verteilten Quellen zu integrieren versuchen. Ein typisches Anwendungsszenario für föderierte Datenbanken ist ein Unternehmen, das eine Anzahl von relationalen Abteilungsdatenbanken in ein unternehmensweites Data Warehouse integrieren möchte. Dagegen adressieren Digital Library Projekte im Umfeld des WWW hunderte von Datenquellen, die ihre Informationen über verschiedenste Schnittstellen zugänglich machen und unterschiedliche Darstellungsformate benutzen.

Aus diesen veränderten Rahmenbedingungen entstanden eine Reihe von neuen Ansätzen für die Integration von Informationssystemen:

- Durch semistrukturierte Datenmodelle versucht man, die Heterogenität der Daten in unterschiedlichen Quellen besser abbilden zu können. Anfragen können dann durch Graphtransformationen beschrieben werden [4]. Neuartige Techniken sind dabei

[1] Diese Arbeit wird unterstützt von der Deutschen Forschungsgemeinschaft durch das Berlin - Brandenburger Graduiertenkolleg “Verteilte Informationssysteme“, Antrag GRK 316.

[2] http://www.wiwi.hu-berlin.de/gkvi

auch für die Anfrageoptimierung [2] notwendig. In eine ähnliche Richtung geht auch das insbesondere im eCommerce - Umfeld wichtige XML.

- Die Integration von Daten aus einer Vielzahl von nahezu unbekannten Quellen kann kaum noch ausschließlich unter logisch - semantischen Kriterien erfolgen. Statt dessen gewinnt die Qualität der Daten eine besondere Bedeutung [17].
- Die Variabilität der Zugriffsmethoden verlangt nach ihrer expliziten Modellierung und besonderer Behandlung. Zum Beispiel können Anfragebeschränkungen, die sich aus der Integration von formularbasierten WWW Schnittstellen ergeben, nicht innerhalb einer konventionellen Anfrageoptimierung berücksichtigt werden [5].
- Durch den hohen Grad an Autonomie der Quellen verschärft sich das Problem, daß die beteiligten Systeme evolutionären Weiterentwicklungen unterworfen sind. Ein Integrationssystem muß darauf entsprechend reagieren können. Ansätze dazu basieren beispielsweise auf der Verwendung geeigneter Metainformationen [9].
- Neben der Integration von Daten gewinnt auch die Verteilung von Operationen im Sinne eines Software - Leasing zunehmend an Bedeutung [7].

Als Anwendungsgebiete werden innerhalb des GKVI zum Beispiel Umweltinformatik [19], digitale Bibliotheken [4] und Molekularbiologie [12] untersucht. Der letzte Bereich soll nun stellvertretend kurz beschrieben werden, um die dabei auftretenden Probleme zu verdeutlichen. Der später vorgestellte Ansatz zu ihrer Lösung ist aber prinzipiell unabhängig vom Anwendungsgebiet.

2. Integration molekularbiologischer Datenquellen

Weltweit sind zur Zeit mehr als 400 Informationssysteme mit molekularbiologischen Daten öffentlich zugänglich [16]. Die überwiegende Mehrzahl bietet ihren Inhalt über das WWW an. Daten können dabei in der Regel über Suchmasken oder Stichworte gezielt selektiert werden. Neben dem WWW erlangt auch CORBA eine zunehmende Bedeutung, und erste Datenbanken sind über entsprechende IDL - basierte Schnittstellen erreichbar [1].

Die Modellierung molekularbiologischer Daten in einer Datenbank erfordert in der Regel komplexe Schemata mit unter Umständen mehreren hundert Klassen. Anfragen an solche Schemata zu formulieren ist für Biologen nicht zumutbar. Deshalb basieren die Schnittstellen in der Regel auf einer begrenzten Anzahl von vordefinierten Anfragen, die vom Benutzer mit Parametern versehen werden können (sogenannten „canned queries“).

Die 400 verschiedenen Quellen sind potentiell überlappend, sowohl auf der intensionalen Ebene, d.h. sie speichern dieselbe Art Daten, als auch in Bezug auf ihre Extensionen, d.h. sie speichern Informationen über dieselben Objekte. Da die Daten oft experimentell erhoben wurden, kann es Widersprüche zwischen verschiedenen Quellen geben. Das bedeutet, daß es oftmals sinnvoll und notwendig ist, für dasselbe Datum mehrere Quellen zu befragen. Des weiteren gibt es eine Vielzahl forschungsrelevanter Fragen, die nicht durch die Benutzung einer einzelnen Quelle beantwortet werden können, sondern die Kombination von Teilergebnissen voraussetzen. Aus diesen

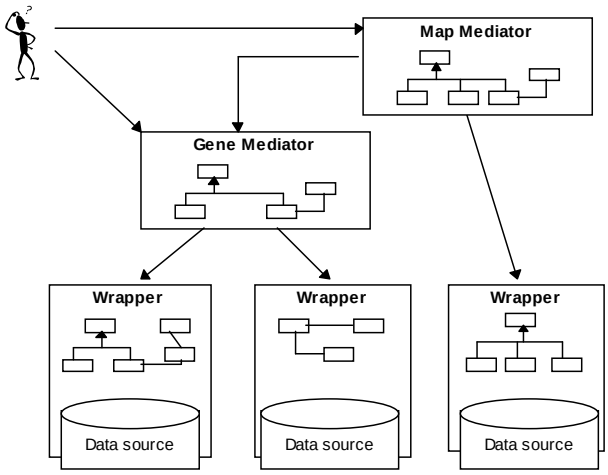

Abbildung 1. Hierarchische, Mediator - basierte Integrationsarchitektur.

Gründen gilt die Datenintegration als eine wichtige Voraussetzungen für den weiteren Erfolg molekularbiologischer Forschung [18].

3. Integrationsmethodik

Aus den im vorigen Abschnitt erläuterten Gegebenheiten können eine Reihe von Anforderungen an eine mögliche Integrationsarchitektur abgeleitet werden. Um einen ausreichenden Grad an Integration und Komfort zu gewährleisten, wird eine *enge Kopplung* angestrebt, d.h. das Integrationssystem basiert auf einem globalen Schema. Eine auf Materialisierung basierende Integration ist aufgrund der kurzen Updatezyklen der Quellen nicht möglich. Deshalb wird eine virtuelle Integration angestrebt, bei der globale Anfragen online in Anfragen an Quellen übersetzt werden. Außerdem sind auf Schemaintegration basierende Ansätze in derart komplexen und semantisch heterogenen Umgebungen kaum anwendbar. Statt dessen wurde ein auf Mediatoren basierender Ansatz gewählt. (siehe Abb. 1 und [21]).

Mediator - basierte Informationssysteme (MBIS) unterscheiden sich von föderierten Datenbanken (FDBS) im wesentlichen in der Herangehensweise. MBIS werden Top-Down entwickelt, d.h., man geht von einem initial vorhandenen globalen Informationsbedürfnis aus, das durch das MBIS erfüllt werden soll. Das globale Schema modelliert die dafür notwendigen Daten; erst in einem zweiten Schritt werden die Daten in den verfügbaren Quellen in ihrem Verhältnis zum globalen Schema durch *Schemakorrespondenzen* beschrieben. Diese Korrespondenzen bilden später die Grundlage für die Ausführung von Anfragen gegen das globale Schema.

FDBS verwenden in der Regel die umgekehrte Methode (Bottom-Up). Ihre Motivation ist die Entwicklung eines Integrationssystems für eine gegebene Menge von Quellen. Das globale Schema muß dementsprechend die Vereinigung der Daten aller

Quellen umfassen. Um das sicherzustellen, verwendet man einen semi-automatischen Schemaintegrationsprozeß, dessen Eingabe *Korrespondenzen zwischen Quellschemata* sind. Während der Berechnung des globalen Schemas werden die Abbildungsvorschriften für globale Anfragen in Quellanfragen mit erzeugt.

Die Top-Down Entwicklung von Integrationssystemen führt, verglichen mit dem FDBS Ansatz, zwar zu einer geringeren Kohärenz innerhalb des Systems, bietet dafür aber eine Reihe von Vorteilen in stark heterogenen und sich häufig ändernden Umgebungen [11]. Beispielsweise kann auf Schemaänderungen in Quellen durch Änderung von Korrespondenzen reagiert werden; eine Re-Integration ist nicht notwendig.

FDBS und MBIS gleichen sich aber in ihrer prinzipiellen Architektur. In MBIS wird das Integrationsproblem in zwei Stufen zerlegt. Die technische und syntaktische Heterogenität wird von quellspezifischen Wrappern behoben. Ein Wrapper ermöglicht es also, auf eine Quelle in einer einheitlichen Sprache zuzugreifen. Die semantische und strukturelle Integration wird von Mediatoren vorgenommen. Ein Mediator verwaltet ein internes Schema und ist in der Lage, Anfragen gegen dieses Schema zu beantworten. Dafür greift er auf die Wrapper zu. Bei der Integration komplexer Domänen ist außerdem eine Modularisierung vorteilhaft. Dazu verwendet man eine Menge von hierarchisch angeordneten Mediatoren.

Im folgenden betrachten wir der Einfachheit halber ein System mit nur einem Mediator. Als globales Datenmodell verwenden wir das Relationenmodell. Wrapper bieten zum Zugriff auf ihre Quellen ein relationales Exportschema an. Sie müssen in der Lage sein, einige, aber nicht notwendigerweise alle, Anfragen gegen dieses Wrapperschema zu beantworten (beschränkte Wrapper).

4. Query Correspondence Assertions

Das eigentliche Ziel jedes MBIS ist die Beantwortung von globalen Anfragen. Dazu muß der Mediator auf die verfügbaren Datenquellen zugreifen, da er selber keine Daten speichert. Die Anfrageübersetzung muß zum Zeitpunkt der Anfrageformulierung geleistet werden: Eine gegebene globale Anfrage Q wird in eine Menge von Anfragen Q_i, übersetzt, so daß die geeignet kombinierten Ergebnisse korrekte Antworten auf Q ergeben. Die Q_i müssen wrapperspezifisch sein; betrachtet man beschränkte Wrapper, muß außerdem beachtet werden, daß nur solche Q_i erzeugt werden, die auch ausführbar sind. Um die semantische Korrektheit der Übersetzung zu gewährleisten, benutzt der Mediator die vorab spezifizierten Korrespondenzen.

Deshalb kommt dem Mechanismus zur Definition von Korrespondenzen innerhalb eines MBIS eine überragende Bedeutung zu. Seine Ausdrucksfähigkeit sollte groß genug sein, um eine Vielzahl von verschiedenartigen Heterogenitäten zwischen Schemata überbrücken zu können; andererseits wird sie begrenzt dadurch, daß sie möglichst effiziente Übersetzungsalgorithmen erlauben muß. Im wesentlichen gibt es drei Klassen:

(M1) Viele Methoden basieren auf 1:1 Entsprechungen zwischen Relationen des globalen Schemas und Relationen von Wrapperschemata;

(M2) Ansätze, die auf Sichten basieren, erlauben die Korrespondenz zwischen einer globalen Relation (der Sicht) mit einer Anfrage an ein Wrapperschema;
(M3) Eine Variante der vorherigen Methode basiert auf der Darstellung von Wrapperrelationen als Sichten auf das globale Schema [14].

Für jedes dieser Verfahren lassen sich Fälle finden, bei denen eine korrekte Beschreibung nicht möglich ist. Diese resultieren meist aus unterschiedlichen Intensionen der Schemata. Beispielsweise möchte man einen Mediator *M* für Gene auf dem X Chromosom von Säugetieren entwickeln. Eine Quelle S_1, die Daten sämtlicher Chromosomen von Säugetieren enthält, läßt sich wie folgt mit (M2) darstellen[3], aber nicht mit (M3), da die Anfrage an die Quelle eine Bedingung enthalten muß:

$$M.gene(Sp,Chr,Obj) \leftarrow S_1.daten(Sp,Chr,Obj),Chr=\text{“}X\text{“};$$

Dagegen wäre eine Quelle S_2, die nur X Chromosom Daten von Menschen enthält, mit (M3), aber nicht mit (M2) beschreibbar, da nun eine Bedingung in der Anfrage an das globale Schema notwendig ist:

$$M.gene(Sp,Chr,Obj),Sp=\text{“}Human\text{“} \rightarrow S_2.daten(Chr,Obj);$$

Aus diesem Grund wurde eine neue Methode zur Definition von Schemakorrespondenzen entwickelt, die auf sogenannten Query Correspondence Assertions beruht (QCAs). QCAs kombinieren (M2) und (M3), indem sie die Definition von (intensionalen) Korrespondenzen zwischen einer Anfrage an das globale Schema und einer Anfrage gegen ein Wrapperschema gestatten. Eine Quelle S_3, die Daten beliebiger Chromosomen das Menschen enthält, kann durch folgende QCA beschreiben werden, aber weder durch (M2) noch (M3):

$$M.gene(Sp,Chr,Obj),Sp=\text{“}Human\text{“} \leftarrow S_3.daten(Chr,Obj),Chr=\text{“}X\text{“};$$

Die intensionale Aussage einer QCA ist damit ist die Äquivalenz zwischen zwei Anfragen: Eine gegen das globale Schema, und eine gegen ein Wrapperschema, deren Ausführbarkeit garantiert ist. Beispielsweise kann so die Bedeutung einer „canned query“ einer WWW Schnittstelle in Bezug auf das globale Schema definiert werden. Extensional sichert eine QCA zu, daß sämtliche Tupel, die durch die Ausführung der Wrapperanfrage berechnet werden, korrekte Tupel für die globale Anfrage sind. Damit ist die Extension der rechten Anfrage per Definition eine Untermenge der (zunächst nur virtuell existierenden) linken Anfrage.

5. Anfrageübersetzung mit QCAs

Dem Entwickler von MBIS ist mit QCAs ein mächtiges Hilfsmittel zur Beschreibung von Zusammenhängen zwischen heterogenen Schemata an die Hand gegeben. Damit alleine ist aber noch nichts gewonnen: Der Mediator muß schließlich in der Lage sein,

[3] Wir verwenden DATALOG Notation für Anfragen. Die genauen Schemata sind aus Platzgründen nicht angegeben.

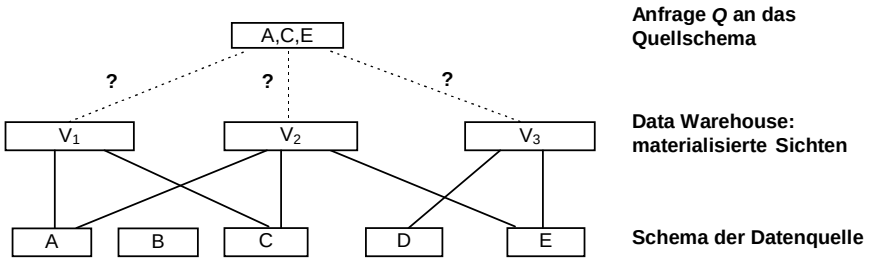

Abbildung 2. Wie kann man *Q* nur mit Hilfe der materialisierten Sichten beantworten ?

eine *beliebige* globale Anfrage *Q* zu beantworten. Nur in Ausnahmefällen wird sich *Q* genau mit einer linken Seite einer QCA decken.

Deshalb muß der Mediator eine Kombination von QCAs (einen *Plan*) finden, so daß die geeignet kombinierten Ergebnisse korrekte Antworten für *Q* liefern. QCAs werden dabei durch die Einführung von Joins kombiniert. Ist ein korrekter Plan gefunden, werden die rechten Seiten der in ihm enthaltenen QCAs ausgeführt und die Ergebnisse im Mediator zwischengespeichert. Zur Zeit werden Joins auf diesen temporären Ergebnissen berechnet, da z.B. im WWW ein Verschieben der Joinoperation in eine Quelle nicht möglich ist. Existieren mehrere korrekte Pläne, werden alle ausgeführt, da die in ihnen enthaltenen QCAs potentiell verschiedene Quellen adressieren und damit unterschiedliche Extensionen liefern können.

Damit wird der gesamte Vorgang der Anfragebearbeitung in drei Teilschritte untergliedert:

1. *Anfrageplanung*: Berechnet die Menge der korrekten Pläne;
2. *Anfrageausführung*: Optimiert die korrekten Pläne und übergibt ihre Teilanfragen zur Ausführung an die entsprechenden Wrapper;
3. *Ergebnisintegration*: Nimmt die Integration der Ergebnisse verschiedener Pläne vor, indem z.B. die Daten von identischen Objekte zusammengeführt werden.

In vielen realen Anwendungen ist Schritt 3 der „schwierigste“, da es oftmals nahezu unmöglich ist, festzustellen, ob die Daten aus zwei Quellen dem gleichen Objekt zugeordnet werden können oder nicht. In solchen Fällen muß die Entscheidung dem Benutzer überlassen werden. Schritt 2 kann auf Forschungsergebnisse im Bereich verteilter Datenbanken zurückgreifen, wenn auch einige Erweiterungen zur Berücksichtigung beschränkter Wrapper notwendig sind.

Der konzeptionell schwierigste Schritt ist der erste. Er verlangt eine Umkehrung der klassischen Sichtexpansion und läßt sich am besten durch eine Analogie beschreiben: Gegeben sei ein Data Warehouse, das aus einer OLTP Datenbank durch Sichtmaterialisierung gebildet wird. Zu einem bestimmten Zeitpunkt ist die Quelle nicht verfügbar. Wie kann man nun eine Anfrage *Q* an das Quellschema beantworten, die nicht einer materialisierten Sicht entspricht (siehe Abb. 2) ?

Im Falle von konjunktiven Sichtdefinitionen und einer konjunktiven Anfrage ist dies möglich. Man sucht dazu Konjunktionen von Sichten, die semantisch äquivalent zu *Q* sind [3]. Eine Anfrage *Q* ist semantisch äquivalent zu einem Plan *P*, wenn *Q* und

P dasselbe Schema adressieren und für jede mögliche Instanz dieses Schemas dasselbe Ergebnis berechnen. In [13] wird gezeigt, daß dieses Problem entscheidbar, aber NP-vollständig ist. Eine Methode zu seiner Lösung besteht darin, daß man alle Kombinationen von Sichten, die nicht in sich widersprüchliche Bedingungen enthalten, aufzählt und für jede dieser Kombinationen, d.h. für jede Konjunktion ihrer Definitionen, testet, ob sie semantisch äquivalent zu *Q* ist.

Im unserem Fall bildet das globale Schema des Mediators das Schema der OLTP Datenbank. Die materialisierten Sichten sind die Daten der Quellen, die jeweils über eine Sicht (die linke Seite einer QCA) auf das globale Schema definiert sind. Nur die Daten der Sichten sind direkt erreichbar; das globale Schema existiert nur virtuell.

6. Erweiterungen

Der Integrationsrahmen, der in den vorherigen Kapiteln skizziert wurde, kann an vielen Stellen noch wesentlich verbessert werden. Beispielsweise kann der angegebene Algorithmus zur Feststellung der semantischen Äquivalenz dadurch beschleunigt werden, daß man die Tatsache ausnutzt, daß eine Anfrage des Äquivalenz-Tests konstant bleibt (das ist *Q*), und die anderen Anfragen jeweils aus einer vorab gegebenen Menge von Blöcken zusammengesetzt werden (den QCAs). Daraus ergeben sich erhebliche Laufzeitverbesserungen, wenn auch die prinzipielle Komplexität erhalten bleibt [10].

Des weiteren kann man Erweiterungen des Ansatzes in Bezug auf die Ausdrucksmächtigkeit von QCAs auf elegante Weise in der Anfrageplanung berücksichtigen. In der oben beschriebenen Version sind QCAs z.B. nicht in der Lage, schematische Heterogenität zu überbrücken. Außerdem können sie keine Generalisierungen im globalen Schema erlauben, was die Verwendung einer objektorientierten Modellierungsmethode für das Mediatorschema unmöglich macht. Beide Beschränkungen können durch Modifikationen des Algorithmus aufgehoben werden, was die Einsetzbarkeit von QCAs erheblich erweitert.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die in der Einleitung erwähnte Bedeutung von Informationsqualität für die Datenintegration. In [17] erweitern wir das hier beschriebene Verfahren dahingehend. Dazu annotieren wir QCAs mit Qualitätseinschätzungen für Kriterien wie z.B. die Verläßlichkeit, Vollständigkeit, und Konsistenz der Daten. Es stellt sich heraus, das QCAs das ideale Ziel für Qualitätsbemessungen sind, da man so die Qualität unterschiedlicher Anfragen an eine Quelle unterschiedlich bewerten kann. Damit ist beispielsweise eine Aussagen wie: „Diese Quelle ist sehr vollständig für Informatikliteratur, aber nur unvollständig im Bereich Medizin“, modellierbar. Die Bewertung einzelner QCAs wird zur Bewertung von Plänen aggregiert, wobei jedem Kriterium eine spezifische Aggregatfunktion zugeordnet wird. Über eine benutzerabhängige Gewichtung kann man die relative Bedeutung der einzelnen Kriterien angeben. Mittels der aggregierten Planbewertungen, zusammen mit der Benutzerwichtung, können Pläne dann gemäß ihrer Qualität sortiert werden.

Literaturangaben:

[1] Barillot, E., U. Leser, et al. (1999). A Proposal for a Standard CORBA Interface for Genome Maps. Bioinformatics **15**(2): 157-169.

[2] Bergholz, A. and J. C. Freytag (1999). Matching Schemata by Using Constraint Satisfaction Techniques. Workshop on Query Processing for Semistructured Data, Jerusalem, Israel.

[3] Chandra, A. K. and P. M. Merlin (1977). Optimal Implementation of Conjunctive Queries in Relational Databases. 9th ACM Symposium on Theory of Computing.

[4] Faulstich, L. and M. Spiliopoulou (1998). Building HyperNavigation Wrappers for Publisher Web-Sides. 2nd European Conf. on Digital Libraries; LNCS 1513, Heraklion, Krete.

[5] Garcia-Molina, H. and R. Yerneni (1999). Coping with Limited Capabilities of Sources. 8th GI Fachtagung: Datenbanksysteme in Büro, Technik und Wissenschaft, Freiburg, Germany.

[6] Jacobsen, H.-A. and B. Kraemer (199). A Design Pattern Based Approach for Generating Synchronization Adaptors from Annotated IDL. IEEE Int. Conf. on Automated Software Engineering.

[7] Jacobsen, H.-A., G. Riessen, et al. (1999). MMM - Middleware for Method Management on the WWW. Workshop on Web Engineering (WWW8), Toronto, Canada.

[8] Jürgens, M. and H.-J. Lenz (1999). PISA - Performance Models for Index Structures with and without Aggregated Data. 11th SSDBM, Cleveland, Ohio.

[9] Kutsche, R.-D. and A. Sünbül (1999). A Meta-Data Based Development Strategy for Heterogeneous, Distributed Information Systems. 3rd IEEE Metadata Conference, Bethesda.

[10] Leser, U. (1998). Combining Heterogeneous Data Sources through Query Correspondence Assertions. Workshop on Web Information and Data Management, Washington, D.C.

[11] Leser, U. (1998). Maintenance and Mediation in Federated Databases. 8th Workshop on Information Technology and Systems, Helsinki, Finland.

[12] Leser, U. (1999). Designing a Global Information Resource for Molecular Biology. 8th GI Fachtagung: Datenbanksysteme in Büro, Technik und Wissenschaft, Freiburg, Germany.

[13] Levy, A. Y., A. O. Mendelzon, et al. (1995). Answering Queries using Views. 14th ACM Symposium on Principles of Database Systems, San Jose, CA.

[14] Levy, A. Y., A. Rajaraman, et al. (1996). Querying Heterogeneous Information Sources Using Source Descriptions. 22nd Conference on Very Large Databases, Bombay, India.

[15] Lewerenz, J. (1999). On the Use of Natural Language Concepts for the Conceptual Modelling of Interaction in Information Systems. 4th Int. Conf. on Applications of Natural Language to Information Systems, Klagenfurt, Austria.

[16] NAR Jan. 1998 (1998). Nucleic Acids Research. January 1998 Issue.

[17] Naumann, F., U. Leser, et al. (1999). Quality-driven Integration of Heterogeneous Information Systems. 25th Conference on Very Large Database Systems, Edinburgh.

[18] Robbins, R. J. (1995). Information Infrastructure for the Human Genome Project. IEEE Engineering in Medicine and Biology **14**(6): 746-759.

[19] Röttgers, J., L. Faulstich, et al. (1997). Ein Verweis- und Kommunikationsservice fuer den betrieblichen Umweltschutz. BUIS'97, Strassburg, Frankreich.

[20] Rupp, B., R. Edell, et al. (1998). INDEX: A Platform for Determining how People Value the Quality of their Internet Access. 6th IEEE/IFIP Workshop on QoS, Napa, California.

[21] Wiederhold, G. (1992). Mediators in the Architecture of Future Information Systems. IEEE Computer **25**(3): 38-49.