

Auf dem Weg zu einem verteilten digitalen Zwilling der Agrarlandschaft¹

Towards a Distributed Digital Twin of the Agricultural Landscape

Mandana Moshrefzadeh, Thomas Machl, David Gackstetter, Andreas Donaubauer,
Thomas H. Kolbe

Agrarlandschaften bilden ein komplexes System aus interagierenden und sich verändernden Elementen und Subsystemen. Verschiedene Akteure aus unterschiedlichen Disziplinen sind am System „Agrarlandschaft“ beteiligt und haben jeweils ihre eigenen Ressourcen und Perspektiven. Um ein solch komplexes System zu verstehen und mit ihm zu arbeiten, bedarf es einer umfassenden Beschreibung des gesamten Systems und eines Ansatzes, der ein interoperables und maßstabsübergreifendes Management von verteilten Informationsressourcen ermöglicht. In diesem Beitrag wird ein als „verteilter digitaler Zwilling der Agrarlandschaft“ bezeichnetes Konzept vorgestellt, das der Verteiltheit der Ressourcen über verschiedene Akteure und Plattformen hinweg Rechnung trägt und gleichzeitig eine Grundlage für die Integration sowohl von bereits vorhandenen, historischen als auch von Echtzeitinformationen für physische Dinge, wie Geräte und Landschaftsobjekte, bietet.

Schlüsselwörter: Agrarlandschaft, verteilter digitaler Zwilling, Dateninfrastruktur, Metadaten, Katalogsystem, IoT

Agricultural landscapes form a complex system of interacting and changing elements and subsystems. They involve stakeholders from varying disciplines each with their own resources and perspectives. Understanding and working with such a complex system requires a comprehensive description of the whole ecosystem and an approach that enables interoperable and cross-scale management of distributed information resources. We introduce a concept that we call the distributed digital twin of the agricultural landscape, which handles the distributed nature of resources over different stakeholders and platforms while providing a basis for integrating both pre-existing, historical and real-time information for physical things such as landscape objects.

Keywords: Agricultural landscape, distributed digital twin, data infrastructure, metadata, catalog systems, IoT

1 EINFÜHRUNG

Als land-, forst- und industriewirtschaftlicher Produktionsstandort, als Lebens- und Erholungsraum und als Lebensraum für Flora und Fauna erbringt die Agrarlandschaft vielfältige Ökosystemleistungen für den Menschen. Verschiedene Akteure befassen sich mit einzelnen Facetten des Landschaftssystems. Sie haben jeweils unter-

schiedliche Anforderungen an die vorhandenen Ressourcen und die Art, den Inhalt, die Qualität sowie die räumliche und zeitliche Ausdehnung der Informationen. Gleichzeitig stellen Akteure verschiedener Disziplinen umfassende Fachinformationen zur Verfügung, die in der Regel in domänenspezifischen Informationssystemen und

¹ Übersetzung des Beitrags „Towards a Distributed Digital Twin of the Agricultural Landscape“ (doi:10.14627/537690019) aus dem Englischen.

verteilt über verschiedene Organisationen vorliegen. Die grundlegende Herausforderung besteht daher darin, diese Informationen, die in der Regel in verteilter Form vorliegen, den Akteuren in einer Form zur Verfügung zu stellen, die ihren Bedürfnissen entspricht, und sie zwischen den verschiedenen Akteuren so zu harmonisieren, dass sie dazu beitragen, ein gemeinsames und maßstabsübergreifendes Verständnis der Landschaft und ihrer Komponenten zu schaffen, um eine koordinierte Entscheidungsfindung zu erleichtern /Van den Brink et al. 2017/. Viele der Informationen, über die die verschiedenen Akteure verfügen, beziehen sich auf ein und dieselben Objekte der realen Welt. Letztere werden in unterschiedlichen Informationssystemen aber oft als unabhängige Objekte repräsentiert.

Das Konzept, Dinge – einschließlich ihres (Echtzeit-)Zustands und Verhaltens – und Prozesse in Form von digitalen Zwillingen (DZ) der realen Phänomene abzubilden, wird bereits im Kontext von Industrie 4.0 praktiziert /Boschert & Rosen 2016/. Eine grundlegende Herausforderung ist dabei die Verteiltheit der verfügbaren Fachinformationen. Um diese Herausforderung zu adressieren, wird in diesem Beitrag der Begriff des verteilten DZ der Agrarlandschaft eingeführt. Das hier beschriebene Konzept zielt darauf ab, den Prozess der Datenintegration sowie den gesamten Prozess der Einbindung von Stakeholdern zu optimieren.

Dieser Beitrag gibt einen Überblick über verwandte Arbeiten und erläutert den Hintergrund und die Anforderungen im Bereich der Agrarlandschaft. Anschließend wird das Konzept des verteilten DZ der Agrarlandschaft beschrieben. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den Hauptelementen des verteilten DZ. Den Proof of Concept für das Konzept liefert eine Implementierung in einem Forschungszentrum der TUM School of Life Sciences der Technischen Universität München (TUM). In der Schlussfolgerung des Beitrags werden die Beiträge unserer Arbeit, insbesondere für den Bereich der Modellierung und Verwaltung der Agrarlandschaft, hervorgehoben und zukünftige Arbeiten diskutiert.

2 VERWANDTE ARBEITEN

2.1 Digitale Zwillinge von (Agrar-)Landschaften

Der Begriff DZ wurde ursprünglich im Produktlebenszyklusmanagement für Industriemaschinen definiert. In der Industrie wird der DZ als eine umfassende physische und funktionale Beschreibung einer Komponente, eines Produkts oder eines Systems betrachtet, die nützliche Informationen für alle Lebenszyklusphasen des physischen Objekts enthält. Die Erstellung von DZ ist zweckorientiert und kann in mehreren Detailebenen erfolgen, die die Anforderungen des Zwecks widerspiegeln /Boschert & Rosen 2016/. Erst in jüngster Zeit haben Kollegen aus der Geoinformationswissenschaft und der Stadtplanung begonnen, die Verwendung von DZ im Kontext der Stadtplanung zu diskutieren (siehe /Batty 2018/), obwohl Konzepte zur Erstellung von „Spiegelwelten“ bis in die 1990er-Jahre zurückreichen /Dawkins et al. 2018/. /Batty 2018/ beschreibt den DZ einer Stadt als eine digitale Repräsentation einer Stadt in Bezug auf ihre physischen Assets. Digitale Zwillinge realer Städte entstehen oft im Zusammenhang mit Smart-City-Projekten. Stadtverwaltungen, die

derzeit digitale Zwillinge ihrer Stadt aufbauen, wie z.B. Helsinki, Rotterdam und Singapur, zielen in der Regel darauf ab, ein semantisches 3D-Stadtmodell zu erstellen und es aktuell zu halten. Die Objekte des Modells werden in der Regel mit Echtzeitinformationen aus dem Internet der Dinge (IoT) sowie mit den Ergebnissen verschiedener Simulationen, wie Solarpotenzialen, Lärmausbreitung oder Verkehrssimulationen, angereichert. Ziel ist es, möglichst umfassende und aktuelle Informationen über den aktuellen Zustand der Stadt zu erhalten. In der Industrie kann der digitale Zwilling eines komplexen Systems als eine Aggregation von digitalen Zwillingen der Komponenten des Systems gesehen werden /Boschert & Rosen 2016/. Ein großes Problem bei der Erstellung und Aktualisierung von DZ komplexerer Systeme ist die Informationsintegration. Der Grund dafür ist, dass die Informationen heterogen und auf verschiedene Akteure verteilt sind. Dies gilt für große Industrieanlagen, wie z.B. Produktionssysteme, die aus Komponenten verschiedener Hersteller bestehen /Boschert & Rosen 2016/, die möglicherweise die DZ ihrer Komponenten besitzen, und in noch größerem Maße für Städte, da diese noch komplexer sind und eine wesentlich größere Anzahl an Akteuren und Dateneigentümern umfassen. Daher muss ein digitaler Zwilling einer Stadt ein verteilter DZ sein. Abgesehen von eigenen Arbeiten sind den Autoren dieses Beitrags keine Veröffentlichungen speziell zu DZ der Agrarlandschaft bekannt. Es gibt jedoch zahlreiche standardisierte Informationsmodelle und viele spezifische GIS-Projekte, die sich mit der digitalen Repräsentation von Landschaften befassen. Beispiele für standardisierte Informationsmodelle sind der ISO-Standard 19152: Land Administration Domain Model oder der OGC-Standard CityGML /Gröger et al. 2012/ auf internationaler Ebene, die INSPIRE-Richtlinie auf europäischer Ebene oder die AAA-Modellierung auf nationaler Ebene für Deutschland /AdV 2015/. Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl meist unabhängiger Fachinformationsmodelle unterschiedlicher Domänen. Mit der Entwicklung des LandModells /Machl et al. 2019/ wurde ein erster Versuch unternommen, das komplexe System der Agrarlandschaft in einem anwendungsunabhängigen, raumzeitlichen und erweiterbaren Informationsmodell abzubilden, das als Basis für einen digitalen Zwilling dient. Die im Informationsmodell modellierten Elemente stellen stabile Referenzobjekte für die Anreicherung mit fachübergreifenden Informationen sowie für die Entwicklung von Analysemethoden zur detaillierten Analyse verschiedener Aspekte der Agrarlandschaft dar. Der verteilten Natur der interdisziplinären Informationen wurde im Projekt LandModell noch nicht vollständig Rechnung getragen. Konkret wurden Daten aus verschiedenen Quellen physisch in das Informationssystem integriert, was in hochgradig verteilten und heterogenen Umgebungen aufwendige Prozessierungen und Datenverwaltungsstrategien erfordert.

2.2 Verwaltung von verteilten Geoinformationen

Seit den späten 1990er-Jahren haben sich im Geoinformationssystembereich Geodateninfrastrukturen (GDI) entwickelt, um den organisationsübergreifenden Austausch von Geodaten zu regeln und zu harmonisieren. GDI umfassen eine Reihe von Vereinbarungen auf organisatorischer Ebene und Technologiestandards zusammen mit Richtlinien, die das Auffinden, die gemeinsame Nutzung und den

interoperablen Austausch von Geodaten ermöglichen /Kresse et al. 2012/. Um diese Funktionalitäten zu gewährleisten, wurden Metadatenkataloge als eine Schlüsselkomponente von GDI definiert. Hierzu wurden im Kontext von GDI Standards für Metadaten, wie ISO 19115 oder Dublin Core, und für Katalogdienste, wie die OGC-CS/W-Schnittstelle, entwickelt. OGC CS/W ist ein Standard, der Schnittstellen und einen Rahmen für die Definition von Anwendungsprofilen spezifiziert, die für die Veröffentlichung und das Auffinden digitaler Ressourcen erforderlich sind /Nebert et al. 2016/. Die Metadaten beschreiben digitale Ressourcen, meist Datensätze und Dienste für den Zugriff auf Daten, die über den Katalog recherchiert und gefunden werden können.

Zusätzlich zu den bekannten Metadatenstandards im Geoinformationsbereich gibt es Metadatenkataloge und -Standards zur Beschreibung von Informationsressourcen auch in anderen Domänen. Das Data Catalog Vocabulary (DCAT) des World Wide Web Consortiums (W3C) ist ein Standard, der es einem Bereitsteller von Daten oder Diensten ermöglicht, diese in einem Katalog zu beschreiben. DCAT erleichtert auch den interoperablen Austausch und die Nutzung von Metadaten zwischen verschiedenen Katalogen. Die aktuelle Version 2 von DCAT ermöglicht es, verschiedenste Arten von Informationsressourcen zu beschreiben /Albertoni et al. 2019/. Der DCAT-Standard wird weltweit in Open-Data-Portalen auf nationaler und multinationaler Ebene verwendet, wie z.B. dem deutschen Open-Government-Data-Portal, dem INSPIRE-Geoportal, dem London Datastore etc. Ein gemeinsames Merkmal der meisten dieser Kataloge ist, dass die Einteilung der Ressourcen auf thematischen Kategorien basiert und jede Ressource in Form eines Katalogeintrags (einer Sammlung von Daten zu einem bestimmten Thema) vorliegt, wie z.B. ein Katalogeintrag mit Informationen über Schutzgebiete unter der thematischen Kategorie „Umwelt“. Mit dem Aufkommen des

Internets der Dinge (IoT) und der immer stärkeren Nutzung von Sensoren und Echtzeitinformationen ändert sich jedoch die Art der in Katalogen verwalteten Ressourcen und Informationen. Neben der Beschreibung von Metadaten zu ganzen Datensätzen wird es hier erforderlich, einzelne physische Dinge in Katalogen zu verwalten. Die Verwaltung von IoT-Sensoren und -Geräten spielt auch in den Agrarwissenschaften eine immer größere Rolle /Minbo et al. 2013/.

3 SRADI – EINE DATENINFRASTRUKTUR FÜR EINEN VERTEILTEN DIGITALEN ZWILLING

Die Komplexität der Agrarlandschaft als System erfordert ein disziplin- und maßstabsübergreifendes Verständnis. Besonders wichtig ist es, Schnittstellen zwischen den verschiedenen beteiligten Disziplinen zu schaffen. Um mit solch komplexen Systemen umzugehen und gleichzeitig die Rolle aller beteiligten Akteure zu würdigen, wird eine multidisziplinäre Informationsinfrastruktur benötigt, die der Heterogenität und der verteilten Natur der Informationsressourcen und ihrer Verbindungen Rechnung trägt. Um den oben genannten Anforderungen gerecht zu werden, wurde ein Konzept mit der Bezeichnung „Smart Rural Area Data Infrastructure – SRADI“ entwickelt, das sich an den Grundsätzen von Geodateninfrastrukturen (GDI), IoT und DZ orientiert.

Wie in Abb. 1 dargestellt, besteht SRADI aus sechs Kernkomponenten: „Akteure“ (Stakeholder), „Anwendungen“, „Analyse-Toolkit“, „Virtuelles Modell der Agrarlandschaft“, „IoT & Sensordaten“ sowie „Katalog (Ressourcenregister)“. Dieses konzeptionelle Modell wird auf der Grundlage der „Smart District Data Infrastructure (SDDI)“ weiterentwickelt, die im Kontext von Smart Cities umgesetzt wurde /Moshrefzadeh et al. 2017/.

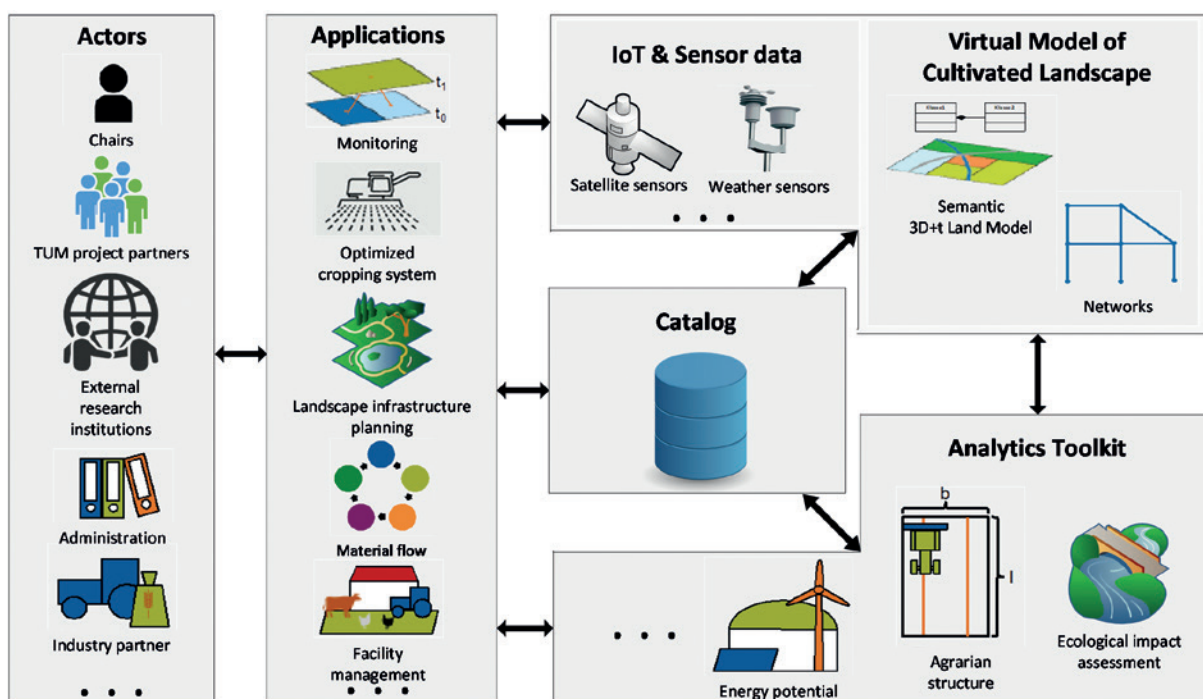


Abb. 1 | Intelligente Dateninfrastruktur für den ländlichen Raum – SRADI

Die *Akteure (Personen, juristische Personen)* stellen nicht nur die Ressourcen und Daten zur Verfügung, sondern definieren auch Anwendungsfälle bzw. Applikationen und dementsprechend die benötigten Funktionalitäten solcher Komponenten. Die Konzeption und Umsetzung der SRADI zielt daher darauf ab, eine interdisziplinäre Informationsinfrastruktur zu schaffen, die den Interessen und Anforderungen der verschiedenen Akteure entspricht.

Anwendungen implementieren die Funktionalitäten, die zur Lösung der spezifischen Aufgaben/Herausforderungen der Akteure erforderlich sind. Sie können als die Schnittstellen zwischen den Akteuren und dem verteilten DZ betrachtet werden. Der DZ besteht aus den folgenden Komponenten:

- **Virtuelles Landschaftsmodell:** eine räumlich-semantische Repräsentation der Landschaft als komplexes System von interagierenden und sich verändernden Elementen (z. B. Flurstücke, hydrologisches Netz, Verkehrsnetz, Vegetationsobjekte). Es bietet eine solide Grundlage für das Systemverständnis der Agrarlandschaft sowie für vertiefte Analysen, z. B. für die Erkennung, Dokumentation und Beschreibung von raumzeitlichen Veränderungsprozessen.
- **IoT- und Sensordaten:** Diese umfassen alle verfügbaren In-situ und Fernerkundungssensoren einschließlich Daten von Drittanbietern, die zur Anreicherung des DZ mit Echtzeitinformatoren verwendet werden. Beispiele für In-situ-Sensoren sind Bodenqualitätssensoren, Wetterstationen, GPS-Tracker an Maschinen und Tieren. Fernerkundungsdaten umfassen zum Beispiel von Satelliten und Drohnen erfasste Daten.
- **Analyse-Toolkit:** Hierbei handelt es sich um eine Sammlung von Modellierungs-, Analyse- und Simulationswerkzeugen, die über standardisierte Dienstschnittstellen mit den anderen Komponenten verbunden sind. Beispiele für Analyse- und Simulationswerkzeuge sind Klimamodellierung, Biomasseschätzung, Pfadplanung für landwirtschaftliche Maschinen, Werkzeuge zur Modellierung von Wasserabfluss und Bodenerosion.

Der *Katalog* ist die Kernkomponente des verteilten DZ. Er umfasst nicht nur verschiedene Arten von verteilten Ressourcen, von Projekten, Software und Geräten bis hin zu den Rohdaten, sondern stellt auch die semantischen Beziehungen zwischen ihnen her. Im Gegensatz zu bestehenden Katalogen, wie sie in GDI verwendet werden, beschränkt sich der Katalog im Konzept nicht auf die Verwaltung von Informationen auf Datensatz- oder Dienstebene, sondern erlaubt es, Metadaten zu einzelnen physischen Dingen (wie einer einzelnen landwirtschaftlichen Parzelle oder Maschine) zu verwalten. Außerdem verwaltet der Katalog nicht nur Ressourcen, sondern auch Akteure und Organisationen, die am gesamten Prozess beteiligt sind.

Im hier beschriebenen Konzept wird die Interoperabilität als Hauptaspekt für die Modellierung und Pflege des verteilten DZ der Agrarlandschaft betrachtet. Ein DZ kann nur erstellt werden, wenn die Komponenten interoperabel sind. Die Kommunikation und Datenmodellierung basiert daher auf offenen Standards, wie denen von ISO (z. B. ISO 191xx), OGC (GML, SensorThings API, Sensor Web Enablement) und W3C (DCAT, DCAT2, RDF). Dieser Beitrag konzentriert sich auf zwei wesentliche Herausforderungen im Zusammenhang mit der Erstellung eines DZ der Agrarlandschaft: das Problem der Verteiltheit der Informationsressourcen und das Problem der Integration von Echtzeitinformatoren in den DZ.

4 MANAGEMENT VERTEILTER INFORMATIONSRESSOURCEN

Wie bereits erwähnt, ist das Management verteilter Informationsressourcen eine große Herausforderung beim Aufbau und Betrieb eines DZ der Agrarlandschaft. Im Rahmen eines laufenden Projekts mit dem Ziel, einen DZ der Agrarlandschaft für ein landwirtschaftliches Forschungszentrum an der TUM aufzubauen, wurde eine Anforderungsanalyse durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Analyse werden im Folgenden beschrieben.

4.1 Herausforderungen, Anforderungen und Lösungsansätze

Die beiden größten Herausforderungen bei der Integration von Informationen aus verteilten, heterogenen Ressourcen sind nach den Aussagen der Mitglieder des landwirtschaftlichen Forschungszentrums mangelnde Transparenz und das multidisziplinäre, verteilte Umfeld.

Mangel an Transparenz: Verschiedene Beteiligte verfügen über unterschiedliche Informationen über dasselbe reale Objekt (z. B. dieselbe Versuchsparzelle). Sie wissen in der Regel nicht, welche Daten von anderen verfügbar sind. Daraus ergeben sich zum Beispiel die folgenden Fragen: Wer sind die Akteure und was sind ihre Aufgaben und Beiträge? Wer wird von Veränderungen in der Landschaft betroffen sein? Welche Projekte haben auf einer bestimmten Parzelle bereits stattgefunden? Von wem wurden die Projekte durchgeführt? Wer besitzt welche Sensordaten für eine bestimmte Versuchsparzelle? Wer hat welche Informationen über einen bestimmten Abschnitt eines Fließgewässers?

Datenintegration in einer multidisziplinären, verteilten Umgebung: Selbst, wenn die verschiedenen Akteure von den Daten anderer über Versuchspartzellen in der realen Welt wissen, kann die Integration von Informationen schwierig sein, weil die Art und Weise, wie sie dieses spezifische Objekt in der realen Welt definieren und sich darauf beziehen, nicht unbedingt dieselbe ist. So haben die Beteiligten beispielsweise unterschiedliche Möglichkeiten, ein Landschaftsobjekt semantisch und geometrisch zu modellieren, und sie verwenden auch unterschiedliche Objektbezeichnungen. Dies führt zu Problemen, wenn die Daten mehrerer Akteure integriert und verknüpft werden sollen. Daher stellt sich die Frage, wie verschiedene Daten über dieselben realen Dinge miteinander in Beziehung gesetzt werden können. Dies ist ein kritischer Punkt für den DZ der Agrarlandschaft, da sich die Landschaftsobjekte (z. B. Parzellen, Gewässer) über die Zeit räumlich verändern können, was sich direkt auf die Integration von Ressourcen auf der Grundlage dieser Objekte auswirkt. Um diese Herausforderung zu bewältigen, ist eine einheitliche Repräsentation der Objekte der realen Welt von Vorteil, sodass jedes Objekt der realen Welt nur einmal mit einem globalen eindeutigen Bezeichner repräsentiert wird. Alle Beteiligten können dann ihre Informationen zu den Objekten der realen Welt in Beziehung setzen, indem sie ihre Informationen mit diesen Referenzobjekten verknüpfen. Dies funktioniert jedoch nur, wenn diese Landschaftsobjekte stabile Identifikatoren besitzen, die die Verknüpfung langfristig aufrechterhalten.

Als Antwort auf diese Herausforderungen sieht das SRADI-Konzept die Einrichtung eines Katalogs als Register für Ressourcen aller Art sowie deren Anbieter (Stakeholder) vor. Wie oben erwähnt, muss dieser Katalog über die bekannten Katalogkomponenten von GDI (beschrieben in Abschnitt 2.2) hinausgehen. Im hier beschriebenen Ansatz umfassen die Ressourcen, die vom Katalog abgedeckt werden sollen, nicht nur Datensätze und Dienste, die auf die Daten zugreifen und sie verarbeiten, sondern auch Einträge für alle relevanten individuellen physischen Dinge (z.B. Landschaftsobjekte oder Geräte, wie Sensoren und landwirtschaftliche Maschinen) und die Angaben zu den beteiligten Organisationen und Akteuren. Es werden Verknüpfungen zwischen dem virtuellen Landschaftsmodell und den Beteiligten und ihren Informationsressourcen hergestellt. So kann ein Benutzer für ein Landschaftsobjekt (z.B. eine Versuchsparzelle) die zugehörigen Ressourcen und die entsprechenden Akteure vom Katalog abrufen. Für die Landschaftsobjekte werden amtliche Geobasisdaten verwendet, bei denen alle Objekte stabile Identifikatoren haben. Dadurch wird sichergestellt, dass die erstellten Beziehungen während des Lebenszyklus der Objekte in der realen Welt gültig bleiben. Würden andere Datenquellen, wie freiwillige geographische Informationen (Volunteered Geographic Information, VGI) (z.B. OpenStreetMap), verwendet, würde das Fehlen stabiler Objektkennungen zu einem Problem werden.

4.2 Metadatenmodell für den verteilten digitalen Zwilling

Um die verteilten verknüpften Ressourcen zu modellieren, wurde ein Metadatenmodell entwickelt, das auf den Standard DCAT Version 2 /Albertoni et al. 2019/ abbildbar ist. Das speziell für den verteilten

DZ der Agrarlandschaft entwickelte Metadatenmodell enthält die folgenden Klassen und Beziehungen (dargestellt als UML-Klassendiagramm in Abb. 2):

- Die Klasse *InformationResource* stellt allgemeine Informationen über verschiedene Arten von Ressourcen dar. Sie ermöglicht auch die Angabe, ob die Informationen über eine bestimmte Ressource für alle frei zugänglich (öffentlich) oder nur für Mitglieder einer Organisation (privat) sind.
- Die Arten von Ressourcen werden durch die Einführung von neun spezifischen Unterklassen der Klasse *InformationResource* unterschieden. Diese sind *Dataset*, *OnlineService*, *OnlineApplication*, *Software*, *Project*, *Method* und *PhysicalThing*, das weiter spezialisiert ist in *Device*, *Animal* oder *LandscapeObject*.
- Eine *InformationResource* kann durch eine zugängliche Form eines Datensatzes, wie eine herunterladbare Datei oder über einen Web-Dienst repräsentiert werden. Dies wird durch eine Beziehung zwischen der Klasse *InformationResource* und der Klasse *Distribution* realisiert. Die Klasse *Distribution* wiederum erlaubt es dem Benutzer, die Zugänglichkeit der Informationen zu steuern. So ist es möglich, die Metadaten öffentlich zugänglich zu machen, aber den Zugriff auf die eigentlichen Daten zu beschränken.
- Die Klassen *User* und *Organization* werden zur Verwaltung der Beteiligten in einer SRADI verwendet. Benutzer können Mitglied mehrerer Organisationen sein und verschiedene Arten von Mitgliedschaften haben. Organisationen können mehrere Ressourcen bereitstellen, aber jede Ressource kann nur einer Organisation gehören.
- Beziehungen zwischen Ressourcen des verteilten DZ sowie mit externen Ressourcen können durch die Klasse *Relationship* dargestellt werden. Die Klasse *Relationship* ist entweder als

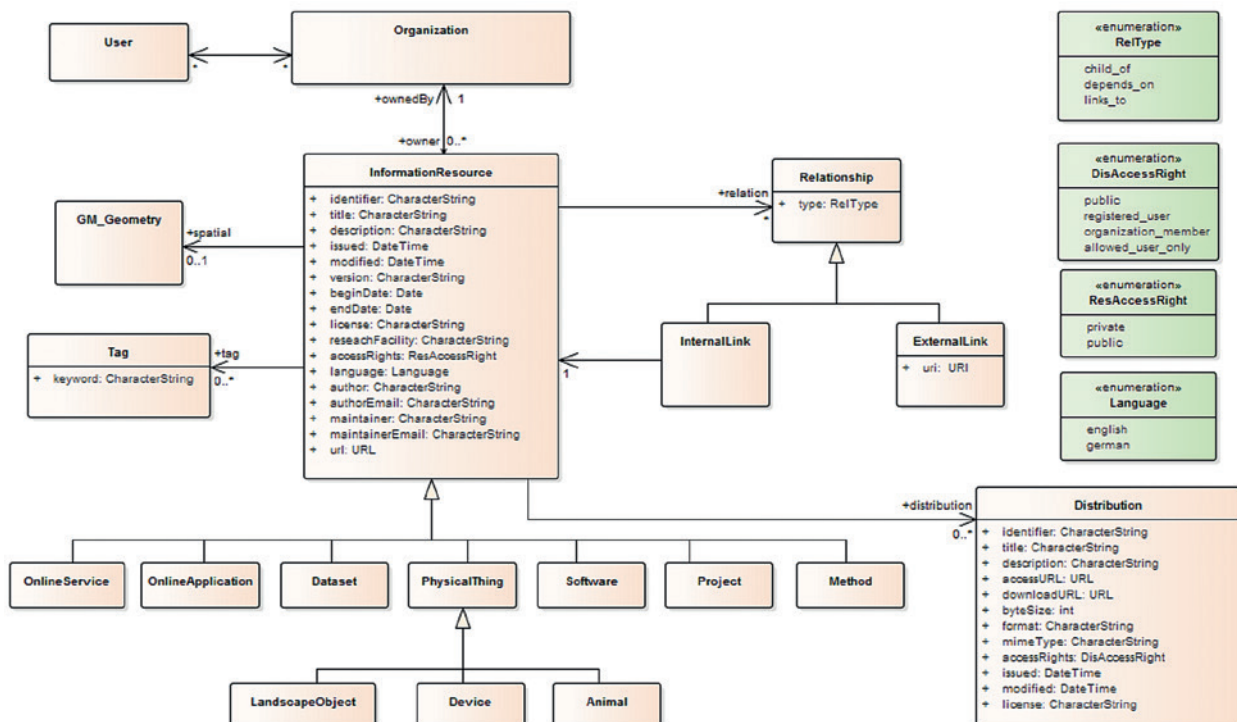


Abb. 2 | Verallgemeinerter Überblick über das Metadatenmodell für den verteilten DZ

InternalLink spezialisiert, um eine Beziehung zu einer anderen im Katalog registrierten Ressource auszudrücken, oder als *ExternalLink*, um eine Beziehung zu einer externen Ressource abbilden zu können. Beziehungen werden nicht nur zur Verknüpfung von Informationsressourcen verwendet, sondern auch, um zu zeigen, wie Organisationen untereinander verbunden sind. Die Beziehungen zwischen

Katalogeinträgen bilden eine Graph-Struktur, die den Zusammenhang der verteilten, aber miteinander verbundenen Informationsressourcen beschreibt und analysierbar macht. Es gibt drei verschiedene Typen von Beziehungen: Der Typ *depends_on* wird verwendet, um auszudrücken, dass eine Informationsressource im Zusammenhang mit einer anderen gesehen werden muss. Dieser Typ wird zum Beispiel verwendet, um die Beziehungen zwischen Informationsressourcen verschiedener Organisationen zu einem bestimmten Objekt der realen Welt zu beschreiben. Die Beziehung *child_of* wird verwendet, um Teil-Ganzes-Beziehungen auszudrücken, zum Beispiel zwischen den Teilprojekten eines Gesamtprojekts. Der Beziehungstyp *links_to* wird verwendet, um Ressourcen zu verknüpfen, die unabhängig voneinander existieren können, aber im konkreten Fall miteinander verknüpft sind.

- Für Ressourcen werden nur ausgehende Links verwendet. Das ermöglicht eine Verwaltung von Ressourcen über die Grenzen von Organisationen hinweg. Organisationen können so Ressourcen eintragen und verlinken, die einen Bezug zu bereits im Katalog (ggf. von einer anderen Organisation) registrierten übergeordneten Ressource haben (z. B. Daten zur Bodenqualität der Organisation „Lehrstuhl X“, die sich auf eine bestimmte, bereits im Katalog registrierte Versuchsparzelle der Organisation „Fakultät Y“ beziehen). Der Verweis gehört der Organisation, die den zusätzlichen Datensatz erstellt hat (und ist nur von diesem Eigentümer widerrufbar). Der Eigentümer der übergeordneten Ressource verwaltet diese Verknüpfungen nicht (und kann dies normalerweise auch nicht). Daher müssen bei der Verknüpfung zweier Ressourcen die Organisationen, zu denen die Ressourcen gehören, und ihr Zugriffsstatus berücksichtigt werden. Dies wird durch die Zugriffsbeschränkung in der Klasse *InformationResource* gesteuert. Während öffentliche Ressourcen frei zugänglich sind, sind private Ressourcen nur für ihre Organisationen einsehbar und können daher nur durch zusätzliche Datensätze derselben Organisationen ergänzt werden. Die Bedingungen für die Verknüpfung von Ressourcen mit unterschiedlichen Zugangsbeschränkungen sind in *Tab. 1* dargestellt.

- Die räumliche Ausdehnung einer Ressource wird mithilfe der Klasse *GM_Geometry* aus ISO 19107 dargestellt. Dies kann z. B. ein Punkt, ein Polygon oder ein dreidimensionaler Körper sein.

- Um die zeitlichen Eigenschaften einer Ressource zu modellieren, wird ein bitemporaler Ansatz verwendet. Dieser wird durch die Attribute *issued* und *modified* (Transaktionszeit in Bezug auf den Katalog) bzw. *startDate* und *endDate* (Gültigkeitszeitraum in Bezug auf die Existenz des physischen Dings) eingeführt.

Ein wesentliches Merkmal des hier beschriebenen Metadatenmodells ist die Spezialisierung der Typen von Informationsressourcen.

Link von \ Link auf	Öffentliche übergeordnete Ressource	Private übergeordnete Ressource
Öffentliche untergeordnete Ressource	Zwischen Datensätzen von verschiedenen Organisationen möglich	Nicht sinnvoll, nach Datenmodell nicht erlaubt
Private untergeordnete Ressource	Zwischen Datensätzen von verschiedenen Organisationen möglich	Nur zwischen Datensätzen der gleichen Organisation möglich

Tab. 1 | Verknüpfung von zwei Ressourcen innerhalb des Katalogs und die sich aus der Zugänglichkeit der Ressourcen ergebenden Einschränkungen

Die Metadatenkataloge und -standards, die in GDI und von offenen Datenportalen verwendet werden, beziehen sich meist auf (offene) Behördendaten, die als Dateien oder Dienste bereitgestellt werden. Daher sind die Metadatenmodelle darauf zugeschnitten, nur derartige Ressourcen zu repräsentieren. Der in diesem Beitrag beschriebene Ansatz erfordert jedoch einen Katalog, der die Verwaltung von Ressourcen jenseits von Dateien oder Diensten ermöglicht. Dies sind die z. B. Metainformationen über einzelne physische Dinge oder Informationen über Projekte und Methoden. Hierzu wurde die Klasse *PhysicalThing* mit ihren Unterklassen *LandscapeObject*, *Device* und *Animal* eingeführt sowie die Klassen *Method*, *Project* und *Software*. Durch die explizite Definition des Typs einer Ressource existieren damit spezifische semantische Informationen. Diese Semantik verbessert die Strukturierung und die Recherche nach Informationen im Katalog. Für jedes Objekt der realen Welt (z. B. Landparzelle, Sensor und landwirtschaftliche Maschine) ist ein eigener Eintrag im Katalog vorgesehen. Dies verbessert die Anwendbarkeit und Nutzbarkeit der Beziehungen zwischen verschiedenen und vielfältigen Ressourcen, die sich im Besitz verschiedener Organisationen befinden. Dies unterscheidet das hier beschriebene Metadatenmodell von typischen Geodaten- und DCAT-Datenmodellen und generell von in herkömmlichen Metadatenkatalogen genutzten Metadatenmodellen.

5 INTEGRATION VON ECHTZEIT-INFORMATIONEN IN LANDSCHAFTSOBJEKTE

Wie bereits erwähnt, besteht eines der Hauptmerkmale von DZ darin, dass ihr aktueller Zustand den aktuellen Zustand ihres physischen Gegenstücks widerspiegelt. Hier kommen die Möglichkeiten der Internet-of-Things-(IoT-)Technologien ins Spiel. Durch eine Echtzeitverbindung mit IoT-Knoten in der physischen Welt erhält ein DZ der Agrarlandschaft zeitlich hochaufgelöste Informationen über den aktuellen Zustand der einzelnen physischen Objekte.

5.1 Merkmale und Anforderungen

Sowohl für das Design als auch den Betrieb von IoT-Anwendungen im Bereich der agrarwissenschaftlichen Forschung gelten im Vergleich zu anderen Bereichen spezielle Rahmenbedingungen. Der Mangel an lokal vorhandenen Strom- und Internetanschlüssen zusammen mit den rauen Umgebungsbedingungen stellen besondere Anforderungen an das Hardware- und Kommunikationsdesign sowie an dessen Robustheit gegenüber Störungen und Geräteausfällen.

Aus dem Bereich der drahtlosen Sensornetzwerke (Wireless Sensor Networks, WSN) erweisen sich Low-Power Wide-Area Networks (LPWAN) als sehr geeignet, die gestellten Anforderungen aus dem Agrarbereich zu erfüllen: LPWAN-basierte IoT-Lösungen bieten die technische Grundlage, um Datenströme von entfernten und geographisch weit verstreuten Sensorgeräten durch energieeffiziente, drahtlose Kommunikation mit großer Reichweite zu ermöglichen /Minbo et al. 2013/. IoT-Netzwerke und ihre Datenströme bilden eine Brücke zwischen dem realen Zustand eines Landschaftsobjekts und seinem digitalen Gegenstück. Die Netzwerke haben dabei großen Einfluss auf die Gestaltung des verteilten DZ, welcher flexibel sein sollte in Bezug auf die Anzahl und eine möglicherweise starke Heterogenität von IoT-Geräten. Landschaftsobjekte in der realen Welt und ihr digitales Abbild können mit nur einem oder mehreren IoT-Geräten verbunden sein, was die gesamte Bandbreite von 1:1-, 1:N- und N:M-Beziehungen zwischen Landschaftsobjekten und gerätebezogenen Datenströmen ermöglicht. Eine weitere Variabilität des Systems lässt sich mit Bezug auf die Heterogenität der Informationsströme erkennen. Geräte und Datenquellen umfassen das gesamte Spektrum von Sensoren und Aktoren im Feld bis hin zur Satellitenfernerkundung. Die Anzahl, Art und Übertragungshäufigkeit der Datenströme, ihre Anteile an statischen und dynamischen Informationsinhalten im Zeitverlauf sowie ihre Übertragungsschnittstellen können sich erheblich unterscheiden. Der Umgang mit der Heterogenität dieser Schnittstellen ist eine große Herausforderung für eine effiziente und interoperable Integration von Sensordaten.

5.2 Sensordatenintegration in der SRADI

Zum Zweck der Sensordatenintegration wird ein LPWAN-basiertes WSN für In-situ-Sensoren über die gesamte vom Forschungsinstitut genutzte und verwaltete Landschaft aufgebaut. Der strukturelle Aufbau und die relevanten Komponenten sind in Abb. 3 dargestellt. Jeder Sensorknoten innerhalb des WSN ist für die Erfassung der physikalischen Eigenschaften des ihm zugewiesenen Landschaftsobjekts verantwortlich. Die Anbindung der In-situ-Sensoren an die digitale Welt erfolgt mittels einer Sensornetzwerkinfrastruktur über drahtlose Kommunikationstechnik und entsprechende Transceiver-

Gateway-Stationen. Für Uplink-Daten der Sensorknoten leiten die Gateways die empfangenen Datenpakete über entsprechende Netzwerkverarbeitungsdienste an ein dediziertes Sensormanagement- und Datenspeichersystem weiter. Die Netzwerkverarbeitungsdienste verbinden die Gateways und damit indirekt die Sensorknoten mit einem gemeinsamen Netzwerk und sorgen für eine sichere Datenübertragung und die Verteilung der Datenpakete an die richtige Empfängeranwendung. Die Sensorverwaltungs- und Datenspeicherkomponente ermöglicht die automatisierte Verarbeitung und Speicherung von eingehenden und historischen Dateneinträgen. Die Verbindung zwischen der Repräsentation eines Objekts im virtuellen Modell der Agrarlandschaft und der Sensormanagement- und Datenspeicherkomponente wird durch Beziehungen zwischen den entsprechenden Metadaten-Einträgen im SRADI-Katalog hergestellt.

6 REALISIERUNG UND DEMONSTRATION DES VERTEILTEN DIGITALEN ZWILLINGS ALS FORSCHUNGSDATENINFRASTRUKTUR FÜR DIE AGRARWISSENSCHAFTEN

Als Proof of Concept für das Konzept des verteilten DZ wurde eine Dateninfrastruktur für das Agrarforschungszentrum „Hans Eisenmann-Forum für Agrarwissenschaften“ aufgebaut, das der TUM School of Life Sciences angegliedert ist. Das Zentrum fördert und entwickelt digitale Lösungen in den Bereichen Agrarforschung und Landschaftsplanung, insbesondere in den Bereichen Agrarökologie, terrestrische Ökologie, Ökosystemmanagement, Umweltmonitoring, Pflanzenwissenschaften, Tierwissenschaften, Agrar- und Umweltökonomie und -politik. Als Hauptergebnis einer Umfrage unter den 30 Lehrstühlen, die Mitglieder dieses Zentrums sind, wurden zwei Schlüsselpunkte identifiziert.

Erstens werden zahlreiche Forschungstätigkeiten und Experimente von verschiedenen Teams in multidisziplinären Studien und auf maßstabsübergreifenden Ebenen durchgeführt. Diese Aktivitäten werden in den Forschungseinrichtungen der TUM (z.B. Parzellen, Stallungen) sowohl im Innenraum als auch im Freien durchgeführt. Infolgedessen werden große Datenmengen in unterschiedlichen Zeitabständen erzeugt, gesammelt, analysiert und an verschiedenen

Orten archiviert. Gleichzeitig werden mehrere stationäre Geräte (z.B. Bodenanalysensensoren) und mobile Geräte (z.B. GNSS) verwendet, die sich an verschiedenen Orten befinden. Das Fehlen einer angemessenen Verwaltung der vorhandenen verteilten Ressourcen sowohl auf der Verwaltungsebene als auch auf der Ebene der einzelnen Forschungsaktivitäten (z.B. Drittmittelprojekte) stellt bisher ein Problem dar.

Zweitens: Viele Forscher führen Experimente in und mit der Landschaft durch, jedoch getrennt voneinander. Es wäre daher sinnvoll, die gesamten Prozesse abzubilden, die während eines bestimmten Zeitintervalls an einem bestimmten Landschaftsobjekt ablaufen und von verschiedenen Forschern beobachtet werden.

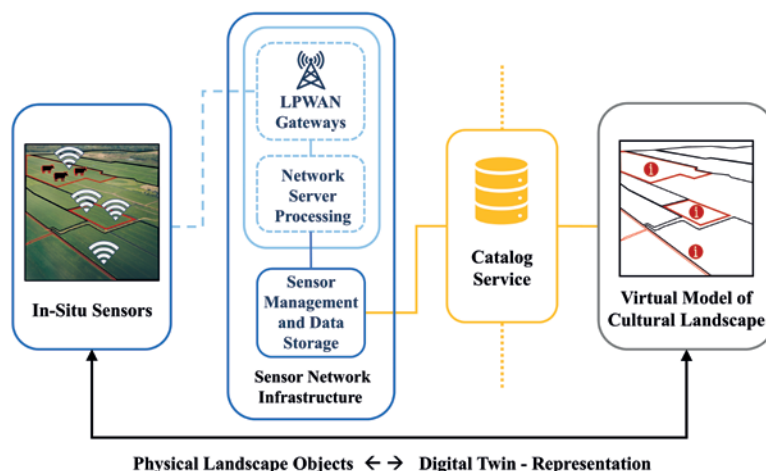


Abb. 3 | Echtzeit-Integration von Sensordaten in SRADI

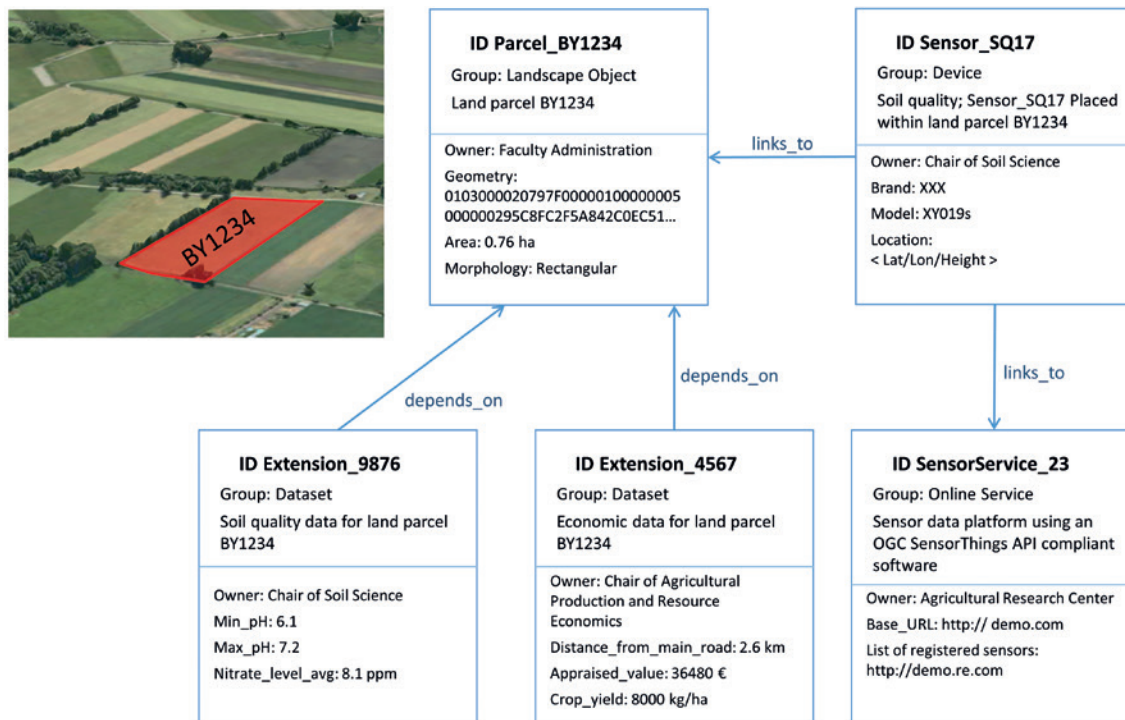


Abb. 4 | Beispiel für einen verteilten DZ eines Flurstücks. Jedes Kästchen steht für eine Informationsressource im Katalog.

Zur Veranschaulichung dieser Situation wird in Abb. 4 ein Beispiel für den verteilten DZ eines bestimmten Landschaftsobjekts (einer Versuchsparzelle) gegeben. In diesem Beispiel sind fünf Ressourcen von vier Organisationen verknüpft. Die Ressource mit dem Identifikator *Parcel_BY1234* und dem Ressourcentyp *Landscape-Object* repräsentiert eine landwirtschaftliche Parzelle im Besitz der Fakultätsverwaltung. Die grundlegenden Informationen dieses Objekts (Kennung, Geometrie, Fläche) sind in einem Datenbanksystem gespeichert, das das virtuelle Modell der Agrarlandschaft /Machl et al. 2019/ implementiert. Ein Analysewerkzeug wurde auf die Geometrie des Objekts angewendet, um die Morphologie als rechteckig zu klassifizieren. Diese grundlegenden Informationen wurden aus der Datenbank extrahiert und automatisch als *InformationResource* im Katalog registriert. Für dieselbe Parzelle gibt es zwei Datensätze, die zwei verschiedenen Lehrstühlen gehören. Sie werden durch zwei zusätzliche Katalogeinträge vom Typ *Dataset* dargestellt, die von den entsprechenden Lehrstühlen manuell eingegeben wurden. Sie sind mit dem Katalogeintrag der Parzelle über ausgehende Beziehungen vom Typ *Depends_on* verknüpft. Darüber hinaus ist auf der Parzelle ein Bodenqualitätssensor installiert, der zu einem weiteren Lehrstuhl gehört. Diese Ressource hat einen Katalogeintrag vom Typ *Device*. Die Sensordaten sind in einer Sensordatenplattform (Zugreifbar über eine OGC-konforme SensorThings-API-Schnittstelle) gespeichert, die vom landwirtschaftlichen Forschungszentrum betrieben wird. Die Ressource, die den Sensor repräsentiert, ist sowohl mit der Parzelle als auch mit der Sensordatenplattform verknüpft. Dieses Beispiel demonstriert:

1. die Verwaltung von verteilten Daten über Landschaftsobjekte, die verschiedenen Organisationen gehören;
2. die Verbindung zwischen Objekten der realen Welt und Sensoren, die Echtzeitinformationen liefern;

3. die Beziehung zwischen Sensoren (*Device*) und der Sensordatenplattform (*OnlineService*); Letztere kann die Daten mehrerer Sensoren verwalten;
 4. die Beziehung zwischen Ressourcen und Organisationen/Personen/Stakeholdern, wie z. B. das Eigentum an jeder Ressource und ihre Verbindung zu den Ressourcen anderer Organisationen.
- Um die Fähigkeiten des verteilten DZ im Hinblick auf die Anforderungen der agrarwissenschaftlichen Forschung zu demonstrieren, wurden die folgenden Komponenten implementiert.

Katalog: Comprehensive Knowledge Archive Network (CKAN) wurde aufgrund der folgenden Eigenschaften als Ressourcenkatalog im Projekt ausgewählt (<https://ckan.org>). CKAN ist eine Open-Source-Software mit einer aktiven Gemeinschaft, die die Software ständig verbessert und aktualisiert und die Benutzer weltweit unterstützt. Sie wird von vielen nationalen Regierungen und internationalen Einrichtungen, wie Australien, USA, Deutschland usw., verwendet. Neben dem Kern von CKAN gibt es eine große Anzahl von Erweiterungen, die die Fähigkeiten von CKAN als Datenportal weiter ausbauen. Im Projekt wurde eine Instanz des CKAN-Kerns eingerichtet und seine Funktionalitäten entsprechend des Konzepts des verteilten DZ der Agrarlandschaft erweitert. So wurden einige bereits bestehenden CKAN-Erweiterungen hinzugefügt, um z. B. räumliche und zeitliche Attribute von Ressourcen repräsentieren zu können. Darüber hinaus wurden Erweiterungen entwickelt, die die benötigten Funktionalitäten weiter ausbauen. Dazu gehört insbesondere die Abbildung des oben beschriebenen Metadatenmodells auf das CKAN-Datenmodell. Um die gemeinsame Nutzung und den Austausch von Metadaten mit anderen Katalogen zu ermöglichen, wurde die CKAN-Erweiterung DCAT verwendet, die es CKAN ermöglicht, Metadaten aus anderen Katalogen mithilfe von RDF-Dokumenten zu nutzen. Die vollständige Abbildung des Metadatenmodells auf

DCAT Version 2 und dessen Implementierung im Katalog wird Teil der zukünftigen Arbeit sein.

IoT- und Sensordaten: Es wurde der LPWAN-Standard LoRaWAN als Übertragungstechnologie ausgewählt, da dieser mehrere Vorteile bietet. Diese sind z.B. stromsparende Transceiver, die über lange Zeiträume (bis zu fünf Jahre) mit Batteriestrom betrieben werden können, eine große Reichweite von zwei Kilometern in städtischen Gebieten bis zu mehr als 40 Kilometern in ländlichen Umgebungen, weniger benötigte Gateways im Vergleich zu anderen Arten von Funknetzen aufgrund der großen Reichweite, Kommunikation auf lizenzfreien Frequenzbändern wie 868 MHz (Europa) im Gegensatz zu 3/4/5G-Netzen und kostengünstige Ausstattung (20 € für einen Sensorknoten mit LoRa-Modul) /LoRa Alliance 2015/. Die geplante Sensornetzinfrastruktur soll ausschließlich auf offenen und internationalen Standards basieren, darunter Standards des OGC Sensor Web Enablement (SWE) /Open Geospatial Consortium 2020/ und das Messaging-Protokoll Message Queuing Telemetry Transport (MQTT). Aus dem Bereich der SWE-Standards wurde die SensorThings-API als elementare Grundlage für das Management der Datenströme dieser Sensornetzwerkinfrastruktur ausgewählt. Sie bietet ein offenes und einheitliches Framework für die Verbindung von IoT-Geräten, Daten und Web-Anwendungen /Liang et al. 2016/.

Virtuelles Modell der Agrarlandschaft: Das entwickelte raumzeitliche Informationsmodell der Landschaft basiert auf internationalen Standards der ISO-191xx-Normenfamilie und beschreibt grundlegende Komponenten der Agrarlandschaft /Machl et al. 2019/. Das

Informationssystem ist mit dem objektrelationalen Datenbankmanagementsystem PostgreSQL (<https://www.postgresql.org>) implementiert inklusive verschiedener Erweiterungen wie PostGIS (<http://postgis.net>) oder pgRouting (<http://pgrouting.org>). Das Informationssystem, das ursprünglich im Auftrag der Bayerischen Verwaltung für Ländliche Entwicklung entwickelt wurde, umfasst mehr als 26 Millionen Objekte, die den Zustand der Agrarlandschaft des gesamten Freistaats Bayern zu diesem Zeitpunkt abbilden. Die im Informationssystem abgebildeten Objekte umfassen neben der landwirtschaftlichen Bodennutzung auch Vegetations-, Siedlungs-, Verkehrs- und Wasserflächen sowie Flurstücke, Feldstücke und Schläge.

7 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Dieser Beitrag beschreibt das Konzept eines verteilten DZ der Agrarlandschaft. Das Konzept wurde im Kontext der Agrarwissenschaft und Landschaftsforschung entwickelt und basiert auf den Anforderungen eines multidisziplinären Agrarforschungszentrums. Unsere wichtigsten Beiträge sind:

1. Entwicklung eines Metadatenmodells, das die Verwaltung verteilter Informationsressourcen mit unterschiedlichen Datentypen (Datei, Webservice), Formaten und Datenmodellen, Eigentumsverhältnissen, Datenschutz und Lizenzen unterstützt. Dieses Metadatenmodell ist die Grundlage für einen Katalog, der Transparenz und Informationsintegration fördert.

ÖAW

AUSTRIAN
ACADEMY OF
SCIENCES

PARIS
LODRON
UNIVERSITY
SALZBURG

Designing Future with Geoinformatics

5. - 7. Juli 2022

www.gi-salzburg.org



GI Salzburg 22

Z GIS

Innovation

Vernetzung

Weiterbildung

2. Die Verbindung zwischen Objekten der realen Welt und Echtzeitinformationen aus verschiedenen Quellen.
3. Eine Implementierung des verteilten DZ, die sich auf bekannte offene internationale Standards und Open-Source-Software stützt und die Fähigkeiten des DZ in der agrarwissenschaftlichen Forschung demonstriert.

Eine Herausforderung bei der Umsetzung des Konzepts in der Fakultät und darüber hinaus besteht darin, dass die Organisationen als Eigentümer ihrer Ressourcen die Metadaten des Katalogs erfassen müssen. Nach unseren Erfahrungen ist es schwierig, Personen davon zu überzeugen, dies zu tun, da es Zeit und eine gewisse Einarbeitung in die Bedienung des Katalogsystems erfordert. Um die Forschenden zur Pflege des Katalogs zu motivieren, ihre Ressourcen dort zu registrieren, muss den Forschenden insbesondere der Mehrwert einer Verknüpfung von Forschungsdaten, Projekten, Landschaftsobjekten, Geräten und weiterer Arten von Ressourcen im Sinne des DZ transparent gemacht werden.

Um den verteilte DZ der Landschaft zu vervollständigen, wird sich die künftige Forschung auf die Verknüpfung der Berechnungs- und Simulationsmodelle der Beteiligten mit dem SRADI konzentrieren. Auf diese Weise wird es möglich sein, die Auswirkungen von Veränderungen in der Landschaft zu bewerten und mithilfe des verteilten DZ der Agrarlandschaft Was-wäre-wenn-Szenarien zu modellieren. Das Metadatenmodell muss hierzu um ein Versionierungskonzept erweitert werden, das die Analyse der Historie sowie alternativer Zukunftsszenarien ermöglicht.

LITERATUR

Adv (2015): Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder Adv, Dokumentation zur Modellierung der Geoinformationen des amtlichen Vermessungswesens (GeoInfoDok Version 6).

Albertoni, R.; Browning, D.; Cox, S.; Beltran, A. G.; Perego, A.; Winstanley, P. (2019): Data Catalog Vocabulary (DCAT) – Version 2. W3C. <https://www.w3.org/TR/vocab-dcat-2> (27.12.2019).

Batty, M. (2018): Digital twins. In: Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science 45(2018)5, 817–820.

Boschert, S.; Rosen, R. (2016): Digital Twin – The Simulation Aspect. In: Hehenberger, P.; Bradley, D. (Hrsg.): Mechatronic Futures. Springer, Cham.

Dawkins, O.; Dennett, A.; Hudson-Smith, A. (2018): Living with a Digital Twin: Operational management and engagement using IoT and Mixed Realities at UCL's Here East Campus on the QEOP. In: Proceedings of the 26th annual GIScience Research UK conference: GISRUk 2018. University of Leicester, UK, GIS Research UK (GISRUk).

Gröger, G.; Kolbe, T. H.; Nagel, C.; Häfele, K.-H. (2012): OpenGIS City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard – Version 2.0.0. Open Geospatial Consortium, OGC Doc. No. 12–019.

Kresse, W.; Danko, D. M.; Fadaie, K. (2012): Standardization. In: Kresse, W.; Danko, D. M. (Hrsg.): Handbook of Geographic Information. Springer, Berlin/Heidelberg.

Liang, S.; Huang, A.; Khalafbeigi, T.; Kim, K.; Schwab, T.; Brodeur, J.; Alzona, M. (2016): OGC SensorThings API. Open Geospatial Consortium. <https://www.opengeospatial.org/standards/sensorthings> (05.01.2020).

LoRa Alliance (2015): A technical overview of LoRa and LoRaWAN. LoRa Alliance. <https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf> (06.01.2020).

Machl, T.; Donaubaue, A.; Kolbe, T. H. (2019): Planning Agricultural Core Road Networks based on a Digital Twin of the Cultivated Landscape. In: Journal of Digital Landscape Architecture (2019)4, 316–327.

Minbo, L.; Zhu, Z.; Guangyu, C. (2013): Information Service System of Agriculture IoT. In: Automatika 54(2013)4, 415–426.

Moshrefzadeh, M.; Chaturvedi, K.; Hijazi, I.; Donaubaue, A.; Kolbe, T. H. (2017): Integrating and Managing the Information for Smart Sustainable Districts – The Smart District Data Infrastructure (SDDI). In: Kolbe, T. H.; Bill, R.; Donaubaue, A. (Hrsg.): Geoinformationssysteme 2017. Beiträge zur 4. Münchner GI-Runde. Wichmann, Berlin/Offenbach, 1–19.

Nebert, D.; Voges, U.; Bigalmi, L. (2016): OGC Catalogue Services 3.0 – General Model. OGC Document No. 12-168r6. <http://docs.opengeospatial.org/is/12-168r6/12-168r6.html> (07.01.2020).

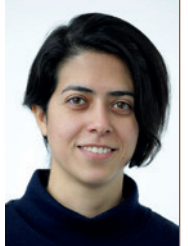
Open Geospatial Consortium (2020): The OGC's Sensor Web Enablement (SWE) Initiative. Open Geospatial Consortium. <https://www.opengeospatial.org/domain/swe#initiative> (04.01.2020).

Van den Brink, L.; Janssen, P.; Quak, W.; Stoter, J. (2017): Towards a high level of semantic harmonisation in the geospatial domain. In: Computers, Environment and Urban Systems 62(2017), 233–242.

Mandana Moshrefzadeh

LANDESHAUPTSTADT MÜNCHEN
KOMMUNALREFERAT – GEODATENSERVICE

Denisstr. 2 | 80335 München
mandana.moshrefzadeh@muenchen.de



Dr. Thomas Machl

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
HANS-EISENMANN-FORUM

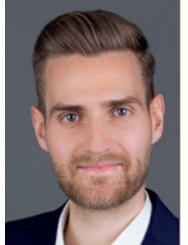
Liesel-Beckmann-Straße 2 | 85354 Freising
thomas.machl@tum.de



David Gackstetter

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
HANS-EISENMANN-FORUM

Liesel-Beckmann-Straße 2 | 85354 Freising
david.gackstetter@tum.de



Dr. Andreas Donaubaue

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
LEHRSTUHL FÜR GEOINFORMATIK

Arcisstraße 21 | 80333 München
andreas.donaubaue@tum.de



Univ.-Prof. Dr. rer. nat Thomas H. Kolbe

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
LEHRSTUHL FÜR GEOINFORMATIK

Arcisstraße 21 | 80333 München
thomas.kolbe@tum.de

