



Schlussbericht zum Vorhaben

ICT4iCity

FH-Impuls 2016 I:

Informations- und Kommunikationstechnik für die iCity

Das Projekt „ICT4iCity“ wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) in der Fördermaßnahme „FH-Impuls: Starke Fachhochschulen – Impuls für die Region“ unter dem Förderkennzeichen 13FH91021A gefördert und vom Projektträger VDI Technologiezentrum GmbH für das BMBF betreut.

Stuttgart, Februar 2023

Ein Projekt der

**Hochschule
für Technik
Stuttgart**

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung





Beteiligte

Hochschule für Technik Stuttgart

Betz, Matthias
Bytyqi, Qendrim
Coors, Volker
Guedey, Myriam
Otto, Robert
Rodrigues, Preston
Schneider, Sven
Traboulsi, Salam
Uckelmann, Dieter

Kooperationspartner:innen

Urban Structure Visualization Promotion Organization, Japan
Klingenstadt Solingen
invenio Virtual Technologies GmbH, Ismaning
Stadtwerke Ludwigsburg-Kornwestheim GmbH
Technische Betriebe Solingen
virtualcitySYSTEMS GmbH, Berlin



Sachlicher Schlussbericht gem. NABF (2019)

ICT4iCity

FH-Impuls 2016 I: Informations- und Kommunikationstechnik für die iCity

Projektlaufzeit	01.06.2021–31.08.2022
Förderkennzeichen	13FH9I02IA
Fördersumme BMBF	291.611,26 €
Drittmittel gesamt	83.301,34 €
Stichworte	Informations- und Kommunikationstechnologie, Intelligente Stadt, Urbane Datenplattform, Smarte Gebäude und Technologien, 5G-Mobilfunknetzwerke, Deep Learning, Klassifikation von Gebäuden
Projektleitung	Prof. Dr. Dieter Uckelmann
Beteiligte Professoren	Prof. Dr. Volker Coors, Prof. Dr. Dieter Uckelmann, Prof. Dr. Nicola Wolpert
Geförderte Maßnahme	Forschung an Fachhochschulen
Förderbereich	Starke Fachhochschulen – Impuls für die Region
Fachhochschule	Hochschule für Technik Stuttgart (HFT Stuttgart), Schellingstraße 24, 70174 Stuttgart

Hochschule für Technik Stuttgart, Februar 2023.



Ein Projekt der
**Hochschule
für Technik
Stuttgart**



Inhalt

Abbildungsverzeichnis.....	2
Tabellenverzeichnis.....	2
Teil 1: Kurzbericht	3
1. Aufgabenstellung	3
2. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	3
3. Ablauf des Vorhabens	3
4. Wesentliche Ergebnisse.....	3
5. Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen.....	4
Teil 2: Ausführliche Darstellung	5
1. Ergebnisse des Vorhabens.....	5
1.1. Urbane Datenplattform	5
1.1.1. Spezifikation des Gesamtsystems (AP 1.1)	5
1.1.2. 3D Digitales Landschaftsmodell (3D-DLM) (AP 1.2)	6
1.1.3. Software-Infrastruktur Urbane Datenplattform (AP 1.3).....	8
1.2. Smart Public Buildings and Infrastructures	10
1.2.1. Anforderungsanalyse Smart Public Buildings and Infrastructures (Co-Design) (AP 2.1).....	10
1.2.2. Vernetzung und Basisinstallation in den öffentlichen Gebäuden (Co-Produktion) (AP 2.2).....	12
1.3. 5G-4-iCity.....	14
1.3.1. Basiskonzeption und Ermittlung der technischen Grundlagen (AP 3.1)	14
1.4. Deep Learning für 3D-Geometriedaten mit Anwendung in der Klassifikation von Gebäudetypen.....	17
1.4.1. Einarbeitung (AP 4.1)	17
1.4.2. Datenanalyse und Datenaufbereitung (AP 4.2)	18
1.4.3. Erweiterung und Anpassung von Netzen basierend auf Bildern und Punktwolken (AP 4.3).....	19
2. Ergänzende Inhalte	21
2.1. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	21
2.2. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit	21
2.3. Voraussichtlicher Nutzen im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	21
2.4. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	22
2.5. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NABF.....	22
3. Verwendete Literatur	22

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Layer-Beschreibung des Referenzmodells	5
Abbildung 2: Beispiel für die Visualisierung von Windfeld-Simulationsdaten	7
Abbildung 3: Workflow zur Erstellung von 3D-DLM mit 3dfier aus ATKIS- und Baumkatasterdaten.....	7
Abbildung 4: Implementierung der Gesamtarchitektur. Steuerung der Aktoren 1 und 2 ist nicht implementiert, da in den bisherigen Use Cases keine Aktoren vorgesehen waren	8
Abbildung 5: Design einer Datenplattform, die flexibel Attribute zu beliebigen georeferenzierten Objekten/Gebieten zuordnen kann	9
Abbildung 6: Für ICT4iCity modifizierte Semiotische Leiter zur Beschreibung von IKT-Systemen in Smart Cities, basierend auf (Stamper, 1996) und (Herion et. al., 2020)	10
Abbildung 7: Use-Case-Entwicklung in ICT4iCity, basierend auf (Fraunhofer IAO, 2020).....	11
Abbildung 8: Systemarchitektur basierend auf der LoRaWAN-Architektur	12
Abbildung 9: Teile der Basisinstallation (Sensorik Energiezähler) im Humboldtgynasium, Solingen	13
Abbildung 10: Schematischer Aufbau der für das 5G-Sensorboard notwendigen Infrastruktur-Komponenten	16
Abbildung 11: Beispiele von 3D-CAD-Gebäuden des Stuttgarter Stadtteils Stöckach.....	18
Abbildung 12: Punktwolkendarstellung eines Gebäudes	18
Abbildung 13: Das zu klassifizierende Gebäude ist rot dargestellt, dessen drei nächste Nachbarn in Grau..	19

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die Anforderungen der Layer des Gesamtsystems.....	6
Tabelle 2: Vergleich verschiedener Methoden mit ModelNet40	19
Tabelle 3: Vergleich von punktwolkenbasierten Methoden auf den Gebäudedaten.....	19
Tabelle 4: Testergebnisse für skalierte und nicht-skalierte Daten	20
Tabelle 5: Klassenverteilung.....	20
Tabelle 6: Testgenauigkeit mit und ohne Gewichtung der Verlustfunktion	20
Tabelle 7: Testgenauigkeit mit Nachbarschaftsinformation	20

Teil 1: Kurzbericht

1. Aufgabenstellung

In dem Vorhaben „Informationsplattform und IKT (ICT4iCity)“ wurden die wissenschaftlichen und technischen Grundlagen für die Erfassung, Zusammenführung, Bereitstellung, Analyse und Nutzung von Daten mit einem Mehrwert für die offene, intelligente Stadt untersucht. Zu diesem Zweck war das Projekt in vier Teilprojekte gegliedert: Im Teilprojekt 1 „Urbane Datenplattform“ wurde eine neue Dateninfrastruktur entwickelt, die über offene Schnittstellen des Open Geospatial Consortiums (OGC) einen einheitlichen Zugriff auf einen heterogenen Datenbestand erlaubt und dabei neben 2D- und 3D-Geobasisdaten auch Sensordaten berücksichtigt. An der Schnittstelle vom Gebäude zur Stadt wurden im Teilprojekt 2 „Smart Public Buildings and Infrastructures“ neue Anwendungen von IKT für intelligente Kommunen und Städte untersucht. Die Arbeiten waren in die Digitalstrategien der Praxispartner eingebettet und wurden im realen Umfeld erprobt. Den Potentialen der neuen 5G-Infrastrukturen, welche derzeit in größeren Städten aufgebaut werden, widmete sich das Teilprojekt 3 „5G-4-iCity“. Hierfür wurden die technischen Grundlagen für den Einsatz von 5G im Gebäude und zur Geolokalisierung in städtischen Testfeldern ermittelt und ein 5G-Sensorboard für entsprechende Tests entwickelt. Das Teilprojekt 4 „Deep Learning für 3D-Geometriedaten mit Anwendung in der Klassifikation von Gebäudetypen“ adressierte die Erforschung von Architekturen neuronaler Netze (Deep Learning), um automatisiert Gebäudetypen in digitalen 3D-Gebäudemodellen erkennen zu können.

2. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Das Vorhaben knüpfte an aktuelle wissenschaftliche Arbeiten sowie technische Berichte und Spezifikationen aus den Bereichen urbane Dateninfrastrukturen, intelligente Gebäude, 5G-Netzwerke (3GPP) und Deep Learning auf 3D-Gebäudedaten an. Darüber hinaus wurde so weit wie möglich auf offene Standards (bspw. OGC), Software (bspw. PointNet, openHAB) und Datensätze aufgebaut. Der wissenschaftliche und technische Stand sowie die verwendete Fachliteratur sind in Teil 2 dieses Schlussberichtes eingehender dargestellt.

3. Ablauf des Vorhabens

ICT4iCity startete zum 01.06.2021 und endete wie geplant nach 15 Monaten am 31.08.2022. Die sehr heterogenen Aufgaben des Vorhabens waren in vier Teilprojekte mit eigener Teilprojektleitung und insgesamt neun Arbeitspakete gegliedert. Die Forschungsarbeiten und die Zusammenarbeit mit den Praxispartnern wurden von den Teilprojektleitungen koordiniert. Übergeordnete Aufgaben wie Projektbesprechungen und Berichtswesen wurden von der Projektleitung in ICT4iCity übernommen. Das Vorhaben war zudem an das Managementprojekt iCity angeschlossen und in dessen Aktivitäten eingebunden.

4. Wesentliche Ergebnisse

4.1 Urbane Datenplattform

Die Spezifikation einer Urbanen Datenplattform wurde erstellt, um einen Mindestfunktionsumfang festzulegen sowie mögliche weitere Komponenten zu definieren. Die Datenplattform besteht aus vier Ebenen, die verschiedene Teilsysteme und Funktionen im Gesamtsystem umfassen. Weiterhin wurde analysiert, welche Daten als 3D-Grundlage verwendet und wie 2D-Daten, Punktwolken und andere Daten (bspw. semantische) zur weiteren Verarbeitung in einen gemeinsamen Datenbestand überführt werden können. Eine Simulation von Windfeldern bzw. Windströmungen benötigt zusätzlich Daten zur Vegetation, die aus einem Baumkataster entnommen werden können. Im Use Case Stöckach wurden aus dem Baumkataster Vegetationsdaten in CityGML mittels FME übertragen. Zudem wurde eine detaillierte

Implementierung einer Urbanen Datenplattform konzipiert und eine Möglichkeit zur flexiblen Verbindung von 3D-, semantischen und Attributdaten aufgezeigt.

4.2 Smart Public Buildings and Infrastructures

Zur Ermittlung vorhandener und geplanter Infrastrukturen und Datenquellen bei den städtischen Praxispartnern wurden Expert:innen der entsprechenden Abteilungen interviewt. Der Status Quo wurde mithilfe eines weiterentwickelten Schemas (Semiotische Leiter von Stamper, 1996) aufbereitet. Basierend auf einer Anforderungsanalyse und dem Status Quo wurden in mehreren Workshops gemeinsam mit den Partnern Use Cases für die im Vorhaben ausgewählten öffentlichen Gebäude – ein Gymnasium und ein Hallenbad – entwickelt und in Steckbriefen dargestellt sowie in das o.g. Schema eingearbeitet. Auf dieser Grundlage konnten Synergien, wie bereits genutzte Technologien und Know-how der Praxispartner, identifiziert und für die Auswahl der Technologien sowie für die Konzeption des Gesamtsystems im Vorhaben genutzt werden. Für die Basisinstallation wurden das LoRaWAN-Netzwerk bei beiden Partnern vor Ort ausgebaut und Energiezähler der Gebäude mit passenden Kommunikationsmodulen (Sensoren) ausgestattet. Der Aufbau einer Forschungsumgebung mit entsprechendem Software-Stack erfolgte basierend auf den Ergebnissen des explorativen Projektes SPUB (Guedey, Uckelmann, 2020).

4.3 5G-4-iCity

Die Ergebnisse des Teilprojektes stehen in direktem Zusammenhang mit dem aktuellen Stand der offiziellen 5G-Releases der 3GPP sowie der Verfügbarkeit von 5G-Mobilfunknetzen und -Technologien. Es wurde eine umfangreiche Literaturrecherche zu den offiziellen 5G-Releases, aktuellen 5G-Endgeräten und den neuen Funktionalitäten von 5G im Mobilfunkbereich durchgeführt. Die Einsatzpotentiale von 5G für intelligente Gebäude und Städte wurden ebenfalls basierend auf einer Literaturrecherche, anderen iCity-Projekten und Experteninterviews mit den Praxispartnern ermittelt. Vielversprechende Use Cases für verschiedene, mit den Praxispartnern abgestimmte Anwendungsfelder wurden spezifiziert und entsprechende Key-Performance-Indikatoren für diese Use Cases definiert. Verschiedene 5G-fähige (Entwickler-)Geräte wurden Leistungstests unterzogen und auf Grundlage eines der Entwicklerboards ein Sensorboard konzipiert und implementiert.

4.4 Deep Learning für 3D-Geometriedaten mit Anwendung in der Klassifikation von Gebäudetypen

Im Bereich der Klassifizierung von 3D-CAD-Modellen mit künstlichen neuronalen Netzen wurden neuronale Netze auf Basis von Punktwolken und Meshes für die 3D-CAD-Klassifizierungsaufgabe getestet und miteinander verglichen. Als Ergebnis wurde entschieden, einen punktwolkenbasierten Ansatz für die Klassifikation von Gebäudetypen weiterzuverfolgen. Für das Training und Testen der neuronalen Netze wurden 3D-CAD-Gebäudedaten des Stuttgarter Stadtteils Stöckach herangezogen und Punktwolken aus den Gebäuden generiert. Es wurde ein neues neuronales Netz auf Basis von zwei bestehenden und als Open Source verfügbaren punktwolkenbasierten neuronalen Netzen entwickelt. Da die Datensätze nicht ausbalanciert waren, wurde zusätzlich die Verlustfunktion angepasst. Des Weiteren wurden verschiedene Eingabemöglichkeiten getestet, etwa die Skalierung der Daten und die Eingabe der Gebäude mit und ohne deren Nachbarschaften, um ein optimiertes Setting zu erstellen.

5. Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Die Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen fand wie im Vorhaben beschrieben mit dem assoziierten Partner, der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, statt. Darüber hinaus hat ein wissenschaftlicher und technischer Erfahrungsaustausch mit der FAU Erlangen-Nürnberg und der TU Dortmund (Smart Buildings, Datenplattformen und ihre Schnittstellen, Internet of Things und openHAB) sowie dem Fraunhofer IPA (5G, Campusnetze, Use Cases, 5G4KMU) stattgefunden.

Teil 2: Ausführliche Darstellung

1. Ergebnisse des Vorhabens

Die Verwendung der Zuwendung und die erzielten Ergebnisse im Vergleich zur ursprünglichen Vorhabenbeschreibung werden im Folgenden auf Ebene der Arbeitspakete pro Teilprojekt dargestellt.

1.1. Urbane Datenplattform

Als Praxispartner unterstützten die virtualcitySYSTEMS GmbH (Berlin) und die Urban Structure Visualization Promotion Organization (Fukuoka, Japan) das Teilprojekt.

1.1.1. Spezifikation des Gesamtsystems (AP 1.1)

Ziele:

Das derzeitige Konzept von städtischen urbanen Plattformen ist relativ weit verbreitet – es stellt allerdings den Zustand einer Stadt in einer Web-Oberfläche dar, indem offene städtische Daten geteilt werden. In TP1 sollte dieses Konzept erweitert werden, um die Integration und Analyse von 2D-/3D-Daten sowie die Analyse von Visualisierungen und die Interaktion des Benutzers durch Funktionen wie z.B. Filtration und Klassifizierung zu berücksichtigen.

Ergebnisse:

Das Gesamtsystem wurde spezifiziert, das Konzept basiert grundsätzlich auf dem Referenzarchitekturmodell (DIN 91357). Das Schichten- oder Layer-Modell aus der DIN 91357 wurde für die festgelegten Use Cases angepasst und um eine Application / Business Logic erweitert (Abbildung 1). Das Konzept der Gesamtarchitektur beinhaltet auch eine Anforderungsanalyse pro Schicht (Tabelle 1).

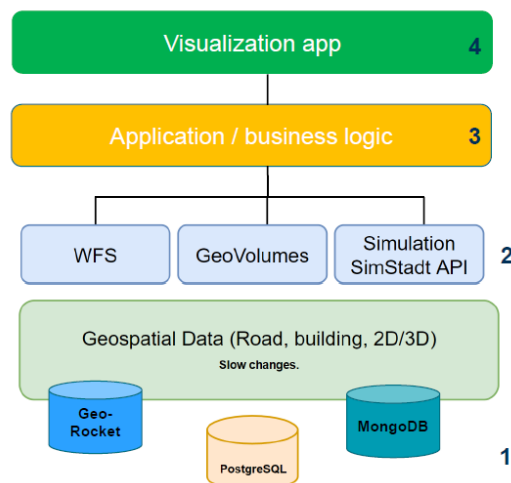


Abbildung 1: Layer-Beschreibung des Referenzmodells

Schicht 1 ist der Datenlayer und beinhaltet die (Geo-)Datenbasis, welche Daten mit nur wenigen bzw. langsamen Veränderungen enthält, z.B. 3D-Gebäudedaten, 2D-Lagepläne oder Punktwolken. Solche Daten werden i.d.R. alle zwei bis vier Jahre aktualisiert und bilden daher die Basis der Urbanen Datenplattform (UDP).

Schicht 2, der Servicelayer, stellt verschiedene Services bereit. Darunter fallen u.a. der WebFeatureService, GeoVolumes, OGC Services API, OGC SensorThingsAPI sowie die (SimStadt-)Simulations-APIs und Schnittstellen zum Bereitstellen von 3D-Digitalen Landschaftsmodellen (3D-DLMs).

Schicht 3 ist der Application- oder Businesslayer. Hier werden Daten analysiert, aufbereitet und ggf. weiter „veredelt“, um sie in Schicht 4 zu visualisieren.

Schicht 4 ist der Visualisierungslayer, der dazu dient, die Geobasisdaten, Sensordaten, Landschaftsdaten, 3D-Modelle und 2D-Lagedaten anzuzeigen. Außerdem werden auch die reduzierten, analysierten und ggf. veredelten Daten dargestellt, um Informationen der zugrundeliegenden Daten besser verstehen und Entscheidungen daraus ableiten zu können. Die Visualisierung kann je nach Anwendungsfall unterschiedlich sein und muss eine gewisse Flexibilität erlauben, bspw. die Darstellung von 2D-, 3D- oder gar 4D-Daten. Dies wird gewährleistet durch die verwendeten, grundlegend offenen Schnittstellen, die in Schicht 2 definiert sind (z.B. GeoVolumes API).

Tabelle 1: Übersicht über die Anforderungen der Layer des Gesamtsystems

Nr.	Layer	Anforderung
1	DATA	<ol style="list-style-type: none"> 1. Daten sollen in relationalen Datenbanken gespeichert werden. 2. Datenbanken sollen Geodaten nativ unterstützen. 3. Daten sollen auch in noSQL-Datenbanken abgelegt werden. 4. Kann Echtzeitstreaming von Daten unterstützen. 5. Kann eine Versionierung der Daten unterstützen.
2	SERVICE	<ol style="list-style-type: none"> 1. Datenabfrage muss mit den Parametern ID, BOUNDING BOX, GEO-VOLUME möglich sein. 2. Bearbeiten der 3D-Daten soll über die ID erfolgen. 3. Output-Format soll mind. CityGML, JSON, GeoJSON, CityJSON unterstützen. 4. Daten sollen über den Parameter FILENAME abgefragt werden können. 5. Authentisierung kann unterstützt werden. 6. Echtzeitstreaming von Daten kann unterstützt werden.
3	APPLICATION	<ol style="list-style-type: none"> 1. Soll eine Service-API bereitstellen, um auf Daten zuzugreifen. 2. Soll eine Visualisierungs-API zur Darstellung der Ergebnisse bereitstellen. 3. Soll eine Daten-API bereitstellen, um einen direkten Zugriff auf die Daten zu ermöglichen. 4. Daten-API kann eine Schnittstelle beinhalten, um bearbeitete Daten zu speichern. 5. Kann Mechanismen beinhalten, um verschiedene Datenquellen zu integrieren.
4	VISUALIZATION	<ol style="list-style-type: none"> 1. Daten sollen in 2D-Diagrammen angezeigt werden können. 2. Soll eine Unterstützung zur Anzeige von 2D-/3D-Objekten (Gebäude, Vegetation) bereitstellen. 3. Soll eine Möglichkeit für ein Streaming von 3D-Daten unterstützen. 4. Soll eine Möglichkeit für ein Streaming von 2D-Daten unterstützen. 5. Kann eine Unterstützung für 3D-Diagramme bieten.

1.1.2. 3D Digitales Landschaftsmodell (3D-DLM) (AP 1.2)

Ziele:

Dreidimensionale digitale Landschaftsmodelle (3D-DLM) ermöglichen es, 3D-Stadtmodelle um zusätzliche Elemente wie Straßen, Brücken und Vegetationsflächen zu erweitern. Diese Elemente sind für viele Anwendungen von großer Bedeutung, jedoch können die unterschiedliche Modellierung, fehlende Standards und mangelnde Werkzeuge eine automatisierte Visualisierung oder Analyse erschweren. Beispiele für Anwendungen sind die Planung von Neubauvorhaben sowie die Analyse von Evakuierungs- und

Rettungsplanungen in städtischen Gebieten. Ein weiteres Anwendungsfeld ist die Simulation von Naturkatastrophen, um die Auswirkungen auf die Bevölkerung und die Infrastruktur besser abschätzen zu können. Der Anwendungsfall, der für dieses Projekt genutzt wurde, ergibt sich aus den Vorarbeiten von iCity zur Simulation von Windfeldern bzw. Windströmungen (Abbildung 2).

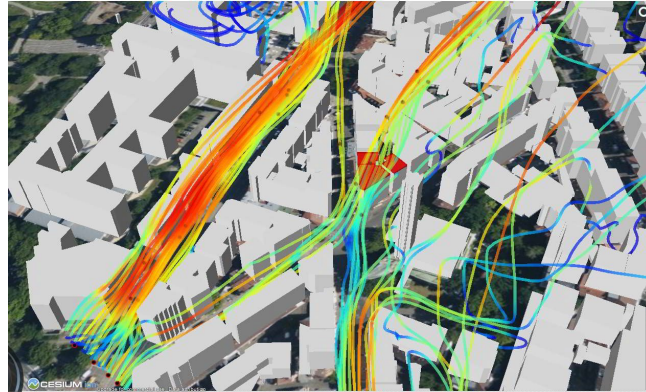


Abbildung 2: Beispiel für die Visualisierung von Windfeld-Simulationsdaten

Derzeit stehen in Deutschland flächendeckend nur 2D-DLM, wie das ATKIS-Basis-DLM sowie ein 3D-Gebäudemodell zur Verfügung. Durch die Erweiterung von 3D-Gebäudemodellen um das 3D-DLM ergeben sich neue Anwendungsmöglichkeiten und bestehende Anwendungen können deutlich verbessert werden.

Ergebnisse:

Im Folgenden wird die Erstellung der Workflows zur Generierung von 3D-DLMs mit 3dfier aus ATKIS- und Baumkatasterdaten beschrieben. Baumkatasterdaten werden im Testgebiet Stuttgart Stöckach eingesetzt. Die Umsetzung wurde mittels FME implementiert. Die laz-Daten werden mittels eines Readers eingelesen. Ein Re-Projector transformiert die Daten von EPSG 4647 nach EPSG 25832. Der Anwender kann im Creator die gewünschte Gebietsgrenze mittels UTM-Koordinaten bestimmen. Anhand dieser Gebietsgrenze werden die benötigten Punktdaten mittels eines Clippers aus den laz-Daten ausgeschnitten. Im nächsten Schritt wird die Punktwolke nach dem Attribut „classification“ gesplittet und wo erforderlich die Reklassifizierung ins ASPRS-1.4-Format durchgeführt. Im unteren Abschnitt des Workflows (Abbildung 3) wird beispielhaft gezeigt, wie die LiDAR-Punktwolke durch das digitale Geländemodell ergänzt werden kann. Bei Bedarf können diese Reader und Transformer deaktiviert werden.

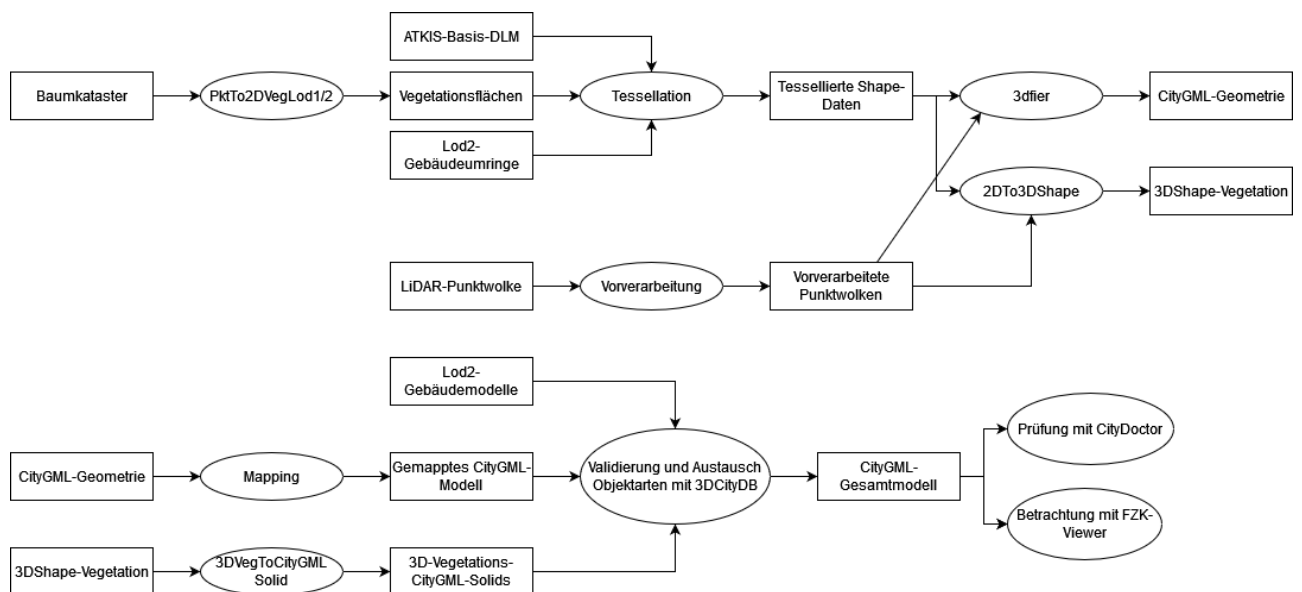


Abbildung 3: Workflow zur Erstellung von 3D-DLM mit 3dfier aus ATKIS- und Baumkatasterdaten

1.1.3. Software-Infrastruktur Urbane Datenplattform (AP 1.3)

Ziele:

Die offene Software Masterportal, die hauptsächlich als 2D-Webclient fungiert, wird hinsichtlich ihrer Erweiterbarkeit für 3D-Daten getestet. Hier profitieren Anwender:innen von vordefinierten Funktionalitäten und Konfigurationen, die sich je nach Bedarf ändern lassen. Als zweite Möglichkeit wird die Entwicklung einer eigenen 3D-Web-Anwendung untersucht, um die benötigten Methoden zur Aggregation, Verarbeitung und Visualisierung von städtischen Daten auf interaktive und analytische Weise abzudecken. Ein Vergleich zwischen diesen beiden Methoden hinsichtlich Leistung, Verarbeitungszeit, Effizienz, Wiederverwendbarkeit und Interoperabilität wird durchgeführt.

Ergebnisse:

Die Urbane Datenplattform wurde auf Basis der Anforderungen der festgelegten Systemarchitektur (vgl. 1.1.1.1) implementiert (Abbildung 4). Die Systemarchitektur wurde bewusst ohne spezifische Softwareangaben definiert, um die Implementierung je nach Anforderung der Anwendungsfälle flexibel gestalten zu können. Die Implementierung umfasste das Festlegen der Dienste, Schnittstellen und Standards sowie die Auswahl von Datenbanktechnologien und die Umsetzung dieser Komponenten. Für die einzelnen Layer wurde folgende Software eingesetzt:

1. *Data Layer*: 3dCityDB, MongoDB (Georocket)
2. *Service Layer*: VC Database (unterstützt WFS, um Abfragen nach den o.g. Kriterien durchzuführen), OGC SensorThingsAPI, OGC API GeoVolumes, OGC API Processes
3. *Application Layer*: Webservice (Zusammenführung von Daten, Übergabe Visualisierung)
4. *Visualization Layer*: Cesium Client, CKAN-Katalog (Auflistung vorhandener Datensätze), Unreal Engine

Die Kommunikation findet in unterschiedlichen Formaten statt. Für die Visualisierung werden JSON-Daten und 3D-Tiles verwendet; die API setzt überwiegend auf JSON. Simulationen können den kompletten Datensatz für einen Bereich in Form einer CityGML benötigen, um Ergebnisse zu produzieren.

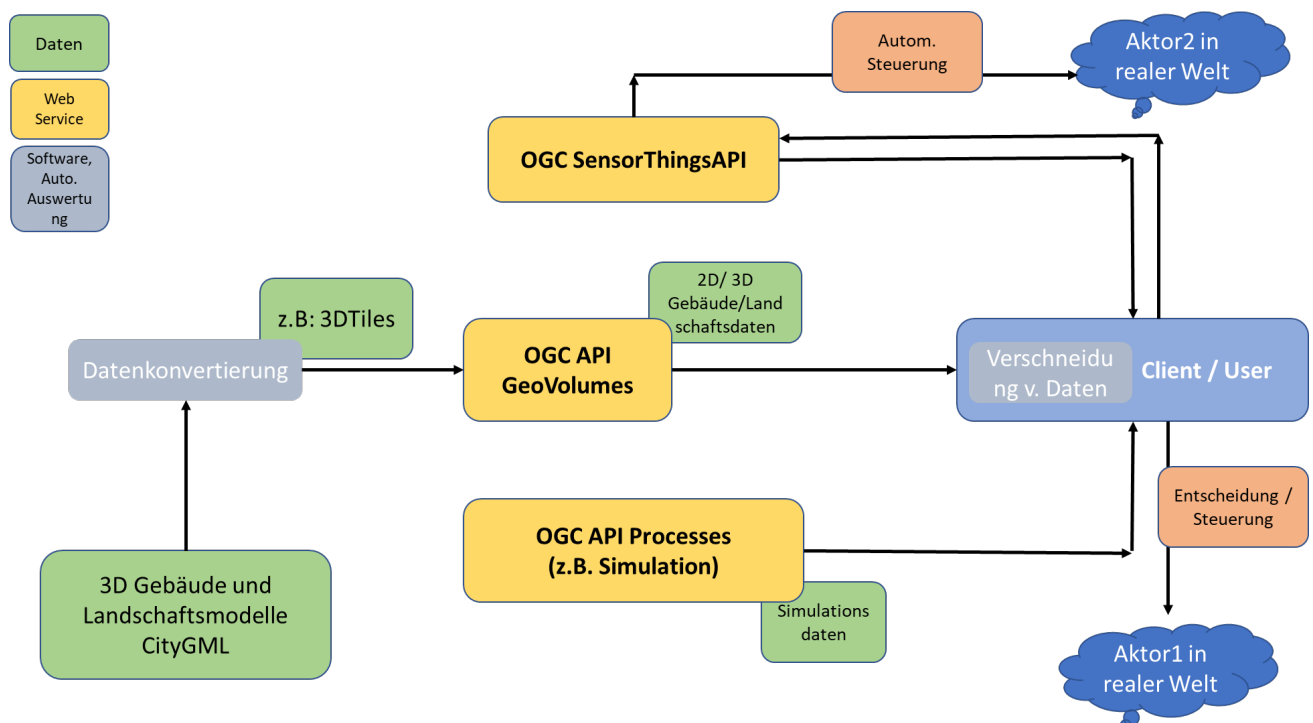


Abbildung 4: Implementierung der Gesamtarchitektur. Steuerung der Aktoren 1 und 2 ist nicht implementiert, da in den bisherigen Use Cases keine Aktoren vorgesehen waren

Für eine größtmögliche Flexibilität wurde der Daten-Layer so entworfen, dass verschiedene raumbezogene Daten – auch solche, die keine Geometriedaten sind – gespeichert werden können (Abbildung 5).

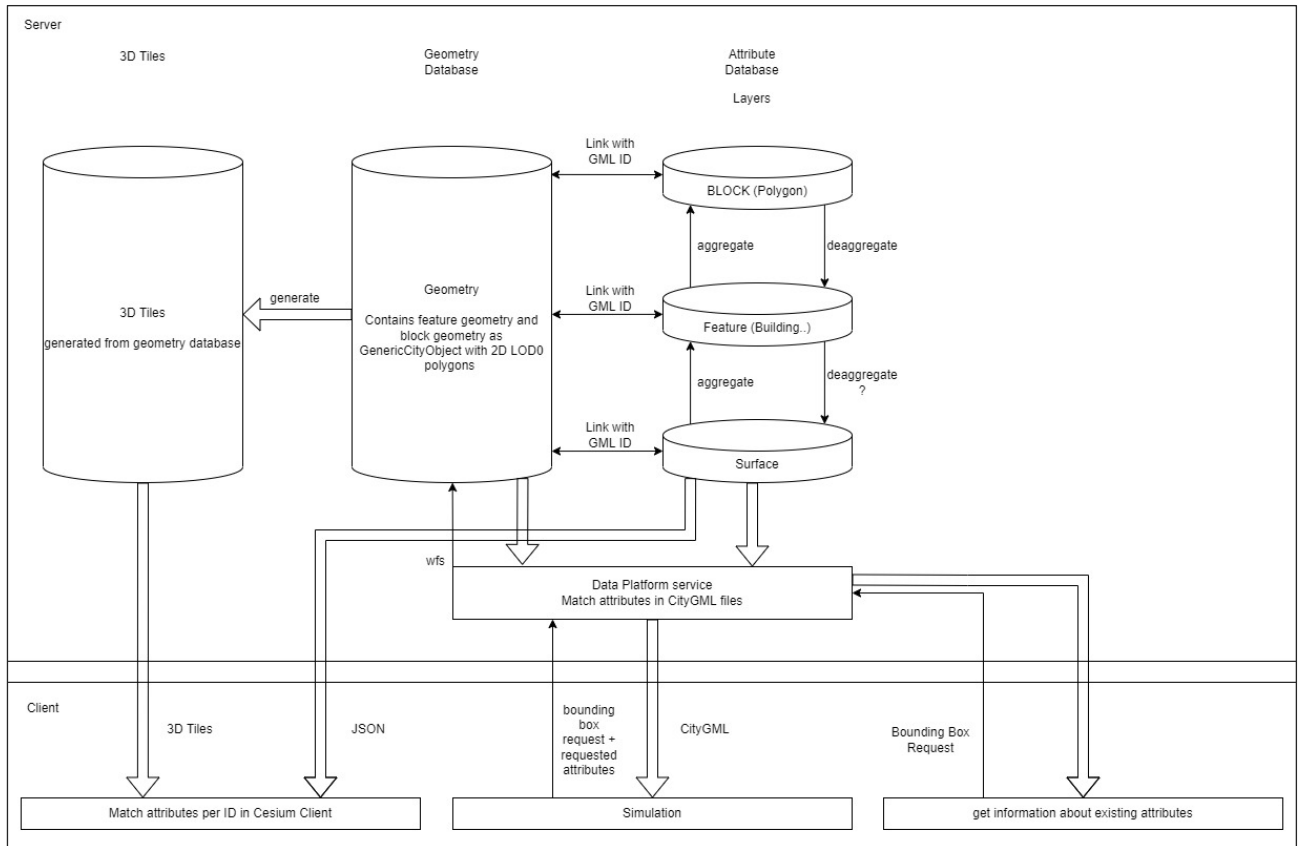


Abbildung 5: Design einer Datenplattform, die flexibel Attribute zu beliebigen georeferenzierten Objekten/Gebieten zuordnen kann

Die Daten werden hier in drei verschiedene Datenbanken aufgeteilt:

1. 3D-Tiles-Datenbank, die direkt von der Visualisierung angesprochen wird, um die 3D-Daten für das Streaming zu bekommen,
2. 3DCityDB, welche die 3D-Daten in einem relationalen Modell speichert, um die semantischen Daten zu erhalten,
3. Relationale Attributdatenbank um Attribute, Simulationsergebnisse o. Ä. zu dem semantischen Datenmodell zu speichern.

Die Zuordnung der Attribute zu einem 3D-Geometrieobjekt (Gebäude, Vegetation, generisches Objekt) erfolgt dabei immer über eine eindeutige GML-ID. Falls nun Daten erhoben werden, die in einem Gebiet gültig sind, also z.B. Einwohnerzahlen pro Gebäudeblock, so existiert in der 3D-Geometriedatenbank zunächst kein exaktes Objekt, das diesen Daten zugeordnet werden kann. Über die Möglichkeit, ein generisches Objekt zu erstellen, kann dieses Gebiet als 2D-Polygon nachträglich eingefügt und dann entsprechend verknüpft werden. Effektiv unterteilen sich die Daten der Attributdatenbank in verschiedene Ebenen, die aber alle über eine ID referenziert werden:

1. Block-Ebene: Daten können beliebigen 2D-Polygonen zugeordnet werden,
2. Objekt-Ebene: Daten werden einem Objekt, z.B. einem Gebäude, zugeordnet,
3. Objektteil-Ebene: Daten können einem Teil eines Objekts, z.B. dem Dach eines Gebäudes, zugeordnet werden.

So ist der Datenbestand flexibel bei der Aufnahme beliebiger raumbezogener und objektbezogener Daten. Diese Daten können dann über einen Webservice abgerufen werden. Applikationen können die Daten weiter

verfeinern, z.B. über eine statistische Verteilung, um die Daten auf einzelne Objekte herunterzubrechen oder einzelne Objektattribute zusammenzufügen, um sie einem Gebiet zuzuweisen.

Mit der Georeferenzierung können leicht externe Datenquellen wie SensorThings API eingebunden werden, die dann mit den vorhandenen Daten verschmolzen werden. Das ermöglicht Simulationen den Zugriff auf vollständig semantische Daten und Visualisierungen eine performante Anzeige von großen Datenbeständen mittels 3D-Tiles- und JSON-Daten.

1.2. Smart Public Buildings and Infrastructures

Praxispartner dieses Teilprojektes waren die Stadt Solingen sowie die Stadtwerke Ludwigsburg-Kornwestheim GmbH.

1.2.1. Anforderungsanalyse Smart Public Buildings and Infrastructures (Co-Design) (AP 2.1)

Ziele:

(a) Ermittlung vorhandener und geplanter Infrastrukturen in Ludwigsburg und Solingen sowie Akquise von Datenquellen und ihren Verfügbarkeiten mittels Expertenbefragung, (b) Auswahl der öffentlichen Gebäude in beiden Städten, (c) gemeinsame Entwicklung von Use Cases und die Ermittlung der Anforderungen für mögliche Pilotanwendungen, (d) Konzeption der Architektur für das Gesamtsystem und Auswahl geeigneter Technologien (Hard- und Software).

Ergebnisse:

(a) Zur Ermittlung von vorhandenen und geplanten Infrastrukturen und Datenquellen bei den Praxispartnern wurden die Partner sowie Mitarbeiter:innen der entsprechenden Abteilungen interviewt. Der Status Quo in beiden Städten wurde mithilfe einer für ICT4iCity angepassten Semiotischen Leiter (Stamper, 1996) aufbereitet (Abbildung 6). Auf diese Weise ließen sich Synergien und vorhandenes Know-how, worauf in ICT4iCity aufgebaut werden konnte, systematisch identifizieren. Hierzu gehörten auf technischer Seite (IT Platform) bspw. Software, Datenformate, Netzwerke und Sensorik und auf der nicht-technischen Ebene (Human Information Functions) Normen, Vereinbarungen und die Zusammenarbeit mit Communities.

Human Information Functions		Social World	User input, community activities (e.g. workshops)
			Contracts, guidelines, licenses (e.g. GDPR)
		Pragmatics	Use cases (e.g. flood sensing, air quality monitoring)
			Applications (e.g. information dashboards, mobile apps)
		Semantics	Metadata, ontologies, specifications (e.g. SensorThings API)
The IT Platform		Syntactics	Encodings, data formats (e.g. JSON, OGC/ISO 19156:2011 O&M)
		Empirics	Operating systems, middleware, algorithms (e.g. Linux, NodeRED, FROST server)
			Protocols (e.g. LoRaWAN, Bluetooth, MQTT, HTTPS)
Physical World		Devices (e.g. sensors, actuators, gateways, information boards)	
		Networks (e.g. LoRa-infrastructure, cellular network)	

Abbildung 6: Für ICT4iCity modifizierte Semiotische Leiter zur Beschreibung von IKT-Systemen in Smart Cities, basierend auf (Stamper, 1996) und (Herion et. al., 2020)

(b) Gemeinsam mit den Partnern wurde ein öffentliches Gebäude pro Stadt zur prototypischen Umsetzung der Basisinstallation sowie perspektivisch auch zur Implementierung weiterer Use Cases ausgewählt. In Ludwigsburg (Partner: Stadtwerke Ludwigsburg-Kornwestheim) wurde das Stadionbad, das größte Hallenbad der Stadt, ausgewählt. In Solingen (Partner: Stadt Solingen) fokussierte sich das Vorhaben auf das Humboldtgymsnasium, einem über die Jahre gewachsenen Schulgebäude. Für beide Gebäude wurden detaillierte Steckbriefe erarbeitet, um neben Baujahr, Größe, Lage, Anzahl der Geschosse, Gebäudenutzung und Öffnungszeiten auch vorhandene technische Anlagen zum Betrieb des Gebäudes (insb. Heizung) zu

erfassen. Ebenso wurden Pläne der Gebäude, des Verlaufs der Heizstränge (soweit vorhanden) sowie die energetischen Verbräuche der letzten Jahre bei den Praxispartnern abgefragt. Die Steckbriefe flossen in die Detaillierung der ausgewählten Use Cases (vgl. Abschnitt c) sowie in die Auswahl geeigneter Technologien mit ein (vgl. Abschnitt d).

(c) Um gemeinsam mit den Praxispartnern Use Cases für smarte öffentliche Gebäude am Beispiel der ausgewählten Gebäude entwickeln zu können, wurden verschiedene Methoden miteinander kombiniert und angepasst. Der Ansatz in ICT4iCity basiert auf der technologieorientierten Use-Case-Entwicklung des Fraunhofer IAO (2020) sowie des Auswahl- und Priorisierungsmodells für Use Cases nach Kohl et al. (2019). Um die Praxispartner einzubinden, wurden zudem mehrere Interviews sowie Workshops nach dem User-zentrierten Ansatz des Design Thinking durchgeführt. Der Prozess der Use-Case-Entwicklung in ICT4iCity war in vier Subprozesse untergliedert (Abbildung 7):

1. Eingrenzen des Themenbereichs und Dokumentation des Status Quo mittels Semiotischer Leiter,
2. Problem- und technologieorientierte Ideensammlung, gestützt durch den Stand der Technik und neue Technologien; User-orientierte Ideenfindung mithilfe von Design Thinking,
3. Auswahl der Use Cases mittels Priorisierung und Bewertung anhand festgelegter Kriterien,
4. Detaillierung der ausgewählten Anwendungsfälle sowie ihrer möglichen technischen und nicht-technischen Komponenten.

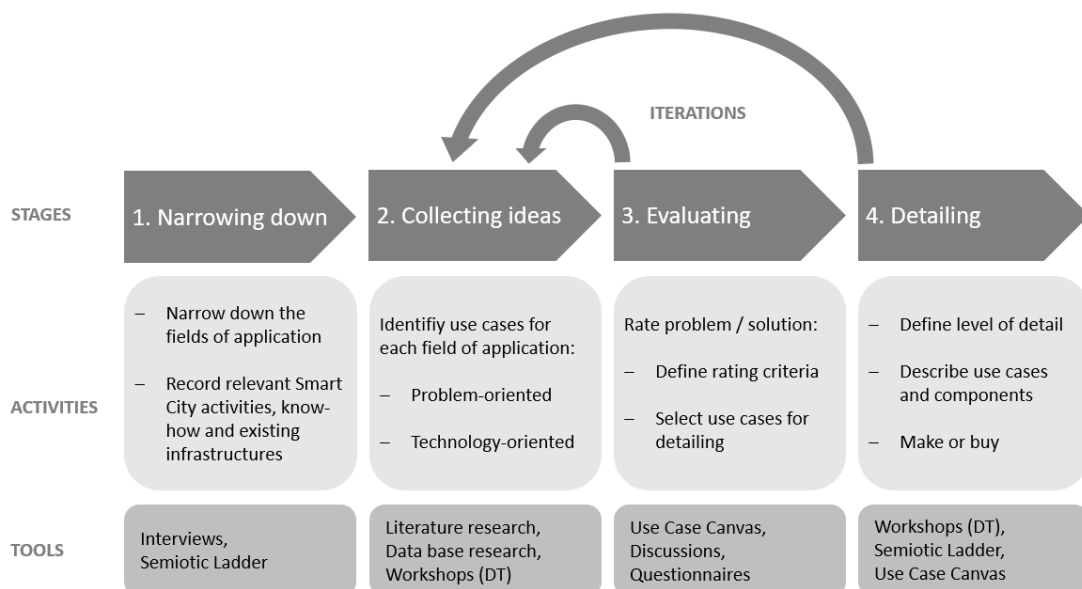


Abbildung 7: Use-Case-Entwicklung in ICT4iCity, basierend auf (Fraunhofer IAO, 2020)

Mithilfe dieses neuen Ansatzes, der auch in einem Konferenzbeitrag veröffentlicht wurde (Otto, Guedey, & Uckelmann, 2022), sind in Zusammenarbeit mit den Praxispartnern sechs Use Cases für den Einsatz smarterer Technologien in deren öffentlichen Gebäuden (inkl. Außenanlagen) identifiziert und ausgearbeitet worden:

1. **Energiemonitoring:** Überwachung und Optimierung des Energieverbrauchs öffentlicher Gebäude mithilfe von Sensorik und Aktorik aus dem IoT-Bereich. Verfügarmachen relevanter Daten für Städte und Kommunen zum Vergleich ihrer öffentlichen Gebäude (bspw. hins. Energieverbrauch).
2. **Unwetter-Frühwarnsystem:** Integration öffentlicher Gebäude in städtische Unwetterwarnsysteme mithilfe der Sensorik und Aktorik vor Ort, gekoppelt mit einem Prädiktionsalgorithmus.
3. **Smarte Parks und Freizeitanlagen:** Intelligente Parkanlagen mit dynamischen Informationsangeboten für Nutzer:innen, Erfassung und Weiterleitung relevanter Daten für städtische Betriebe (bspw. zum Zustand von Bäumen und Anlagen).
4. **Sensormanagement:** Automatisierte Überwachung der in öffentlichen Gebäuden und Infrastrukturen eingesetzten IoT-Sensorik und -Aktorik mit entsprechendem Alerting an zentrale Stellen.

5. *Smart Home Lab*: Aufbau eines Living Lab als Demonstrator für IoT-Anwendungen im öffentlichen Gebäudebereich mit Remote-Komponenten zum Monitoring des Labs.
6. *Auslastung öffentlicher Infrastrukturen*: Erfassung der Auslastung öffentlicher Gebäude und Infrastrukturen zur Optimierung von Dienstleistungen und zur effizienteren Ressourcennutzung.

Als Ergebnis der abschließenden Evaluation wurden die Anwendungsfälle 1, 4 und 6 für eine perspektivische Umsetzung ausgewählt.

(d) Bei der Auswahl der Architektur für das Gesamtsystem sowie geeigneter Technologien wurde darauf geachtet, so weit wie möglich offene Standards und offene Lösungen zu verwenden, um die Umsetzung flexibel und herstellerunabhängig gestalten zu können. Die Aufnahme des Status Quo (vgl. Abschnitt a) ermöglichte eine Übersicht über bereits eingesetzte Technologien und vorhandene Infrastrukturen bei den Partnern. Die Systemarchitektur baut daher auf dem offenen Standard LoRaWAN auf (Abbildung 8), mit dem bereits in der Aufbauphase des Vorhabens (exploratives Projekt SPUB) Erfahrungen gesammelt werden konnten. LoRaWAN wird zur Datenübertragung von Sensorik und Aktorik im Gebäude verwendet. Als Netzwerkservers kann der öffentlich verfügbare Server von The Things Network (TTN) oder ein anderer Server (bspw. bei einem von der Stadt oder einem Energieversorger betriebenen LoRaWAN-Netzwerk) dienen. Sofern im Gebäude vor Ort noch keine Verbindung zum Netzwerk besteht, kann dieses mittels weiterer Gateways relativ einfach und kostengünstig erweitert werden. Die bei den Praxispartnern eingesetzten Netzwerkservers und der Netzwerkservers von TTN verfügen über Schnittstellen, um die Daten mithilfe des offenen Protokolls MQTT weiterzuleiten. Auf dem Applikationsservers läuft ein Software-Stack für Persistenz, Visualisierung sowie Auswertung, Steuerung und Bereitstellung der Daten (vgl. 1.2.2).

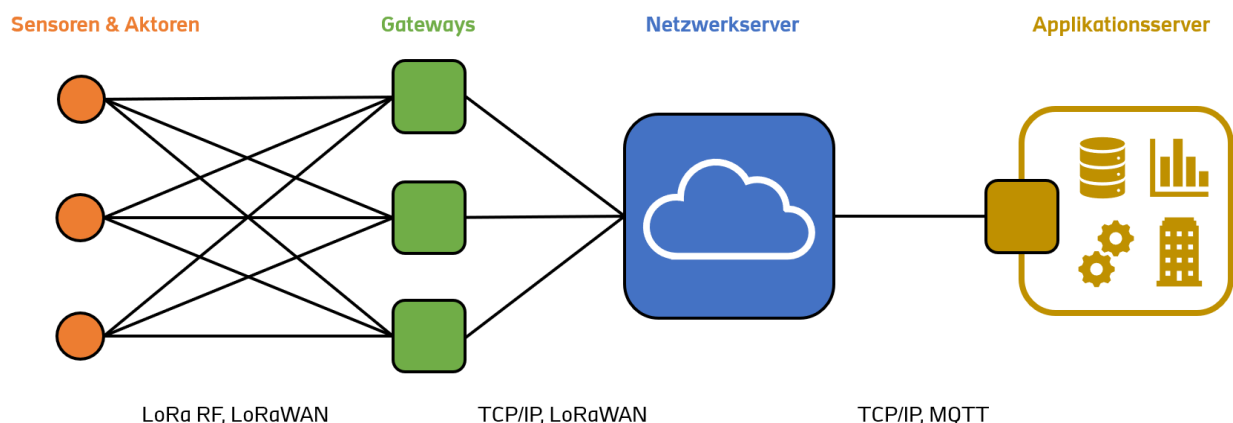


Abbildung 8. Systemarchitektur basierend auf der LoRaWAN-Architektur

1.2.2. Vernetzung und Basisinstallation in den öffentlichen Gebäuden (Co-Produktion) (AP 2.2)

Ziele:

(a) Beispielhafte Vernetzung (Sensorik, Aktorik, Gateways) der ausgewählten öffentlichen Gebäude in Solingen und Ludwigsburg sowie ggf. der Außenbereiche, (b) Aufbau einer parallel zu bestehenden Produktivumgebungen lauffähigen Forschungsumgebung, (c) Auswahl der Tools und Schnittstellen zur späteren Integration von Use Cases, (d) Analyse zur Privatsphäre und Datensicherheit (Schnittstelle zu explorativem Projekt „Datensicherheit“).

Ergebnisse:

(a) Aufbauend auf einer Literaturrecherche sowie dem Status Quo und den Use-Case-Steckbriefen wurde eine Basisinstallation konzipiert, auf der die ausgewählten wie auch weitere Use Cases perspektivisch aufsetzen können. Die Basisinstallation schafft zunächst die Grundlagen für ein automatisiertes Energiemonitoring mittels Vernetzung der Gebäude sowie Erfassung der Energiezähler. Zur Vernetzung der beiden öffentlichen Gebäude (Hallenbad und Schule) wurde das LoRaWAN-Netzwerk vor Ort durch Gateways erweitert. Im Fall von Solingen wurde TTN verwendet (Aufbau durch die HFT), im Fall von

Ludwigsburg wurde das vom Projektpartner betriebene LoRaWAN-Netzwerk ausgebaut. Weiterhin wurden die Energiezähler in den Gebäuden durch entsprechende Funk-Kommunikationsmodule digitalisiert und fernauslesbar gemacht. In Solingen wurden Wärmemengen-, Gas- und Stromzähler integriert (Abbildung 9), in Ludwigsburg Wärmemengen-, Wasser- und Gaszähler. Hierfür musste eine umfassende Recherche der verschiedenen Zählertypen und dafür geeigneter Module durchgeführt werden, die dokumentiert wurde.



Abbildung 9: Teile der Basisinstallation (Sensorik Energiezähler) im Humboldtgynasium, Solingen

(b) Der Aufbau der Forschungsumgebung erfolgte an der HFT Stuttgart. Hierfür wurden der Software-Stack zunächst auf einem lokalen Server installiert und die geplante Sensorik in das LoRaWAN-Netzwerk der HFT integriert. So konnten Interoperabilität, Einsatzfähigkeit und Handhabung getestet werden. Im weiteren Verlauf des Vorhabens (vgl. Abschnitt c) wurde das technische Konzept der Forschungsumgebung dahingehend weiterentwickelt, dass alle Applikationen als Container verwendet und mittels Docker Compose vorkonfiguriert wurden. Dies ermöglicht eine vom Host OS unabhängige Installation; die Anwendung ist zudem auf unterschiedliche Hosts (Bare-Metal-Server, Virtuelle Maschine, PC) ohne weitere Anpassung übertragbar.

(c) Für eine Anforderungsanalyse wurden Interviews mit den Partnern geführt. Auf dieser Grundlage sowie mit Blick auf den Status Quo (vorhandene Technologien, Infrastrukturen, Know-how) wurden Software und Schnittstellen zur späteren Integration der ausgewählten Use Cases festgelegt. Alle Komponenten sind als offene Software verfügbar und in der Praxis bereits etabliert. Zum Einsatz kommen Docker/Docker Compose (Containerisierung), Influx DB (Datenbank), Grafana (Visualisierung), OpenHAB (Datenhub, Automation), NodeRED (Scripting, Schnittstellen), Mosquitto (MQTT), Portainer (Docker Management) und Traefik (Reverse Proxy). Neben MQTT wurde REST als weitere Schnittstelle ausgewählt, um Daten im JSON-Format zur Verfügung zu stellen und abzurufen. Die Gebäudedaten verarbeitenden Applikationen des Software-Stack verfügen alle über eine REST API. Gleiches gilt für die bei den Praxispartnern bereits auf städtischer wie unternehmensweiter Ebene eingesetzten Datenhubs und IoT-Plattformen.

(d) Basierend auf den Ergebnissen des explorativen iCity-Projekts SPUB, den Steckbriefen der ausgewählten Use Cases sowie der Architektur, Software und den Schnittstellen konnte eine erste Einschätzung bzgl. Datenschutz und -sicherheit vorgenommen werden. Personenbezogene Daten werden in den Anwendungsfällen nicht erhoben oder verarbeitet. In Bezug auf die Datensicherheit muss darauf geachtet werden, wo möglich Verschlüsselung und Authentifizierung einzusetzen. LoRaWAN ist Ende-zu-Ende verschlüsselt (AES) und auch MQTT und REST erlauben eine sichere Kommunikation mittels TLS1.3. Die Anwendungen des Software-Stack im Intranet werden durch den Reverse Proxy geschützt und zusätzlich mittels Authentifizierung gesichert.

Projektdokumentation und -management wurden im HFT-internen GitLab durchgeführt. Git verfügt u.a. über die Möglichkeit, sog. Repositories anzulegen, die Arbeitspakete repräsentieren können. Über Gast-Accounts hatten die Praxispartner Zugang zum GitLab, was die Zusammenarbeit auf technischer wie organisatorischer Ebene vereinfachte. Die Dokumentation erfolgte in Markdown, einem Format, das sich bei der Erstellung von digitalen Enzyklopädien (Wikis) etabliert hat. Perspektivisch sollen die nicht-sensiblen Projektergebnisse mit einer Creative-Commons-Lizenz versehen ins öffentliche GitLab der HFT (Transferportal) umziehen. Dadurch werden sie einer breiteren Öffentlichkeit zur weiteren Verwendung zur Verfügung stehen.

1.3. 5G-4-iCity

Die Stadtwerke Ludwigsburg-Kornwestheim GmbH und die Technischen Betriebe Solingen haben dieses Teilprojekt als Partner begleitet.

1.3.1. Basiskonzeption und Ermittlung der technischen Grundlagen (AP 3.1)

Ziele:

(a) Ermittlung der technischen Grundlagen und Einsatzpotentiale von 5G für intelligente Gebäude, Industrieunternehmen und Städte, Analyse der provider- und geräteseitigen Möglichkeiten, (b) Detaillierung von vielversprechenden Use Cases, (c) Entwicklung eines 5G-Sensorboards mit entsprechender Schnittstelle zur Einbindung, (d) Ermittlung der technischen Grundlagen und Genauigkeiten von 5G für die Positionsbestimmung in Gebäuden und im städtischen Umfeld.

Ergebnisse:

(a) Basierend auf einer umfassenden Literaturrecherche wurden in dem Vorhaben der Stand der Technik und aktuelle Entwicklungen des neuen Mobilfunkstandards 5G ermittelt. Ausgehend davon wurde das Potential von 5G für Smart-City-Anwendungsfälle untersucht, u.a. in den Bereichen Energiemanagement, Verkehr, Umweltschutz und Verwaltungsmanagement. Typische Herausforderungen der untersuchten Anwendungsfälle, die 5G zu bewältigen verspricht, sind eine hohe Bandbreite zur Unterstützung der Datenrate (bspw. für Augmented Reality und Videoüberwachung), eine große Anzahl verteilter Geräte mit möglichst geringem Stromverbrauch, langer Batterielebensdauer, niedrigen Kosten, hoher Reichweite und Verfügbarkeit sowie eine hohe Zuverlässigkeit und geringe Latenz bei der Kommunikation.

Zur Grundlagenrecherche gehörte insbesondere auch die Ermittlung der Roadmap des 3rd Generation Partnership Project (3GPP) – dem offiziellen Gremium für die Mobilfunk-Standardisierung seit 3G – und der Status Quo (Bertenyi, 2021). Die vier bisher bereits angekündigten Spezifikationen für 5G sind Release 15, 16, 17 und 18. Release 15 erschien 2018, Release 16 wurde 2020 veröffentlicht. Die Arbeit an den Releases und damit die Funktionalitäten und der Einsatz von 5G wurden durch die COVID-19-Pandemie beeinträchtigt; bspw. wurden Zeitpläne mehrfach verschoben und Release 17 erst Mitte 2022 veröffentlicht. Hardware, welche den Spezifikationen entspricht, war zur Laufzeit des Vorhabens bis Release 16 verfügbar.

Die Initialphase begann mit Release 15 und definierte drei Kategorien von 5G-basierten Anwendungsfällen: eMBB (Enhanced Mobile Broadband), mMTC (Massive Machine Type Communication) und uRLLC (Ultra Reliable Low Latency Communication). Dabei konzentrierte sie sich auf mobiles Breitband für die Non-Standalone-5G-Architektur (NSA), was bedeutet, dass 5G 4G als Core benötigt, aber zusätzlich 5G RAN, um die Kapazität und die Geschwindigkeiten des Netzes zu erhöhen. In dieser Phase wurden auch die Standalone-5G-Architektur (SA) und die ultrazuverlässige, latenzarme 5G-Funktionalität eingeführt, d.h. ein Konnektivitätsniveau, das schnelle Reaktionen und zuverlässige Fernkommunikation ermöglicht. Um die Migration von 4G zu 5G zu vereinfachen, führte 3GPP in Release 16 das „Dynamic Spectrum Sharing“ (DSS) ein, welches es ermöglicht, das Spektrum mit der bestehenden 4G-Konnektivität zu teilen. In diesem Release wurde die für 5G-Privatcampus konzipierte Funktionalität eingeführt, d.h. Netzaufteilung, Positionsgenauigkeit, Analyse von Netzdaten usw. Release 17 bietet eine verbesserte Unterstützung der Funktionen von Release 16 für IoT-Implementierungen und -Automatisierung, z.B. private Netze, Edge-Computing mit Mehrfachzugriff, massive MIMO-Funktion (Multiple Input Multiple Output) für höhere Datenraten und bessere Abdeckung, Network Slicing, hochgenaue Positionierung, nicht-terrestrische Vernetzung (NTN), verbessertes V2X usw. Release 18 (derzeit in Arbeit) soll die in Release 17 enthaltenen Arbeiten abschließen und optimieren.

Es wurden folgende 5G-Funktionen, die für das Vorhaben von Interesse sind, identifiziert:

1. Network Data Analytics Function (NWDAF) bietet Netzwerkanalysefunktionen mit Algorithmen des Machine Learning (ML) und der künstlichen Intelligenz (KI) für 5GC-Netzwerke, um eine intelligente,

maschinengesteuerte Umgebung für Anwendungen wie die Reduzierung von Verkehrsstaus in intelligenten Städten zu schaffen.

2. Unterstützung für IoT-Anwendungen durch zeitabhängige Kommunikation (TSC), nicht öffentliche oder private Netzwerke, erweiterte Ortungsdienste etc.
3. Hochpräzise Positionierung, um IoT-Geräte mit 5G-Signalen zu lokalisieren, die aufgrund der extrem großen Bandbreite und des Directional Beamforming eine Genauigkeit von einigen Metern bietet.
4. Sidelink Communication verbessert die direkte Kommunikation von Gerät zu Gerät, z.B. von Fahrzeug zu Fahrzeug, von Fahrzeug zu RSU (straßenseitige Einheit), von Fahrzeug zu Fußgänger usw. unter Verwendung von uRLLC mit Edge Computing.
5. Network Slicing (NS) wurde als ein wesentliches Merkmal des 5G-Netzes eingeführt. Es zielt darauf ab, ein einzelnes physisches Netz in mehrere voneinander isolierte logische Netze (sog. Slices) aufzuteilen. Jedes Slice zeichnet sich durch seine eigene Dienstqualität und Größe aus und ist darauf ausgerichtet, die Anforderungen eines bestimmten Anwendungsfalls zu erfüllen.
6. Massive MIMO ermöglicht hohe Konnektivität und großflächige Abdeckung im 5G-Netz und ist eine Erweiterung des herkömmlichen MIMO. Es ist ein unverzichtbarer Bestandteil von 5G, einschließlich gemeinsamer und Kontrollkanäle mit Beamforming und Tracking.
7. Nicht-terrestrische Netze (NTN) sind die wichtigste 5G-Netzlösung, um die Kommunikation überall einheitlich zu unterstützen. NTN erhöhen die Zuverlässigkeit der Dienste, verbessern die Verfügbarkeit für unternehmenskritische Kommunikation und vereinfachen die Skalierbarkeit von 5G-Netzwerken.

Ermittlung von Potentialen und möglichen Hindernissen bei der Umsetzung:

Die 5G-Technologie befindet sich noch in der Entwicklungsphase, d.h. es fehlen technische Spezifikationen in den bisher veröffentlichten Releases 15 und 16, deren Umsetzung erst in Rel. 17 erfolgte bzw. in Rel. 18 erfolgen wird (Veröffentlichung geplant für März 2024). Daher sind einige Funktionen, die wir benötigen, derzeit noch nicht verfügbar – und sobald sie verfügbar sein werden, ist davon auszugehen, dass es weitere Zeit braucht, bis es 5G-Module und technische Dokumente gibt, die diese Funktionen (z.B. NWDAF, Positionierungsgenauigkeit) unterstützen.

(b) Aufgrund dieses Ergebnisses haben wir uns entschieden, den Fokus auf die Identifizierung, das Design und die Definition von technisch bereits möglichen Anwendungsfällen zu legen und für diese entsprechende Key-Performance-Indikatoren (KPI) zu definieren. Basierend auf einer Literaturrecherche und weiteren iCity-Projekten aus den Bereichen intelligente Gebäude, intelligente Stadt und intelligente Industrie wurden eine Klassifizierung der entsprechenden Anwendungsfälle vorgenommen und die unterschiedlichen Anforderungen der unterschiedlichen Sektoren identifiziert. Die Use Cases wurden in einer Tabelle zusammengefasst und jeder mit einer Gewichtung hinsichtlich seiner Relevanz für das iCity-Projekt versehen.

Auch in diesem Teilprojekt wurde die adaptierte Semiotische Leiter (vgl. 1.2.1) angewendet, um den Status Quo bei den Projektpartnern vor Ort sowie die Spezifikation der gemeinsam mit ihnen entwickelten Anwendungsfälle darzustellen. Für die Anwendungsfälle wurden zudem detaillierte Steckbriefe erstellt. Zwei Anwendungsfälle wurden für eine perspektivische Umsetzung ausgewählt und weiter ausgearbeitet:

1. 5G in der Smart City - 5G Smarte Werkstatt: Als praxisnaher Anwendungsbereich für 5G wurde gemeinsam mit dem Projektpartner eine Kehrmaschine (CityCat v20e) ausgewählt, die im Umfeld von Logistik und Automatisierung in städtischen Betrieben eine Rolle spielt und bei den Technischen Betrieben in Solingen im Einsatz ist. Eine Beschreibung des geplanten Prototyps und der schematischen Struktur des Softwareteils wurde erarbeitet.

2. 5G im Smarten Gebäude - 5G Energy Monitoring: Das automatisierte Monitoring des Energieverbrauchs sowie die folgende Steuerung in öffentlichen Gebäuden kann von IoT-Geräten und Netzwerktechnologien sowie vom Einsatz des maschinellen Lernens profitieren. 5G ermöglicht die großflächige funkbasierte Anbindung von Sensoren und Aktoren zur Überwachung der entsprechenden Parameter wie Heizung, Lüftung und Klimatisierung (HVAC) in Echtzeit. 5G bietet die notwendige Bandbreite und Geschwindigkeit,

um eine große Anzahl von Sensoren, Aktoren, (Wärmebild-)Kameras, LiDAR etc. in dasselbe Netz einzubinden und die entsprechenden Daten in Echtzeit zu analysieren. Die Daten sind die Ausgangsbasis für die effiziente Steuerung des Gebäudes zur Verbesserung von Produktivität und Komfort in städtischen Anwendungen.

(c) Für die Einbindung zahlreicher Sensoren über 5G wurden die Anforderungen an ein 5G-Sensorboard sowie notwendige Komponenten untersucht und ein Konzept erarbeitet. Die Entwicklung basiert auf den 5G-Releases 15 und 16 mit den entsprechenden Restriktionen. Die Konzeption des Sensorboards sieht es vor, 5G als Kommunikationsnetz für die Datenübertragung zu nutzen (Abbildung 10), aber auch 5G-Technologien für die Ortung und räumliche Überwachung der verteilten Assets zu verwenden. Das 5G-Sensorboard soll zudem in der Lage sein, eine Reihe verschiedener Sensoren und Aktoren mit möglichst geringem Aufwand zu unterstützen und zu verwalten.

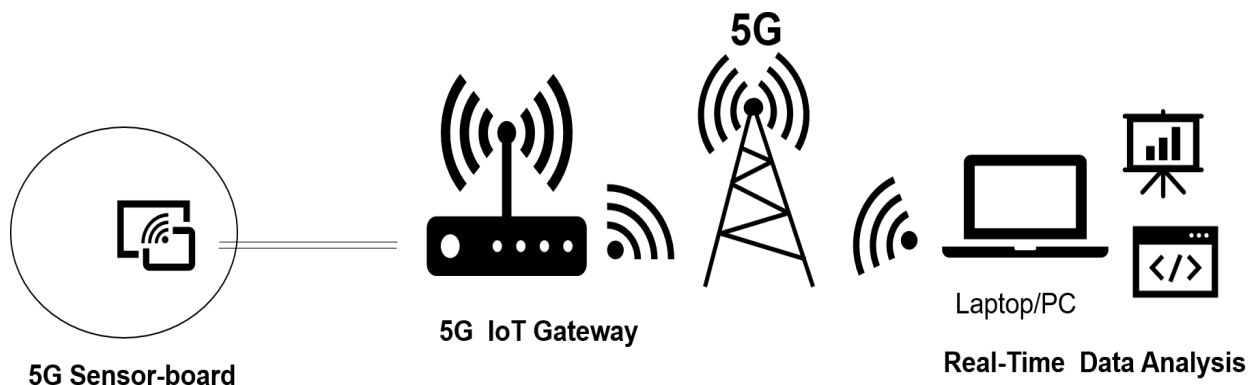


Abbildung 10: Schematischer Aufbau der für das 5G-Sensorboard notwendigen Infrastruktur-Komponenten

Durchgeführte Arbeitsschritte und Ergebnisse:

Identifizieren der Hardware-Komponenten: Das 5G-Sensorboard besteht hauptsächlich aus 5G-Modulen, einem Prozessorboard (wie Arduino oder Raspberry Pi), 5G-Geräten und Sensoren. Die 5G-Module dienen als Basis, um das Sensorboard mit dem 5G-Mobilfunknetz zu verbinden. Als Platine wurde der Raspberry Pi verwendet, der mit diesem Modul integriert wurde. Bei den 5G-Geräten handelt es sich um 5G-fähige Endgeräte, wie z.B. 5G-Handys oder -PCs. Sensoren und Aktoren werden je nach Anwendung individuell angebunden.

Schritt 1: Der Waveshare SIM8200EA-M2 5G HAT wurde als 5G-Modul genutzt. Der erste Schritt bestand darin, die Leistung dieses 5G-Moduls zu konfigurieren und zu testen. Um das 5G-Mobilfunknetz zu unterstützen, wurde eine 5G-Prepaid-SIM-Karte verwendet. Das Modul wurde zwar unter Windows einwandfrei unterstützt, aber die Verbindung zum Raspberry Pi war problembehaftet. Es wurden Benchmarks in Python implementiert, um die Fähigkeit des 5G-Moduls mit AT-Befehlen zu testen (Senden von Nachrichten, Anrufen, Senden/Empfangen von MQTT usw.). Das Sensorboard wurde aufgrund der auftretenden Probleme mit dem 5G-Modul zunächst per WLAN mit OpenHAB verbunden. Um das 5G-Modul zu testen wurde das 5G-Modul in Verbindung mit dem Windows-Betriebssystem genutzt. Im Anschluss wurden Daten über 5G an OpenHAB übertragen. Die Übertragung der sensorischen Daten verlief somit erfolgreich über 5G, allerdings über einen zusätzlich notwendigen Windows-PC. In diesem Schritt wurde auch eine simulierte 5G-Infrastruktur mit UERANSIM installiert und genutzt. Als 5G-Kern wurde der Open5GS-Kern verwendet, der einer der verfügbaren Open-Source-5G-Kerne ist. Der 5G-RAN-Teil wird mit UERANSIM simuliert.

Schritt 2: Mangels einschlägiger Publikationen zu 5G-Modulen und verwandten Technologien wurden weitere 5G-Module getestet, z.B. das Quecktel RMU 500 EK. Im Gegensatz zum ersten getesteten Modul von Waveshare handelt es sich um ein USB-Modul, das daher leicht mit anderen Geräten verbunden werden kann. Die PIN-Steuerung des Raspberry Pi kann hier besser konfiguriert werden, da das 5G-Modul nicht wie das Modul von Waveshare an der PIN-Leiste mit dem Raspberry Pi verbunden ist. Außerdem können hier ggf.

mehr Sensoren angeschlossen werden. Die Leistung der verwendeten 5G-Module und -Geräte haben wir mit Netzwerkanalysatoren gemessen, wobei die Upload- und Download-Tests vom 5G-Netzwerk abhängen. Der Prozess lief analog zu Schritt 1. Allerdings konnte auch hier der Aufbau eines 5G-Sensorboards auf Basis des Raspberry Pi nicht wie unter Windows realisiert werden. Ein Austausch mit Forscher:innen anderer Institutionen bestätigte die Problematik.

Zusammenfassung: Viele der geplanten 5G-basierten Funktionen, die für die Use Cases in iCity relevant sind (bspw. Tracking und Tracing in Innen- und Außenumgebungen mit einer Genauigkeit <1m oder einer Latenz von <1s zur Echtzeitdatenverarbeitung) waren in der letzten Version der 5G-Standardisierung (Release 16) noch nicht verfügbar. Die verfügbaren, auf Release 15 und 16 basierenden 5G-Module waren zudem nicht kompatibel mit dem Raspberry Pi. Für die Erforschung im Labor ist der Umweg über einen Windows-PC hinreichend, jedoch für die geplante praktische Umsetzung und Erprobung im Betrieb beim Praxispartner noch nicht zufriedenstellend.

(d) Ermittlung der Rolle der Ortungsgenauigkeit für intelligente Städte und Gebäude (Traboulsi, 2022): Es wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, um die Ortungsgenauigkeit verschiedener 5G-Releases und anderer, bereits etablierter Netzwerktechnologien (LTE, BLE, WLAN, RFID) miteinander zu vergleichen. Darüber hinaus wurden unterschiedliche Positionierungsmethoden (u.a. TDOS, TOA, AOA, RSS, Fingerabdruck) und ihre Relevanz für die Anwendungsfälle sowie zusätzliche statistische Methoden, die zur Verbesserung der Leistung einer bestimmten Methode führen können, ermittelt.

1.4. Deep Learning für 3D-Geometriedaten mit Anwendung in der Klassifikation von Gebäudetypen

Als Praxispartner hat die invenio Virtual Technologies GmbH (Ismaning) dieses Teilprojekt unterstützt.

Ziele:

Für die Energieanalyse und Auslegung von (erneuerbaren) Versorgungssystemen ist der Wärmebedarf von Gebäuden eine wichtige Information. Der Wärmebedarf eines Gebäudes hängt zum einen maßgeblich vom Gebäudevolumen und von der Grundfläche ab, welche aus der urbanen Datenplattform ableitbar sind. Zum anderen spielt die Fassadendämmung, die nicht im Detail bekannt ist, eine wichtige Rolle. Um hier zu einer belastbaren Schätzung zu kommen, wird das Gebäude derzeit bezüglich des TABULA-Standards klassifiziert. Der TABULA-Standard unterscheidet hinsichtlich des Baujahrs, welches üblicherweise im Stadtmodell hinterlegt ist, und hinsichtlich verschiedener Gebäudetypen: Einfamilienhaus (EFH), Reihenhaus (RH), Mehrfamilienhaus (MFH), großes Mehrfamilienhaus (GMH) und Hochhaus (HH). Ziel dieses Teilprojektes war es, die Klassifikation von Gebäuden in einem Stadtmodell mit Hilfe von neuronalen Netzen zwischen den genannten Gebäudetypen durchzuführen. Dabei waren folgende Fragestellungen zu untersuchen:

1. Welcher Datensatz soll für das Training eines neuronalen Netzes verwendet und wie muss dieser aufbereitet werden?
2. Welches Format soll für die Daten gewählt werden?
3. Welches neuronale Netz soll verwendet werden? Gibt es passende Open-Source-Lösungen oder muss eine neue Architektur entwickelt werden?
4. Welche Metrik soll für die Bewertung der Güte der Klassifikation verwendet werden?

Ergebnisse:

1.4.1. Einarbeitung (AP 4.1)

Es wurde eine ausgiebige Literaturrecherche im Bereich der Klassifizierung von 3D-CAD-Modellen mit künstlichen neuronalen Netzen (KNN) durchgeführt. Dabei wurde der Fokus auf KNN auf Basis von Punktwolken und Meshes (statt Bildern) gelegt. Bereits im vorherigen Projekt GeoCADUp wurden KNN auf Basis von Punktwolken betrachtet und erweitert, allerdings mit Fokus auf einem industriellen Kontext. Für die Anwendung der Klassifikation von Gebäudetypen in diesem Projekt wurde entschieden, zurück auf die

Basismethoden PointNet (Qi et al., 2017) und PointNet++ (Qi et al., 2017) zu gehen. Das erstere Netz ist eine Pionierarbeit, in welcher direkt mit Punktwolken gearbeitet wird. Dabei wird die Punktwolke global als Ganzes verarbeitet. Das zweite Netz ist eine Folgearbeit von PointNet, welches im Grunde genommen eine PointNet-ähnliche Architektur auf lokale Bereiche hierarchisch anwendet, um das Objekt zu verarbeiten. Es folgt demnach einem Lokal-zu-global-Ansatz. Für die Mesh-basierten Ansätze wurden MeshNet (Feng et al., 2019) und MeshNet+SDMC (Singh et al., 2021) verwendet. Beide Methoden verarbeiten die Objekte auf Dreiecksbasis. Der Unterschied besteht wieder darin, dass MeshNet nur eine kleine Nachbarschaft für jedes Dreieck betrachtet, wohingegen MeshNet+SDMC größere Nachbarschaften berücksichtigt. Beide Methoden erfordern allerdings ein wasserdichtes Dreiecksnetz, d.h. ein Dreiecksnetz ohne Löcher, und eine feste Anzahl an Dreiecken für alle Objekte. Für die Bewertung der verschiedenen KNN wurde neben den Gebäudedaten auch der akademische öffentliche Datensatz ModelNet40 herangezogen. ModelNet40 beinhaltet 9843 Trainingsobjekte und 2468 Testobjekte, welche in 40 Klassen als CAD-Geometrien unterteilt sind, wie z.B. Tische, Stühle, Flugzeuge oder Vasen. Die Objekte liegen in triangulierter Form als Dreiecksnetze vor.

1.4.2. Datenanalyse und Datenaufbereitung (AP 4.2)

Als Grundlage für das Training und die Evaluierung der KNN wurden 3D-CAD-Gebäude des Stuttgarter Stadtteils Stöckach herangezogen (Abbildung 11). Der Datensatz beinhaltet 1786 3D-CAD-Gebäude und wurde in 1426 Trainingsdaten und 360 Testdaten aufgeteilt. Die Gebäude sind bezüglich der z-Achse ausgerichtet. Für die Evaluation wurde der Testdatensatz erweitert, indem für jedes Gebäude zehn weitere Repräsentationen durch Rotationen bezüglich der z-Achse erzeugt wurden.

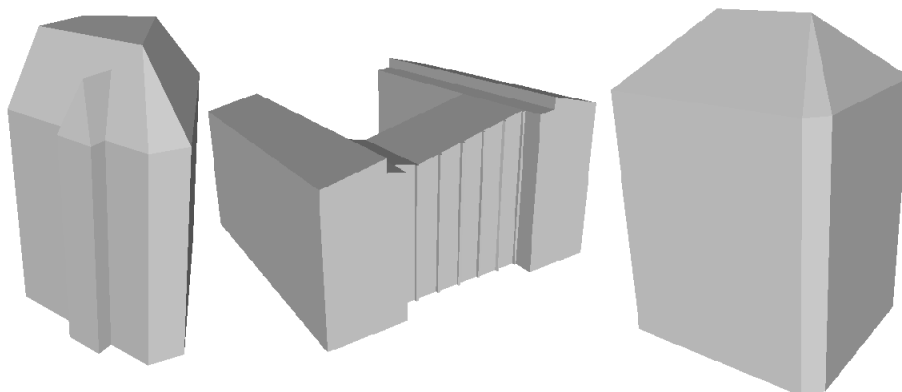


Abbildung 11: Beispiele von 3D-CAD-Gebäuden des Stuttgarter Stadtteils Stöckach

Für das Arbeiten mit punktwolkenbasierten KNN wurden aus den 3D-CAD-Gebäuden Punktwolken generiert (Abbildung 12). Dabei wurden 1024 Punkte mit Hilfe der Funktion Poisson-disk Sampling (Ranzuglia et al., 2012) aus MeshLab (Cignoni et al., 2008) per Skript automatisiert erzeugt.

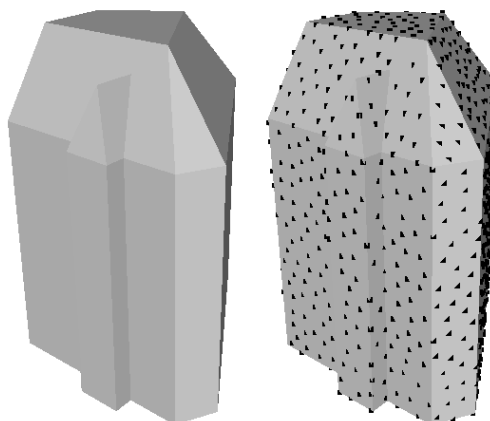


Abbildung 12: Punktwolkendarstellung eines Gebäudes

Des Weiteren wurde ein neuer Datensatz erstellt, der die Nachbarschaftsinformation der Gebäude beinhaltet. Für jedes Gebäude wurden dessen drei nächste Nachbarn ermittelt und zusammengeführt (Abbildung 13). Dies beantwortet die Frage 1, welcher Datensatz betrachtet und wie dieser aufbereitet werden soll.

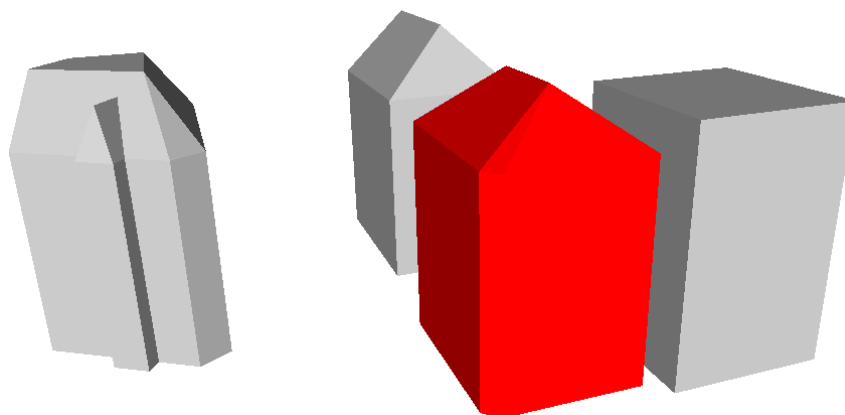


Abbildung 13: Das zu klassifizierende Gebäude ist rot dargestellt, dessen drei nächste Nachbarn in Grau

1.4.3. Erweiterung und Anpassung von Netzen basierend auf Bildern und Punktwolken (AP 4.3)

Für den Vergleich der verschiedenen Methoden wurde zunächst der akademische Datensatz ModelNet40 herangezogen. In der Literatur ist die Ausgangssituation der Daten nicht einheitlich. PointNet und PointNet++ rotieren die Daten bezüglich der z-Achse beim Training, um die in der Praxis auftretenden Fälle abzufangen. Bei MeshNet und MeshNet+SDMC liegen die Objekte in initialisierter Lage vor, was die Klassifikationsaufgabe erheblich vereinfacht. Daher wurde für ModelNet40 die gleiche Basis für alle Methoden geschaffen, indem alle Objekte in initialisierter Lage verwendet werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zu sehen. Die Ergebnisse für MeshNet und MeshNet+SDMC wurden im Rahmen einer Masterarbeit erzeugt.

Tabelle 2: Vergleich verschiedener Methoden mit ModelNet40

Methode	PointNet	PointNet++	MeshNet	MeshNet+SDMC
Testgenauigkeit	90.3%	92.6%	90.4%	91.7%

Zur Klassifikation von Gebäudetypen haben wir uns für den punktwolkenbasierten Ansatz entschieden. Die Methoden liefern nicht nur bessere Ergebnisse auf ModelNet40, sondern erfordern auch keine weiteren Vorverarbeitungen wie bei den Mesh-basierten Netzen. Die Mesh-basierten Netze verlangen, dass jedes Objekt die exakt gleiche Anzahl an Dreiecken aufweist. Damit ist die Frage 2 beantwortet, welches Format für die Daten gewählt werden soll.

Danach wurden die Gebäude einzeln für das Training des neuronalen Netzes als Eingabe verwendet. Als Architektur wurde jeweils eine abgespeckte Version von PointNet und PointNet++ verwendet. Außerdem wurde ein neues Netz entwickelt, indem die beiden Netze PointNet und PointNet++ kombiniert wurden. Die Kombination ermöglicht eine globale (PointNet) als auch lokale (PointNet++) Verarbeitung der Gebäude. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 zu sehen. Festzustellen ist, dass die globale Information wichtiger ist als die lokale Information.

Tabelle 3: Vergleich von punktwolkenbasierten Methoden auf den Gebäudedaten

Methode	PointNet (Vanilla)	PointNet++ (abg.)	Kombination
Testgenauigkeit	73.4%	62.3%	75.7%

Für punktwolkenbasierte Ansätze ist es üblich, alle Objekte in die Einheitssphäre zu skalieren. Für Gebäude führt das (wie durch das vorangegangene Experiment zu erwarten war) zu einer Verschlechterung der Klassifikationsgenauigkeit (vgl. Tabelle 4).

Tabelle 4: Testergebnisse für skalierte und nicht-skalierte Daten

	Skaliert	Nicht skaliert
Testgenauigkeit	58.1%	75.7%

Die Anzahl der Objekte für die verschiedenen Klassen in dem verwendeten Datensatz variieren stark und dies wirkt sich auf die Klassengenauigkeiten aus. Das Training eines künstlichen neuronalen Netzes mit nicht-balancierten Datensätzen neigt dazu, jene Klassen, die stark vertreten sind, zu bevorzugen. Um dem entgegenzuwirken, wurde zusätzlich eine Gewichtung der Kreuzentropie Verlustfunktion in Abhängigkeit der Anzahl der Objekte für jede Klasse vorgenommen (vgl. Tabelle 5).

Tabelle 5: Klassenverteilung

Klasse	EFH	RH	MFH	GMH	HH
Anzahl Obj.	210	558	441	498	79
Klassengenauigkeit Kreuzentropie ohne Gewichtung	46.0%	75.0%	76.3%	88.9%	73.3%
Klassengenauigkeit Kreuzentropie mit Gewichtung	88.9%	55.4%	68.6%	80.3%	86.7%

Bei Frage 4 nach der Metrik zur Bewertung der Klassifikationsgenauigkeiten haben wir uns entschieden, neben der Testgenauigkeit über alle Objekte (Overall) auch die Testgenauigkeit über alle Klassen (Mean) zu betrachten. In Tabelle 6 sind die Ergebnisse für unsere Methode mit und ohne Gewichtung der Kreuzentropie zu sehen. Durch die Gewichtung sinkt zwar die Overall-Testgenauigkeit, jedoch steigt die Mean-Testgenauigkeit.

Tabelle 6: Testgenauigkeit mit und ohne Gewichtung der Verlustfunktion

	Kreuzentropie mit Gewichtung	Kreuzentropie ohne Gewichtung
Testgenauigkeit Overall	70.9%	75.7%
Testgenauigkeit Mean	76.0%	71.9%

Die Unterscheidung zwischen Reihenhäusern und Einfamilienhäusern ist ohne die Betrachtung der Nachbargebäude auch für den Menschen sehr schwierig. Daher wurden Gebäude mit deren drei nächsten Nachbargebäuden für die Eingabe verwendet (Abbildung 13). Der Schwerpunkt des zu klassifizierenden Gebäudes wurde in den Ursprung verschoben und dessen Punkten eine Zusatzinformation angehängt. Die Testgenauigkeit konnte dadurch auf 80.3% (Overall) und 77.6% (Mean) verbessert werden (vgl. Tabelle 7).

Tabelle 7: Testgenauigkeit mit Nachbarschaftsinformation

	Kreuzentropie mit Gewichtung	Kreuzentropie ohne Gewichtung
Testgenauigkeit Overall	75.2%	80.3%
Testgenauigkeit Mean	77.9%	77.6%

Zusammenfassend lässt sich zur Beantwortung von Frage 3 nach der besten Lösung sagen, dass die Kombination aus einem lokalen und globalen Ansatz und die Verwendung von Nachbarschaftsinformationen zu den besten Ergebnissen führen. Damit wurde auch Meilenstein M4.1 erreicht: Als Open Source verfügbare Netze zur Klassifikation von 3D-Geometriedaten wurden für die Gebäudeklassifikation angepasst und getestet.

2. Ergänzende Inhalte

2.1. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Den wesentlichen Kostenfaktor stellte die Beschäftigung der akademischen Mitarbeiter:innen im Umfang von sechs E13-Stellen in Teilzeit sowie in geringerem Umfang die Finanzierung von wissenschaftlichen Hilfskräften zur Unterstützung der umfangreichen Rechercharbeiten dar. Weitere Positionen entfielen auf Reisemittel für die Teilnahme der akademischen Mitarbeiter:innen an wissenschaftlichen Konferenzen in Deutschland und der EU zur Dissemination der Ergebnisse (siehe 2.5) sowie für Arbeitstreffen mit den Praxispartnern. Zudem wurden in größerem Umfang Sachmittel eingesetzt für Endgeräte, Sensoren, Aktoren und Gateways, die an der Hochschule sowie bei den Praxispartnern in Solingen und Ludwigsburg (Teilprojekt 2 und 3) verbaut wurden. Die über die gesamte Projektlaufzeit angefallenen Kosten sind dem Verwendungsnachweis zu entnehmen.

2.2. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit

Charalabidis et al. (2019) haben auf Basis einer umfassenden Recherche unterschiedlicher Smart-City-Initiativen „Information and Communication Technology“ (ICT) als entscheidende Komponente gegenwärtiger und zukünftiger Aktivitäten identifiziert. Die Autoren nennen in diesem Kontext Datenzentren für die Sammlung und Speicherung sensorischer Daten, (mobile) Netzwerke, neue Services zur Information von Bürgerinnen und Bürgern sowie GIS-Daten für städtische Bauvorhaben und urbanes Monitoring mit entsprechenden Sensoren. Die durchgeführten Arbeiten waren notwendig, da in dem Vorhaben in eben diesen Themenfeldern wichtige Grundlagen zur Erfassung, Zusammenführung, Bereitstellung, Analyse und Nutzung von Daten mit einem Mehrwert für die offene, intelligente Stadt ermittelt und evaluiert werden konnten. Durch die enge Zusammenarbeit mit den kommunalen Projektpartnern sowie Partnern aus der Wirtschaft sind die Ergebnisse zudem an den tatsächlichen Anforderungen und Belangen der Praxis orientiert. Angemessen ist die geleistete Projektarbeit, da sie dem im Antrag dargestellten Vorhaben entspricht. Alle geplanten Aufgaben konnten – bis auf geringe Abweichungen, die im Projektverlauf notwendig wurden – erfolgreich bearbeitet werden.

2.3. Voraussichtlicher Nutzen im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Aus dem Projekt haben sich zahlreiche Verwertungen ergeben, die durch das erfolgreich beantragte Vorhaben UDigiT4iCity weiter ausgebaut werden können. Aus der Kooperation mit den Kolleg:innen aus den Baudisziplinen der HFT Stuttgart ist zudem ein weiterer Antrag (InDeckle) zum Einsatz von Auto-ID-Technologien für industriell gefertigte Bauteile (Decken) entstanden und Anfang 2023 eingereicht worden. Neben der Forschung erfolgt die Einbeziehung der erworbenen Kenntnisse in die Lehre (bspw. Vorlesung zum Internet der Dinge) sowie zur Vertiefung von Fragestellungen in Abschlussarbeiten (Master und Bachelor).

Die technischen Entwicklungen treffen auf reges Interesse in öffentlichen Einrichtungen und der Industrie, da hier Nutzungspotentiale für die verwendeten Netzwerktechnologien (LoRaWan, 5G) und Sensoren bestehen. Insbesondere die Praxispartner aus dem öffentlichen Sektor können auf die Ergebnisse, die offene Software und Standards nutzen, aufbauen und Teile davon in ihre bestehenden Infrastrukturen integrieren. Die konkreten Möglichkeiten hierfür sollen in UDigiT4iCity untersucht werden.

Durch die weitere Zusammenarbeit mit den Partnern kann zukünftig auch eine wirtschaftliche Nutzung durch Dienstleistungen im Kontext der Urbanen Datenplattform entstehen. Die entwickelte Klassifizierung von Gebäudetypen kann zudem verwendet werden, um Aussagen über Entwicklungsszenarien für Stadtquartiere, Kommunen und Regionen zu treffen.

Die Projektergebnisse können als Basis für erste Prototypen im Bereich 5G verwendet werden. Auch das gewonnene, systematisch aufgearbeitete Know-how zum Stand der Technik im Bereich 5G und der Aufbau

verschiedener Testsettings bilden die Grundlage für eine realistische Einschätzung wirtschaftlicher Potentiale und Risiken dieser neuen Technologie.

2.4. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Laufzeit des Vorhabens wurde in der aktuellen Literatur regelmäßig nach Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des Vorhabens recherchiert sowie ein wissenschaftlicher Austausch auf Konferenzen und anderen Veranstaltungen im praxisnahen Umfeld der Projektpartner gepflegt. Während der Durchführung des Vorhabens wurde uns kein Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen wissenschaftlichen Stellen bekannt.

2.5. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NABF

Der vorliegende Bericht wird auf der Projektwebseite der HFT Stuttgart frei zugänglich zum Download angeboten. Abgesehen davon sind die Ergebnisse des Vorhabens in folgenden wissenschaftlichen Publikationen vorgestellt und soweit möglich als Open Access veröffentlicht worden:

Bücher:

- Coors, V., Pietruschka, D., Zeitler, B. (Eds.). iCity. Transformative Research for the Livable, Intelligent, and Sustainable City - Research Findings of University of Applied Sciences Stuttgart, 2022, Springer. ISBN: 978-3-030-92095-1. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-92096-8>

Konferenzbände:

- Dastageeri, H.; Schneider, S.; Alfakhori, M.; Coors, V. (2023). HOT SPOTS IN CITIES - CLASSIFYING EMOTIONS DURING PHYSICAL OUTDOOR ACTIVITIES IN URBAN AREAS. Proceedings GeoinfoWeek 2022, 14–17 November 2022, Conference at Uni. of Malaysia, in KL.
- Santhanavanich, T., Wuerstle, P., Padsala, R., & Coors, V. (2022). Digital 3D city models towards urban data platform using OGC 3D GeoVolumes API. In: 42. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, 5.-6. Oktober 2022 in Dresden (pp. 237–242). Geschäftsstelle der DGPF. <https://doi.org/10.24407/KXP:1796036099>.
- Otto, R., Guedey, M. & Uckelmann, D. (2022). Developing User- and Technology-driven Use Cases for Smart City Applications. In: Y. Xiao, A. Abraham, G. C. Peng & J. Roth, Hrsg. Proceedings of the IADIS International Conference Connected Smart Cities. 19–22 July 2022, Lissabon, Portugal, pp. 208–212.
- Traboulsi, S. (2022). Overview of 5G-oriented Positioning Technology in Smart Cities. (ANT'22) Procedia Comput. Sci., 201, pp. 368–374. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.03.049>.

3. Verwendete Literatur

3GPP, Study on Communication for Automation in Vertical Domains (CAV)}, 2018.

3GPP, TR 38.913 V16.0.0, 2020. Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies (Release 16).

3GPP, TS 23.501 V16.1.0, 5G in Release 17—Strong Radio Evolution, 2019.

3GPP, TS 23.501 V16.1.0, System Architecture for the 5G System, 2019.

3GPP, SP-190453, Study on Enhanced Support of Non-Public Networks, 2019.

3GPP, SP-190452, Study on Enhancement to the 5GC Location Services-Phase 2, 2019.

3GPP, TR 38.811, Study on New Radio (NR) to Support Non-Terrestrial Networks (Release 15), 2020.

Almalki FA (2020). Implementation of 5G IoT-based smart buildings using VLAN configuration via cisco packet tracer. International Journal of Electronics Communication and Computer Engineering. 2020;11(4):56-67.

- Bertenyi, B. (2021, February). 5G Evolution: What's Next? *IEEE Wireless Communications*, 28, 4-8. doi:10.1109/MWC.2021.9363048
- Charalabidis, Y. A. (2019). A 360-Degree Model for Prioritizing Smart Cities Initiatives, with the Participation of Municipality Officials, Citizens and Experts. In *E-Participation in Smart Cities: Technologies and Models of Governance for Citizen Engagement*. Public Administration and Information Technology (pp. 123-153). Springer.
- Chaturvedi, K.; Yao, Z.; Kolbe, T. H. (2019) Integrated Management and Visualization of Static and Dynamics Properties of Semantic 3D City Models, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-4/W17, S. 7–14.
- Chew MY, Teo EA, Shah KW, Kumar V, Hussein GF (2020). Evaluating the roadmap of 5G technology implementation for smart building and facilities management in Singapore. *Sustainability*. 2020 Dec 8;12(24):10259.
- Cignoni, P., Callieri, M., Corsini, M., Dellepiane, M., Ganovelli, F., Ranzuglia, G. (2008). MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool, in *Sixth Eurographics Italian Chapter Conference*, pp. 129-136.
- C. R. Qi, H. Su, K. Mo, and L. J. Guibas (2017). PointNet: Deep learning on point sets for 3D classification and segmentation, in *Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 77-85.
- C. R. Qi, L. Yi, H. Su, and L. J. Guibas (2017). PointNet++: Deep hierarchical feature learning on point sets in a metric space, in *Neural Information Processing Systems*, pp. 5105-5114.
- DIN 91357:2017-12 (2017). Referenzarchitekturmodell Offene Urbane Plattform (OUP), Beuth-Verlag.
- Feng, Yutong and Feng, Yifan and You, Haoxuan and Zhao, Xibin and Gao, Yue (2019). Meshnet: Mesh neural network for 3d shape representation, in *Conference on Artificial Intelligence*, pp. 8279-8286.
- Foukas X, Patounas G, Elmokashfi A, Marina MK (2017). Network slicing in 5G: Survey and challenges. *IEEE communications magazine*. 2017 May 12;55(5):94-100.
- Foukas X, Patounas G, Elmokashfi A, Marina MK (2017). Network slicing in 5G: Survey and challenges. *IEEE communications magazine*. 2017 May 12;55(5):94-100.
- Fraunhofer IAO. (2020). KI-Toolbox für Versorgungsunternehmen: Modul Use Cases. Retrieved 12 27, 2022, from <https://www.kodis.iao.fraunhofer.de/de/ki-toolbox-fuer-versorgungsunternehmen/use-cases.html>
- Gianni, F. & Divitini, M. (2017). Designing IoT Applications for Smart Cities: extending the Tiles Ideation Toolkit. <https://www.semanticscholar.org/paper/Designing-IoT-Applications-for-Smart-Cities%3A-the-Gianni-Divitini/Od0791bdc42667e701b0a82e8531b7f0b6a65f41>
- Guedey, M. & Uckelmann, D. (2020). Exploring smart home and internet of things technologies for smart public buildings. In P. Davidsson & M. Langheinrich (Hrsg.), *Proceedings of the 10th International Conference on the Internet of Things* (S. 1–8). ACM. <https://doi.org/10.1145/3410992.3411009>
- Herion, L., Hunecke, C. & Uckelmann, D. (2020). LoRa-Technologie in der Logistik (Bd. 2020). https://www.researchgate.net/publication/344029964_LoRa-Technologie_in_der_Logistik
https://doi.org/10.30844/FS20-3_41-44
- Kohl, M., Malik, B., Lopitzsch, J., & Fottner, J. (2019, 12 20). Auswahl- und Priorisierungsmodell für Industrie 4.0-Use Cases in der Logistik. *Logistics Journal: Proceedings*, Vol. 2019, Iss. 12, pp. 1-13. doi:10.2195/lj_Proc_kohl_de_201912_01
- Minoli D, Occhiogrosso B. (2019). Practical aspects for the integration of 5G networks and IoT applications in smart cities environments. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2019 Aug 5.
- Moshrefzadeh, M.; Chaturvedi, K.; Hijazi, I.; Donaubauer, A.; Kolbe, T. H. (2017). Integrating and managing the information for smart sustainable districts – the Smart District Data Infrastructure (SDDI). In: Kolbe, T., Bill,

R. and Donaubaue, A. (Hrsg.): Geoinformationssysteme 2017 – Beiträge zur 4. Münchener GI-Runde, Wichmann Verlag, Heidelberg.

Mylonas, G., Amaxilatis, D., Tsampas, S., Pocero, L. & Gunneriusson, J. (2019). A Methodology for Saving Energy in Educational Buildings Using an IoT Infrastructure: 15-17 July 2019, Patras, Greece. IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=8893976> <https://doi.org/10.1109/IISA47616.2019>

Otto, R., Guedey, M., & Uckelmann, D. (2022). Developing User- and Technology-driven Use Cases for Smart City Applications. In Y. Xiao, A. Abraham, G. C. Peng, & J. Roth (Eds.), Proceedings of the IADIS International Conference Connected Smart Cities. 19 – 22 July 2022. (pp. 208-212). Lissabon, Portugal: IADIS - International Association for Development of the Information Society. doi:978-989-8704-42-9

Rothengaß, L. (2019). Generierung und Evaluierung dreidimensionaler Landschaftsmodelle für eine CFD-Windsimulation, *gis.science 2/2019*, Wichmann.

Ruohomäki, T.; Airaksinen, E.; Huuska, P.; Kesäniemi, O.; Martikka, M.; Suomisto, J. (2018). Smart City Platform Enabling Digital Twin. In: 2018 International Conference on Intelligent Systems (IS), Funchal - Madeira, Portugal, S. 155-161.

Singh, Vinit Veerendraveer and Sheshappanavar, Shivanand Venkanna and Kambhamettu, Chandra (2021). Mesh Classification with Dilated Mesh Convolutions, in International Conference on Image Processing, pp. 3138-3142.

Stamper, R. (1973). Information in business and administrative systems. New York, NY, United States: John Wiley & Sons, Inc. 605 Third Ave.

Stamper, R. (1996). Signs, Information, Norms and Systems. In B. Holmqvist, P. B. Andersen, H. Klein, & R. Posner (Eds.), Signs of Work: Semiosis and Information Processing in Organisations (pp. 349–397). Berlin: De Gruyter.

Ranzuglia, G., Callieri, M., Dellepiane, M., Cignoni, P., Scopigno, R. (2012). Efficient and Flexible Sampling with Blue Noise Properties of Triangular Meshes, in *Trans. on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 18, Num. 6, pp. 914-924.

Traboulsi, S. (2022). Overview of 5G-oriented Positioning Technology in Smart Cities. *Procedia Computer Science*, 201, 368-374. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.03.049>

Zhu, W.; Simons, A.; Wursthorn, S.; Nichersu, A. (2016). Integration of CityGML and Air Quality Spatio-Temporal Data Series via OGC SOS. In: Proceedings of the Geospatial Sensor Web Conference (GSW), Münster, Germany, S. 29-31.