

Geodateninfrastrukturen

Lars Bernard, Johannes Brauner, Stephan Mäs, Stefan Wiemann

lars.bernard@tu-dresden.de; johannes.brauner@tu-dresden.de; stephan.maes@tu-dresden.de; stefan.wiemann@tu-dresden.de

Schlüsselwörter

Geodateninfrastrukturen (Geoinformationsinfrastrukturen, GDI), Geoprozessierung, Interoperabilität, Kartendienste, nutzergenerierte Geoinformationen (VGI), INSPIRE, Geodatenfusion, Geoinformation, Geodaten, Geodienste, Geodatenmodelle (Schemata)

Zusammenfassung

Geodateninfrastrukturen (GDI) zielen auf den einfachen Austausch von Geodaten und -diensten. GDI sollen die effiziente Umsetzung von Geoinformationsanwendungen mit Zugriff auf aktuelle, verteilte heterogene Geodatenquellen erlauben. Zahlreiche gesetzliche, kommerzielle, nutzergetriebene und wissenschaftliche Initiativen forcieren den Auf- und Ausbau von GDI. Der Beitrag diskutiert Arten und aktuelle Entwicklungsstände von GDI und zeigt Ansätze für die nächsten GDI-Generationen.

1 Geodateninfrastrukturen im Überblick

Die Idee zur Schaffung internetbasierter Infrastrukturen für den Austausch und die gemeinsame Nutzung verteilter digitaler Geodaten ist inzwischen mehr als 20 Jahre alt: Mit der *Executive Order 12906 - Coordinating Geographic Data Acquisition and Access: The National Spatial Data Infrastructure (NSDI)* fiel 1994 der Startschuss für den Aufbau der US NSDI, einer Geodateninfrastruktur (GDI) in den USA. Inzwischen gibt es eine Vielzahl an Initiativen die an einheitlichen Standards und Richtlinien zum Austausch von Geoinformationen arbeiten. Entsprechende Aktivitäten, etwa der *International Organization for Standardization (ISO)* und des *Open Geospatial Consortium (OGC)* zielen einerseits auf syntaktische Interoperabilität (etwa Austauschformate oder Diensteschnittstellen) aber auch immer mehr auf semantische Interoperabilität (gemeinsame Vokabulare oder semantische Referenzsysteme) für künftige Informationsinfrastrukturen. Auf europäischer Ebene stellt die Richtlinie *Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE, <http://inspire.jrc.ec.europa.eu/>)* die gesetzliche Grundlage zur Schaffung einer behördlichen, europäischen Infrastruktur zum effizienten Austausch umweltrelevanter Geodaten. Die vor rund 10 Jahren aufgekommenen kommerziellen Kartendienste (z. B. Google Maps, Bing Maps) und nutzergetriebenen Crowdsourcing-Projekte (z. B. OpenStreetMap), die nahezu gleichzeitig entstanden sind und sehr rasch über eine globale Nutzergemeinde verfügt haben, beeinflussen heute ebenfalls maßgeblich die aktuellen GDI-Entwicklungen.

Zur besseren Einordnung der im Folgenden genauer dargestellten Initiativen und Aktivitäten zu Entwicklungen im Kontext von Geodateninfrastrukturen soll eine knappe Begriffsbestimmung über das zu Grunde liegende Verständnis einer GDI vorangestellt werden:

Eine Geodateninfrastruktur umfasst verteilte Geodaten und -dienste, Netzwerke, Standards und Richtlinien zum verantwortungsvollen Austausch und Umgang mit den zur Verfügung stehenden Geoinformationen sowie die institutionellen, organisatorischen, technologischen und wirtschaftlichen Ressourcen zu Entwicklung, Betrieb und Pflege der Geodateninfrastruktur. Nutzer einer Geodateninfrastruktur können ad-hoc die angebotenen Geodaten und -dienste verwenden und für ihre Anwendungszwecke zusammenführen sowie eigene Geodaten und -dienste bereitstellen.

Dieses GDI-Verständnis orientiert sich an [1] und ist recht weitreichend. Es lässt auch Analogien von GDI zu anderen Infrastrukturen (etwa Verkehr- oder Kommunikationsinfrastrukturen) erkennen. In der Literatur und Gesetzgebung finden sich heute zahlreiche weitere Definitionsansätze, die teilweise und je nach Kontext den GDI-Begriff beispielsweise auf technologische, strukturelle oder rechtliche Aspekte reduzieren. Auch wenn *Daten* und *Information* sowie *Geo* und *Raum* jeweils keine synonymen Begriffspaare sind, werden die Begriffe *Geodaten-* oder *Geoinformationsinfrastruktur* und *Spatial Data* oder *Spatial Information Infrastructure* oft synonym verwendet. Auch hier soll GDI daher als Synonym zu Geo- oder Rauminformationsinfrastrukturen verstanden werden. Dabei sollte jedoch nicht vergessen werden, dass die Ableitung von Information immer entsprechende Methoden sowie Wissen um die Semantik und die Rezipienten voraussetzt, die es zu berücksichtigen gilt.

Die obige GDI-Definition umfasst auch die Nutzersicht und speziell den Aspekt, ad-hoc, also sofort und ohne weitere technische oder organisatorische Aufwände, auf die Ressourcen einer GDI zugreifen zu können. Das ist gleichzeitig ein wesentliches Qualitätsmerkmal für GDI, die sicherlich nur dann die bisherigen proprietären Geodatenilos und Doppelentwicklungen ablösen können, wenn die Nutzer es gewährleistet sehen, dass auch ohne selbstgepflegte lokale Kopien immer problemlos auf Geodaten und -dienste für die eigenen Anwendungen zugegriffen werden kann.

Wiederum in Analogie zu anderen (Informations-)Infrastrukturen können ergänzend zu der obigen Definition eine Reihe grundlegender Prinzipien einer GDI angeführt werden:

- **Subsidiarität:** Die Verantwortung für Bereitstellung, Qualität, Konsistenz, Aktualität sowie Pflege der verteilten Geodaten und aufsetzenden Geodienste liegt grundsätzlich bei den Erzeugern bzw. Anbietern.
- **Interoperabilität und Interdisziplinarität:** Die Einigungen auf gemeinsame, idealerweise etablierte Standards und Referenzsysteme sind Grundlage technischer und semantischer Interoperabilität, um den Austausch von Geoinformationen auch über Disziplingrenzen hinweg zu ermöglichen.
- **Skalierbarkeit:** Verfügbare Geodaten und -dienste sollten für unterschiedliche Anwendungszwecke wieder- und weiterverwendet werden können. Eine GDI sollte im technischen und organisatorischen Sinn erweiterbar sein.
- **Transparenz:** Die verteilt verfügbaren Geodaten und -dienste sollten problemlos recherchierbar und nutzbar sein. Auch die zu Grunde liegenden Regelwerke und Beteiligungsformen zu Abstimmungsprozessen in einer GDI sollten bekannt sein.
- **Verlässlichkeit:** Die (langfristige) Verfügbarkeit einer GDI sollte ebenso, wie die Einhaltung definierter Qualitätsstandards für Geodaten, Geodienste und Anwendungen, sichergestellt sein.
- **Effizienz und Effektivität:** Es gilt unter Berücksichtigung der gegebenen Ressourcen bestmögliche Informationen zur Entscheidungsunterstützung oder Problemlösung unkompliziert bereitzustellen. Bestmöglich kann sich dabei beispielsweise auf die Aktualität, die raumzeitliche oder thematische Abdeckung und Auflösung der zugrunde liegenden Geodaten und -dienste, deren Kosten oder Rechte beziehen und sollte durch einen Bewertungsrahmen objektiv beschreibbar sein.

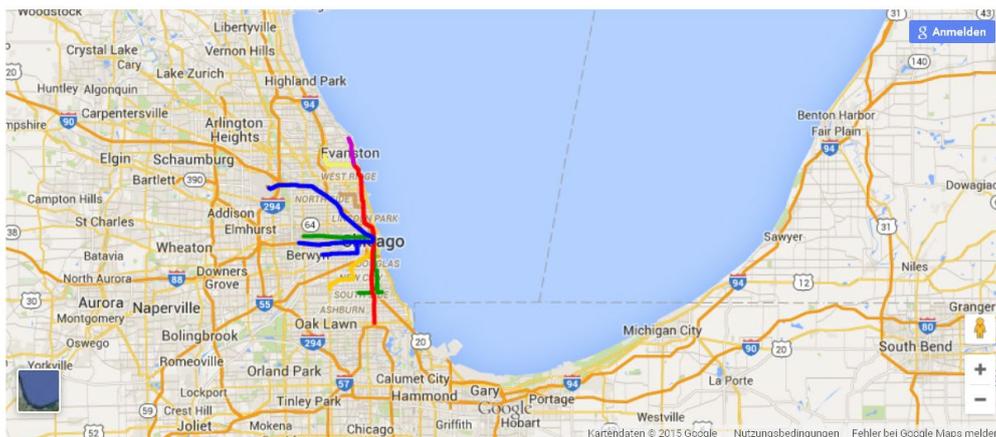
Heute lassen sich viele Initiativen zum Austausch von Geoinformationen finden, die sich in unterschiedlichen Anwendungsbereichen und Regionen mehr oder weniger stark etabliert haben und die genannten Prinzipien bzw. den angeführten GDI-Begriff adressieren. Für die folgende Darstellung sind diese grob kategorisiert in kommerzielle Kartendienste, Projekte für nutzergenerierte Geoinformationen, administrative GDI, sowie wissenschaftliche Geoinformationsinfrastrukturen. Daneben gibt es zahlreiche politisch getriebene Programme und Verbände [2], die darauf zielen weltweit Verfügbarkeit und Austausch

von Geodaten zu stimulieren. Beispiele sind die *Global Spatial Data Infrastructure Association* (GSDI, seit 1996), das *Global Earth Observation System of Systems* (GEOSS, seit 2005) oder die *United Nations Initiative on Global Geospatial Information Management* (UN-GGIM, seit 2011), die an dieser Stelle aber nicht weiter betrachtet werden.

1.1 Kommerzielle Kartendienste

Im Kontext der Entwicklung der US NSDI hat der damalige US-Vizepräsident Al Gore die Vision einer Digital Earth als Anwendung skizziert, in der sich an unterschiedlichen Stellen vorhandene auch zeitvariante und dreidimensionale Geodaten zusammenführen und in Form eines virtuellen Globus nutzen lassen [3]. Dabei ging Al Gore davon aus, dass eine solche Anwendung derart rechenintensiv ist, dass sie nur auf speziellen Terminals in Forschungszentren oder Bibliotheken ausgeführt werden kann. Seit Mitte der 1990er Jahre gab es bereits erste WebGIS-Anwendungen für einfache Geovisualisierungen und Geodatenabfragen [4]. In 2004 stellten die US-Raumfahrtbehörde NASA mit der Software World Wind sowie 2005 die Firma Google mit dem aus dem Keyhole Earth Viewer hervorgegangenen Google Earth und der Entwicklung Google Maps dann Internetanwendungen bereit, die auf handelsüblichen PCs viele Aspekte der von Al Gore skizzierten Vision umsetzten und auf Massen Anwendungen zielten. Es kam zu einer Zäsur in der weltweiten Nutzung von Geoinformationen: Die heute im Internet angebotenen Kartendienste der großen IT-Unternehmen können auf stationären PCs und unterschiedlichen mobilen Endgeräten problemlos genutzt werden und erreichen sehr große Nutzerzahlen. Die Nutzungen dieser Kartendienste mit den angebotenen räumlichen Such- und Navigationsfunktionen und deren Integration in die Internetsuchmaschinen haben inzwischen auch analoge Karten in vielen Bereichen abgelöst. Anwender digitaler Geodaten sind damit nicht mehr nur die GIS-Experten der 1990er Jahre sondern nahezu alle Internetnutzer.

Heute verfügbare Kartendienste lassen sich in unterschiedliche Webanwendungen einbinden und bieten typischerweise Programmierschnittstellen zur Einbindung eigener, einfach strukturierter Geodaten in die Kartenansichten sowie zur Nutzung von Routingfunktionen auf Basis der zentral durch die Anbieter vorgehaltenen Geodaten [5]. Als sogenannte *Mashups* können so recht einfach und schnell, performante und gut nutzbare Geoauskunfts- bzw. Visualisierungsanwendungen realisiert werden (Abbildung 1).



View this example [full screen](#).

JavaScript JavaScript + HTML

```
function initialize() {
  var chicago = new google.maps.LatLng(41.875696, -87.624207);
  var mapOptions = {
    zoom: 11,
    center: chicago
  }

  var map = new google.maps.Map(document.getElementById('map-canvas'), mapOptions);

  var ctaLayer = new google.maps.KmlLayer({
    url: 'http://gmaps-samples.googlecode.com/svn/trunk/ggeoxml/cta.kml'
  });
  ctaLayer.setMap(map);
}

google.maps.event.addDomListener(window, 'load', initialize);
```

Abbildung 1: Beispiel eines einfachen Mashup auf Basis der Google Maps API zur Visualisierung von in einer bereitgestellten Datei (cta.kml) kodierten Linienzügen in Google Maps([6]).

Die Kartendienste erfüllen damit die oben angeführten Prinzipien einer GDI bezüglich Effizienz und Effektivität und zeigen sich für den Anwendungsbereich einfacher Kartenauskunftsdienste gut nutzbar und vielseitig auch bei großen Nutzerzahlen einsetzbar (Skalierbarkeit). Datei- und Dienstschnittstellen sind zu großen Teilen proprietär (mangelnde Interoperabilität), die Kombination der Geodaten und -dienste verschiedener Quellen daher oft nicht oder nicht ad-hoc möglich. Die zu Grunde liegenden Regelwerke dieser Infrastrukturen sind meist nur schwer zugänglich oder unzureichend dokumentiert (mangelnde Transparenz). Auch detaillierte und strukturierte Metadaten mit Informationen zu den verfügbaren Geodaten und -diensten sowie ihren Qualitäten und Qualitätsanforderungen finden sich kaum. Die Recherche zur Wiederverwendung von Geodaten und -diensten ist daher meist mühselig. Die vollständige räumliche oder thematische Abdeckung, die dauerhafte Bereitstellung der in diesen Infrastrukturen angebotenen Daten oder Funktionalitäten und die Investitionssicherheit eigener Entwicklungen ist meist nicht garantiert (mangelnde Verlässlichkeit).

1.2 Nutzergenerierte Geoinformationen

Nutzergenerierte Geoinformationen umfassen sowohl die unbewusst und ggf. unfreiwillig als auch die bewusst bzw. freiwillig durch Anwender erfassten Geodaten. In der Umweltbeobachtung, etwa in der Ornithologie gibt es mit den jährlichen Vogelzählungen des *Christmas Bird Counts* (<http://www.audubon.org>) bereits eine mehr als 100-jährige Tradition von gemeinschaftlich und freiwillig erfassten Daten. Durch die heute nahezu ubiquitär, etwa in jedem Smartphone, verfügbaren Technologien für Datenaustausch, Lokalisierung und Sensorik sowie die mit dem Web 2.0 aufgekommene Kultur der sozialen Netze, Blogs und Mashups zur schnellen online Publikation haben das Crowdsourcing

und hier speziell Initiativen zu nutzergenerierten Geoinformationen einen erheblichen Schub bekommen. Im Kontext des oben beschriebenen GDI-Verständnisses soll dabei nur die bewusste und freiwillige Erfassung und Bereitstellung von nutzergenerierten Geodaten und -diensten als relevant angesehen werden, für die sich auch der Begriff der Volunteered Geographic Information (VGI) etabliert hat [7]. Neben der Einbindung lokaler Expertise zählen Aktualität und dezentrale Datenerfassung zu den großen Vorteilen von VGI. Bürger können mit ihrem lokalen Wissen gezielt bei der Ergänzung und Korrektur von Datenbeständen helfen, außergewöhnliche Ereignisse erkennen, dokumentieren und zeitnah weitermelden. Die sehr schnelle gemeinschaftliche, weltweit verteilte Kartierung für Katastrophen- und Krisengebiete auf Grundlage aktueller Beobachtungen oder Satellitendaten, oder die Extraktion und Zusammenführung aktueller Nachrichten aus sozialen Netzwerken hat zu neuen Formen der humanitären Hilfe und dem Begriff der *Digital Humanitarians* geführt [8,9].

Das in 2004 gestartete OpenStreetMap Projekt (OSM) zum Aufbau einer freien digitalen Weltkarte ist das prominenteste VGI-Beispiel. Dabei stammen die zusammengetragenen Geodaten sowohl aus den GPS-Messungen und Digitalisierungen der mehr als 2 Millionen Nutzer als auch aus Geodatenspenden unterschiedlicher Institutionen [10]. Die zusammengeführten frei verfügbaren OSM Daten werden heute in zahlreichen Anwendungen eingesetzt und über unterschiedliche Kartendienste zur Verfügung gestellt. Die ursprünglich stark auf Straßendaten fokussierten Erfassungen sind nun auch auf weitere topographische Daten und Indoor-Daten erweitert worden. Das gemeinnützige Unternehmen OpenStreetMap Foundation organisiert den operationellen Betrieb und die Finanzierung von OSM und tritt als juristische Person für OSM auf. Spezielle Arbeitsgruppen moderieren den Datenerfassungsprozess in OSM, etwa um die Datenqualität zu sichern und Datenvandalismus zu verhindern.

Qualität und Eignung nutzergenerierte Geoinformation für die Weiterverwendung hängen unter anderem von der Expertise der (freiwilligen) Datenerfasser, der genutzten Sensorik und den eingesetzten Plausibilisierungsverfahren ab. Die Entwicklung von Methoden zur Validierung nutzergenerierter Daten untereinander und gegen Wissensbasen oder Modellierungsergebnisse sowie zur Kombination nutzergenerierter mit amtlichen Daten sind aktuelle Forschungsthemen in diesem Bereich [11,12,7]. Die Ergebnisse von VGI Initiativen sind überwiegend zentrale Geodatenbanken oder Softwareplattformen und orientieren sich zumeist nicht an dem Subsidiaritätsprinzip. Es bleibt grundlegend zu klären, inwieweit freiwillige Crowdsourcing-Aktivitäten als nachhaltige Datenquelle für das Umweltmonitoring oder den Aufbau von Frühwarnsystemen geeignet bzw. verlässlich sind [13].

1.3 Administrative Geodateninfrastrukturen

Seit den 1990er Jahren finden sich weltweit auf verschiedenen Verwaltungsebenen und dort innerhalb unterschiedlicher Fachdomänen Initiativen zum Aufbau von GDI. Die Initiative Infrastructure for Spatial Information in Europe (INSPIRE), die 2001 gemeinsam durch Vertreter aus den Umwelt- und Vermessungsverwaltungen der EU-Mitgliedstaaten, den EU-Generaldirektionen Umwelt, Eurostat und Gemeinsame Forschungsstelle sowie der Europäischen Umweltagentur initiiert und 2007 als EU-Direktive [14] verabschiedet wurde, ist aktuell in diesem Kontext die relevanteste Initiative zum Aufbau der behördlichen GDI in Europa. Kernziel von INSPIRE ist die Entwicklung einer europäischen GDI, die den Zugriff auf (digitale) raumbezogene Umweltinformationen der nationalen Verwaltungen in der Europäischen Union erheblich erleichtern soll. Die Direktive dient als gesetzliches Rahmenwerk für den Aufbau einer europäischen GDI, die sich im Wesentlichen aus den GDI der Europäischen Mitgliedstaaten zusammensetzt. Dafür legt INSPIRE die grundlegenden Komponenten, Interoperabilitäts- und Leistungsfähigkeitsforderungen sowie die Zeitpläne für die Umsetzung fest. Die INSPIRE Umsetzung in entsprechende Bundes- und Ländergesetze liefert heute auch die wesentliche Grundlage der konsolidierten Entwicklung der GDI in Deutschland.

Die INSPIRE Direktive fordert die Bereitstellung von Metadaten als beschreibende Daten für die problemlose thematische und räumliche Recherche nach behördlichen Geodaten und -diensten und für deren

Bewertung. Die Metadaten sollen auch Informationen zu Nutzungsbedingungen, Qualität, Konformität, Verantwortlichen sowie Zugangsbeschränkungen liefern. Konkret adressiert INSPIRE 34 Themen, für die durch harmonisierte Geodatenpezifikationen Interoperabilität und damit ein vereinfachter Datenaustausch und Wiederverwendbarkeit erreicht werden sollen. Die dabei adressierten Themen bzw. Dateninhalte orientieren sich im Wesentlichen an den Anforderungen der Umweltberichterstattung und gehen damit Art und Umfang deutlich über die Inhalte der oben beschriebenen Kartendienste und nutzergerichtet Geoinformation hinaus. Ausgehend von existierenden Ansätzen und Modellen (Kap. 2.3) sollen harmonisierten Geodatenpezifikationen (*Schemata* zu Objektdefinitionen und Georeferenzierung) für diese Themenbereiche geschaffen werden und die in diese Themenbereiche fallenden behördlichen Geodaten entsprechend dieser Schemata INSPIRE-konform bereitgestellt werden. Die 34 Themen (Tabelle 1) sind in 3 Teilbereiche (Annex 1-3) untergliedert. Dabei entsprechen die in den ersten beiden Teilbereichen genannten Themen typischen Georeferenz- bzw. Geobasisdaten die für Modellierung und Austausch der eigentlichen Umweltdaten des dritten Teilbereichs als Referenz dienen sollen. Für diese Georeferenz- bzw. Geobasisdaten gilt es daher auch Identifikatorensysteme, Beschreibungen der Objektbeziehungen, Objektmodelle und verwendete Thesauri, Beschreibungen zur zeitlichen Dimension, sowie Aspekte der Datenaktualisierung einheitlich zu regeln.

Tabelle 1: Die 34 INSPIRE-Datenthemen, für die behördliche Geodaten entsprechend der INSPIRE Datenspezifikation harmonisiert bereitgestellt werden sollen.

Annex I	Annex II	Annex III
<ol style="list-style-type: none"> 1. Koordinatenreferenzsysteme 2. Gittersysteme 3. Geografische Bezeichnungen 4. Verwaltungseinheiten 5. Adressen 6. Flurstücke oder Grundstücke 7. Verkehrsnetze 8. Gewässernetz 9. Schutzgebiete 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Höhe 2. Bodenbedeckung 3. Orthofotografie 4. Geologie 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Statistische Einheiten, 2. Gebäude 3. Boden 4. Bodennutzung 5. Gesundheit und Sicherheit 6. Versorgungswirtschaft und staatliche Dienste 7. Umweltüberwachung 8. Produktions- und Industrieanlagen 9. Landwirtschaftliche Anlagen und Aquakulturanlagen 10. Verteilung der Bevölkerung - Demografie 11. Bewirtschaftungsgebiete, Schutzgebiete, geregelte Gebiete und Berichterstattungseinheiten 12. Gebiete mit naturbedingten Risiken 13. Atmosphärische Bedingungen 14. Meteorologisch-geografische Kennwerte 15. Ozeanografisch-geografische Kennwerte 16. Meeresregionen 17. Biogeografische Regionen 18. Lebensräume und Biotope 19. Verteilung der Arten 20. Energiequellen 21. Mineralische Bodenschätze

Die durch INSPIRE adressierten Geodaten werden durch Netzwerkdienste verfügbar gemacht. Die Direktive unterscheidet dazu Such-, Darstellungs-, Download- und Transformationsdienste sowie weitere Dienste, die den Aufruf von Geodatendiensten erlauben (Abbildung 2).

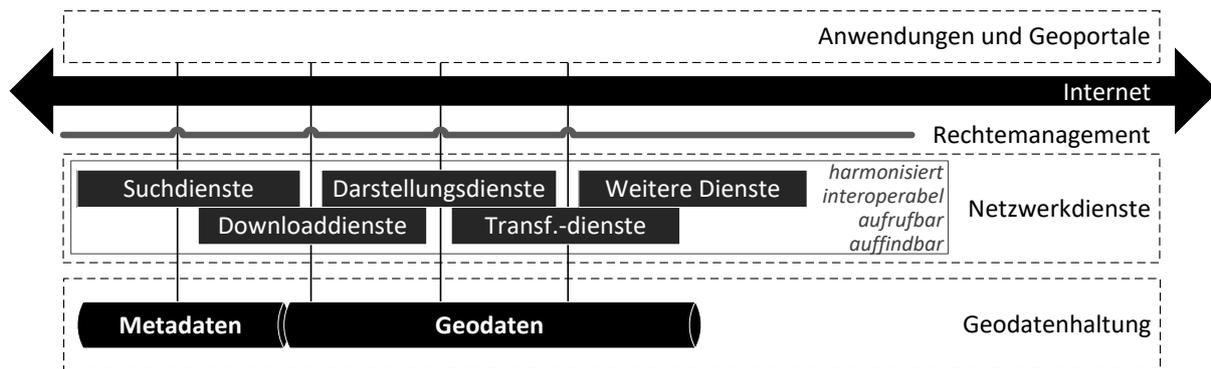


Abbildung 2: Übersicht über die INSPIRE-Komponenten (nach [15])

Die INSPIRE-Entwicklungen werden durch die Europäische Kommission koordiniert und die Mitgliedsstaaten berichten regelmäßig über die Umsetzung der Richtlinie. Auf der europäischen Ebene sind durch mehrere Expertengruppen *INSPIRE-Durchführungsbestimmungen* entwickelt worden, die die im Gesetzestext der INSPIRE-Richtlinie genannten Anforderungen konkretisieren. Diese Bestimmungen umfassen die abstrakten Anforderungen an die INSPIRE-Metadaten, Netzwerkdienste und Datenspezifikationen, die Zugriffsregeln für INSPIRE-Daten und Dienste sowie die Berichtspflichten zur INSPIRE-Umsetzung in den Mitgliedsstaaten. Ergänzend sind die rechtlich nicht bindenden *INSPIRE Technical Guidances* als technische Handlungsempfehlungen entwickelt worden, um die konkreten technischen Details zu den Spezifikationen und Schnittstellen auf Basis der aktuellen Normen und Standards zu definieren. Die Handlungsempfehlungen können bei Bedarf, etwa bei Änderungen der Technologien oder Verbesserung der Normen, aktualisiert werden, ohne dass der Gesetzgebungs- oder Regelungsprozess erneut durchlaufen werden muss.

Open Data bezeichnet Daten öffentlicher Verwaltungen und privatwirtschaftlicher Betriebe, die ohne eine Einschränkung bezüglich ihrer Nutzung und Weiterverbreitung frei zugänglich gemacht werden. Damit verbunden sind im Sinne eines *Open Government* Forderungen zur verstärkten Transparenz und offenen Beteiligungsprozessen in der öffentlichen Verwaltung. Im Bereich der Geodaten werden in den letzten Jahren immer mehr behördliche Daten als Open Data veröffentlicht, beispielsweise Basis-karten in Dänemark, Großbritannien, den Niederlanden und Tschechien. Im Geodatenzugangsgesetz (GeoZG) als der deutschen Umsetzung von INSPIRE wurde in einer 2012 durchgeführten Reform der Open Data Bewegung Rechnung getragen: Geodaten und Geodatendienste des Bundes sollen grundsätzlich kostenfrei zur Verfügung gestellt werden. Hier bedarf die Frage, welche aus den Länderdaten auf Bundesebene zusammengeführten Daten als Eigentum des Bundes gelten dürfen, jedoch noch weiterer Abstimmungen. Zunehmend setzen sich jedoch OpenData Regelungen auch auf den Länderebenen durch und es finden sich in einigen Bundesländern Open Data Portale, die zahlreiche Geodaten kostenfrei zur Verfügung stellen. Mittelfristig ist daher zu erwarten, dass nicht nur Umweltdaten sondern behördliche Geodaten generell in Deutschland kostenfrei zugänglich sind.

Die zukünftigen Entwicklungen von GDI in den Verwaltungen müssen zeigen, ob und wie weit die Umsetzung der ambitioniert formulierten INSPIRE Richtlinie und der Open Data Bewegung gelingen kann und soll. Dabei darf die GDI-Umsetzung nicht zum Selbstzweck werden. Es gilt etwa, durch künftige Reformen sowohl der INSPIRE-, ATKIS- und ALKIS-Regelungen, als auch der Regelungen zu Monitoring-, Planungs- und Beteiligungsverfahren weiter dafür Sorge zu tragen, dass mit den GDI-Diensten die behördlichen Berichts- und Regelungspflichten ad-hoc erfüllt werden können und Doppelaufwände vermieden werden [2].

1.4 Wissenschaftliche Geoinformationsinfrastrukturen

Die Publikation von Forschungsdaten und Software gewinnt als zusätzlicher wissenschaftlicher Output neben den traditionellen Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Zeitschriften und Lehrbüchern zunehmend an Bedeutung und trägt maßgeblich zu wissenschaftlicher Transparenz bei. In verschiedenen Disziplinen gibt es inzwischen Plattformen für Publikation und Austausch wissenschaftlicher Daten. In den Geo- und Umweltwissenschaften etabliert sich beispielsweise PANGAEA (*Data Publisher for Earth and Environmental Science*, <http://www.pangaea.de/>). Die publizierten Daten erhalten eine eindeutige Identifizierung in Form eines *Digital Object Identifier* (DOI), wie er auch für wissenschaftliche Veröffentlichungen verwandt wird und sind dauerhaft für die Datennutzung und weitere *Datenzitate* verfügbar. Allerdings haben sich generell für solche Datenpublikationen noch keine Zertifizierungsmechanismen etabliert, die dem *peer review* zur Qualitätssicherung wissenschaftlicher Zeitschriften gleichen. Ein solcher Prozess führt idealerweise auch zu einer Bewertung, welche Forschungsdaten und auch welche wissenschaftliche Softwareentwicklung in welchen Umfängen einer Langzeitarchivierung zugeführt werden sollten. Daten- oder Softwarepublikationen werden in heutigen wissenschaftlichen Anreizsystemen in der Regel gar nicht oder nur sehr gering honoriert. Für Wissenschaftler besteht daher kaum Grund wissenschaftliche Daten oder Software zu publizieren, bevor diese nicht umfänglich für eigene wissenschaftliche Aufsätze genutzt wurden. Die heute in der Wissenschaft nahezu überall übliche, durchgehend digitale und vernetzte Bearbeitung von Forschungsdaten erfordert formalisierte, transparente und letztlich weitgehend automatisierbare Regelungen zum Lizenz-, Persönlichkeits- und Datenschutz, derart, dass eine Nutzung von Daten für wissenschaftliche Anwendungen möglich ist bzw. bleibt (etwa in Anwendungen zur Umweltepidemiologie oder zu demographischen und Sozialstudien). Hier können Ansätze aus dem Bibliothekswesen und in den Forschungsnetzen etablierte Lösungen zur Autorisierung (z. B. DFN-AAI/ Shibboleth) Ausgangspunkt weiterer Entwicklungen zur Formalisierung und Automatisierung der entsprechenden Lizenz- und Datenschutzbestimmungen sein. Archivierung und Bereitstellung wissenschaftlicher Daten und Software bedarf in den Zeiten der nur kurzfristig angelegten wissenschaftlichen Projektförderung auch entsprechend nachhaltiger technischer und organisatorischer Strukturen sowie einer Verteilung der Aufgaben. Der hier skizzierte generelle Reformbedarf in den Förderstrukturen und auch den wissenschaftlichen Kulturen an Hochschulen und außeruniversitären Forschungseinrichtungen zur künftigen Schaffung kollaborativer wissenschaftlicher Informationsinfrastrukturen bei gleichzeitig besserer Nutzung der physischen Forschungsinfrastrukturen (Messnetze, Großversuchsanstalten etc.) ist an verschiedenen Stellen erkannt [16]. Große Forschungsinitiativen wie die *Initiative on Scientific Cyberinfrastructures* der US National Science Foundation oder im Europäischen Raum die *European Strategy Forum on Research Infrastructures* sowie die Deutsche Forschungsgemeinschaft und der Wissenschaftsrat [16] forcieren den Aufbau wissenschaftlicher Informationsinfrastrukturen. Ziele solcher Infrastrukturen sind etwa die verbesserte Dokumentation, Transparenz und Reproduzierbarkeit von Forschung, eine höhere Rentabilität öffentlich geförderter Forschungsinitiativen sowie die verbesserte Unterstützung von datenintensiver, multi- und interdisziplinärer Forschung. Die Wiederverwendung von Forschungsdaten und -software soll erleichtert und die Zusammenarbeit zwischen Wissenschaftlern gefördert werden. Außerdem sollen Forschungsergebnisse auch für die Öffentlichkeit und Entscheidungsträger leichter zugänglich und nutzbar sein.

Die zentralen Funktionen der meist isoliert für einzelne Forschungsdisziplinen entstehenden Plattformen sind in der Regel die Recherche in Katalogen, der Zugriff auf Daten und Visualisierungen, die Bereitstellung von Rechenkapazitäten sowie die Interaktion und Kollaboration zwischen Wissenschaftlern. Obwohl GDI ebenfalls die meisten dieser Funktionalitäten unterstützen, gibt es bisher kaum entsprechende Implementierungen als wissenschaftliche Informationsinfrastrukturen [17]. In Ihrer Formulierung einer Agenda für die Digital Earth 2020 und als Fortführung der Vision von Gore [3] sehen Cragila et al. [18] dazu folgende generelle Aufgaben für die künftige GDI-Entwicklung:

- Förderung der Verknüpfung multidisziplinärer Modelle aus Natur-, Sozial- und Wirtschaftswissenschaften zur Vorhersage und Bewertung globaler Veränderungen. Die große Herausforderung dabei ist es, diese Modelle über Disziplingrenzen verständlich und nutzbar zu machen und die zu Grunde liegenden Annahmen, Einschränkungen und Unsicherheiten zu beschreiben.
- Bereitstellung von Informationen zu den unterschiedlichen Szenarien politischer Maßnahmen und Möglichkeiten zum Vergleich des zu erwartenden sozialen, wirtschaftlichen und Umweltwandels.
- Bereitstellung einer Plattform, die der breiten Öffentlichkeit und Entscheidungsträgern aus allen Regionen und sozialen Gruppen die Beteiligung und Rückmeldung zu den Analysen wissenschaftlicher Ergebnisse und den zu erwartenden Effekten ermöglicht.
- Integration von (nahe) Echtzeit-Beobachtungen aus Sensornetzwerken und sozialen Netzen.

In diesem Kontext skizzieren Entwicklungen im Rahmen von Forschungsprojekten zum nachhaltigen Landmanagement, wie aktuelle GDI-Standards und Technologien für Forschungsinfrastrukturen in den Umweltwissenschaften genutzt und erweitert werden können [19,20].

2 Methoden und Technologien für Geodateninfrastrukturen

Der Überblick über heutige GDI(-Arten) lässt einige Herausforderungen an die Geoinformatik zur Konzeption und Entwicklung der nächsten GDI-Generationen erkennen. Hierzu gehören der Entwurf und die Umsetzung tragfähiger Entwicklungs- und Betriebsmodelle sowie flexible Ansätze zur Geodatenmodellierung, -transformation und -fusion, um syntaktische und semantische Interoperabilität für die Integration heterogener Datenquellen zu schaffen. Weiterhin gilt es Ansätze zur interoperablen Geoprozessierung zu etablieren, um beispielsweise aus den stetig wachsenden, verteilten Geodatenbeständen die jeweils zur Entscheidungsunterstützung benötigte Geoinformation ad-hoc ableiten zu können. Speziell für wissenschaftliche (Geo-)Informationsinfrastrukturen sind Methoden zum Austausch von Umweltsimulationsmodellen weiterzuentwickeln. Im Weiteren sollen dazu nicht umfassend aber exemplarisch Aspekte des zur Verfügung stehenden Methodenapparats dargestellt und einige Entwicklungsansätze skizziert werden.

2.1 Modelle für Betrieb und Entwicklungen von Geodateninfrastrukturen

Der durch die verschiedenen Gesetze und Regelungen geforderte Aufbau und operationelle Betrieb von GDI erfordert entsprechende Betriebsmodelle. Diese Modelle regeln die grundsätzliche Organisation der Prozesse, die einzuhaltenden technischen Randwerte, die Art und Verteilung der angebotenen Dienste und Dienstleistungen und legen die entsprechenden Rollen und Zuständigkeiten fest. Die Modelle orientieren sich dabei an ähnlichen Modellen aus den Bereichen IT-Infrastrukturen und e-Government. Hier etabliert sich der Aufbau von entsprechenden GDI-Dienstleistungszentren, die als Mediator wirken und in unterschiedlichen Skalierungen helfen können, für die einzelnen geodatenhaltenden Stellen erforderliche Rechnerressourcen und Kompetenzen für Entwicklung und Betrieb von Geodiensten zentral sicherzustellen und ergänzend anzubieten.

Beispielhaft sei das Betriebsmodell der GDI-Sachsen [21,22] angeführt. Auf einer abstrakten Ebene werden hier zunächst generell drei Szenarien für die Datenbereitstellung durch geodatenhaltende Stellen – Stellen, die durch die Regelungen oder Gesetzgebungen adressierte Geodaten führen – skizziert (Abbildung 3):

- (1) Eine geodatenhaltende Stelle betreibt selbst dezentral Geodienste, die die dazu definierten GDI-Qualitätskriterien (Konformität, Performanz, Verfügbarkeit etc.) erfüllen. Diese Stelle verfügt über entsprechende Ressourcen (ausreichend performante und verfügbare Servertechnologien und Netzverbindungen, Kompetenz und personelle Ressourcen etc.).

- (2) Eine geodatenhaltende Stelle betreibt dezentral Geodienste, etwa eigene Darstellungs- oder Downloaddienste, die jedoch nicht zwingend die definierten Qualitätskriterien erfüllen. Eine zusätzliche (zentralisierte) Diensteschicht kaskadiert diese Dienste und stellt durch entsprechende Mechanismen (Harvesting und/oder Caching, verschiedene Arten von Nutzungsheuristiken, hochperformante und -verfügbare Servertechnologien etc.) sicher, dass die Diensteanhalte der dezentralen Dienste entsprechend der definierten Qualitätskriterien verfügbar sind. Auf diese Weise ist die Bereitstellung der dezentralen Dienste für eine geodatenhaltende Stelle weniger aufwändig.
- (3) Eine geodatenhaltende Stelle nutzt zentrale Geodienste zur Bereitstellung der Geodaten. Die zentralen Geodienste sind dann (wie unter 2) entsprechend der definierten Qualitätskriterien verfügbar. Dabei sollten die zentralen Geodienste durch die geodatenhaltenden Stellen derart konfigurierbar sein, dass die Aktualisierung der Geodatenbestände, die Änderung von Schematransformationen oder die Definition des Zugangsschutzes durch die jeweilige geodatenhaltende Stelle eigenständig vorgenommen und kontrolliert werden kann.

Natürlich sind verschiedene Mischformen dieser grob skizzierten Geodienste-Topologien denkbar. Jede dieser technologischen Lösungen sollte dabei organisatorisch dem Subsidiaritätsprinzip für GDI entsprechen: Verantwortung für, bzw. Wissen und Hoheit über die angebotenen Geodaten und Geodienste liegen bei den jeweiligen geodatenhaltenden Stellen.

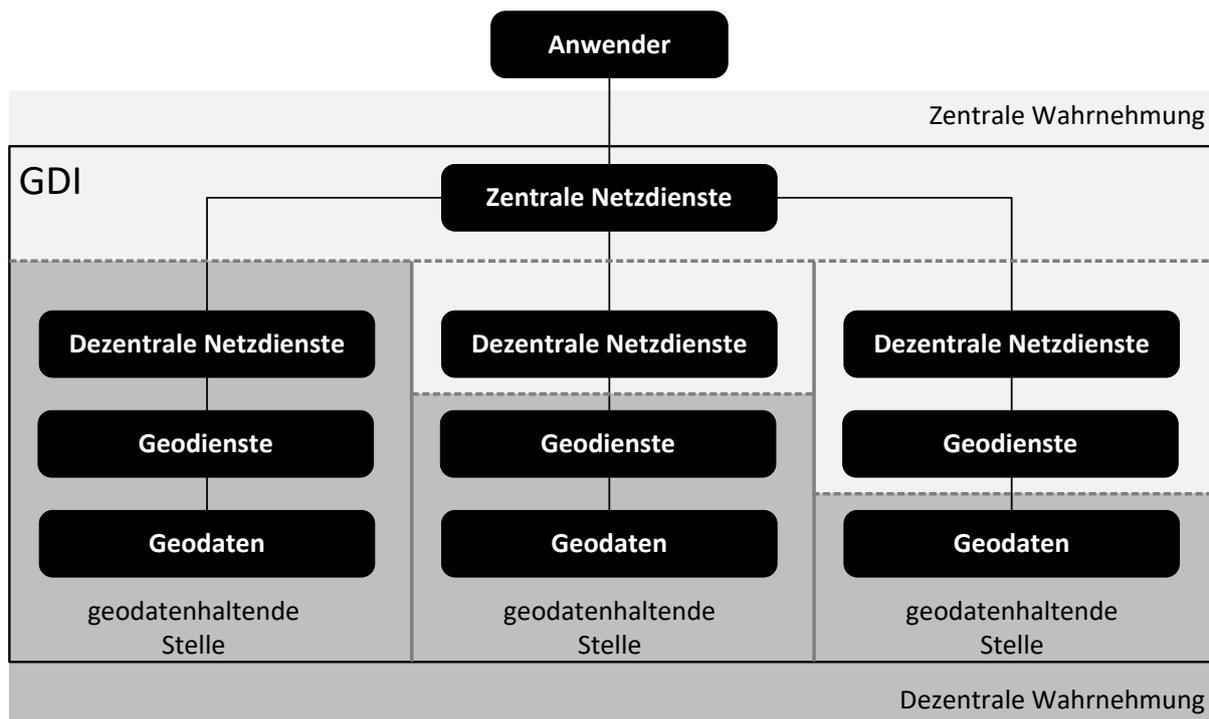


Abbildung 3: Betriebsmodell zu möglichen zentralen und dezentralen Wahrnehmung von Aufgaben geodatenhaltender Stellen (verändert nach [21]).

Ausgehend von den oben genannten Szenarien, lassen sich für den GDI-Betrieb grob folgende Rollen identifizieren:

- (1) GDI-Koordinationsstelle etwa auch als Anbieter zentraler Komponenten einer GDI (z.B. Portale, Katalogdienste, Konformitätstests)
- (2) Geodienste- und Geodatenanbieter mit dezentralen Diensten (Darstellungs-, Download-, Katalog-, fachbezogene Analysedienste)
- (3) Geodienste- und Geodatenanbieter als Nutzer zentraler Dienste

(4) Anwender der Geodienste

Die in der Umsetzung der aktuellen Gesetzgebungen entstehende erste GDI-Generation erlaubt die internetbasierte Suche nach Geodaten und Geodiensten, die integrierte Visualisierung von verteilt vorliegenden Geodaten als interaktive Internetkarten sowie das Herunterladen wohldefinierter Geodatensätze zur Integration in eigene Informationssysteme. Unterschiedliche Geoportale dienen dabei zumeist als Schaufenster der vorhandenen Geodaten. Das dahinter liegende Paradigma (suchen, anschauen, herunterladen) entspricht der traditionellen Bibliotheksmetapher (suchen, anschauen, ausleihen), erfüllt jedoch nicht dem Anspruch an eine GDI die angebotenen Geodaten und -dienste nahtlos in eigene Anwendungen integrieren zu können (mangelnde Effektivität). Daher besteht weiterhin die Gefahr, dass redundante und meist teure und weniger effiziente Datensilos entstehen. Künftige administrative GDI sollten deshalb funktionale Schnittstellen anbieten, die eine mühelose Integration der GDI-Angebote in die Prozesse im e-Government erlauben. Dabei können GDI-Entwicklungen dort durchaus auch Vorreiterfunktionen übernehmen, sollten aber nicht zu Geo-Speziallösungen führen.

Die weitere GDI-Entwicklung erfolgt idealerweise ähnlich dem ursprünglich als Spiralmodell aus der Softwareentwicklung [23] bekannten Konzept iterativ und in Form von Pilotierungen, etwa in der folgenden Art:

- Konkrete Verwaltungsaufgaben oder Berichtspflichten werden für die Umsetzung in der GDI priorisiert.
- Betroffene Anwender und deren Anforderungen sowie die relevanten Geodathemen mit ihren Verantwortlichen werden identifiziert.
- Erforderliche Datentransformationen, Prozessketten und mögliche Dienstetopologien werden unter Nutzung in der GDI verfügbarer Ressourcen (prototypisch) implementiert.
- Die Piloten werden evaluiert (Effektivität, Effizienz, Nutzbarkeit, Risiken etc.) und bei Bedarf die Implementierungen entsprechend angepasst.
- Erfolgreiche Lösungen werden als operationelle Anwendungen umgesetzt.
- Erfahrungen aus Umsetzung und Evaluierung werden dokumentiert und fließen in die weiteren Pilotierungen ein.

Adaptionen des *Reference Model for Open Distributed Processing* (RM-ODP) haben sich für Zusammenführung der Geschäftsprozesse, Anforderungsanalysen, Entwürfe der Datenmodelle und Dienstspezifikationen sowie der technischen Plattformschreibungen etabliert und bieten einen geeigneten Rahmen für die fortlaufende Dokumentation einer GDI-Entwicklung [24].

Es finden sich aktuell nur recht wenige Kosten-Nutzen Studien zu GDI und da die verfügbaren Studien meist parallel zu oder sogar vor dem Aufbau operationeller GDI durchgeführt werden, sind die Nutzeffekte ex-ante geschätzt. Auch wenn laut [25] die verfügbaren Studien im Mittel aussagen, dass der zu erwartende bzw. geschätzte Nutzen von GDI dreifach höher als deren Kosten sei, bleiben für verlässliche Aussagen zur Effektivität und Effizienz (administrativer) GDI die zukünftigen Entwicklungen und Studien abzuwarten. Dabei ist auch ein einheitliches Verständnis des zu erwartenden Nutzen zu definieren und zu entscheiden, ob lediglich Rationalisierungseffekte und Effizienzsteigerungen eingehen oder auch Abschätzungen zu den auf besseren Geoinformationsgrundlagen eventuell fundierteren Entscheidungen oder zu möglichen Innovationseffekten berücksichtigt werden sollen.

2.2 Architekturen und Protokolle für Geodateninfrastrukturen

Technologisch betrachtet wird Funktionalität, die für Austausch, Visualisierung und Analyse von Geoinformationen in GDI benötigt wird, über Webdienste bereitgestellt. Webdienste sind autonom agierende Programme, die permanent auf einem Webserver laufen und auf Anfragen eines Webclients reagieren und entsprechende Antworten auf die Anfragen an den Webclient zurücksenden. Eine Anfrage wird über ein Netzwerk, z. B. das Internet, in Form einer URL (*Uniform Resource Locator*) gestellt.

Webdienste können in unterschiedlichen Architekturen eingebettet werden, die genauer definieren, wie Anfragen gestellt und entsprechende Antworten des Webserver gegeben werden. Oft basieren Webdienste entweder auf einer *Service Oriented Architecture* (SOA) [26] oder einer *Resource Oriented Architecture* (ROA) [27]. ROA- und SOA-Webdienste unterscheiden sich hauptsächlich in der Komplexität, der Beschreibung und den Standards für die Schnittstellen, an die die Anfragen der Webclients geschickt werden.

ROA-Webdienste basieren auf der Idee, dass alle Informationen und Angebote im WWW als eindeutig identifizierbare Ressource abrufbar sind. Dadurch, dass die Schnittstellen der Webdienste meist auf den Standardoperationen des *Hypertext Transfer Protocols* (HTTP) basieren, ist außer der URL keine weitere Beschreibung notwendig. Mashups auf Basis von Kartendiensten (Kap. 1.1) basieren daher oft auf ROA-Webdiensten. Die Schnittstellen sind einfacher implementierbar als bei SOA, anwendungsspezifisch notwendige Modifikationen oder Ergänzungen, sowie komplexe Schnittstellen sind jedoch nur mit hohem Aufwand umsetzbar. Durch die unparametrisierten Schnittstellen (URLs) ist die Verwendung von ROA-Webdiensten für dynamische und parametrisierbare Inhalte nur bedingt geeignet.

Um dem Nachteil der fehlenden Parametrisierbarkeit zu umgehen, wird für SOA-Webdienste eine weitere Schnittschicht zwischen HTTP und dem eigentlichen Dienst eingeschoben. Diese Ebene ergänzt die reine HTTP-Schnittstelle um notwendige Dienstspezifika, die in einer expliziten Schnittstellenbeschreibung veröffentlicht werden, damit die Schnittstelle interoperabel und von beliebigen Webclients zugreifbar ist. Diese oft komplexen Schnittstellen sind meist standardisiert, in GDI hauptsächlich durch Standards des OGC und der ISO-19.000er Normenreihe. Diesem Konzept folgen beispielsweise die Schnittstellen der INSPIRE-Netzdienste (Kap. 1.3). Da die Komplexität und Parametrisierbarkeit beliebig hoch sein kann, können auch sehr komplexe Webdienste realisiert werden. Allerdings entstehen durch die starke Formalisierung und die zusätzlichen Schnittstellenebenen erhöhte Anforderungen für die während der Laufzeit zu verarbeitenden Informationen sowie in der Entwicklung erhöhte Aufwände für die notwendigen Server- und Client-Implementierungen.

Im Gegensatz zu den beiden zuvor beschriebenen Dienstarchitekturen, stützt sich die Realisierung des Semantic Web [28,29] auf das Linked Data Paradigma. Der Aufbau des Semantic Web wird im Wesentlichen durch den Wechsel von dokumentenorientierten hin zu daten- und informationsgetriebenen Strukturen im Internet charakterisiert. Die zunehmende Vernetzung von Daten und Nutzung einheitlicher Vokabulare und Ontologien soll dabei die automatisierte Ableitung anwendungsbezogen relevanter Informationen ermöglichen. Die Bereitstellung strukturierter Daten wird dabei über Linked Data realisiert. Dessen grundlegende Prinzipien sind (1) die Nutzung einheitlicher Identifikatoren (*Unique Resource Identifier*, URI) für Objekte, (2) die Nutzung von HTTP, um einen standardisierten Zugriff auf das Objekt zu ermöglichen, (3) die Bereitstellung aussagekräftiger Informationen über das Objekt über die W3C-Standards RDF (*Resource Description Framework* [30]) und SPARQL (*SPARQL Protocol and RDF Query Language* [31]) sowie (4) die Einbettung weiterführender Links. Alle Daten werden dabei über Tripel (Subjekt, Prädikat, Objekt) beschrieben, wobei jedes Element eindeutig referenzierbar und beschrieben sein muss. In zahlreichen Open Data Initiativen (Kap. 1.3) wird Linked Data als sogenanntes *Linked Open Data* (LOD) genutzt. So hat der britische Ordnance Survey die frei verfügbaren Daten zu britischen Postleitzahlen und Ortsverzeichnissen als LOD bereitgestellt (<http://data.ordnancesurvey.co.uk/>). Diese Datensätze verfügen nur über einfache Punkt-, Linien- und Polygoneometrien und sind damit gut für die Publikation als Linked Data und zur Verknüpfung mit anderen LOD-Quellen geeignet.

Die oben beschriebenen Ansätze eignen sich jeweils für unterschiedliche Zwecke und lassen sich komplementär nutzen [32]. Linked Data ist einfach zu realisieren und verspricht Potenzial für die Integration von Daten unterschiedlicher Fachdomänen. Linked Data wird oft für die Recherche nach und das Explorieren von Daten verwendet, ohne weitere Funktionalitäten bereitzustellen, etwa zur Analyse der

gefundenen Daten. Dem gegenüber steht SOA mit einer komplexeren Realisierung, aber einem höheren Funktionalitätspotential für die Unterstützung spezifischer Aufgaben. Geoprozessierungsdienste (Kap. 2.5), die komplexe Funktionalität für die Analyse von Geodaten bereitstellen, basieren daher meist auf SOA. ROA hingegen kann, bezüglich des Realisierungsaufwands, der Flexibilität und dem Umfang der bereitgestellten Funktionalität zwischen Linked Data und SOA angesiedelt werden (Abbildung 4).

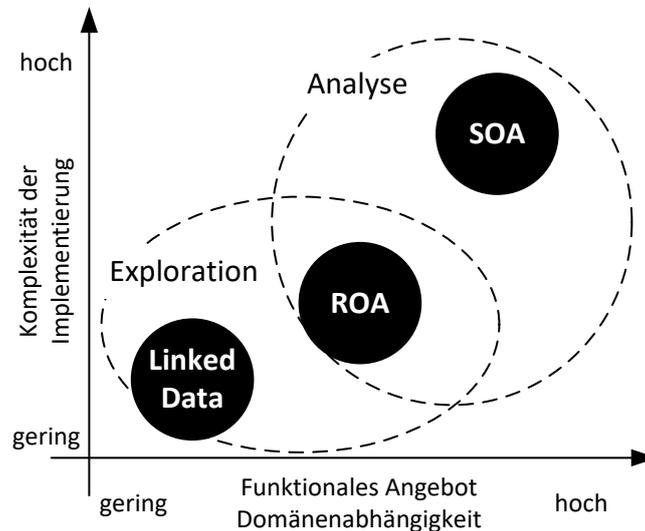


Abbildung 4: Grobkategorisierung der Ansätze zu Service Oriented Architecture, Resource Oriented Architecture und Linked Data für unterschiedliche GDI-Anwendungsbereiche.

2.3 Geodatschemata und -transformationen

Die beschriebenen Ansätze zur Datenpublikation über kommerzielle Kartendienste oder über Linked Data zeigen, dass für die Datenbereitstellung zur Recherche, Exploration und einfachen Visualisierung nicht zwangsläufig komplexe Datenschemata verwendet werden müssen [33,34]. Für den interoperablen und systemübergreifenden Datenaustausch komplex modellierter Geodaten (z. B. Klassenhierarchien, Assoziationsklassen, Topologie, Integritätsbedingungen etc.) sind diese Ansätze begrenzt geeignet und können zu Informationsverlusten führen. Hierfür müssen die Datenstrukturen und die Semantik bis zu einem gewissen Grad vereinheitlicht und entsprechend dokumentiert werden.

Im Bereich der Datenmodellierung geographischer Informationen sind über die ISO-Normen [35,36] die Grundlagen zur Beschreibung und Manipulation der räumlichen und zeitlichen Charakteristika objektstrukturierter Daten definiert [37]. Darauf aufbauend können Anwendungsschemata zur formalen Dokumentation von Datenstrukturen und Semantik definiert werden [38]. Diese Anwendungsschemata definieren konzeptionelle Schemata als Domänenmodelle oder Sichten für einen bestimmten Anwendungsbereich. Meist wird neben der konzeptionellen Modellierung in der *Unified Modelling Language* (UML) auch noch die Datenkodierung in der *Geography Markup Language* (GML) spezifiziert. GML bietet hierfür Primitive zur Beschreibung von räumlichen Objekten, Geometrien, Referenzsystemen, Maßeinheiten, Topologie, sowie Zeit. Beispiele für solche vereinheitlichten bzw. standardisierten Anwendungsschemata sind:

- CityGML: Modell und GML-Kodierung für 3-dimensionale Stadtmodelle.
- ATKIS: Objektartenkatalog als Modell für die topographischen Daten der Landesvermessung in Deutschland.
- OKSTRA: Objektkatalog für das Straßen und Verkehrswesen.
- Harmonisierte Geodatenspezifikationen für die INSPIRE Geodathemen (vgl. Kap. 1.3).

Für konkrete Anwendungen ist es möglich diese umfangreichen Schemata über Profile einzuschränken und zu vereinfachen. Umgekehrt ist es auch möglich die Vorgaben der standardisierten Anwendungsschemata um eigene Klassen, Attribute und Codelisten zu erweitern. Vor dieser Aufgabe stehen derzeit etwa die von INSPIRE betroffenen Behörden, wenn sie ihre Daten in einem der INSPIRE-Modelle veröffentlichen wollen. Die Vorgaben der INSPIRE-Modelle sind hier häufig nicht detailliert genug. Beispielsweise sind beim Thema Schutzgebiete jeweils die Art des Schutzgebietes und der zugrunde liegende Rechtsakt zu beschreiben. Das Modell beinhaltet hierfür Vorgaben wie sie auf internationaler Ebene gültig sind (Ramsar-Konvention, UNESCO Weltkulturerbe etc.), aber nationale Bestimmungen wie die Kategorisierung entsprechend dem Bundesnaturschutzgesetz in Nationalpark, Biosphärenreservat etc. sind nicht enthalten. Diese Modellerweiterung, -verfeinerung und -einschränkung erfolgt in der Regel zunächst auf der Ebene der UML-Modellierungen (Abbildung 5). Anschließend muss das erweiterte Anwendungsschema in ein Kodierungsschema (meist XML Schema) transformiert werden. Komplexe UML-Strukturen eignen sich nur begrenzt für die Datenenkodierung, deshalb wird das Modell bei der Transformation meist vereinfacht und die gegebene Klassenhierarchie abgeflacht. Das erhaltene Zieldatenschema bildet die Basis für die Schematransformation. Dabei werden zwischen dem Quelldatenschema, in dem die Ursprungsdaten vorliegen, und dem (INSPIRE-konformen) Zieldatenschema Transformationsregeln festgelegt. Diese beinhalten die Zuordnung von Quell- und Zielattributen und von den Attributwerten verschiedener Codelisten, sowie die Transformation oder Umrechnung von Attributwerten z. B. bei unterschiedlichen Maßeinheiten. Die Definition der Transformationsregeln [39] erfolgt meist graphisch unterstützt in Transformationswerkzeugen (z. B. FME, HALE, ArcGIS for INSPIRE). Danach erfolgt die eigentliche Transformation der Ursprungsdaten in das Zieldatenformat. Die Transformationswerkzeuge erlauben es auch, in diesem Schritt direkt einen Webdienst für die Publikation der Daten zu publizieren [40].

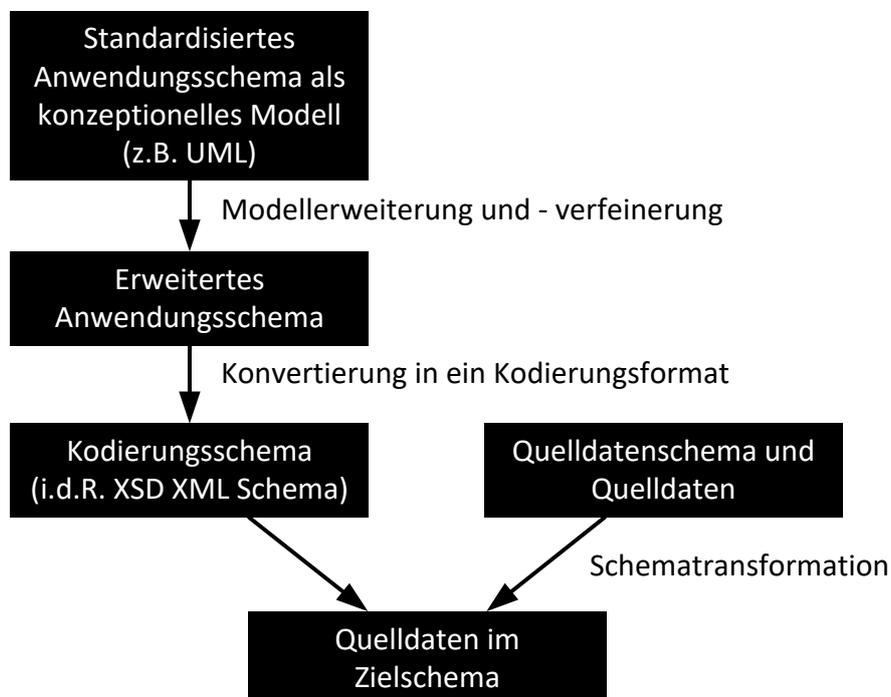


Abbildung 5: Ablaufschema der Schemaerweiterung mit anschließender Transformation

Für den interoperablen Datenaustausch müssen neben den Daten selbst auch die Schemata bereitgestellt werden. Hierfür können Schemata und Codelisten in *Registries* versioniert abgelegt und verwaltet werden. Jeder Eintrag erhält dabei einen eindeutigen und permanenten Identifikator als Referenz. Wird der

Registerinhalt an anderer Stelle verwendet kann über diesen Identifikator ein eindeutiger Bezug hergestellt werden. Registries werden in GDI auch verwendet, um eindeutige Begrifflichkeiten für beispielsweise Koordinatenreferenzsysteme, gemeinsame Vokabulare oder Ontologien für Schlüsselwörter, Objektidentifikatoren oder Organisationen festzulegen. Diese Referenzierungen bieten die Basis für Koordinatentransformationen oder semantische Transformationen bei der Datenintegration.

2.4 Geodatenfusion in Geodateninfrastrukturen

Auch wenn es mit der weiteren Entwicklung von GDI zu einer stärkeren Harmonisierung von Datenmodellen kommt, wird es weiterhin einen großen Bedarf geben, (Geo-)Daten unterschiedlicher Quellen, etwa aus behördlichen und nutzergenerierten Datenbeständen oder von unterschiedlichen online verfügbaren Sensoren bestenfalls ad-hoc für eine Fragestellung zusammenzuführen [41]. Entsprechende Methoden zur Geodatenfusion können dabei beispielsweise zur Datenanreicherung, zur Datenaktualisierung oder zur Detektion von Unterschieden bzw. Veränderungen genutzt werden. Existierende Lösungen in diesem Bereich sind meist komplexe, in sich geschlossene Systeme mit konkretem Anwendungsbezug.

Für den Einsatz in einer GDI gilt es zunächst durch eine Dekomposition des Fusionsprozesses, einzelne wohldefinierte, wiederverwendbare Teilprozesse zu identifizieren. Diese können dann beispielsweise über Geoprocessingdienste (Kap. 2.5) bereitgestellt und je nach Anwendungszweck unterschiedlich miteinander kombiniert werden. Der Fusionsprozess kann dazu grob in sieben Einzelschritte unterteilt werden:

- (1) Suche und Bezug der gewünschten oder potenziell geeigneten Daten für die angestrebte Datenfusion. Dazu können Katalog- und Geodatendienste einer GDI genutzt werden.
- (2) Datenanreicherung, Fehlerkorrektur oder grundsätzliche Qualitätsprüfung (z. B. durch Geokodierungs- oder Geoprocessingdienste für die Prüfung der Topologie), um im Ergebnis einen konsistenten, für die weitere Bearbeitung geeigneten Datensatz bereitzustellen.
- (3) Datenharmonisierung zur Angleichung von Eingangsdaten, um die grundsätzliche Vergleichbarkeit herzustellen (z. B. Koordinatentransformation, Generalisierung).
- (4) Relations- und Ähnlichkeitsmessung, um mögliche Gleichheiten oder Beziehungen zwischen Datensätzen und den darin enthaltenen Objekten, basierend auf objekt-, struktur- oder konzeptspezifischen Eigenschaften zu ermitteln (z.B. mittels geometrischer, topologischer oder semantischer Maße).
- (5) Zuordnung von Objekten unter Nutzung der zuvor ermittelten Relations- und Ähnlichkeitsmaße; dabei werden Konfidenzmaße für die ermittelten Relationen abgeleitet.
- (6) Bewertung und eventuelle Auflösung bestehender Zuordnungskonflikte, entsprechende Anwendung von Konfliktlösungsstrategien und Verarbeitung von Relationen, um den konkreten Anwendungsfall umzusetzen (z. B. Datenintegration, Informationstransfer, Änderungsdetektion).
- (7) Temporäre oder dauerhafte Bereitstellung der Fusionsergebnisse, etwa über Visualisierungs- oder Zugriffsdienste in einer GDI, die dann die weitere Verarbeitung und Nutzung erlauben.

Um Anwendungen die interoperable Nutzung der erstellten Fusionsergebnisse zu ermöglichen, müssen die ermittelten Relationen formalisiert beschrieben werden. Der Entwurf eines geeigneten Schemas zur Beschreibung der Relationen ist in Abbildung 6 dargestellt. Grundsätzlich wird angenommen, dass alle beteiligten Objekte als *Resource* direkt oder indirekt eindeutig identifizierbar sind. Eine *FeatureRelation* beschreibt die Beziehung zwischen mindestens zwei Geoobjekten (*Feature*). Die Art der Relation wird

durch Relationstypen bestimmt, welche wiederum auf durchgeführten Relations- und Ähnlichkeitsmessungen beruhen. Eine Relation sollte stets reproduzierbar sein und dementsprechend ausreichend Informationen zur vorangegangenen Prozessierung beinhalten. Als Beispiel kann die Gleichheit zweier Objekte (*RelationType sameAs*) durch verschiedene geometrische, topologische oder semantische Ähnlichkeitsmaße beschrieben sein. Ein einfaches geometrisches Konfidenzmaß kann dann etwa aus der mittleren quadratischen Abweichung der Objektgeometrien ermittelt werden.

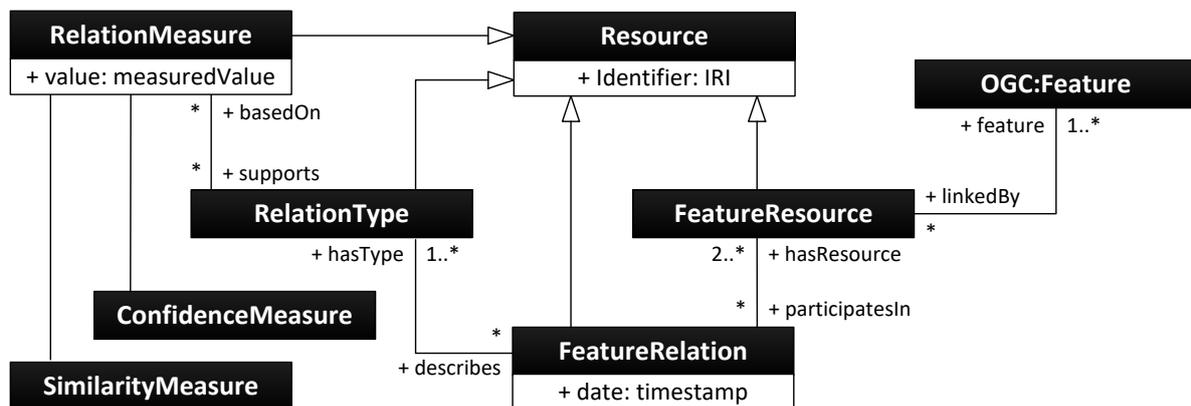


Abbildung 6: Vereinfachtes Modell zur Beschreibung von Relationen zwischen Geodatenobjekten

Um Relationen zwischen Objekten unterschiedlicher Geodatenätze verfügbar zu machen, bietet sich die Nutzung von Linked Data an (Kap. 2.2). Dazu können etablierte W3C Standards (z. B. RDF, SPARQL), sowie der OGC GeoSPARQL [42] Standard genutzt werden. Die in der Fusion ermittelten Relationen können so auch unabhängig von den jeweils fusionierten Dateninstanzen vorgehalten werden. Existierende Datenquellen im Web können so direkt miteinander in Relation gesetzt werden, ohne die Datensätze selbst ändern zu müssen. Eine einmalig berechnete Relation kann anschließend auf Anwendungsebene beliebig oft genutzt werden und die Datenquellen können ad-hoc zusammengeführt werden. Zudem erlaubt die Verwendung von Linked Data auch die Nutzung bestehender Entwicklungen des Semantic Web, um etwa mit Methoden des Semantic Reasoning weitere Recherchen über ähnliche und relevante Informationsressourcen in unterschiedlichen Domänen durchzuführen. Abbildung 7 zeigt das mögliche Zusammenspiel der entsprechenden Komponenten.

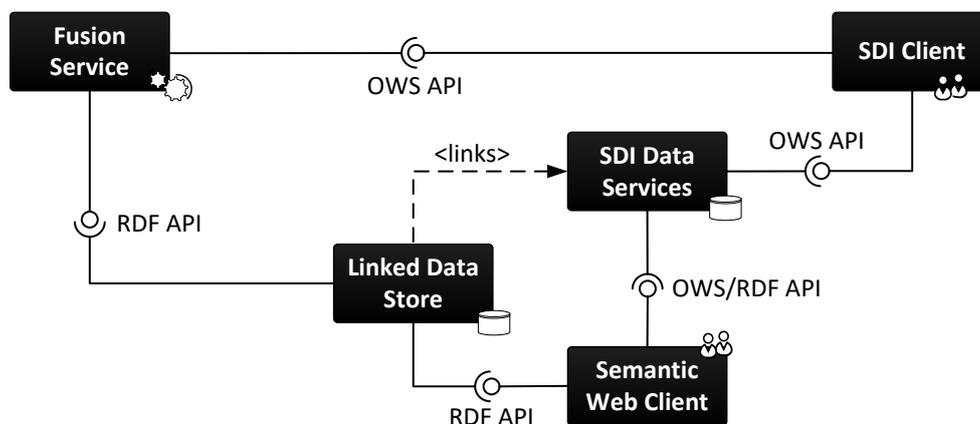


Abbildung 7: Komponenten zur Unterstützung von ad-hoc Geodatenfusion unter Nutzung von Linked-Data-Mechanismen

Ein konkretes Beispiel für die GDI-Umsetzung einer Geodatenfusion nach dem beschriebenen Konzept ist etwa die Kombination amtlicher Fachdaten mit nutzergerierten Geodaten. Da diese Datenbestände jeweils mit unterschiedlichen Zielstellungen und Methoden erhoben werden, sind sie nicht unbedingt re-

dundant, sondern teilweise komplementär. Eine Integration dieser vielfältigen und heterogenen Datenquellen sollte damit idealerweise zu einer Verbesserung der thematischen als auch der raumzeitlichen Auflösung führen. Ein wesentliches Problem bei der Datenintegration ist die Handhabung und Verarbeitung der unterschiedlichen Datenqualitäten (Kap. 1.2). Amtliche Daten werden gewöhnlich nach vordefinierten Qualitätsstandards erhoben und bereitgestellt und daher z. B. für sicherheitsrelevante Anwendungen bevorzugt als Datenbasis verwendet. Privatpersonen oder einzelne Nutzergruppen publizieren ihre Daten dahingegen oft ohne Qualitätsangaben. Dieses Konzept wurde beispielhaft in einer dienstebasierten Anwendung für Vergleich und Zusammenführung von Straßendaten aus ATKIS bzw. OpenStreetMap realisiert [43]. Die unter Einsatz geometrischer, topologischer und semantischer Maße ermittelten Ähnlichkeiten können analysiert und die Straßendaten zusammengeführt werden (Abbildung 8).

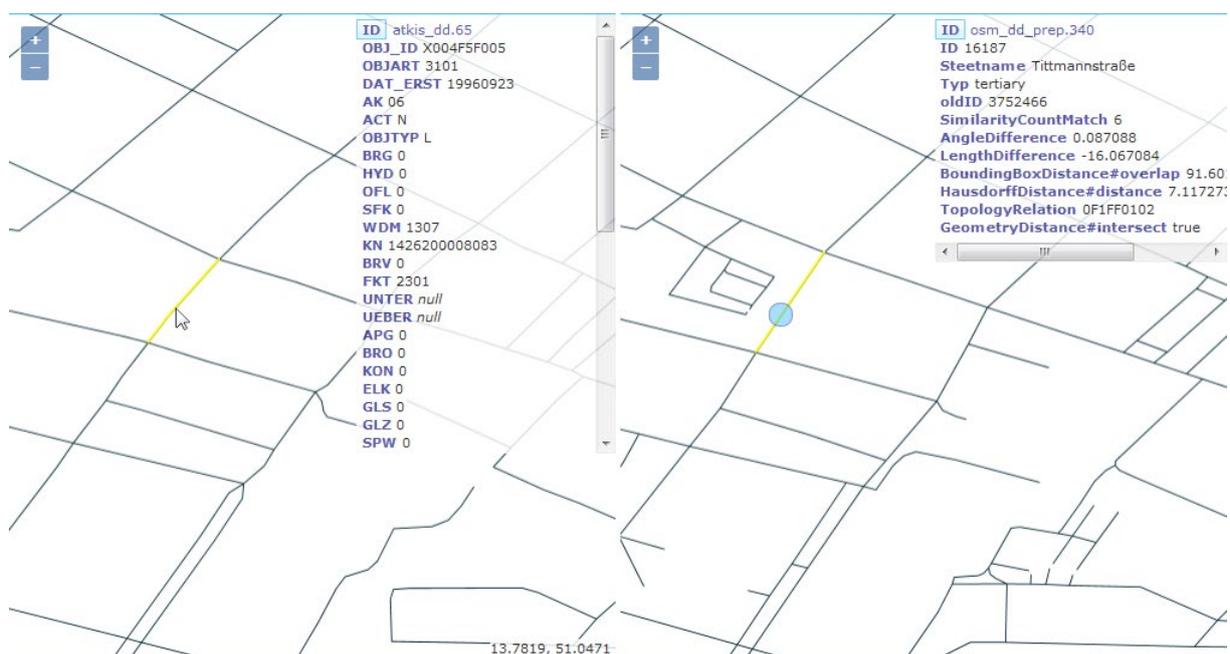


Abbildung 8: Daten aus ATKIS (links), sowie in Relation stehende Daten aus OSM (rechts), inklusive Anzeige der zuvor ermittelten Ähnlichkeitsmaße in einem Web-Client.

Weitere ähnliche Lösungen können beispielsweise für die Fusion von Daten im Umweltmonitoring genutzt werden, um behördliche Daten zur Beschreibung von Schutzgebieten mit Daten aus den zahlreichen Crowdsourcing Kampagnen der unterschiedlichen Naturschutzverbände und -initiativen zusammenzuführen [12].

2.5 Verteilte Geoprozessierung

Der Begriff *Geoprozessierung* umfasst alle Aspekte typischer GIS-Funktionalität für die Aufnahme, die Analyse, das Speichern und das Publizieren von Geodaten [44] und betont in seiner derzeitigen Verwendung die Analyse von Geodaten [45]. Geoprozessierung darf nicht mit dem Begriff Geoprozess verwechselt werden, der einen Vorgang in der realen Welt beschreibt, z. B. ein Hochwasserereignis [46,47]. Der Begriff der *verteilten Geoprozessierung* beschreibt die Umsetzung der entsprechenden Funktionalitäten in interoperable Webdienste, die austauschbar und flexibel für die Analyse verteilter Geodaten bereitgestellt werden [46,48]. Durch die Verfügbarkeit von Geoprozessierungsdiensten können auch über einfache Mashups (Kap. 1.1) hinausgehende komplexe Anwendungen in GDI umgesetzt werden, beispielsweise für ad-hoc Analysen, die auf hochdynamischen Sensordaten basieren.

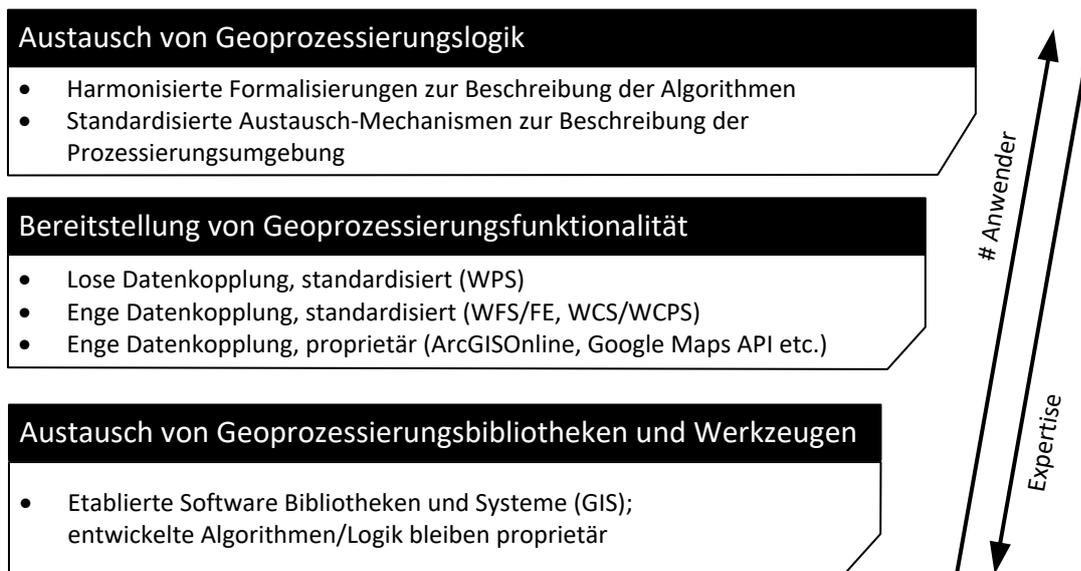


Abbildung 9: Ebenen der interoperablen Geoprozessierung.

Die Entwicklung von verteilter und interoperabler Geoprozessierung kann in drei Ebenen unterteilt werden (Abbildung 9):

- (1) *Austausch von Geoprozessierungsbibliotheken und Werkzeugen*: Um Geoprozessierungslogik zu entwickeln und bereitzustellen werden etablierte und hauptsächlich desktopbasierte Systeme und Softwarebibliotheken benutzt. Funktionalität kann nur mit erhöhtem Aufwand und manuell ausgetauscht werden. Die entwickelte Funktionalität bleibt meist proprietär, da sie fest an die verwendeten Systeme gekoppelt ist.
- (2) *Bereitstellung von Geoprozessierungsfunktionalität*: Die Bereitstellung von Funktionalität über Webdienste kann sowohl proprietär als auch standardisiert erfolgen. Anbieter stellen über Schnittstellen eng an die Daten gekoppelte Funktionalitäten über proprietäre Schnittstellen (etwa kommerzielle Kartendienste, Kap. 1.1) oder standardisierte Schnittstellen als Web Feature Service [49] oder Web Coverage Service [50,51] zur Verfügung. Die standardisierte Webdienstschnittstelle des OGC Web Processing Service [52,53] ermöglicht es Geoprozessierungsfunktionalität interoperabel und in enger oder loser Kopplung an die Daten bereitzustellen. Bestehende Funktionalitäten, beispielsweise aus GIS-Softwarebibliotheken, Geodatenbanken oder Simulationssystemen können über die WPS-Schnittstelle im Sinne einer Black Box gekapselt als Dienst zur Verfügung gestellt werden [54,55].
- (3) *Austausch von Geoprozessierungslogik (Algorithmen)*: Der Austausch von Geoprozessierungslogik im Sinne de *moving code* Paradigma markiert die nächste Interoperabilitätsebene für Geoprozessierung in GDI. Auf Basis des WPS Standards, eines Plattformbeschreibungsstandards aus dem Cloud Computing und Lizenzbeschreibungen können dann die Geoprozessierungsumgebungen definiert werden, in der Geoprozessierungscode ausgetauscht und flexibel in unterschiedlichen Umgebungen ausgeführt werden kann [56,57]. In dieser Form kann etwa bei der Prozessierung großer oder geschützter Datenmengen, der Algorithmus zu den Daten gebracht werden. Weiterhin werden Formalismen benötigt, die die Semantik der angebotenen Geoprozessierungslogik so beschreiben, dass Anwender beim Suchen und bei der Auswahl von Funktionalität für die Entwicklung oder die Reproduktion von komplexen wissenschaftlichen Arbeitsabläufen [17] automatisiert und über unterschiedliche Geoprozessierungsplattformen hinweg unterstützt werden. Die Basis hierfür legen Geoperatoren [58], die die Semantik der zugrundeliegenden Funktionalität formalisieren. Die Formalisierung umfasst u. a. Links zu alternativen Geoperatoren, die die gleiche oder ähnliche

Funktionalität anbieten und Links zu Geooperatoren, die häufig im gleichen Kontext verwendet werden. Das Finden von passenden Geooperatoren wird durch formalisierte Kategorisierungen aus Wissenschaft und Praxis unterstützt. Diese Kategorisierungen stellen unterschiedlichste Perspektiven auf Geooperatoren bereit: Aus Sicht einer bestimmten Anwendungsdomäne, auf Basis von Eigenschaften der benötigten Daten oder Prozessierungsumgebungen etc. Die Zusammenhänge und Links zwischen den Geooperatoren und den dazugehörigen Kategorien und Perspektiven können über eine *concept map* (Abbildung 10) dargestellt werden. Die formalisierten Beschreibungen der Geooperatoren werden als *Simple Knowledge Organization System* (SKOS) [59,60] und den Prinzipien von Linked Data folgend bereitgestellt [61,62]. So wird sowohl eine wohlstrukturierte textuelle als auch eine maschinenlesbare Version des Vokabulars verfügbar gemacht. Der Austausch von Funktionalitäten über moving code und die semantischen Beschreibungen der Geooperatoren sind in einer Communityplattform integriert, die damit die Kollaboration zwischen Entwicklern und Anwendern verbessert [63,64].

Grundsätzlich markieren die erste und zweite Ebene den heutigen Entwicklungsstand zur interoperablen Geoprozessierung, verlangen allerdings einen recht großen Grad an Geoinformatik-Expertise. Für die dritte Ebene, die eine deutlich größere Anwendergruppe etwa in wissenschaftlichen Geoinformationsinfrastrukturen adressiert, finden sich heute lediglich Forschungsansätze.

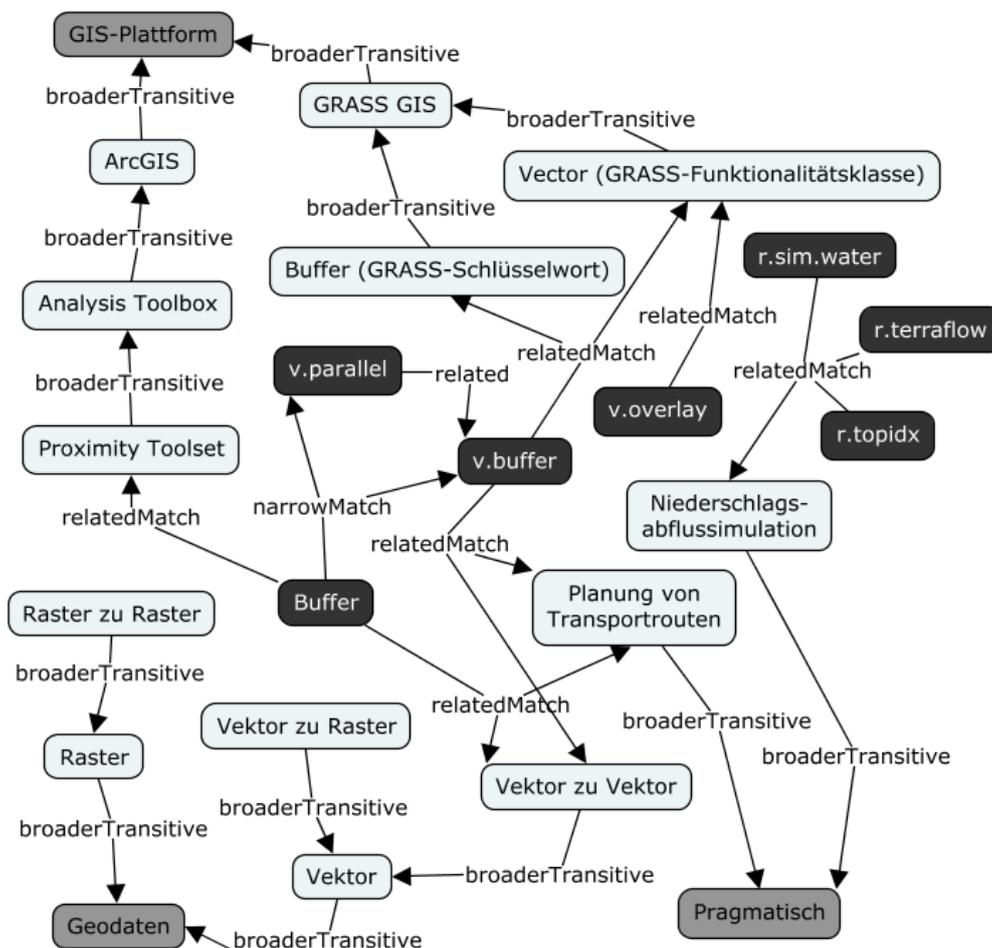


Abbildung 10: Auszug einer concept map (nach [58]) von Geooperatoren (schwarz), Kategorien (transparent) und Perspektiven (grau). Perspektiven realisieren unterschiedliche fachliche Sichten auf die Kategorien und Geooperatoren: In der Perspektive GIS-Plattform sind Operatoren nach den unterschiedlichen Zuordnungen zu speziellen GIS (hier ArcGIS und Grass)

organisiert; in der Perspektive Geodaten erfolgt die Organisation entsprechend der Prozessierungen, die typischerweise zur Geodatentransformation eingesetzt werden.

2.6 Austausch von interdisziplinären Umweltmodellen

Die Entwicklung von Ansätzen zum Austausch und zur Verknüpfung von Umweltsimulationsmodellen unterschiedlicher Disziplinen sowie deren Anbindung an Geoinformationssysteme sind seit langem ein Forschungsfeld in der Geoinformatik [65-69]. Für die weitere Entwicklung wissenschaftlicher Geoinformationsinfrastrukturen (Kap. 1.4) lassen sich dabei grob drei Strategien zum Austausch und zur Kopplung von Umweltmodellen unterscheiden:

- (1) *Gemeinsame Modellentwicklungen* haben zu einer Reihe sogenannter *community models* geführt und sind eine recht weit verbreitete Strategie. Ähnlich dem Vorgehen in Open-Source-Projekten entwickeln Gruppen aus einer oder mehreren Forschungseinrichtungen ein gemeinsames Modell innerhalb einer Fachdisziplin (z. B. das *Weather Research & Forecasting Model*, <http://www.wrf-model.org>).
- (2) *Kopplung von Modellkomponenten* mit dem Ziel auch Modelle unterschiedlicher Disziplinen in einer integrierten Anwendung nutzen zu können. Dabei gibt es unterschiedliche Strategien: Zum einen werden existierende Modelle modifiziert, um sie über standardisierte Schnittstellen koppeln zu können (z. B. unter Anwendung der IEEE Standards der *High Level Architecture* [70] oder des *Open Modelling Interface*, <http://www.openmi.org/>). Allerdings hat sich hier noch kein Ansatz umfassend etablieren können. Zum anderen werden integrierte Modelle (neu) entwickelt, um Modelle aus verschiedenen Disziplinen zu synthetisieren [71,72]. In beiden Fällen sind die Entwicklungsaufwände recht groß, speziell wenn auch Rückkopplungen zwischen unterschiedlichen raumzeitvarianten Umweltmodellen möglich sein sollen.
- (3) *Austausch von Simulationsergebnissen*, der es Wissenschaftlern verschiedener Disziplinen erlaubt auf spezifische Simulationsergebnisse zuzugreifen. Die Ergebnisse stammen dabei entweder aus vorab ausgeführten Simulationsläufen (z. B. die verfügbaren Daten zu Klimaszenarien des International Panel on Climate Change, IPCC) und sollten entsprechend validiert und auf ihre Plausibilität geprüft worden sein. Oder ein (vor-parametrisiertes) robustes Modell erlaubt eine ad-hoc Ausführung (z. B. ein Interpolationsmodell zur Berechnung von Schadstoffverteilungen aus Sensormessungen [73,74]). Hier können die OGC Spezifikationen des *Sensor Web Enablement* genutzt werden, um ausführbare Modelle (*Model as a Sensor*) oder Simulationsergebnisse in GDI zu Verfügung zu stellen [69].

Ähnlich der verteilten Geoprozessierung definieren sich damit auch drei Interoperabilitätsebenen für den Austausch von Umweltsimulationsmodellen, die abhängig von den Nutzeranforderungen und Anpassungsfähigkeiten der Modelle sowie den verfügbaren Ressourcen eingesetzt oder kombiniert werden können.

Für den Austausch von Umweltsimulationsergebnissen sind Informationen zu den zu Grunde liegenden Szenarien und Modellparametern ein relevanter Bestandteil der beschreibenden Metadaten und wesentlich für die Beschreibung von Umweltdaten in wissenschaftlichen Informationsinfrastrukturen. Die ISO Norm 19115 [75] beinhaltet hierfür das *Lineage* Element zur Beschreibung der Entstehungsprozesse und Eingangsdaten. In den meisten Anwendungen der ISO-Norm wird jedoch auf diese detaillierte Modellierung verzichtet, und die Historie ist bestenfalls als Freitext hinterlegt. Henzen et al. [76] zeigen wie unter Einhaltung der ISO-Norm die Entstehungsgeschichte der Simulationsergebnisse formalisiert modelliert und in Geokatalogen genutzt werden kann. Für jeden Datensatz können die beteiligten Simulationsmodelle, die jeweiligen Eingabedaten und wissenschaftlichen Veröffentlichungen beschrieben und durch Wissenschaftler recherchiert werden (Abbildung 11). So wird nicht nur die Entstehung abgeleiteter Daten dokumentiert, sondern auch die Weiterverwendung eines Datensatzes in anderen Analyse-

und Simulationsprozessen in den Metadaten erfasst. Die angepasste Geokataloganwendung bildet automatisch aus den Metadaten die Entstehungsgraphen und ermöglicht den direkten Aufruf von Visualisierungsfunktionen und Zugriffsfunktionen zur Exploration und Nutzung der zeitvarianten Geodaten.

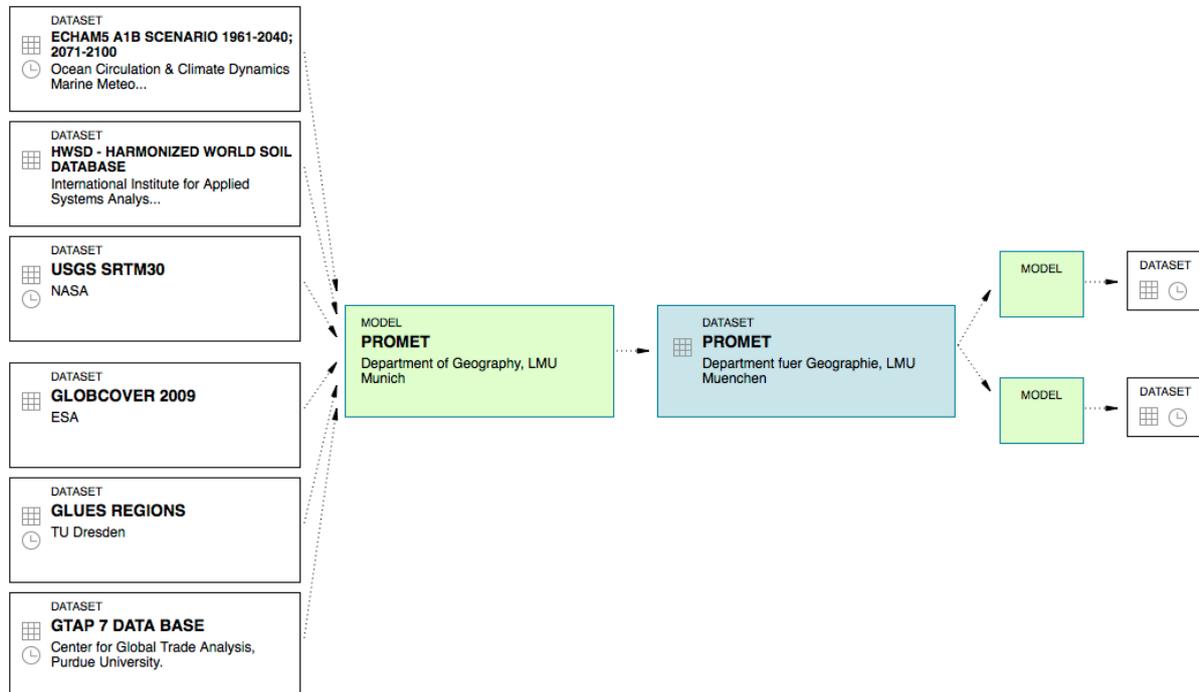


Abbildung 11: Interaktive Visualisierung des Entstehungsgraphen eines Simulationsergebnisses (blau), der beteiligten Modelle (grün) und Eingabedaten unter Verwendung der ISO Normen und aktueller Geodatenkataloge. Das Beispiel ist dem Katalog der GLUES GDI [20] entnommen.

Anwendungen dieser Art stoßen bei beteiligten Wissenschaftlern auf positive Resonanz und helfen insbesondere auch, den Mehrwert der Erfassung (formalisierter) Metadaten im Speziellen und der Anwendung wissenschaftlicher Informationsinfrastrukturen im Generellen zu vermitteln. Es zeigt sich aber ebenfalls, dass es selbst im Bereich der Metadaten (immer) noch ein weiter Weg bis zu der Erfüllung der von Craglia et al. [18] definierten Aufgaben zur Unterstützung multi-disziplinärer Umweltmodellierung ist [17]. Hier sind beispielsweise die Verbesserung der automatisierten Erfassung und Fortführung von Metadaten in wissenschaftlichen Anwendungen, die Erweiterungen von Standards für wissenschaftliche Belange, erweiterte Referenz-Vokabulare und Ontologien zum interdisziplinären Austausch sowie die Weiterentwicklung von Ansätzen zur Beschreibung der Modellannahmen und Unsicherheiten und deren Berücksichtigung in Analyseanwendungen zu nennen [77,78,17].

3 Fazit Geodateninfrastrukturen

GDI der ersten Generation zur Recherche, Visualisierung und Bezug von verteilt vorliegenden Geodaten sind mittlerweile weitgehend etabliert. Dabei können Kartendienste, Initiativen zu nutzergenerierten Geoinformation sowie administrative GDI grob unter Einsatz der in Abschnitt 1 genannten grundlegenden Prinzipien kategorisiert werden (Abbildung 12). Aktivitäten zum Aufbau wissenschaftliche Geoinformationsinfrastrukturen, die sich derzeit noch in einer Start- bzw. ersten Konsolidierungsphase befinden, bleiben diese bei der Kategorisierung außen vor.

	Kartendienste	Nutzer-generierte Geo-informationen	Administrative GDI
Subsidiarität	--	-	++
Interoperabilität	-	0	+
Interdisziplinarität	0	0	-
Skalierbarkeit	++	-	0
Transparenz	--	++	++
Verlässlichkeit	-	-	0
Effizienz & Effektivität	++	+	--

Abbildung 12: Grobe Kategorisierung heutiger Initiativen zum Austausch von Geoinformationen (vgl. Abschnitt 1).

Eine wesentliche Herausforderung für weitere GDI-Entwicklungen ist es, Strategien zu entwickeln, um die in dieser Kategorisierung erkennbaren unterschiedlichen Stärken der jeweiligen Initiativen komplementär zu nutzen und generelle Schwächen zu beseitigen. Aktuelle Geoinformatikforschungen skizzieren dazu Ansätze. Etwa wie künftige GDI-Anwendungen bei zu erwartenden weiter wachsenden Geodatenmengen anfragegerecht aufbereiteter Geoinformationen liefern können oder zeigen das Potenzial von weiteren GDI-Entwicklungen für wissenschaftliche Informationsinfrastrukturen. Die Darstellung der in diesem Kapitel angerissenen Entwicklungen sollte repräsentativ sein, aber erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit: Es gibt zahlreiche weitere, breitgefächerte Themen im GDI-Kontext (z. B. *Usability*, Anbindung an das *Internet der Dinge*, *Smart Cities*, robuste online Umweltsimulationen für Global Change Adaptionen, Sozio-ökonomische Betrachtungen zu Kosten-Nutzen, *Data Democracy* etc.), die auch zukünftig eine Menge spannender Forschungsfragen für die Geoinformatik erwarten lassen. Darüber hinaus ist auch die Ausbildung zur Schaffung entsprechender Geoinformatik-Expertise gefordert.

4 Literatur

1. Bernard, L., Fitzke, J., Wagner, R. (Hrsg.): Geodateninfrastrukturen - Grundlagen und Anwendungen. Wichmann, Heidelberg (2005)
2. Streuff, H., Kutterer, H.-J., Lenk, M., Rummel, R.: Geoinformation im internationalen Umfeld. In: Kummer, K., Kötter, T., Eichhorn, A. (Hrsg.) Das deutsche Vermessungs- und Geoinformationswesen, vol. 2015. S. 193-251. Wichmann, Berlin (2014)
3. Gore, A.: The Digital Earth: Understanding Our Planet in the 21st Century (Speech held on January 31, 1998 in the California Science Center). *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **65** (5), 528-530 (1999).
4. Funde, P., Sun, J.: *Web GIS: Principles and Applications*. ESRI Press, Redlands, California (2011)
5. Peterson, M.: Evaluating Mapping APIs. In: Brus, J., Vondrakova, A., Vozenilek, V. (Hrsg.) *Modern Trends in Cartography. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, S. 183-197. Springer International Publishing, (2015)
6. Google: Examples Google Maps API. <https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/examples/layer-kml> (2015). Zugegriffen: 30.04.2015
7. Goodchild, M.F., Li, L.N.: Assuring the quality of volunteered geographic information. *Spat Stat-Neth* **1**(0), 110-120 (2012). doi:DOI 10.1016/j.spasta.2012.03.002
8. Meier, P.: *Digital Humanitarians: How Big Data Is Changing the Face of Humanitarian Response*. CRC Press, (2015)

9. Goodchild, M.F., Glennon, J.A.: Crowdsourcing geographic information for disaster response: a research frontier. *International Journal of Digital Earth* **3**(3), 231-241 (2010). doi:10.1080/17538941003759255
10. OSM: OpenStreetMap Wiki. <http://wiki.openstreetmap.org> (2015). Zugegriffen: April 30, 2015
11. Barron, C., Neis, P., Zipf, A.: A Comprehensive Framework for Intrinsic OpenStreetMap Quality Analysis. *Transactions in GIS* **18**(6), 877-895 (2014). doi:10.1111/tgis.12073
12. Wiemann, S., Bernard, L.: Linking crowdsourced observations with INSPIRE. In: Joaquin, H., Schade, S., Granell, C. (Hrsg.) *Conference of the Association of Geographic Information Laboratories for Europe (AGILE), Castellón, Spain 2014*
13. Craglia, M., Shanley, L.: Data democracy – increased supply of geospatial information and expanded participatory processes in the production of data. *International Journal of Digital Earth*, 1-15 (2015). doi:10.1080/17538947.2015.1008214
14. EC: Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council of 14 March 2007 establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE). In: Council, E.P.a.E. (ed.). S. L 108/101 - L 108/114. *Official Journal of the European Union*, (2007)
15. INSPIRE: INSPIRE spatial data services and services allowing spatial data services to be invoked. Draft Implementing Rules, Network Services Drafting Team, Version 3.0. http://inspire.ec.europa.eu/documents/Spatial_Data_Services/Draft_TG_for_INSPIRE_SDS_2.0.1.pdf (2013)
16. WR: Empfehlungen zur Weiterentwicklung der wissenschaftlichen Informationsinfrastrukturen in Deutschland bis 2020. Wissenschaftsrat, Berlin (2012)
17. Bernard, L., Mäs, S., Müller, M., Henzen, C., Brauner, J.: Scientific Geodata Infrastructures: Challenges, Approaches and Directions. *International Journal of Digital Earth* **7**(7), 613-633 (2014). doi:10.1080/17538947.2013.781244
18. Craglia, M., de Bie, K., Jackson, D., Pesaresi, M., Remetey-Fulopp, G., Wang, C.L., Annoni, A., Bian, L., Campbell, F., Ehlers, M., van Genderen, J., Goodchild, M., Guo, H.D., Lewis, A., Simpson, R., Skidmore, A., Woodgate, P.: Digital Earth 2020: towards the vision for the next decade. *International Journal of Digital Earth* **5**(1), 4-21 (2012). doi:10.1080/17538947.2011.638500
19. Eppink, F., Werntze, A., Mäs, S., Popp, A., Seppelt, R.: Land Management and Ecosystem Services: How Collaborative Research Programmes Can Support Better Policies. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* **21**(1), 55-63 (2012).
20. Mäs, S., Henzen, C., Müller, M., Bernard, L.: GLUES GDI – Eine Geodateninfrastruktur für wissenschaftliche Umweltdaten. *gis.SCIENCE* **2014**(4), 129-137 (2014).
21. Bernard, L., Hergert, A., Katerbaum, G., Schwarzbach, F., Taggeselle, J.: INSPIRE Umsetzung in der GDI Sachsen. In: *Beiträge zum 16. Münchener Fortbildungsseminar 2011*. Edition GIS.Events, S. 114-121
22. Bernard, L., Brauner, J., Taggeselle, J.: *Vorstudie zum Betriebskonzept der Geodateninfrastruktur des Freistaates Sachsen (GDI Sachsen)*. (2008)
23. Boehm, B.W.: A spiral model of software development and enhancement. *Computer* **21**(5), 61-72 (1988). doi:10.1109/2.59
24. Usländer, T.: *Service-Oriented Design of Environmental Information Systems*, vol. 5. *Karlsruher Schriften zur Anthropomatik*. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe (2010)
25. Trapp, N., Schneider, U.A., McCallum, I., Fritz, S., Schill, C., Borzacchiello, M.T., Heumesser, C., Craglia, M.: A Meta-Analysis on the Return on Investment of Geospatial Data and Systems: A Multi-Country Perspective. *Transactions in GIS* **19**(2), 169-187 (2015). doi:10.1111/tgis.12091
26. Melzer, I.: *Service-orientierte Architekturen mit Web Services*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg (2010)
27. Fielding, R.T., Taylor, R.N.: *Principled Design of the Modern Web Architecture*. In, 2000 2000. *ICSE '00*, S. 407–416. ACM, New York, NY, USA
28. Berners-Lee, T., Hendler, J., Lassila, O.: The Semantic Web. *Scientific American* **184**, 34–43 (2001).
29. Shadbolt, N., Hall, W., Berners-Lee, T.: The Semantic Web Revisited. *IEEE Intelligent Systems* **21**, 96-101 (2006). doi:10.1109/MIS.2006.62
30. W3C: *RDF Primer - W3C Recommendation 10 February 2004*. In: Manola, F., Miller, E. (eds.). *W3C*, (2004)
31. W3C: *SPARQL 1.1 Query Language*. In: Harris, S., Seaborne, A. (eds.). *W3C*, (2013)
32. Pautasso, C., Zimmermann, O., Leymann, F.: Restful Web Services vs. "Big" Web Services: Making the Right Architectural Decision. In, 2008 2008. *WWW '08*, S. 805–814. ACM, New York, NY, USA
33. Auer, S., Lehmann, J., Hellmann, S.: *LinkedGeoData: Adding a Spatial Dimension to the Web of Data*. In: Bernstein, A., Karger, D., Heath, T., Feigenbaum, L., Maynard, D., Motta, E., Thirunarayan, K. (Hrsg.) *The Semantic Web - ISWC 2009*, vol. 5823. *Lecture Notes in Computer Science*, S. 731-746. Springer Berlin Heidelberg, (2009)
34. Goodwin, J., Dolbear, C., Hart, G.: Geographical Linked Data: The Administrative Geography of Great Britain on the Semantic Web. *Transactions in GIS* **12**, 19-30 (2008). doi:10.1111/j.1467-9671.2008.01133.x

35. ISO: ISO 19108 International Standard on Geographic information - Temporal Schema. International Organization for Standardization, (2002)
36. ISO: ISO 19107 International Standard on Geographic information - Spatial Schema. International Organization for Standardization, (2003)
37. Brinkhoff, T.: Geodatenbanksysteme in Theorie und Praxis: Einführung in objektrelationale Geodatenbanken unter besonderer Berücksichtigung von Oracle Spatial. Wichmann VDE Verlag, Heidelberg (2013)
38. ISO: ISO 19109 International Standard on Geographic information - Rules for Application Schema. International Organization for Standardization, (2005)
39. Reinwarth, S., Bernard, L.: Das Rule Interchange Format (RIF) für interoperable Schemamapping-Anwendungen In INSPIRE. *gis.SCIENCE* **2012**(3), 109-117 (2012).
40. Lehto, L.: Schema Translations in a Web Service Based SDI. In: Wachowicz, M., Bodum, L. (Hrsg.) Conference of the Association of Geographic Information Laboratories for Europe (AGILE), Aalborg, Denmark 2007
41. Mohammadi, H., Rajabifard, A., Williamson, I.P.: Development of an interoperable tool to facilitate spatial data integration in the context of SDI. *International Journal of Geographical Information Science* **24**(4), 487-505 (2010). doi:10.1080/13658810902881903
42. OGC: OGC GeoSPARQL - A Geographic Query Language for RDF Data, 11-052r4. Open Geospatial Consortium, Inc., (2012)
43. Wiemann, S., Bernard, L.: Conflation Services within Spatial Data Infrastructures. In: Painho, M., Santos, M.Y., Pundt, H. (Hrsg.) 13th AGILE International Conference on Geographic Information Science, Guimarães, Portugal 2010, S. 1-8
44. OGC: OGC - Glossary of Terms. In. (2014)
45. Wade, T., Sommer, S.: A to Z GIS: an illustrated dictionary of geographic information systems. ESRI Press, Redlands, California (2006)
46. Foerster, T., Schaeffer, B., Baranski, B., Brauner, J.: Geospatial Web Services for Distributed Processing: Applications and Scenarios. In: Zhao, P., Di, L. (Hrsg.) *Geospatial Web Services: Advances in Information Interoperability*. S. 245–286. IGI Global, Hershey, PA (2011)
47. Janowicz, K., Schade, S., Bröring, A., Keßler, C., Maué, P., Stasch, C.: Semantic Enablement for Spatial Data Infrastructures. *Transactions in GIS* **14**, 111–129 (2010). doi:10.1111/j.1467-9671.2010.01186.x
48. Neteler, M., Mitasova, H.: *Open Source GIS: A GRASS GIS Approach*, 3rd ed. Springer, New York (2007)
49. OGC: OGC Web Feature Service 2.0 Interface Standard – With Corrigendum. Open Geospatial Consortium, (2014)
50. OGC: OpenGIS Web Coverage Processing Service (WCPS) Language Interface Standard 1.0.0. Open Geospatial Consortium, (2009)
51. OGC: OGC WCS 2.0 Interface Standard - Core. Open Geospatial Consortium, (2010)
52. OGC: OpenGIS Web Processing Service Vs. 1.0.0 Open Geospatial Consortium, (2007)
53. OGC: OGC WPS 2.0 Interface Standard. Open Geospatial Consortium, (2014)
54. Friis-Christensen, A., Ostländer, N., Lutz, M., Bernard, L.: Designing Service Architectures for Distributed Geoprocessing: Challenges and Future Directions *Transactions in GIS* **11**(6), 799-818 (2007). doi:10.1111/j.1467-9671.2007.01075.x
55. Brauner, J.: Anbindung von GIS-Funktionalitäten an eine Geodateninfrastruktur über eine Web Processing Service Schnittstelle. *GIS Zeitschrift für Geoinformatik*(3), 18-25 (2008).
56. Müller, M., Bernard, L., Kadner, D.: Moving code - Sharing geoprocessing logic on the Web. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **83**, 193-203 (2013). doi:10.1016/j.isprsjprs.2013.02.011
57. Kadner, D., Müller, M., Brauner, J., Bernard, L.: Konzeption eines Marktplatzes für den Austausch von Geoprocessingimplementierungen. *gis.SCIENCE* **2012**(3), 118-124 (2012).
58. Brauner, J.: Formalizations for geoperators - geoprocessing in Spatial Data Infrastructures. PhD thesis, Technische Universität Dresden (2015)
59. W3C: SKOS Simple Knowledge Organization System Primer. In: Isaac, A., Summers, E. (eds.). W3C, (2009)
60. W3C: SKOS Simple Knowledge Organization System Reference. In: Miles, A., Bechhofer, S. (eds.). W3C, (2009)
61. W3C: Best Practice Recipes for Publishing RDF Vocabularies. In: Berrueta, D., Phipps, J. (eds.). W3C, (2008)
62. W3C: Cool URIs for the Semantic Web. In: Sauerbmann, L., Cyganiak, R. (eds.). W3C, (2008)
63. Henzen, C., Brauner, J., Müller, M., Henzen, D., Bernard, L.: Geoprocessing Appstore. In: Bacao, F., Santos, M.Y., Painho, M. (Hrsg.) The 18th AGILE International Conference on Geographic Information Science, Lisbon, Portugal, 2015 2015, Lisbon, Portugal
64. Kadner, D., Müller, M., Brauner, J., Bernard, L.: Konzeption eines Marktplatzes für den Austausch von Geoprocessingimplementierungen. *gis.SCIENCE* **2012**, 118–124 (2012).

65. Bernard, L., Krüger, T.: Integration of GIS and Spatio-Temporal Simulation Models. *Transactions in GIS* **4**(3), 197-215 (2000). doi:10.1111/1467-9671.00049
66. Goodchild, M.F., Parks, B.O., Steyaert, L.T. (Hrsg.): *Environmental Modeling with GIS*. Oxford University Press, New York (1993)
67. Haubrock, S., Theisselmann, F., Rotzoll, H., Dransch, D.: Web-based management of simulation models - concepts, technologies and the users' needs. In: Anderssen, R.S., Braddock, R.D., Newham, L.T.H. (Hrsg.) 18th World IMACS Congress and MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation, Cairns, Australia 2009, S. 880-886
68. Goodchild, M.F., Steyaert, L.T., Parks, B.O. (Hrsg.): *GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues*. GIS World Books, Fort Collins (1996)
69. Maué, P., Stasch, C., Athanasopoulos, G., Gerharz, L.: Geospatial Standards for Web-enabled Environmental Models. *International Journal of Spatial Data Infrastructures Research* **6**, 145-167 (2011).
70. IEEE: 1516 IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA) Framework and Rules Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA (2010)
71. Voinov, A., Shugart, H.H.: 'Integronsters', integral and integrated modeling. *Environmental Modelling & Software* **39**(0), 149-158 (2013). doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.05.014>
72. Beven, K.: Towards integrated environmental models of everywhere: uncertainty, data and modelling as a learning process. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **11**(1), 460-467 (2007). doi:10.5194/hess-11-460-2007
73. Wiemann, S., S., R., Karrascha, P., Brauner, J., Pech, K., Bernard, L.: Classification-driven air pollution mapping as for environment and health analysis. Paper presented at the iEMSs Sixth Biennial Meeting: International Congress on Environmental Modelling and Software (iEMSs 2012). International Environmental Modelling and Software Society.,
74. Stasch, C., Foerster, T., Autermann, C., Pebesma, E.: Spatio-temporal aggregation of European air quality observations in the Sensor Web. *Computers & Geosciences*, in press (2011).
75. ISO: ISO 19115-2 International Standard on Geographic information - Part 2: metadata for imagery and gridded data. International Organization for Standardization, (2005)
76. Henzen, C., Mäs, S., Bernard, L.: Provenance Information In Geodata Infrastructures. In: Vandenbroucke, D., Bucher, B., Crompvoets, J. (Hrsg.) *Geographic Information Science at the Heart of Europe*. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography., S. 131-151. Springer, Heidelberg (2013)
77. Pebesma, E.J., de Jong, K., Briggs, D.: Interactive visualization of uncertain spatial and spatio-temporal data under different scenarios: an air quality example. *International Journal of Geographical Information Science* **21**(5), 515-527 (2007). doi:10.1080/13658810601064009
78. Jung-Hong, H., Min-Lang, H.: Interoperable GIS Operations: A Quality-Aware Perspective. In: Gensel, J., Josselin, D., Vandenbroucke, D. (Hrsg.) 15th AGILE International Conference on Geographic Information Science, Avignon, France 2012