

Band 21 der TOGI-Schriftenreihe schafft durch die Methode der Taxonomie und eine sich daran anschließende Analyse einen Orientierungsrahmen für die Auswahl von Sensoren in bürgergetriebenen Smart Cities. Im Fokus steht die Identifikation und Klassifikation von IoT-Sensor-Typen und deren Analyse in Anwendungsszenarien. Durch Handlungsempfehlungen wird Grundlagenarbeit zur Auswahl von IoT-Sensor-Typen im öffentlichen Raum geleistet. Durch aktive Bürgerbeteiligung und die Schaffung von Transparenz können Smart Cities so nachhaltiger gestaltet werden kann.

*Hintergrund:*

The Open Government Institute | TOGI ist an der Zeppelin Universität Friedrichshafen angesiedelt. Es setzt sich das Ziel, als Pionier wegweisende Ideen, Visionen, Strategien, Konzepte, Theorien, Modelle und Werkzeuge zum Einsatz moderner Informations- und Kommunikationstechnologien zu erarbeiten und diese mit Partnern zu realisieren.

Mit der vorliegenden Schriftenreihe des TOGI besteht ein interdisziplinärer Raum für Veröffentlichungen. Empirische Untersuchungen und Forschungsergebnisse sollen in Form von Monographien, Beiträgen, Vorträgen sowie Tagungs- und Konferenzergebnissen die Inhalte der Schriftenreihe sein und so direkt zum Wissenstransfer beitragen.

Informationen: <http://togi.zu.de>

ISSN 2193-8946

ISBN 978-3-752979-20-6

Mößle: Analyse und Klassifikation anwendungsorientierter IoT-Sensoren

# Analyse und Klassifikation anwendungsorientierter IoT-Sensoren in bürgergetriebenen Smart Cities am Beispiel der Stadt Ulm

Monographie am  
The Open Government Institute | TOGI  
der Zeppelin Universität

**zeppelin universität**

The  
Open Government Institute | TOGI

ZU | TOGI

Band 21 der Schriftenreihe des  
The Open Government Institute | TOGI  
der Zeppelin Universität Friedrichshafen

**zeppelin universität**

The Open Government Institute | TOGI



Jens Mößle

**Analyse und Klassifikation  
anwendungsorientierter IoT-Sensoren in  
bürgergetriebenen Smart Cities am  
Beispiel der Stadt Ulm**

**Monographie am  
The Open Government Institute | TOGI  
der Zeppelin Universität**

**TOGI Schriftenreihe - Band 21**

Schriftenreihe des  
The Open Government Institute | TOGI  
der Zeppelin Universität Friedrichshafen

# The Open Government Institute | TOGI

## TOGI Schriftenreihe

### Band 21

### Herausgeber von Band 21

Univ.-Prof. Dr. Jörn von Lucke  
TOGI | Zeppelin Universität, Friedrichshafen  
joern.vonlucke@zu.de

### Herausgeber der TOGI Schriftenreihe

Univ.-Prof. Dr. Jörn von Lucke  
TOGI | Zeppelin Universität, Friedrichshafen  
joern.vonlucke@zu.de

### Impressum



The Open Government Institute | TOGI  
Zeppelin Universität, Friedrichshafen 2020

Druck und Verlag: Neopubli GmbH, Berlin, <http://www.epubli.de>  
Holtzbrinck Publishing Group  
ISSN 2193-8946

## Vorwort

Sensoren sind technische Bauteile, die bestimmte physische oder chemische Eigenschaften qualitativ oder als Messgröße quantitativ erfassen und sie in eine digital weiterverarbeitbare Form umwandeln (Geisberger/Broy 2012, S. 139 und S. 255). Diese laufend generierten Daten können auf Nachfrage weitergeleitet werden. Ein Sensornetz ist ein System aus Sensorknoten, die entweder in einem infrastrukturbasierten oder einem sich selbst organisierenden Ad-hoc-Sensornetz zusammenarbeiten, um ihre Umgebung mittels Sensoren zu überwachen und die erfassten Daten, unter Umständen vorverarbeitet, weiterzuleiten (Geisberger/Broy 2012, S. 255). Sensoren unterschiedlichster Art befinden sich heute bereits in Smartphones, Tablets, Tischen, Videokameras, Geräten, Maschinen, Autos, Straßen, Häusern, Geschäften, Büros und Produktionsstraßen (Rifkin 2014b, S. 2). Sie sind elementarer Bestandteil von smarten Objekten und cyberphysischen Systemen. Technisch sind vielfältige Einsatzszenarien für Sensoren und ihre gebündelte Auswertung vorstellbar, insbesondere im öffentlichen Sektor und in smarten Städten (von Lucke 2015, S. 12).

Wie sieht es aber mit dem Datenschutz aus, wenn Sensoren automatisch Daten generieren und sie sich so als laufende Datenschleudern positionieren. Entwickler könnten auf dieser Basis Nutzungs- und Bewegungsprotokolle generieren. Freiwillige Selbstverpflichtungen der Anbieter, Sensoren und smarte Objekte datenschutzkonform (Privacy-by-default) zu gestalten und bei hoher Qualität IT-Sicherheit zu gewährleisten, überzeugen, solange kein Missbrauch erfolgt. Halten sich aber alle Akteure in einer smarten Welt an eine solche Vereinbarung? Der Gesetzgeber muss dann Regulierungsbedarf sehen, wenn Schaden entsteht oder inakzeptable Handlungen beobachtet werden. Was bedeutet dies langfristig für das Experimentierfeld der smarten Stadt?

Persönlich kenne ich Jens Mößle schon früh aus seinem Bachelor-Studium Politics, Administration & International Relations (PAIR) an der Zeppelin Universität in Friedrichshafen. Im Rahmen seines ersten Praktikums in der Zukunftsstadt Ulm 2018 brachte er zahlreiche Impulse ein, die mich und andere aufhorchen ließen. Auf meine Empfehlung hin machte er 2019 sein Auslandspraktikum in der benachbarten Vorarlberger Landeshauptstadt Bregenz, die zu dieser Zeit die Impulse zum Aufbau einer Smart Government Akademie Bodensee (<https://www.smartgov.eu>) setzte. 2019 ging es daran, sich Gedanken über eine passende Bachelor Thesis zu machen. Im Kontext der Zukunftsstadt Ulm sahen wir, dass noch nicht ausreichend Grundlagenarbeiten geleistet worden waren. Zwar wurde mit den Bürgern viel über Open Government und Smart City gesprochen. Aber eigentlich ging es immer sehr schnell und pragmatisch los mit dem „Einfach mal

machen!“. Datenschutz spielt in allen Erprobungsräumen eine wichtige Rolle. Dennoch gab es bisher noch keine Übersicht, welche der Sensoren, Aktoren, smarten Objekte und cyberphysischen Systeme in der Testfeldern datenschutzkonform sind und welche nicht. Uns allen war aber bewusst, dass in einem Smartphone mehr als 15 Sensoren eingebaut sind und unsere Freunde aus Amerika, Russland und China in der Lage sind, die Datenströme dieser Sensoren auch auszuwerten. Also schlug ich im Juni 2019 Jens Mößle vor, einmal zu analysieren, wie es mit der Datenschutzkonformität von Sensoren in smarten Städten derzeit aussieht. Damit würde er der Wissenschaft, der Stadt Ulm und vielen anderen Städten eine wertvolle Grundlage geben, wenn es um den künftigen Einsatz von Sensoren in Smart Cities gehen wird. Heute freut es mich, nach Vorlage der sehr guten Abschlussarbeit und der mündlichen Prüfung, die Arbeit als 21. Band in der TOGI-Schriftenreihe veröffentlichen zu dürfen.

Die vorgelegte Bachelorarbeit ist das Ergebnis einer intensiven Auseinandersetzung mit Sensoren und Sensortypen im Kontext smarterer Städte und in der Zukunftsstadt Ulm. Trotz intensiver Auseinandersetzung mit Sensoren lag aus unserer Sicht bisher noch keine systematische Aufbereitung einer Taxonomie vor. Jens Mößle hat sich im Sommer und Herbst 2019 sehr intensiv mit Sensortechnologien und ihren Anwendungsmöglichkeiten in intelligent vernetzten Städten auseinandergesetzt. Mit dieser Arbeit erreichte er im Juli 2020 beim studentischen Wettbewerb „Nachhaltigkeit staatlichen Handelns“ der arf GmbH den 3. Platz des „Dr. Horst Körner-Preises“. Nicht nur für die Jury, sondern für alle interessierten Leser beinhaltet diese Abschlussarbeit zahlreiche Denkanstöße. Zugleich erhöht sich der Wunsch nach praktischer Umsetzung von datenschutzkonformen Sensoren. In der Tat erzeugt das vorgelegte Werk so echte Mehrwerte, die es im Sinne eines Wissenstransfers nun rasch in die Breite zu bringen gilt.

Friedrichshafen, der 23. Juli 2020

Jörn von Lucke

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	5
Inhaltsverzeichnis .....	7
Abbildungsverzeichnis .....	9
Tabellenverzeichnis .....	10
Abkürzungsverzeichnis .....	11
Zusammenfassung .....	13
1 Thematische Einführung.....	14
1.1 Problemstellung und Relevanz.....	14
1.2 Methodik.....	15
1.3 Aufbau der Arbeit .....	16
2 Theoretische Grundlage .....	17
2.1 Das Konzept Smart City.....	17
2.2 Urbane Datenplattform .....	18
2.3 Sensorik .....	20
2.4 Internet of Things.....	21
2.5 LoRaWAN .....	22
2.6 Datenschutz .....	23
2.7 Datensicherheit .....	24
3 Klassifikationsschema für Sensoren.....	25
3.1 Methodisches Vorgehen .....	25
3.2 Taxonomie-Entwicklung.....	27
3.3 Einordnung der Bedeutung von Sensoren in einer Smart City....	34



4	IoT-Sensor-Typen für Smart City Anwendungen .....	36
4.1	IoT-Sensoren .....	36
4.2	Taxonomie von IoT-Sensor-Typen.....	37
4.3	Analyse relevanter Sensor-Typen für Smart City-Anwendungen	39
4.3.1	Akustik-Sensoren .....	39
4.3.2	Optik-Sensoren .....	40
4.3.3	Thermo-Sensoren .....	42
4.3.4	Bewegungs-Sensoren .....	43
4.3.5	Umwelt-Sensoren .....	46
4.4	Anwendungsszenarien .....	48
4.4.1	Smarte Versorgungsinfrastruktur .....	48
4.4.2	Smarte Klimaüberwachung .....	50
4.4.3	Smart Urban Planning.....	51
5	Anwendungsfälle am Beispiel der Stadt Ulm.....	53
5.1	Smart City Ulm.....	53
5.2	Handlungsfelder und Anwendungsfälle der Stadt Ulm .....	55
5.2.1	Intelligente Abfallbehälter.....	55
5.2.2	Urban Gardening .....	57
5.2.3	Luftqualitätsmessung .....	58
6	Diskussion und Handlungsempfehlungen .....	59
6.1	Handlungsempfehlungen.....	59
6.2	Impulse für die Umsetzung.....	62
7	Abschließende Bewertung und Limitation .....	63
8	Fazit und Ausblick.....	64
	Anhang .....	65
	Literaturverzeichnis .....	78

## **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Systematisches Vorgehensmodell zur Taxonomie-Entwicklung .....	27
Abbildung 2: Iteration 1.....	31
Abbildung 3: Iteration 2.....	32
Abbildung 4 Iteration 3.....	33
Abbildung 5: Smart City-Architekturmodell aus Perspektive der Sensorik	34
Abbildung 6: Bildsprache zur Kennzeichnung von IoT-Sensoren.....	61

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Am Markt verfügbare IoT-Sensor-Typen für Smart Cities .....	30
Tabelle 2: Taxonomie von IoT-Sensor-Typen für Smart Cities .....	38
Tabelle 3: Bewertung - Intelligente Abfallbehälter .....	56
Tabelle 4: Bewertung - Urban Gardening.....	57
Tabelle 5: Bewertung - Luftqualitätsmessung .....	58

## Abkürzungsverzeichnis

3G	Dritte Generation drahtloser Mobilfunktechnologie
5G	Fünfte Generation drahtloser Mobilfunktechnologie
ACM	Association for Computing Machinery
AMCIS	Americas Conference on Information Systems
API	Application Programming Interface (Programmierschnittstelle)
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung
BITKOM	Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V.
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMI	Bundesministerium des Innern
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
CPS	Cyberphysische Systeme
DIN e.V.	Deutsches Institut für Normierung e.V.
DIN SPEC	Deutsches Institut für Normierung, Spezifikation
DKE	Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE
DSGVO	Datenschutz-Grundverordnung der EU
EU	Europäische Union
FOKUS	Fraunhofer-Institut für Offene Kommunikationssysteme
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
IAIS	Fraunhofer-Institut für Intelligente Analyse- und Informationssysteme
ICST	Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering
IdD	Internet der Dinge
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
IML	Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik
IoT	Internet of Things

IT	Informationstechnik
KI	Künstliche Intelligenz
LoRa Alliance	Organisation zur Förderung und Standardisierung der Long Range Wide Area Network Technologien im Rahmen der Low-Power Wide Area Networks
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LPWAN	Low-Power Wide Area Network
LTE	Long Term Evolution
NEDO	New Energy and Industrial Technology Development Organization
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
OUP	Offene Urbane Plattform
RFID	Radio-Frequency-Identification
TOGI	The Open Government Institute
UDP	Urban Data Plattform (Urbane Datenplattform)
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
WIFI	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network
ZigBee	Kommunikationsstandard für drahtlose Netzwerke mit geringem Datenaufkommen

## **Zusammenfassung**

Deutsche Kommunen stehen vor den Herausforderungen der Transformation ins digitale Zeitalter und müssen zentrale Rahmenbedingungen für eine ganzheitliche, digitale Stadtentwicklung schaffen. Dabei stehen Sensoren im Zentrum der intelligent vernetzten Stadt von Morgen.

Diese Arbeit schafft durch die Methode der Taxonomie und eine daran anschließende Analyse einen Orientierungsrahmen für die Auswahl von Sensoren in bürgergetriebenen Smart Cities. Im Mittelpunkt der Untersuchung steht die Identifikation und Klassifikation von IoT-Sensor-Typen und die Analyse dieser an Anwendungsszenarien. Durch abschließend abgeleitete, zentrale Handlungsempfehlungen leistet die Arbeit die Grundlage für die Auswahl von IoT-Sensor-Typen im öffentlichen Raum, die durch aktive Bürgerbeteiligung und die Schaffung von Transparenz nachhaltig positiv gestaltet werden kann.

## **Abstract**

German municipalities are facing the challenges of transformation into the digital age and must create central framework conditions for a comprehensive, digital urban development. Sensors are at the heart of the smart cities of tomorrow.

Through the method of taxonomy and a subsequent analysis, this work creates an orientation framework for the selection of sensors in citizen-driven smart cities. The study focuses on the identification and classification of IoT sensor types and their analysis in application scenarios. By finally deriving central recommendations for action, the work provides the basis for the selection of IoT sensor types in public spaces, which can be positively shaped through active citizen participation and the creation of transparency.

# 1 Thematische Einführung

## 1.1 Problemstellung und Relevanz

Die digitale Transformation macht auch vor Städten, Kommunen und Landkreisen nicht halt: Im Zeitalter des Internet der Dinge und Dienste und der cyberphysischen Systeme sind zunehmend mehr deutsche Städte auf dem Weg zur „Smart City“ und schließen sich somit dem globalen Trend an.

Zugleich stehen die Kommunen in den nächsten Jahren vor großen Herausforderungen (Kaczorowski 2014, S. 37-45). Nicht nur die Auswirkungen des demografischen Wandels und die Notwendigkeit einer nachhaltigen Entwicklung der Kommunen erfordern eine Anpassung der Rahmenbedingungen, um gesamtheitliche Lösungen für die Stadt von Morgen zu schaffen. Zentrale Zukunftsaufgabe der Kommunen ist neben der Integration und urbaner Mobilität vor allem die Digitalisierung (Deutsches Institut für Urbanistik (Difu) 2019). Dass die digitale Transformation in den Kommunen und die Entwicklung zu einer Smart City auch Potentiale zur Lösung der kommunalen Herausforderung ermöglichen, haben die im BITKOM Smart City Atlas<sup>1</sup> erfassten deutschen Städte und Kommunen bereits erkannt. Um die Potentiale einer Smart City vollumfänglich entwickeln zu können, muss die bestehende städtische IT-Infrastruktur um eine urbane Datenplattform zur Verknüpfung von Daten-Silos und Anbindung von IoT-Sensordaten erweitert werden. Intelligent vernetzte Objekte wie Sensoren oder Aktoren bilden den Mittelpunkt einer intelligent vernetzten Stadt und sind Grundlage für die Vernetzung von realen Objekten mit dem Internet der Dinge und Dienste (vgl. von Lucke 2015, S. 11 f.).

Einige Städte, darunter auch die Stadt Ulm, haben bereits frühzeitig mit der Entwicklung ihrer umfassenden Digitalisierungsvorhaben begonnen und stehen nun vor der Umsetzung konkreter Anwendungen. Dafür sollen erste IoT-Sensoren ausgewählt und installiert werden. Bereits heute können eine Vielzahl von IoT-Sensoren für Smart Cities über Online Marktplätze oder direkt bei Herstellern bezogen werden. Beispiele sind Füllstandssensoren, Bewegungssensoren oder Geräuschpegelsensoren. Zum Zeitpunkt dieser Arbeit fehlt in der Literatur jedoch eine systematische Erfassung, Klassifikation und Analyse von am Markt verfügbaren IoT-Sensor-Typen für Smart Cities, um einen Orientierungsrahmen für die Auswahl von Sensoren zu geben. Diese Arbeit stellt deshalb eine besondere Relevanz für kommunale

---

<sup>1</sup> Der Bitkom Smart City Atlas fasst 50 Städten und Kommunen hinsichtlich ihrer Aktivitäten sowie den aktuellen Stand der Digitalisierungs- und Smart City-Prozesse zusammen. <https://www.bitkom.org/sites/default/files/2019-03/190318-Smart-City-Atlas.pdf>.

Entscheider,<sup>2</sup> sowohl Führungskräfte als auch demokratisch gewählte Vertreter der Bürgerschaft, für an Umsetzungsprojekten beteiligte Mitarbeiter sowie auch für interessierte Bürger dar und ist Grundlage für die zukünftige Auswahl von IoT-Sensor-Typen. Im Vordergrund dieser Arbeit steht der Erkenntnisgewinn. Daraus ergibt sich für diese Arbeit folgende Forschungsfrage:

Wie können am Markt verfügbare IoT-Sensor-Typen anwendungsorientiert klassifiziert werden und welche Anwendungsszenarien ergeben sich dafür für bürgergetriebene Smart Cities?

Diese Arbeit sucht nach Handlungsempfehlungen und einem Orientierungsrahmen bei der Auswahl von IoT-Sensor-Typen für Anwendungsszenarien im öffentlichen Raum. Das Verständnis einer bürgergetriebenen<sup>3</sup> Smart City in dieser Arbeit orientiert sich dabei an der Monographie von Beinrott (2015). Darin analysiert die Autorin den Gestaltungsrahmen einer bürgerorientierten Smart City und unterscheidet zwischen der technologisch-orientierten und der bürgerorientierten Smart City, in der Lösungen von Alltagsproblemen der Bürger im Mittelpunkt stehen. Der bürgerorientierte Ansatz verfolgt die partnerschaftliche Zusammenarbeit in Form von Beteiligungsprozessen und setzt auf Transparenz und Vertrauen gegenüber den Bürgern und deren Bedürfnissen (Beinrott 2015, S. 87 f.). Diese Arbeit teilt das Verständnis eines ganzheitlichen Ansatzes einer Smart City, das aus der Definition von Dameri (2013) hervorgeht. (s. Kapitel 2.1)

## 1.2 Methodik

Im Zentrum dieser Arbeit steht die Klassifikation und Analyse anwendungsorientierter IoT-Sensor-Typen für bürgergetriebene Smart Cities. Aus der Problemstellung und Relevanz dieser Arbeit geht hervor, dass die Forschung zu IoT-Sensorik in Smart Cities zum jetzigen Zeitpunkt noch am Anfang steht, wobei der Bedarf nach einem Orientierungsrahmen für die Auswahl von Sensoren aus der kommunalen Praxis gleichzeitig groß ist. Eine Literaturrecherche bildet die theoretische Grundlage und zeigt den zugrundeliegenden Stand der Technik dieser qualitativen Arbeit auf. Die Reduktion der Komplexität ermöglicht ein gemeinsames Verständnis der dieser Arbeit zugrundeliegenden umfangreichen Thematik. Den Schwerpunkt dieser Arbeit bilden die Entwicklung und Anwendung der Methodik

---

<sup>2</sup> In der vorliegenden Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit ausschließlich das generische Maskulinum verwendet. Diese bezieht stets weibliche oder anderweitige Geschlechteridentitäten mit ein. Andernfalls wird dies ausdrücklich erwähnt.

<sup>3</sup> Der Begriff ‚bürgergetrieben‘ meint in dieser Arbeit das Bottom-Up-Prinzip als Herangehensweise für die Umsetzung einer Smart City (Entwicklung aus der Bürgerschaft heraus), während der bürgerorientierte Ansatz als ein Teil einer bürgergetriebenen Stadt verstanden wird und die Bedürfnisse der Bürger in den Mittelpunkt stellt.



zur Taxonomie-Entwicklung von IoT-Sensor-Typen nach Bailey (1994) sowie die sich daran anschließende Analyse. In die Methodik der Taxonomie wird in Kapitel 3 gesondert eingeführt.

### **1.3 Aufbau der Arbeit**

Im Anschluss an die thematische Einführung sollen in Kapitel 2 die theoretische Grundlage geschaffen und zentrale Begriffe und Konzepte definiert werden, um die Thematik in seiner Komplexität in dieser Arbeit einzuordnen und Grundlage für die spätere Taxonomie und Analyse zu schaffen. Kapitel 3 führt zunächst in die Methodik ein, leitet dann über in die Taxonomie-Entwicklung und folgt Schritt-für-Schritt dem systematischen Vorgehensmodell, bevor dann das Kapitel mit der Einordnung von IoT-Sensoren in die Smart City abschließt. Aufbauend auf der entwickelten Taxonomie analysiert Kapitel 4 anschließend die identifizierten IoT-Sensor-Typen. An zwei konkreten Anwendungsszenarien sowie einem visionären Leitbild von Smart Urban Planning werden dann Potentiale skizziert. Die Arbeit gibt in Kapitel 5 zunächst einen Überblick über die Smart City Ulm, bevor die Taxonomie und Analyse an realen Anwendungsfällen gespiegelt wird. Auf Basis des theoretischen Hintergrunds und den Ergebnissen dieser Arbeit, werden in Kapitel 6 Handlungsempfehlungen und Impulse für die Umsetzung gegeben, ehe Kapitel 7 in einer abschließenden Bewertung diese Arbeit abrundet und Kapitel 8 mit einem Fazit und Ausblick abschließt.

## 2 Theoretische Grundlage

### 2.1 Das Konzept Smart City

Das Konzept, beziehungsweise der Begriff „Smart City“, ist zunächst ein Sammelbegriff, der Ansätze oder Entwicklungsdimensionen eines gesamtgesellschaftlichen, digitalen Stadtentwicklungskonzeptes zusammenfasst. Dennoch gibt es bis heute keine einheitliche, scharfe Definition für das Konzept Smart City, weshalb Interpretationsspielraum in der Schwerpunktsetzung der Dimensionen offenbleibt (Cocchia 2014, S. 14 f.; Anthopoulos 2017, S. 7 ff.; Caragliu, Del Bo, & Nijkamp 2011, S. 76 f.).

Cocchia (2014, S. 25-28) erforscht in einer systematischen Literaturanalyse, dass der Begriff „Smart City“ erstmals 1994 in wissenschaftlichen Publikationen verwendet wurde. Seit dem Jahr 2010 sei durch größeres Interesse und Aufmerksamkeit ein exponentieller Anstieg an Publikationen zu Smart City zu verzeichnen. Die Konzepte, die unter dem Begriff „Smart City“ oder „Digital City“ verstanden werden, umfassen heterogene Perspektiven und Dimensionen (Cocchia 2014; Kaczorowski 2014).

Kaczorowski (2014, S. 22 f.) erschließt die politische Dimension, gesellschaftliche Dimension, technologische Dimension, stadtplanerische Dimension und wirtschaftliche Dimension einer Smart City. Eine Smart City wird dabei sowohl aus Perspektive von Unternehmen, die vor allem den neuen Absatzmarkt sehen, als auch aus Perspektive des öffentlichen Sektors, der nach neuen Lösungen und einem ökonomischen wie ökologischen Nutzenpotential sucht, getrieben (vgl. Müller-Seitz, Seiter, & Wenz 2016, S. 4).

Anthopoulos (2017) analysiert unterschiedliche Ansätze und Konzepte aus der Wissenschaft, Praxis und reale Best Practice internationaler Städte zur Definition von Smart City und deren Schwerpunktsetzung, um diese anschließend zu klassifizieren. Aus seiner Analyse ergeben sich acht, durch Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) untereinander vernetzte und eingebetteten Komponenten.<sup>4</sup> Die folgende Definition von Dameri (2013) trägt zum Verständnis des Begriffs Smart City in dieser Arbeit bei:

„A smart city is a well defined geographical area, in which high technologies such as ICT, logistic, energy production, and so on, cooperate to create benefits for citizens in terms of well being, inclusion and participation, environmental quality, intelligent development; it

---

<sup>4</sup> Smart Infrastructure, Smart Transportation, Smart Environment, Smart Services, Smart Governance, Smart People, Smart Living, Smart Economy (Anthopoulos, 2017, S. 8-13).

is governed by a well defined pool of subjects, able to state the rules and policy for the city government and development.” (Dameri 2013, S. 2549).

Kaczorowski (2014) identifiziert sechs Handlungsfelder einer Smart City, die ihre Potentiale und Dynamik erst durch systematisch vernetzte IKT entfalten können.<sup>5</sup> Das Problem der unscharfen Begriffsdefinition wurde vom DIN e.V. und VDE zum Anlass genommen, gemeinsam mit internationalen Experten an einer Normierungsroadmap Smart City zu arbeiten, um durch das Entwickeln von Standards mehr Sicherheit zu bieten und die Vision der Smart City inkrementell zu realisieren (DIN Deutsches Institut für Normierung e.V. & DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE 2015). Ebenfalls hat das DIN ein Impulspapier zu Normen und Standards auf den Weg gebracht (DIN Deutsches Institut für Normierung e.V. 2017b).

Die im Jahr 2017 veröffentlichte Smart City Charta, die an deutsche Kommunen und Kreise gerichtet ist, soll zentrale Leitlinien zur strategischen Entwicklung einer Smart City im Rahmen nachhaltiger, integrierter Stadtentwicklung geben. Gleichzeitig definiert diese ein normatives Wertebild einer intelligenten, zukunftsorientierten Kommune (Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung (BBSR) & Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) 2017).

Nach Kaczorowski (2014) gibt es aber auch berechtigte Kritik am Konzept Smart City, die sich jedoch vor allem auf die Dominanz profitorientierter Technologiekonzerne, nicht ausreichendem Datenschutz und Datensicherheit sowie der Gefahr eines Ausfalls oder Störung von kommunaler Kerninfrastruktur durch smarte Steuerung, bezieht (ebd., S. 205-210). Zukünftig müssen diese Themen bereits bei der Strategieentwicklung berücksichtigt werden.

## 2.2 Urbane Datenplattform

Urbane Datenplattformen (UDP) stellen eine kommunale Basisinfrastruktur zur vollumfänglichen Nutzbarmachung der Potentiale einer Smart City im Rahmen der digitalen Transformation von Kommunen dar und nehmen deshalb die zentrale Rolle als Ermöglicher neuer, digitaler Services ein.

UDP verknüpfen und harmonisieren durch standardisierte Schnittstellen kommunale Datenschätze<sup>6</sup> die in Form von diversen Datenarten in Daten-

---

<sup>5</sup> „Smarte Verwaltung und Politik“, „Smarte Bildung“, „Smarte Wertschöpfung“, „Smarte Mobilität“, „Smartest Leben“, „Smarte Energie und Umwelt“ (Kaczorowski, 2014, S. 67-70).

<sup>6</sup> Zum Zeitpunkt dieser Arbeit gibt es noch keine scharfe Definition des Begriffs „Datenschatz“. In dieser Arbeit werden unter Datenschätze ungeordnete, unüberschaubare

silos vorliegen. Gleichzeitig bildet die UDP durch standardisierte Schnittstellen einen ‚Hafen‘ zur Integration von IoT-Sensordaten und Sensornetzwerke der Smart City. Auf dieser Datenbasis lassen sich kommunale Datenschätze dank intelligenter Analysen nutzbar machen und beispielsweise zur Überwachung und Kontrolle von Infrastruktur für öffentliche oder private Zwecke öffnen (DIN e.V. 2017a).

Offene Urbane Plattformen (OUP) stellen offene Programmierschnittstellen (offene APIs) zur Integration, zum Austausch und zur Interoperabilität zwischen mehreren Schichten für Kommunikation und Verarbeitung von Daten und Informationen bereit (Fraunhofer FOKUS, Fraunhofer IAIS, & Fraunhofer IML 2018, S. 52). Diese OUP sind in der DIN SPEC 91357 in Form eines Referenzarchitekturmodells definiert und formen Leitlinien bei der Umsetzung von offenen Plattformen (DIN e.V. 2017a). Das Grundprinzip hinter OUP ist die öffentliche Nutzarmachung von Datenschätzen. Stakeholder von UDP oder OUP lassen sich Fraunhofer FOKUS folgend in drei Akteursgruppen einteilen: strukturelle Akteure, unterstützende Akteure und mitwirkende Akteure, wobei letztere für bürgergetriebene Smart Cities relevant sind (vgl. Fraunhofer FOKUS et al. 2018, S. 35).

Der urbane Datenraum bezieht sich auf die zugrundeliegende Datenbasis als Teil der Smart City, der „... alle Arten von Daten enthält, die für den kommunalen Gemeinschafts-, Wirtschafts- und Politikraum relevant sein können.“ (Fraunhofer FOKUS et al. 2018, S. 30). Auf dieser Datenbasis können dann weitere, sektorenübergreifende Dienste und Applikationen der Smart City aufgebaut und digitale oder analoge Mehrwerte generiert werden. Fraunhofer IAO untersuchte 2017 den sehr dynamischen und schnell wachsenden Markt von IoT-Plattform-Anbietern anhand eines Referenzmodells für IoT-Plattformen. Ergebnis ist eine objektive Übersicht über 24 relevante Anbieter von IoT-Plattformen in Deutschland, darunter bekannte Software- und Telekommunikations-unternehmen wie SAP, IBM, Deutsche Telekom, Oracle, als auch über deren Plattform-Funktionalitäten (Krause et al. 2017).

Im europäischen Kontext ist vor allem die im Rahmen eines EU-Projektes entwickelte Open-Source-Plattform Fiware<sup>7</sup> erwähnenswert. Auf Basis von UDP lassen sich in Dashboards Echtzeitdaten von IoT-Sensoren oder verknüpfte Datenschätze analysieren und in Form von Anwendungsszenarien visualisieren. Kaczorowski (2014, S. 179) verwendet den Begriff „City Cockpit“ bzw. „Smart City Cockpit“ für ein Dashboard, das einen ganzheitlichen Überblick über den Zustand der Stadt liefert.

---

digitalisierte Informationen aus unterschiedlichen Quellen verstanden, die im Sinne von Big Data durch eine intelligente Verknüpfung und Analyse zur Nutzung zunächst veredelt werden müssen.

<sup>7</sup> Fiware: <https://www.fiware.org>.

Als internationales Best Practice gilt das Londoner City Cockpit.<sup>8</sup> Dort lassen sich in Echtzeit Umwelt- und Klimadaten, aber auch Verkehrsdaten und der Status zur Verfügbarkeit von Leihrädern abrufen. Gleichzeitig werden dort leicht zeitverzögert Live-Cams aus dem Straßenverkehr angezeigt, was im Kontext des Datenschutzes diskussionswürdig ist. Bad Hersfeld gilt als einer der deutschen Vorreiterstädte und hat frühzeitig gemeinsam mit dem Urban Institut<sup>9</sup> das „UrbanCockpit“ Bad Hersfeld<sup>10</sup> umgesetzt, ein Dashboard zur Visualisierung und Bereitstellung von IoT-Sensordaten, wobei aktuell noch keine tatsächlich ‚smarten‘ Anwendungen auf Basis dieser Plattform entwickelt wurden.

Zukünftig sind im Bereich von Datenplattformen / IoT-Plattformen die Entwicklung beziehungsweise die Definition gemeinsamer Standards entscheidend. Besonders notwendig ist die Definition von einheitlichen, offenen Schnittstellen zur Anbindung von Daten und IoT-Sensoren. Erste Standards für die IKT auf kommunaler Ebene sind bereits definiert (Fraunhofer FOKUS et al. 2018, S. 50).

### 2.3 Sensorik

Der Begriff des Sensors oder der Sensorsysteme ist bis heute in der Praxis leider „aufgrund mangelnder Präzision der Sinnggebung“ nicht scharf definiert (Adam, Busch, & Nickolay 1997, S. 7). Auch im Deutschen gibt es keine einheitliche Deutung des aus den USA stammenden Begriffs, jedoch scheint die beste Übersetzung „(Mess-)Fühler“ zu sein (Adam et al. 1997, S. 7 f.).

Adam et al. (ebd., S. 8) skizzieren vor dem Hintergrund bestehender Definitionsversuche eine zusammenfassende Definition: „Sensoren sind geräte-technische Einheiten, die physikalische oder chemische Zustände oder deren zeitliche beziehungsweise räumliche Veränderung erfassen und in ein verarbeitbares Signal umwandeln.“ (ebd., S. 8).

Sensoren liefern in spezifischen Anwendungsszenarien Daten und melden Zustände wie beispielsweise Temperatur, Feuchtigkeit, Druck, Licht oder Beschleunigung. Durch die Analyse dieser Daten kann neues Wissen entstehen. Somit lassen sich neue Datenschätze erschließen. Unzählig viele, teils technologisch hochspezialisierte Sensoren stehen heute unterschiedlichen Kriterien zur Klassifizierung gegenüber. So können Sensoren unter anderem nach deren physikalischen oder chemischen Transduktionsprinzipien, nach Anwendungen, nach Messgrößen, nach Präzision, nach Kosten et cetera klassifiziert werden (Grandke & Hesse 1989, S. 8-11).

---

<sup>8</sup> CityDashboard London: <http://citydashboard.org/london/>.

<sup>9</sup> [ui!]: <https://www.ui.city/de/>.

<sup>10</sup> Urban Cockpit Bad Hersfeld: <https://badhersfeld.urbanpulse.de>.

Sensoren bieten neben der Industrie und Automatisierungstechnik auch in der digitalen Stadtentwicklung enorme Potentiale, um die urbanen Herausforderungen zu lösen und neue, digitale Services sowohl für Bürger als auch für Kommunen und städtische Unternehmen zu schaffen. Intelligent vernetzte Sensoren und Sensordaten bilden dafür neben einer UDP die Basisinfrastruktur für neue Anwendungen. Diese Arbeit legt den Fokus auf aufwendungsorientierte, intelligent vernetzte IoT-Sensor-Typen. Anwendungsorientiert meint in diesem Zusammenhang, dass Sensoren am Markt verfügbar sein müssen, was hochspezialisierte Industrie-Sensoren ausschließt. Ebenso sind die Zertifizierung und Eichung der Sensoren im Zusammenhang dieser Arbeit nicht relevant.

## 2.4 Internet of Things

Der Begriff Internet of Things (IoT), im Deutschen Internet der Dinge (IdD), ist zunächst ein Sammelbegriff für die Technologie, die hinter der drahtlosen Vernetzung und Kommunikation zwischen intelligenten Objekten und Systemen steckt. IoT kann verkürzt auch als das Konzept hinter der Vernetzung der Gesellschaft mit dem Internet beschrieben werden (Kuma 2017, S. 4).

Sensoren, die mit Netzwerken verbunden sind, bilden das Fundament des IoT (Bunz & Meikle 2018, S. 11). Das Internet der Dinge bildet dabei die Schnittmenge aus drei unterschiedlichen Visionen: die Dinge orientierte Vision, die Internet orientierte Vision sowie die Semantik orientierte Vision (vgl. Atzori, Iera, & Morabito 2010, S. 2789). IoT hat das Potential, durch die Realisierung der Vision „Anytime, Anywhere, Anything“, die Art, wie wir heute leben grundlegend zu verändern, indem die Kommunikation zwischen intelligent vernetzten Objekten ermöglicht wird (Atzori et al. 2010, S. 2803).

Für die Anbindung an das Internet der Dinge und die Kommunikation zwischen unterschiedlichen vernetzten Objekten und Systemen nehmen drahtlose Kommunikationsservices in Form von Netzwerkprotokollen eine Schlüsselrolle ein (Gaur, Scotney, Parr, & McClean 2015).

Bereits heute stehen in einigen Städten eine Vielzahl von Datennetzwerken für unterschiedliche Anwendungen von IoT-Sensoren zur Auswahl. Beispiele sind GSM, UMTS, LTE, 5G über das Mobilfunknetz, WiFi, Bluetooth, ZigBee zur Kurzstreckenkommunikation sowie Low-Power Wide-Area Network (LPWAN) wie LoRaWAN und SigFox (Barillaro et al. 2019; Du, Santi, Xiao, Vasilakos, & Fischione 2019; Gaur et al. 2015; Smart City Solutions GmbH 2019).

Im Kontext der Smart City kann die Bedeutung von IoT durch konkrete Anwendungsbeispiele wie ganzheitliche Stadtplanung, Verbesserung des öffentlichen Personennahverkehrs oder die Sicherheit der Städte untermauert werden (vgl. Kazmi, Serrano, & Lenis 2019, S. 58).

Die zukünftige Herausforderung für IoT in Smart Cities liegt in der Integration, Steuerung und Bereitstellung von heterogenen IoT-Systemen und deren Daten, die bisher nicht interoperabel nutzbar sind (Kazmi et al. 2019). Fehlende, einheitliche Kommunikationsstandards für IoT-Sensoren stellen ebenfalls ein Hemmnis bei der Umsetzung dar.

## 2.5 LoRaWAN

LoRaWAN bezeichnet ein Low Power Wide Area Wireless-Netzprotokoll (LPWAN), das für die bidirektionale, drahtlose Kommunikation von batteriebetriebenen Dingen und Systemen mit dem Internet entwickelt wurde und damit die Anforderungen des IoT erfüllt (Barillaro et al. 2019; vgl. LoRa Alliance 2019b).

Von der LoRa Alliance werden die LoRaWAN Spezifikationen zur Interoperabilität festgelegt. Die LoRa Alliance wurde im Jahr 2015 von namhaften Konzernen, unter anderem IBM, Cisco und Swisscom, gegründet um den nachhaltigen Erfolg des LoRaWAN-Protokolls als führenden, offenen und globalen Standard für IoT zu sichern und gleichzeitig die Interoperabilität aller LoRaWAN-Produkte und Technologien zu gewährleisten (LoRa Alliance 2019a).

Die Vorteile von LoRaWAN als Netzwerkprotokoll für die Kommunikation zwischen IoT-Sensoren sind besonders im Smart City-Kontext relevant. Neben einer sehr großen Funkreichweite, bei einer gleichzeitig geringen Anzahl nötiger Gateways, ist besonders der geringe Energieverbrauch batteriebetriebener LoRaWAN Sensoren mit einer Lebensdauer zwischen 5 – 10 Jahren im Betrieb ausschlaggebend. Geringe Kosten, eine hohe Skalierbarkeit sowie hohe Sicherheit von LoRaWAN sind für Kommunen oftmals maßgebende Entscheidungsfaktoren bei der Auswahl von Netzwerkprotokollen oder IoT-Sensoren. Gleichzeitig lassen sich jedoch nur geringe Datenmengen und Datengrößen über LoRaWAN übermitteln. Für große Datenmengen oder Echtzeitanforderungen sollte deshalb ein anderes Netzwerkprotokoll gewählt werden (The Things Network 2019).

Immer mehr deutsche Städte wie beispielsweise Darmstadt, Karlsruhe, München oder Hamburg haben deshalb ein LoRaWAN-Netzwerk zur Kommunikation mit IoT-Sensoren aufgebaut. Auch in der Stadt Ulm wird seit 2016 auf LoRaWAN als Basisinfrastruktur für IoT-Sensoren gesetzt. Die „initiative.ulm.digital e.V.“ hat zusammen mit der „The Things Network“

Gruppe Ulm professionelle LoRa-Gateways installiert, die eine vollständige Netzabdeckung sowohl in der Innenstadt, als auch über die Stadtgrenzen hinaus gewährleisten (vgl. initiative.ulm.digital e.V. 2019).

## 2.6 Datenschutz

Die Bedeutung des Datenschutzes ist in den letzten Jahren durch die Digitalisierung gewachsen, insbesondere durch die Potentiale von künstlicher Intelligenz (KI). Datenschutz nimmt bei der Entwicklung von Smart Cities eine erfolgsentscheidende Rolle ein, schließlich dringen neue Technologien in Form von Sensoren in den schützenswerten Lebensalltag aller Bürger ein. Folglich stellt der Datenschutz in dieser Arbeit, besonders bei der Taxonomie von IoT-Sensor-Typen und den Handlungsempfehlungen für die Auswahl von Sensoren, ein zentrales Thema dar. Seit dem Inkrafttreten der Europäischen Datenschutz-Grundverordnung im Mai 2018 ist die Erfassung und Verarbeitung personenbezogener Daten in Art. 4 und Art. 5 DSGVO geregelt. Entsprechend müssen alle Aktivitäten im Kontext der Smart City DSGVO-konform sein.

Eine zentrale Anforderung beim Datenschutz ist die Anonymisierung (Randomisierung und Verallgemeinerung) und Pseudonymisierung von Daten (Voigt & von dem Bussche 2018, S. 13-19), welche im Kontext von Smart City-Anwendungen, wie beispielsweise Smart Metering oder Smart Parking, jedoch an Grenzen stoßen kann, schließlich werden dort teilweise zwangsläufig personenbezogene Daten benötigt (vgl. Kaczorowski 2017, S. 15 f.).

Generell besteht eine Gefahr darin, dass zentrale Technologien einer Smart City zu einem späteren Zeitpunkt für andere Zwecke missbraucht werden könnten als zum Zeitpunkt der Entwicklung angedacht (vgl. Sadowski & Pasquale 2015, S. 20).

Dieser Kontrollverlust muss ausgeschlossen werden. Deshalb stellt die DSGVO konforme Entwicklung und Umsetzung von Smart Cities, beispielsweise durch die Grundsätze „Privacy by Design“ und „Privacy by Default“, eine grundlegende Notwendigkeit dar, um einen späteren Missbrauch oder Verstoß gegen den Schutz personenbezogener Daten vorzubeugen (Voigt & von dem Bussche 2018, S. 81-83). In einem Paper der Rosa-Luxemburg-Stiftung machen sich die Autoren für demokratiestärkende Leitlinien zur Sicherung der kommunalen Datensouveränität stark und berufen sich auf Best Practice internationaler Smart Cities wie Barcelona und Amsterdam. Teil der Leitlinien ist die Forderung der Anwendung offener Standards wie Data Commons und Open Source sowie die kommunale Kontrolle über digitale Plattformen (Morozov & Bria 2017, S. 66-69).



## 2.7 Datensicherheit

Neben Datenschutz ist auch die Datensicherheit von UDP sowie von Sensordaten ein Erfolgskriterium bei der digitalen Stadtentwicklung. In Abgrenzung zum Datenschutz steht bei Datensicherheit der Schutz vor unbefugtem Zugriff von Dritten im Fokus.

Zur effektiven Datensicherheit in Smart Cities gehören alle Maßnahmen zum Schutz der Vertraulichkeit, Integrität, Verfügbarkeit sowie Verfügbarkeit von Systemen, Plattformen und Daten. Urbane Datenplattformen sind, aufgrund der umfangreichen, vernetzten Datensätze und dem Zugang zu Informationen kritischer Infrastrukturen, Ziel für Cyber-Angriffe. Deshalb muss die Sicherheit der Systeme und Daten unbedingt gewährleistet sein (vgl. Kaczorowski 2017, S. 15). Datensicherheit muss durch konsequentes Privacy-by-Design, wie unter anderem auch in der DIN SPEC 91357 definiert, garantiert sein (DIN e.V. 2017a).

Nicht nur IoT-Plattformen selbst können mögliches Ziel von Cyber-Angriffen werden. Der unbefugte Zugriff Dritter auf Sensornetzwerke stellt ebenfalls eine reale Gefahr dar. So seien beispielsweise die bestehenden und standardmäßig bereitgestellten Sicherheitsmerkmale von LoRaWAN-Sensornetzwerken und deren Gateways nicht immer ausreichend gesichert (Oniga, Dadarlat, De Poorter, & Munteanu 2017). Dadurch können Sensordaten abgegriffen werden, bevor diese auf die geschützte Plattform gelangen.

Hinsichtlich der Bereitstellung und Zugänglichkeit von Daten kann zwischen drei Schichten im urbanen Datenraum unterschieden werden: Interne urbane Daten, kommerziell verfügbare urbane Daten sowie frei verfügbare urbane Daten (Open Data) (vgl. Fraunhofer FOKUS et al. 2018, S. 36 f.). Zudem besteht aktuell die Herausforderung, dass es kein einheitliches Verständnis einer Smart City Data Governance gibt, sowohl in der Literatur als auch in der Praxis (von Grafenstein, Wernick, & Olk 2019).

Zukünftig soll im Diskurs festgelegt werden, welche Sensordaten welcher Datenschicht zuordenbar sind, beziehungsweise in welcher Form diese zugänglich sein sollen. Dieser Einteilung folgend, müsste ein gesamtheitliches Datensicherheitskonzept für Datenplattformen und IoT-Sensoren inkl. Zugriffsrechten entwickelt werden.

## 3 Klassifikationsschema für Sensoren

### 3.1 Methodisches Vorgehen

Im Zentrum dieser Arbeit steht die Klassifikation von IoT-Sensor-Typen in bürgergetriebenen Smart Cities. Bisher fehlt in der Literatur eine systematische Erfassung und Klassifikation von IoT-Sensor-Typen, wie in Kapitel 1.1 zur Problemstellung und Relevanz beschrieben. Die Klassifikation ist eine sozialwissenschaftliche wie naturwissenschaftliche Methode zur Einordnung von Objekten. Die Anwendung von Taxonomien oder Typologien stellt dabei eine mögliche Form der Klassifikation dar. Taxonomien können als „Einordnung in ein bestimmtes System“ (Dudenredaktion 2019) definiert werden und werden häufig in der Biologie zur Einordnung von Arten oder in der Lerntechnik angewandt.

Bailey (1994)<sup>11</sup> erläutert in seiner Monographie „Typologies and Taxonomies: An Introduction to Classification Techniques“ wie Klassifizierungsmethoden zur Verbesserung der Forschung eingesetzt werden können. Unter Klassifikation wird, in der einfachsten Form, die Einordnung von Objekten in Gruppen oder Klassen auf Grundlage deren Gemeinsamkeiten und/oder Unterschiede verstanden, wobei im Zentrum die Reduktion der Komplexität steht (Bailey 1994, S. 1). Innerhalb der Methode geschaffener Klassen müssen für Objekte „exhaustive“, also erschöpfend, und „mutually exclusive“, sich gegenseitig ausschließend, sein. „Exhaustive“ sind Klassifikationen dann, wenn diese für jedes Objekt eine passende, zuordenbare Klasse aufweisen, „mutually exclusive“ dann, wenn kein Objekt zwei Klassen gleichrangig zuordenbar ist (ebd. S. 3).

Taxonomie und Typologie sind ähnlich, weshalb die Begriffe oftmals fälschlicherweise synonym verwendet werden. Dennoch unterscheiden sich Taxonomie von Typologie darin, dass diese Methode auf empirischen Einheiten aufbaut, Typologie ist hingegen lediglich konzeptionell (ebd., S. 6). Taxonomien stellen folglich eine empirische Methode zur Klassifikation dar (ebd., S. 7).

Taxonomien beschreiben darüber hinaus nicht lediglich das Endergebnis der Klassifikation, sondern den umfänglichen Prozess von der Entwicklung der Methodik bis zur Einordnung. Ziel der Taxonomie ist die Reduktion der Komplexität und die Differenzierung von Objekten aufgrund deren Gemeinsamkeiten und Unterschiede in der Merkmalsausprägung.

---

<sup>11</sup> Kenneth D. Bailey ist Professor der Soziologie an der University of California, Los Angeles. Er publizierte hauptsächlich zu Forschungsmethoden und Systemtheorien in den Sozialwissenschaften.

Bailey (1994, S. 30-34) schlägt für die Taxonomie-Entwicklung das „Three-Level-Model“ vor, das sowohl den Ansatz empirisch-zu-deduktiv als auch deduktiv-zu-empirisch kombiniert. In der Anwendung kann entweder mit der empirischen oder der konzeptuellen Methode begonnen werden, deren Ergebnisse dann in einer Kombination aus beidem untersucht werden können.

Basierend auf der Problem- und Fragestellung in Kapitel 1.1 eignet sich die Entwicklung und Anwendung einer Taxonomie als Methode, die dem „Three-Level-Model“ folgt, für diese Arbeit besonders. Hinsichtlich der hohen Komplexität durch eine Vielzahl von verfügbaren IoT-Sensor-Typen, die es einzuordnen gilt, steht die Komplexitätsreduktion im Vordergrund.

Nickerson, Varshney, Muntermann und Isaac (2009) haben in ihrem Paper eine Taxonomie als Methode im Bereich der Informationssysteme, speziell für die Klassifikation von mobilen Anwendungen, systematisch entwickelt. Diese Methode basiert auf Bailey's vorgeschlagenem Modell.

In einem weiteren Paper zur Klassifikation von mobilen Anwendungen, das auf Nickerson et al. (2009) basiert, führen Nickerson, Varshney und Muntermann (2013) das methodische Vorgehen zur Taxonomie-Entwicklung weiter aus und entwickeln ein systematisches, übertragbares Vorgehensmodell zur Taxonomie-Entwicklung in der Informationstechnik, das zukünftig Orientierung bieten soll.

Dieses systematische Vorgehensmodell kann auf andere Bereiche und Fragestellungen übertragen werden. Varsheny, Nickerson, und Muntermann (2013) beispielsweise wenden das Vorgehensmodell nach Nickerson et al. (2013) zur Klassifikation von Health-IT-Anwendungen an.

Püschel, Röglinger und Schlott (2016) setzen das Vorgehensmodell zur Entwicklung einer mehrschichtigen Taxonomie für Smart Things im IoT, anhand zehn Dimensionen bestehender Architekturschichten, um.

Für die Entwicklung des methodischen Vorgehens der Taxonomie, zur Klassifikation von IoT-Sensor-Typen in bürgergetriebenen Smart Cities in dieser Arbeit, wird das von Nickerson et al. (2009) und Nickerson et al. (2013) erarbeitete systematische Vorgehensmodell angewandt.

Abbildung 1 gibt einen Überblick über das im folgenden Kapitel 3.2 Schritt für Schritt angewandte methodische Vorgehen. Die eigene Darstellung wurde in Anlehnung an das Flussdiagramm von Nickerson et al. (2013, 2009) entwickelt und an die Anforderungen der Taxonomie in dieser Arbeit angepasst. Im folgenden Kapitel werden in drei Iterationen der Taxonomie-Entwicklung drei Dimensionen mit insgesamt 18 Charakteristika identifiziert.

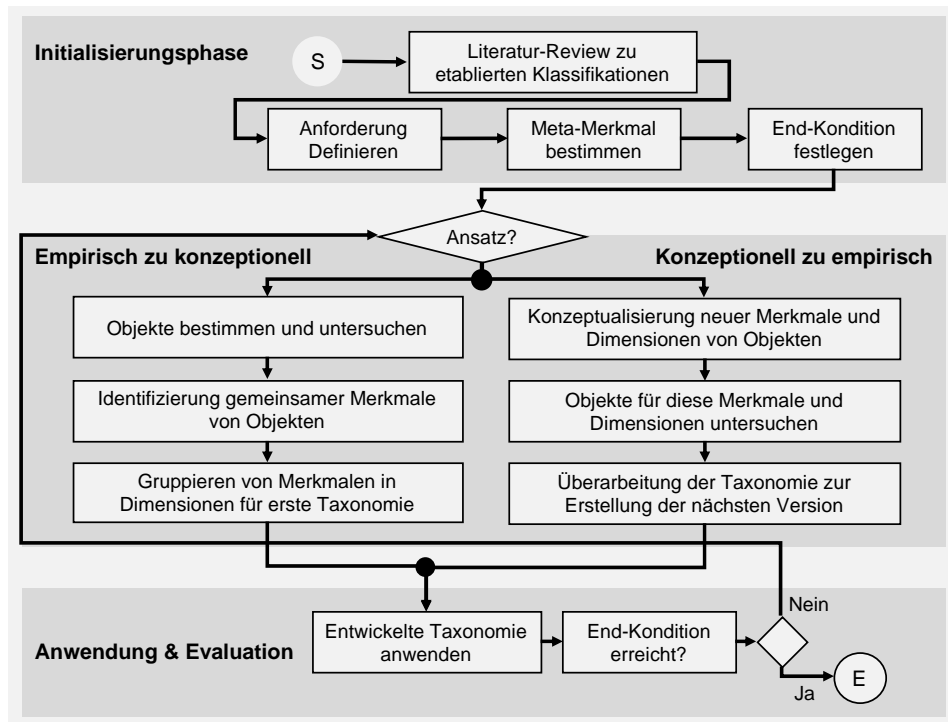


Abbildung 1: Systematisches Vorgehensmodell zur Taxonomie-Entwicklung (eigene Darstellung in Anlehnung an Nickerson et al. 2013, S. 10)

### 3.2 Taxonomie-Entwicklung

Dieses Kapitel folgt Schritt-für-Schritt dem systematischen Vorgehensmodell aus Kapitel 3.1. Am Ende bildet sich aus dem Prozess die vollständige Taxonomie.

Das systematische Vorgehensmodell in Anlehnung an Nickerson et al. (2013, 2009) startet mit der Initialisierungsphase, in der zunächst ein Literatur-Review zur Analyse bereits bestehender Klassifikationsansätze von Sen-

soren durchgeführt wird.<sup>12</sup> Daran anschließend werden Anforderungen an die Taxonomie erarbeitet. Meta-Merkmale, basierend auf dem Zweck der Taxonomie beziehungsweise den Anforderungen und dem zukünftig zu erwartendem Nutzen, führen dann zur Festlegung der End-Konditionen.

Grandke und Hesse (1989) legen die essentielle Notwendigkeit von Klassifikationen von Sensoren dar, um die Komplexität einer Vielzahl von unterschiedlichen Sensoren zu reduzieren. Die Autoren diskutieren mögliche Kriterien zur Klassifikation von Sensoren, wie beispielsweise nach dem Transduktionsprinzip, nach Anwendung, nach Messgröße, nach Präzision, nach Kosten, et cetera. Lion (1969) schlägt die Gruppierung verschiedener Sensoren nach der Form des Eingangs- und Ausgangssignals vor. Die Limitation der Klassifikation nach diesen Transduktionsprinzipien liegt in der Tatsache, dass selbst einfache Sensoren mehr als einem Transduktionsprinzip zuordenbar sind (Grandke & Hesse 1989, 5-11). Dennoch erfolgt die Einteilung häufig nach diesem Prinzip. Schaumburg (1992) unterscheidet in seinem Buch zwischen Temperatursensoren, Kraft- und Drucksensoren, Magnetsensoren, optischen Sensoren, Feuchtesensoren und chemischen Sensoren.

Schnell (1991) folgt der physikalischen/technischen Klassifikation für Sensoren zur Erfassung der Umwelt in der Automatisierungstechnik. Diese wird in mechanische, chemische, thermische, magnetische und optische Sensoren unterteilt. Schanz (2014, S. 29-31) analysiert und klassifiziert in seinem Buch „Sensoren: Sensortechnik für Praktiker“ Sensoren und Sensorsysteme nach Art der Messgröße.

**Anforderung:** Dem systematischen Vorgehensmodell zur Entwicklung einer Taxonomie folgend, werden vor diesem Hintergrund die Anforderungen festgelegt. Durch die Entwicklung dieser Taxonomie soll zunächst eine Übersicht über die am Markt verfügbaren IoT-Sensor-Typen entstehen. Insbesondere liegt der Zweck darin, eine Vielzahl an heterogenen Sensoren durch gemeinsame Merkmale zu ordnen und die Komplexität zu reduzieren. Diese Darstellung soll in der Praxis bei der Entwicklung und Umsetzung von smarten Anwendungsszenarien für Smart Cities Orientierung bieten. Kommunale Entscheider, Bürger oder Projektpartner werden so bei der Auswahl von Sensoren unterstützt und der Diskurs über den Einsatz von Sensoren im öffentlichen Raum gestärkt.

---

<sup>12</sup> Zum Zeitpunkt dieser Arbeit gibt es keine Klassifikation von IoT-Sensor-Typen. Aufgrund des fortschreitenden technischen Wandels ist jedoch davon auszugehen, dass grundsätzlich jeder Sensor durch die Anbindung an das Internet der Dinge zu einem IoT-Sensor entwickelt werden kann, weshalb sich das Literatur-Review auf Sensoren im Allgemeinen bezieht.

**Meta-Merkmal:** Als Meta-Merkmal für die Taxonomie werden „Klassifikationsmerkmale anwendungsorientierter IoT-Sensor-Typen für bürgergetriebene Smart Cities“ definiert. Davon abgrenzend geht es nicht um die Analyse spezifischer Sensoren von spezifischen Herstellern und deren Merkmale wie Validität, Größe, Messspektrum, Eichung, Kosten et cetera, sondern um deren Meta-Merkmale auf Ebene der Sensor-Typen.

**End-Konditionen:** Nickerson et al. (2013, S. 8 f.) schlagen zur Orientierung neben den obligatorischen, objektiven Endbedingungen, „exhaustive“ und „mutually exclusive“, definiert durch die Methode nach Bailey (1994, S. 3), weitere, durch den Forscher zusätzlich adaptierbare Bedingungen vor. Gegeben durch den Umfang dieser Arbeit, werden keine weiteren als die obligatorischen Bedingungen hinzugefügt. Nickerson et al. (2013, S. 9) gibt darüber hinaus subjektive, obligatorische Endbedingungen vor. Demnach kann die Methode beendet werden, wenn die Bedingungen „concise, robust, comprehensive, extendible, and explanatory“ erfüllt werden.

### **Iteration 1: Empirisch zu konzeptionell**

In der ersten Iteration wird der Ansatz empirisch-zu-konzeptionell verfolgt, da zunächst IoT-Sensor-Typen auf Basis einer Literaturrecherche identifiziert werden müssen.

#### *Step 1: Objekte bestimmen und untersuchen:*

Zum Zeitpunkt dieser Arbeit liegt keine repräsentative Auflistung von auf dem Markt verfügbaren IoT-Sensor-Typen vor. Im ersten Schritt wird deshalb eine systematische Recherche auf Grundlage folgender zur Verfügung stehender Informationsquellen<sup>13</sup> durchgeführt, um die Objekte zu bestimmen (*Anhang 1*):

- | Internetauftritte von Herstellern von IoT-Sensoren, inkl. Online-Shops
- | Händler/Portale/Online-Marktplätze

Auf Grundlage dieser umfassenden Recherche wurden spezifische IoT-Sensoren zu Sensor-Typen zusammengefasst. Insgesamt wurden 62 IoT-Sensor-Typen identifiziert, die in einer Zusammenfassung in folgender Tabelle aufgelistet werden.

---

<sup>13</sup> Das vollständige Verzeichnis der Quellen ist dem separaten „Quellenverzeichnis IoT-Sensor-Typen“ zu entnehmen, welches sich dem Literaturverzeichnis am Ende anschließt.

**Auflistung identifizierter am Markt verfügbarer IoT-Sensor-Typen für Smart Cities in alphabetischer Reihenfolge:**

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Berührungssensoren</li> <li>• Beschleunigungssensoren (3-A.-Beschl.)</li> <li>• Bewegungsmelder</li> <li>• Bewegungszähler</li> <li>• Bodenfrostsensoren</li> <li>• Drehmomentsensoren</li> <li>• Drehzahlsensoren</li> <li>• Drucksensoren</li> <li>• Durchflusssensoren (Gase &amp; Flüssigkeiten)</li> <li>• Erdbebensensoren</li> <li>• Farbsensoren</li> <li>• Feinstaubsensoren</li> <li>• Feuchtigkeitssensoren (Boden, Erde)</li> <li>• Flüssigkeitssensoren</li> <li>• Füllstandssensoren</li> <li>• Gas &amp; Fluid Smart Meter</li> <li>• Geräuschpegelsensoren</li> <li>• Geschwindigkeitssensoren</li> <li>• GPS-Tracker</li> <li>• Hitzesensoren</li> <li>• Höhenmesser</li> <li>• Infrarot-Kamera-Sensoren</li> <li>• Infrarotsensoren (Lichtmessung)</li> <li>• Kältesensoren</li> <li>• Kamera-Bild-Sensoren</li> <li>• Kohlenmonoxid-Sensoren</li> <li>• Kohlenstoffdioxid-Sensoren (CO<sub>2</sub>)</li> <li>• Kraftsensoren</li> <li>• Lichtschranken</li> <li>• Lichtsensoren</li> <li>• Linienverfolgungssensoren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Luftdrucksensoren</li> <li>• Luftfeuchtigkeitssensoren</li> <li>• Luftqualitätssensoren</li> <li>• Luftstromsensoren</li> <li>• Magnetfeldsensoren</li> <li>• Mikrofon-Sensoren</li> <li>• Näherungssensoren</li> <li>• Niedriglichtsensoren</li> <li>• Oxygenium-Sensoren (O<sub>2</sub>)</li> <li>• Pax-Counter (WLAN und Bluetooth)</li> <li>• pH-Wert-Sensoren</li> <li>• Push-Button</li> <li>• Rauchmelde-Sensoren</li> <li>• Reed-Schalter (offen/zu)</li> <li>• RFID-Sensoren (Reader/Scanner)</li> <li>• Smart Meter</li> <li>• Spannungssensoren</li> <li>• Stickoxid-Sensoren</li> <li>• Tastschalter</li> <li>• Temperatursensoren (Thermosensoren)</li> <li>• Ultraschallsensoren (Abstandssensoren)</li> <li>• Ultraschallsensoren (Gegenst.-Erk.)</li> <li>• UV-Sensoren</li> <li>• Vibrationssensoren</li> <li>• Voice-Sensoren</li> <li>• Wasseraustrittssensoren</li> <li>• Wasseraustrittssensoren mit Seilsensor</li> <li>• Wasserqualitätssensoren</li> <li>• Wasserstandssensoren</li> <li>• Wegesensoren (Abstandssensoren)</li> <li>• Windgeschwindigkeitssensoren</li> </ul>
---	--

Tabelle 1: Am Markt verfügbare IoT-Sensor-Typen für Smart Cities

Die Auflistung erhebt jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit, die durch zwei Faktoren bedingt wird: Zum einen sind nicht alle IoT-Sensoren auf dem freien Markt verfügbar, zum anderen können durch die fortschreitende, technische Weiterentwicklung jederzeit neue IoT-Sensoren und Sensor-Typen hinzukommen.

*Step 2: Identifizierung gemeinsamer Merkmale von Objekten:*

Durch die Analyse der Sensor-Typen lässt sich als Unterscheidungsmerkmal die Art der Anwendung der Messung der Sensor-Typen als Dimension identifizieren. Diese Dimension geht der Frage nach: ‚Was misst dieser Sensor-Typ in der Stadt?‘. Im Sinne des bürgerorientierten Ansatzes orientiert sich diese Dimension zur Unterstützung eines einfachen Verständ-

nisses an den fünf Sinnen:<sup>14</sup> Riechen, Schmecken, Fühlen (oder Tasten), Sehen und Hören. Infolgedessen ergeben sich 5 Charakteristika zur Merkmalsunterscheidung:

- | Akustik-Sensoren: Lautstärke, Lärm, Geräusche, Ton, Stimmen
- | Optische-Sensoren: Licht, Lichtstärke, Farben, Bilder, Bewegtbilder
- | Thermo-Sensoren: Wärme, Kälte, Temperatur
- | Bewegungs-Sensoren: Bewegung, Geschwindigkeit, Abstand
- | Umwelt-Sensoren: Feuchtigkeit, Wasser, Strömung, Luft, Luftqualität

*Step 3: Gruppierung von Merkmalen in Dimensionen für die erste Taxonomie:*

Das identifizierte Merkmal bildet die erste Dimension mit fünf Charakteristika der Taxonomie. Die vollständige Darstellung der Taxonomie nach Iteration 1 ist im *Anhang 2a* zu finden.

IoT-Sensor-Typen	Messung nach Anwendung				
	Akustik-Sensoren	Optik-Sensoren	Thermo-Sensoren	Bewegungs-Sensoren	Umwelt-Sensoren

Abbildung 2: Iteration 1

Die Taxonomie in dieser Form ist „exhaustive“ und „mutually exclusive“ als auch „concise“, „extendible“ und „explanatory“ (vgl. Nickerson et al. 2013, S. 9). Jedoch kann noch keine Aussage getroffen werden, ob die Bedingungen „robust“ und „comprehensive“ erfüllt werden. Eine weitere Iteration ist deshalb notwendig.

### **Iteration 2: Konzeptionell zu empirisch**

In der zweiten Iteration wird der Ansatz konzeptionell-zu-empirisch verfolgt, schließlich werden neue Merkmale und Dimensionen der vorliegenden Objekte evaluiert.

*Step 1: Konzeptualisierung neuer Merkmale und Dimensionen von Objekten:*

Ein weiteres, allgemeines Unterscheidungskriterium für IoT-Sensoren bezieht sich auf die Art der Daten, die diese Sensor-Typen erheben. Sensoren in Smart Cities werden zukünftig hauptsächlich im öffentlichen Raum in-

<sup>14</sup> Beispiel: Bewegung kann durch die Sinne Sehen und Fühlen erfasst werden. Die Umwelt kann beispielsweise durch Sehen, Fühlen und Schmecken erfasst werden.



stalliert. Deshalb ist für die Taxonomie von IoT-Sensor-Typen als weitere Dimension der Schutz von personenbezogenen Daten relevant, im speziellen die Identifizierbarkeit von Personen und die Zuordenbarkeit von personenbezogenen Daten zu einer natürlichen Person.

*Step 2: Objekte für diese Merkmale und Dimensionen untersuchen:*

Für die spätere Einordnung der Objekte in Charakteristika muss an dieser Stelle kurz erläutert werden, welche durch Sensoren erhobenen Daten als personenbezogen einzustufen sind. Bereits in Kapitel 2.6 zum Datenschutz wurde auf Art. 4 DSGVO sowie Art. 5 DSGVO verwiesen.

Demnach umfassen personenbezogene Daten alle Informationen, die eine natürliche Person direkt oder indirekt identifizieren. Dazu gehören neben Namen, Kennnummern, Bankdaten, Online-Daten oder Besitzmerkmalen besonders sensible Daten wie beispielsweise biometrische, genetische und physische und psychologische Merkmale (vgl. Voigt & von dem Bussche 2018, S. 14-19).

Zwar stehen technische Möglichkeiten zur Anonymisierung und Pseudonymisierung von personenbezogenen Daten nach der Erfassung zur Verfügung (ebd. S. 16-19), jedoch kann die vollständige Sicherheit, zum Beispiel bei einem Cyber-Angriff, nicht gewährleistet werden.

Vor diesem Hintergrund werden zwei Charakteristika der Dimension „Identifizierbarkeit“ hinzugefügt:

- | De-Identifizierbar: Sensordaten lassen keine Rückschlüsse auf natürliche Personen zu (Daten ohne Personenbezug)
- | Identifizierbar: Sensordaten ermöglichen Rückschlüsse auf natürliche Personen (Daten mit Personenbezug)

*Step 3: Überarbeitung der Taxonomie zur Erstellung der nächsten Version:*

Das identifizierte Merkmal bildet die zweite Dimension mit zwei Charakteristika der Taxonomie. Die vollständige Darstellung der Taxonomie nach Iteration 2 ist im *Anhang 2b* zu finden.

IoT-Sensor-Typen	Messung nach Anwendung					Ident.	
	Akustik-Sensoren	Optik-Sensoren	Thermo-Sensoren	Bewegungs-Sensoren	Umwelt-Sensoren	De-ID	ID

Abbildung 3: Iteration 2

Auch nach Iteration 2 kann keine Aussage getroffen werden, ob die Bedingungen „robust“ und „comprehensive“ erfüllt werden. Eine weitere Iteration ist deshalb notwendig.

### Iteration 3: Konzeptionell zu empirisch

In der dritten Iteration wird ebenfalls der Ansatz konzeptionell-zu-empirisch verfolgt, da noch eine weitere Dimension bestimmt werden soll.

*Step 1: Konzeptualisierung neuer Merkmale und Dimensionen von Objekten:*

Aus dem vorherigen Literatur-Review zur Sensorik ergibt sich ein weiteres, allgemeines Unterscheidungskriterium für IoT-Sensor-Typen, das sich auf die Art der Messgröße bezieht. Schanz (2004, S. 29-31) unternimmt eine Grobeinteilung von Sensoren und Sensorsystemen nach diesem Ansatz. Er identifiziert Arten von Messgrößen, unter welchen sich dann die tatsächlichen Messeinheiten und physikalischen Messgrößen verbergen:

*Step 2: Objekte für dieses Merkmal und Dimensionen untersuchen:*

Aufgrund der in Iteration 1 identifizierten Objekten ergeben sich für die Taxonomie von IoT-Sensor-Typen folgende 11 Charakteristika in Form von Arten der Messgröße:

- | akustisch, Bildfassung, chemisch & biologisch, dynamisch, elektrisch, geometrisch, klimatisch, magnetisch, mechanisch, optisch, thermisch

*Step 3: Überarbeitung der Taxonomie zur Erstellung der nächsten Version:*

Das identifizierte Merkmal bildet die dritte Dimension mit 11 Charakteristika der Taxonomie. Die vollständige Darstellung der Taxonomie nach Iteration 3 ist im *Anhang 2c* oder in Kapitel 4.2 zu finden.

IoT-Sensor-Typen	Messung nach Anwendung					Ident.		Art der Messgröße										
	Akustik-Sensoren	Optik-Sensoren	Thermo-Sensoren	Bewegungs-Sensoren	Umwelt-Sensoren	De-ID	ID	akustisch	Bildfassung	chemisch & biologisch	dynamisch	elektrisch	geometrisch	klimatisch	magnetisch	mechanisch	optisch	thermisch

Abbildung 4: Iteration 3

Durch das Hinzufügen einer weiteren Dimension erfüllt die Taxonomie nun die Bedingung „robust“ zur Unterscheidung der Merkmale der Objekte. Darüber hinaus konnten alle Objekte klassifiziert werden, was die Bedingung „comprehensive“ erfüllt. Folglich können nun alle End-Konditionen nach der Anwendung der Taxonomie geprüft werden.

**End-Konditionen:** Nach Iteration 3 ist die nach dem systematischen Vorgehensmodell entwickelte Taxonomie beendet. Die Taxonomie ist sowohl „exhaustive“ als auch „mutually exclusive“ und erfüllt damit die objektiven Endbedingungen. Gleichzeitig werden alle subjektiven, obligatorischen Endbedingungen, den Richtlinien nach Nickerson et al. (2013, S. 9) folgend,

erfüllt. Die Taxonomie ist demnach: „concise“, „robust“, „comprehensive“, „extendible“ sowie „explanatory“.

### 3.3 Einordnung der Bedeutung von Sensoren in einer Smart City

Um die Rolle und Bedeutung der Sensorik im Kontext der Smart City einordnen zu können, ist eine gesamtheitliche Betrachtung sowohl aus Perspektive der Handlungsfelder als auch aus Perspektive der urbanen Datenplattform notwendig. Bislang gibt es kein Architekturmodell, das beide Perspektiven vereint und dabei die Rolle der Sensoren einordnet. Aufbauend auf den vorangegangenen Kapiteln wurde daher folgendes Architekturmodell entwickelt. Dies stellt die Grundlage der weiteren Analyse von IoT-Sensor-Typen in Kapitel 4 dar. Hervorzuheben ist, dass die zentralen Aspekte Datenschutz, Datensicherheit und Datensparsamkeit, auch auf Ebene der Sensoren, ebenfalls im Architekturmodell abgebildet sind.

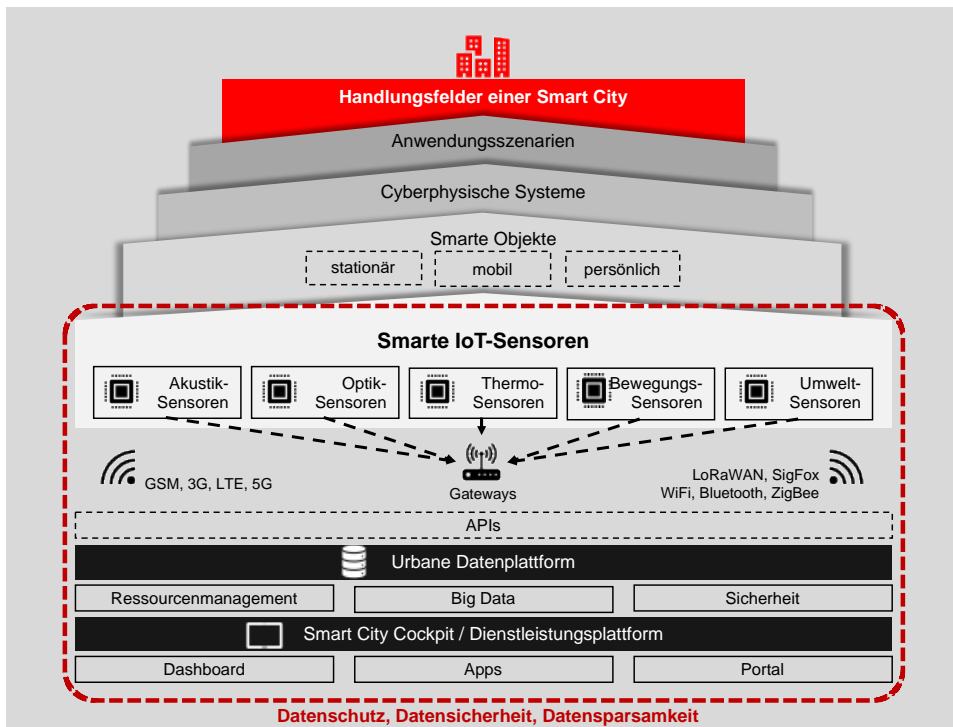


Abbildung 5: Smart City-Architekturmodell aus Perspektive der Sensorik (eigene Darstellung)

**Sensoren** als technisches Bauteil erfassen Eigenschaften und Zustände innerhalb der Stadt und bilden damit die Grundlage einer Smart City. Auf Basis von Sensorik, smarterer Objekte und cyberphysischer Systeme kann so die Vision eines „Digitalen Zwillings“<sup>15</sup> einer Stadt entwickelt werden.

**Smarte Objekte** sind im Internet der Dinge eingebettete physische Objekte, die im Internet eindeutig identifizierbar sind. Intelligent vernetzte Sensoren und Aktoren können zusätzlich die Umgebung digital erfassen und über das Internet der Dinge mit anderen intelligent vernetzten Objekten kommunizieren (von Lucke 2015, S. 12-14). Smarte Objekte lassen sich in stationäre (durch Anbringung im öffentlichen Raum oder privaten Raum), mobile (an Fahrrädern, Autos, ÖPNV) oder persönliche Objekte (Smartphone, Smart-Watch, smarte Brille) unterteilen.

**Cyberphysische Systeme** (CPS) können als „...heterogen vernetzte Gebilde, die reale physische Objekte mit digitalen Informations- und Kommunikationssystemen verknüpfen und kombinieren“ definiert werden (von Lucke 2015, S. 14). CPS stellen an das Internet der Dinge angebundene, intelligent vernetzte Objekte, eingebettete Systeme und Sensornetzwerke dar, aus deren Verknüpfungen sich diverse Anwendungsfelder entwickeln lassen. (ebd.) Beispiele für den vielfältigen Einsatz von CPS sind Smart Grids zur intelligenten Steuerung des Stromnetzes, intelligente Frühwarnsysteme im Hochwasserschutz oder altersgerechte Assistenzsysteme wie Bewegungs- und Sturzmelder. Zukünftig sollen CPS auch Vorhersagen zur Anbahnung einer Gefahr, beispielsweise im Straßenverkehr, ermöglichen (Santana, Chaves, Gerosa, Kon, & Milojevic 2017, S. 5 f.).

Die **Anwendungsszenarien** einer Smart City ergeben sich aus den in cyberphysischen Systemen eingebetteten smarten Objekten. Beispiele für Anwendungsszenarien im Internet der Dinge sind das smarte Abfallmanagement, smarte Verkehrssteuerung, smarte Luftqualitätskontrolle oder das smarte Büro.

Die **Handlungsfelder einer Smart City** umfassen beispielsweise die sechs identifizierten Handlungsfelder nach Kaczorowski (2014, S. 67-70). Dazu gehören die Verwaltung und Politik, Bildung, Wertschöpfung, Mobilität, Leben sowie Energie und Umwelt. Dem Bitkom Smart City Atlas folgend, können in der Smart City die Handlungsfelder Datenplattform, IT-Infrastruktur und Sicherheit ergänzt werden (Bitkom e.V. 2019).

---

<sup>15</sup> Die Stadt München möchte in ihrem Leuchtturmprojekt „Digitaler Zwilling“, unter anderem durch den Einsatz von Sensorik, ein digitales Abbild der Stadt schaffen. <https://muenchen.digital/blog/digitaler-zwilling-in-muenchen-ein-leuchtturmprojekt-auf-dem-weg-zur-digitalen-metropole/>

## 4 IoT-Sensor-Typen für Smart City Anwendungen

Bereits an dieser Stelle bildet diese Arbeit durch die Identifikation und Klassifikation von IoT-Sensor-Typen in vorliegender Taxonomie einen wichtigen Beitrag und Orientierungsrahmen für die Auswahl von Sensor-Typen in bürgergetriebenen Smart Cities. Anhand der Taxonomie können sich kommunale Entscheider, Mitarbeiter von Umsetzungsprojekten oder Bürger einen Überblick über am Markt verfügbare IoT-Sensor-Typen machen. Im Zentrum der Klassifikation steht die Dimension „Messung nach Anwendung“. Diese Dimension eignet sich im Sinne der Bürgerorientierung besonders, schließlich ermöglicht diese die Beantwortung der einfachen Frage: „Was soll gemessen werden?“. Für die weitere Analyse der IoT-Sensor-Typen in Kapitel 4.3 orientiert sich diese Arbeit folglich an der ersten Dimension.

### 4.1 IoT-Sensoren

Die genauen Auswertungen der Klassifikation nach unterschiedlichen Fragestellungen sind vollständig dem Anhang beigefügt.

In *Anhang 3* sind alle identifizierbaren IoT-Sensoren dargestellt. Insgesamt können 9 IoT-Sensor-Typen personenbezogene Daten erfassen, am häufigsten durch die akustische und optische Messgröße.

*Anhang 4* stellt alle de-identifizierbaren IoT-Sensor-Typen dar. Insgesamt können 53 IoT-Sensor-Typen keine personenbezogenen Daten erfassen.

Für einen besseren Überblick über die IoT-Sensor-Typen in der Dimension „Art der Anwendung / Messung nach Anwendung“ sind in *Anhang 5* alle IoT-Sensor-Typen innerhalb dieser Dimension alphabetisch geordnet. Beispielsweise kann in dieser Darstellung auf einen Blick erkannt werden, wie viele Sensoren dem Charakteristika „Umwelt-Sensor“ zugeordnet sind.

Anwendung findet die Taxonomie, unter Betrachtung der Auswertung der jeweils relevanten Analyse, unter der Frage: Welche Art der Messung wird für die Anwendung benötigt? Wird ein Optik-Sensor benötigt? Oder ein Umwelt-Sensor? Anschließend können alle relevanten IoT-Sensor-Typen für die Auswahl in der Kategorie in Betracht gezogen werden.

## 4.2 Taxonomie von IoT-Sensor-Typen

IoT-Sensor-Typen	Messung nach Anwendung					Ident.		Art der Messgröße												
	Akustik-Sensoren	Optik-Sensoren	Thermo-Sensoren	Bewegungs-Sensoren	Umwelt-Sensoren	De-ID	ID	akustisch	Bilderfassung	chemisch & biologisch	dynamisch	elektrisch	geometrisch	klimatisch	magnetisch	mechanisch	optisch	thermisch		
Berührungssensoren				x				x									x			
Beschleunigungssensoren (3-A.-Beschl.)				x				x			x									
Bewegungsmelder				x				x									x			
Bewegungszähler				x				x									x			
Bodenfrostsensoren			x					x										x		
Drehmomentsensoren				x				x									x			
Drehzahlsensoren				x				x									x			
Drucksensoren				x				x									x			
Durchflusssensoren (Gase & Flüssigk.)					x			x			x									
Erdbebensensoren				x				x							x					
Farbsensoren		x						x									x			
Feinstaubsensoren					x			x		x										
Feuchtigkeitssensoren (Boden, Erde)					x			x						x						
Flüssigkeitssensoren					x			x		x										
Füllstandssensoren					x			x					x							
Gas & Fluid Smart Meter					x			x		x										
Geräuschpegelsensoren	x							x		x										
Geschwindigkeitssensoren				x				x			x									
GPS-Tracker				x				x						x						
Hitzesensoren			x					x										x		
Höhenmesser				x				x					x							
Infrarot-Kamera-Sensoren		x						x									x			
Infrarotsensoren (Lichtmessung)		x						x									x			
Kältesensoren			x					x										x		
Kamera-Bild-Sensoren		x						x		x										
Kohlenmonoxid-Sensoren					x			x		x										
Kohlenstoffdioxid-Sensoren (CO2)					x			x		x										
Kraftsensoren				x				x								x				
Lichtschranken		x						x									x			
Lichtsensoren		x						x									x			
Linienverfolgungssensoren		x						x									x			

IoT-Sensor-Typen	Messung nach Anwendung					Ident.		Art der Messgröße													
	Akustik-Sensoren	Optik-Sensoren	Thermo-Sensoren	Bewegungs-Sensoren	Umwelt-Sensoren	De-ID	ID	akustisch	Bilderfassung	chemisch & biologisch	dynamisch	elektrisch	geometrisch	klimatisch	magnetisch	mechanisch	optisch	thermisch			
Luftdrucksensoren					x	x												x			
Luftfeuchtigkeitssensoren					x	x								x							
Luftqualitätssensoren					x	x				x											
Luftstromsensoren					x	x					x										
Magnetfeldsensoren					x		x									x					
Mikrofon-Sensoren	x						x	x													
Näherungssensoren					x		x												x		
Niedriglichtsensoren			x				x												x		
Oxygenium-Sensoren (O2)					x		x			x											
Pax-Counter (WLAN und Bluetooth)					x			x						x							
pH-Wert-Sensoren					x		x			x											
Push-Button					x		x											x			
Rauchmelde-Sensoren					x		x												x		
Reed-Schalter (offen/zu)					x		x									x					
RFID-Sensoren (Reader/Scanner)					x			x													
Smart Meter					x			x													
Spannungssensoren					x		x														
Stickoxid-Sensoren					x		x			x											
Tastschalter					x		x												x		
Temperatursensoren (Thermosensoren)					x		x												x		
Ultraschallsensoren (Abstandssensoren)					x		x		x												
Ultraschallsensoren (Gegenst.-Erk.)					x		x												x		
UV-Sensoren					x		x												x		
Vibrationssensoren					x		x												x		
Voice-Sensoren	x							x	x												
Wasseraustrittssensoren					x		x												x		
Wasseraustrittssensoren mit Seilsensor					x		x												x		
Wasserqualitätssensoren					x		x			x											
Wasserstandssensoren					x		x												x		
Wegesensoren (Abstandssensoren)					x		x												x		
Windgeschwindigkeitssensoren					x		x												x		

Tabelle 2: Taxonomie von IoT-Sensor-Typen für Smart Cities

### 4.3 Analyse relevanter Sensor-Typen für Smart City-Anwendungen

Wie bereits dargestellt, lassen sich Sensoren in fünf Kategorien nach Art der Anwendung klassifizieren. Aus der entwickelten Taxonomie folgend, lassen sich alle identifizierten IoT-Sensor-Typen in nachfolgende Kategorien eingliedern: Akustik-Sensoren, Optik-Sensoren, Thermo-Sensoren, Bewegungs-Sensoren sowie Umwelt-Sensoren. Im Folgenden werden die identifizierten IoT-Sensor-Typen innerhalb dieser Kategorien analysiert. Dabei werden zunächst alle Sensoren der Kategorie aufgelistet und zwischen „De-Identifizierbar“ und „Identifizierbar“ differenziert. Anschließend werden die für Smart Cities besonders relevanten IoT-Sensor-Typen beschrieben und mögliche Anwendungsszenarien skizziert. In dieser Arbeit gelten Sensor-Typen als besonders relevant, wenn diese bürgerorientierte Anwendungsszenarien ermöglichen, wobei dies zunächst eine subjektive Wertung darstellt.

#### 4.3.1 Akustik-Sensoren

Die in der Taxonomie identifizierten drei IoT-Sensor-Typen in der Kategorie „Akustik-Sensoren“ (s. Kapitel 4.2) können aufgrund der Identifizierbarkeit personenbezogener Daten weiter gruppiert werden.

##### **De-Identifizierbar:**

| Geräuschpegelsensoren

##### **Identifizierbar:**

| Mikrophon-Sensoren, Voice-Sensoren

**Mikrophon-Sensoren** sind Schalldrucksensoren zur Messung in der Luft und werden der akustischen Messgröße zugeordnet. Mikrofone wandeln den Schalldruck durch eine Membran in eine elektrische Spannungsänderung um.

Schalldrucksensoren erfassen einen breiten Frequenz- und Dynamikbereich an Schallwellen (Schanz 2004, S. 118). Anwendungsszenarien für Mikrophon-Sensoren in der Smart City ergeben sich hauptsächlich in der Sicherheitsüberwachung. So kann bereits heute durch computergestützte Analyse eine Anbahnung von Gewalttaten frühzeitig erkannt und durch Alarmierung der Polizei verhindert werden.

Mikrophon-Sensoren werden aufgrund der erfassbaren personenbezogenen Daten als „identifizierbar“ eingestuft. Als personenbezogene Daten gelten hierbei vor allem indirekte, persönliche Merkmale wie die Stimme, der Sprachgebrauch, et cetera, die einer natürlichen Person zugeordnet werden



können. Technische Möglichkeiten zur Anonymisierung und Pseudonymisierung dieser Daten sind möglich, jedoch kann die vollständige Sicherheit nicht gewährleistet werden (Voigt & von dem Bussche 2018, S. 16-19). Darüber hinaus können **Voice-Sensoren**, ebenfalls akustische Schalldrucksensoren, zur Spracherkennung eingesetzt werden. Entsprechend werden Voice-Sensoren durch das Erfassen personenbezogener Daten genauso den identifizierbaren Sensoren zugeordnet.

**Geräuschpegelsensoren**, auch Schallpegelmesser genannt, sind ebenfalls eine Variante von Schalldrucksensoren und der akustischen Messgröße zugeordnet. Der Sensor wandelt den Schalldruck in eine elektrische Spannung um (Schanz 2004, S. 118). In Abgrenzung zu Mikrofon-Sensoren wird bei Geräuschpegelsensoren lediglich der Dynamikbereich des Schallpegels in Abhängigkeit zur Zeit in dB erfasst und anschließend als Pegel angezeigt, wodurch es sich beim Messergebnis um einen Mittelwert handelt. Geräuschpegelsensoren erfassen deshalb keine personenbezogenen Daten. Anwendungsszenarien sind die Messung des flächendeckenden Umweltlärms im Stadtgebiet, die punktuelle Messung von Straßenlärm oder die Erfassung der Lautstärke am Arbeitsplatz.

### 4.3.2 Optik-Sensoren

Die in der Taxonomie identifizierten zehn IoT-Sensor-Typen in der Kategorie „Optik-Sensoren“ (s. Kapitel 4.2) können aufgrund der Identifizierbarkeit personenbezogener Daten weiter gruppiert werden.

#### **De-Identifizierbar:**

| Farbsensoren, Infrarotsensoren (Lichtmessung), Lichtschranken, Lichtsensoren, Linienverfolgungssensoren, Niedriglichtsensoren, Ultraschallsensoren (Gegenstandserkennung), UV-Sensoren

#### **Identifizierbar:**

| Infrarot-Kamera-Sensoren, Kamera-Bild-Sensoren

**Lichtsensoren**, auch Fotodetektoren genannt, eignen sich zur Erfassung der Umgebungshelligkeit und werden der optischen Messgröße zugeordnet. Als optoelektronische Empfänger wandeln Lichtsensoren die Lichtstrahlung aus der Umgebung in ein elektrisches Signal um. Fotowiderstände, Fotodioden oder Fototransistoren werden als Bauelement für Lichtsensoren verwendet (Schanz 2004, S. 108 f.). Dabei beschränken sich Lichtsensoren nicht nur auf die Erfassung des für das Auge sichtbaren Lichtspektrums, sondern können auch infrarote und ultraviolette Lichtwellenlängen erfassen (ebd., S. 109).

Lichtsensoren in Kombination mit intelligent vernetzten Beleuchtungsanlagen im Innen- und Außenbereich ermöglichen eine automatische Anpassung der Beleuchtungsstärke auf Basis der Lichtintensität der Umgebung. Lichtsensoren können nicht nur flächendeckend im Stadtgebiet zur intelligenten Steuerung der Straßenbeleuchtung, sondern auch in kommunalen Liegenschaften zur Energieeinsparung eingesetzt werden. **UV-Sensoren** funktionieren nach demselben Prinzip wie Lichtsensoren und ermöglichen die Erfassung der UV-Strahlungsintensität in Echtzeit.

**Infrarot-Kamera-Sensoren** erfassen das Lichtspektrum der infraroten Lichtwellenlänge, welches im Spektralbereich einzuordnen ist. Infrarot-Kamera-Sensoren gehören aufgrund der bildgebenden Erfassung zur optischen Messgröße, jedoch handelt es sich bei der infraroten Strahlung auch um eine thermische Strahlung (ebd., S. 95 f., S. 109). Die von Personen oder Objekten abgestrahlte Wärme wird durch eine Linse fokussiert und vom Sensor als bildgebendes Signal weiterverarbeitet. Mit Infrarot-Kamera-Sensoren lassen sich Personen und Objekte berührungslos auch aus der Ferne erfassen und deren Temperaturen messen (ebd., S. 96). Daraus ergeben sich vielfältige Anwendungsszenarien für Infrarot-Kamera-Sensoren, zum Beispiel zur Personenzählung, Bewegungserfassung, Temperaturmessung oder auch zur Parkraumüberwachung. Gleichzeitig werden Infrarot-Kamera-Sensoren jedoch aufgrund der möglicherweise erfassbaren personenbezogenen Daten im öffentlichen Raum als „identifizierbar“ eingestuft. Als personenbezogene Daten gelten hierbei vor allem physische und biometrische Daten von natürlichen Personen. Durch hochauflösende Infrarot-Kamera-Sensoren können, ähnlich wie bei Kamera-Bild-Sensoren, natürliche Personen direkt identifiziert werden. Auch geringer auflösende Sensoren könnten, beispielsweise durch den Einsatz von künstlicher Intelligenz zur automatisierten Datenanalyse, Bewegungsmuster von Personen indirekt identifizieren.

**Ultraschallsensoren** zur Gegenstandserkennung (bildgebende Ultraschallsensoren) (Adam et al. 1997, S. 132 f.) werden der optischen Messgröße zugeordnet, wobei das reine Ultraschallsignal selbst der akustischen Messgröße entspricht. Hochfrequente Schallwellen werden vom Sensor ausgesendet und von Objekten reflektiert, welche der Sensor als bildgebendes Signal verarbeitet. Ultraschallsensoren können unterschiedliche Materialien und Oberflächen von Objekten identifizieren, unabhängig ob diese fest, flüssig oder pulverartig sind. Anwendungsszenarien können die Parkraumüberwachung in Form der Identifikation von Fahrzeugen auf Parkplätzen darstellen.

### 4.3.3 Thermo-Sensoren

Die in der Taxonomie identifizierten vier IoT-Sensor-Typen in der Kategorie „Thermo-Sensoren“ (s. Kapitel 4.2) können aufgrund der Identifizierbarkeit personenbezogener Daten weiter gruppiert werden.

#### De-Identifizierbar:

| Bodenfrostsensoren, Hitzesensoren, Kältesensoren, Temperatursensoren

**Temperatursensoren** beziehungsweise Thermosensoren ermöglichen die genaue Messung von Temperaturen oder Temperaturänderungen der Umgebung oder der Wassertemperatur, wobei deren Einsatz sehr vielfältig und heterogen sein kann. Thermosensoren bestehen aus Kaltleiter oder Heißeiter, die je nach Bauteil die Widerstandsänderung aufgrund von Temperaturschwankungen messen (Schaumburg 1992, S. 61-66). Thermosensoren unterscheiden sich vor allem auch im möglichen Messspektrum und der Messabweichung. Temperatursensoren schaffen vielfältige Anwendungsszenarien in der Smart City. Im Allgemeinen kann durch das Ausbringen von Temperatursensoren eine flächendeckende Temperaturmessung in der Stadt realisiert werden. Auch in kommunalen Liegenschaften wie Schulen, Hallen oder Verwaltungsgebäuden bieten Temperatursensoren zur intelligenten Steuerung der Heizungs- und Klimaanlage Potentiale zur Energieeinsparung. Auch der Ausfall von Heizungsanlagen in einzelnen Räumen, Etagen oder ganzen Gebäuden kann überwacht werden. Ebenfalls können Wassertemperaturen von Flüssen und (Bade-) Seen über ein Netzwerkprotokoll auf die urbane Datenplattform übertragen werden und im Smart City Cockpit dargestellt werden. Bürger können sich so in Echtzeit über die Temperaturen oder Temperaturverläufe informieren.

In Kombination mit Windgeschwindigkeits- und Luftstromsensoren (s. Kapitel 4.3.5) lassen sich auf dieser Datengrundlage die möglichen Auswirkungen auf die Frischluftzufuhr und Kaltluftströmungen innerhalb der Stadt bereits in der Planungsphase städtebaulicher Maßnahmen berücksichtigen. Stadtplanerische Maßnahmen in Kombination mit Sensordaten können zukünftig dem weiteren Temperaturanstieg im urbanen Raum entgegenwirken.

**Bodenfrostsensoren** werden als Messfühler der thermischen Messgröße zugeordnet. Demnach handelt es sich bei diesen Sensor-Typen um klassische Thermosensoren, deren Deklaration in der Erfassung der Lufttemperatur in Höhe von etwa 5 cm über dem Boden oder auf direkter Bodenhöhe liegt (Schanz 2004, S. 104). Bodenfrostsensoren finden vor allem Anwendung im Bereich der Überwachung von Obst- und Gemüseanbau auf Freiflächen oder in Gewächshäusern. Die Überwachung oberirdischer Wasserleitungen zur Abwehr von Frostschäden ist ebenfalls denkbar.

In Kombination mit Bodenfeuchtigkeitssensoren, zur klimatischen Erfassung der Umgebung (s. Kapitel 4.3.5), können Bodenfrostsensoren auch zur Früherkennung von Glatteis, gefrierendem Nebel oder gefrierendem Regen eingesetzt werden. Bodenfeuchtigkeitssensoren und Bodenfrostsensoren senden in Echtzeit Datenpakete zur Analyse des Taupunktes an die urbane Datenplattform. Beim Erreichen des Taupunktes wird automatisch der Streudienst alarmiert und über die betroffenen Standorte informiert. Über das Smart City Cockpit erhalten Bürger eine Eiswarnung. Folglich ermöglichen Sensoren Anwendungsszenarien wie den smarten Winter- und Streudienst. Gefahrensituationen durch Glatteis können zukünftig bereits vor dem Auftreten gezielt verhindert werden.

#### 4.3.4 Bewegungs-Sensoren

Die in der Taxonomie identifizierten 22 IoT-Sensor-Typen in der Kategorie „Bewegungs-Sensoren“ (s. Kapitel 4.2) können aufgrund der Identifizierbarkeit personenbezogener Daten weiter gruppiert werden.

##### De-Identifizierbar:

- | Bewegungsmelder, Berührungssensoren, Beschleunigungssensoren (3-Achsen-Beschleunigung), Bewegungszähler, Drehmomentsensoren, Drehzahlsensoren, Drucksensoren, Erdbebensensoren, Geschwindigkeitssensoren, Höhenmesser, Kraftsensoren, Magnetfeldsensoren, Näherungssensoren, Push-Button, Reed-Schalter (offen/zu), Tastschalter, Ultraschallsensoren (Abstandssensoren), Vibrationssensoren, Wegesensoren (Abstandssensoren)

##### Identifizierbar:

- | GPS-Tracker, Pax-Counter (WLAN und Bluetooth), RFID-Sensoren (Reader/Scanner)

**Bewegungsmelder** oder auch Aktivitätserkennungssensoren erfassen plötzliche Bewegungen in der Umgebung und werden der optischen Messgröße zugeordnet. Bewegungsmelder können, sowohl durch Ultraschall als auch über Infrarot (Schanz 2004, S. 95, S. 109) Bewegungen von Personen, Tieren oder Objekten aufzeichnen. Durch Auslösen des Sensors wird ein Datenpaket an die urbane Datenplattform übertragen. Wenn keine Bewegung registriert werden kann, wird in definierten Intervallen ein Statusbericht übertragen. Anwendungsszenarien neben den klassischen Bewegungsmeldern zur automatischen Lichtsteuerung, die letztendlich Energieeinsparungen ermöglichen, stellen Einbruchsmelder dar.

**Bewegungszähler** werden ebenfalls der optischen Messgröße zugeordnet und funktionieren ähnlich wie Bewegungsmelder. In Abgrenzung dazu erfassen Bewegungszähler die Häufigkeit von Bewegungen oder Vibrationen

und senden diese Datenpakete über Netzwerkprotokolle wie LoRaWAN an urbane Datenplattformen. Mögliche Anwendungsszenarien sind die Personenzählung oder Verkehrszählung. Die Limitation und Einschränkung der Validität der Messergebnisse ergibt sich aus der Tatsache, dass zunächst jede Bewegung gezählt wird, unabhängig davon, ob diese durch Personen, Tiere, Autos, Fahrräder oder sonstige bewegliche Objekte erzeugt werden.

**Beschleunigungssensoren** oder Drei-Achsen-Beschleunigungssensoren (auch Accelerometer) erfassen die Änderung der Bewegung, Ausrichtung und Vibration und werden der dynamischen Messgröße zugeordnet. Durch Bewegung und Vibration werden Schwingungen in elektrische Signale umgewandelt (ebd., S. 68).

Anwendungsszenarien können die Überwachung der Vibrationen von Brücken und Gebäuden darstellen. Beschleunigungssensoren erweisen sich auch als Alternative zu GPS-Trackern, sofern lediglich die Bewegung oder die Geschwindigkeit eines Objektes wie Fahrrad, Auto und öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV) dargestellt werden soll, die genaue Position jedoch nicht relevant ist. Hochempfindliche Accelerometer können auch zur Erdbebenwarnung und -messung eingesetzt werden.

**Reed-Schalter** können der magnetischen Messgröße zugeordnet werden und reagieren auf externe Magnetfelder, weshalb Reed-Schalter auch zu den Magnetfeldsensoren gehören. In einem Glasröhrchen eingeschmolzene Schaltkontakte werden durch Einfluss eines äußeren Permanentmagneten geschlossen. Infolgedessen schließt sich der Stromkreis und ein elektrisches Signal wird erzeugt (ebd., S. 122). Reed-Schalter eignen sich deshalb zur Meldung des Zustandes ‚offen‘ oder ‚zu‘. Das Potential von Reed-Schaltern liegt durch die schmale Bauweise im vielfältigen Einsatzbereich.

Daraus ergeben sich mögliche Anwendungsszenarien im Kontext einer Smart City. Durch den Einsatz von Reed-Schaltern können Fenster und Türen kommunaler Liegenschaften in Echtzeit überwacht werden. Sollten beispielsweise Türen oder Fenster ohne Erlaubnis geöffnet oder geschlossen werden, kann ein Alarm ausgelöst werden. Unter anderem ermöglichen Reed-Schalter zukünftig smartes Facilitymanagement kommunaler Liegenschaften.

**Push-Button** sind Taster, die durch Drücken einen Stromkreis schließen und dadurch ein elektrisches Signal erzeugen. Wird der Tastschalter nicht mehr gedrückt, springt er in seine Ausgangslage zurück. Der Stromkreis wird unterbrochen und kein elektrisches Signal erzeugt. Drucktastschalter werden der mechanischen Messgröße zugeordnet (ebd., S. 55-57).

Mögliches Anwendungsszenario für Push-Button in der Smart City ist neben dem Einsatz als Notruftaster, der durch Drücken einen Alarm absetzt, die Anwendung als Sofort-Stimmungsbarometer zur Bürgerbefragung im öffentlichen Raum. Push-Buttons können sowohl als stationäre smarte Objekte in Form von Notruftastern in öffentlichen Gebäuden wie Schulen, Universitäten, Sport- und Schwimmhallen, Verwaltungsgebäuden und an öffentlichen Plätzen eingesetzt oder als persönliche smarte Objekte am Körper und an Kleidungsstücken getragen werden. Notruftaster im Smart Home können das selbstbestimmte Leben im Alter sicherer machen. Im nicht gedrückten Zustand sendet der Sensor in definierten Intervallen einen Statusbericht. Sofort-Stimmungsbarometer bestehen aus mehreren Push-Buttons, welche jeweils mit einer Antwort oder einer Stimmung auf eine übergeordnete Frage belegt sind. Bürger können durch Drücken der entsprechenden Taste ihre Antwort oder aktuelle Stimmung mitteilen. In Echtzeit können die Sensordaten auf der urbanen Datenplattform ausgewertet und im Smart City Cockpit transparent dargestellt werden.

**GPS-Tracker** (Global Positioning System) werden zur genauen Positionsbestimmung von Fahrzeugen, Gegenständen oder Personen eingesetzt. GPS-Tracker ermöglichen vielfältige, heterogene Anwendungsszenarien. Allgemein kann die Positionsbestimmung beispielsweise automatisch in Echtzeit, zeitgesteuert in festgelegten Intervallen oder per Befehl erfolgen. Als Netzwerkprotokoll kann das effiziente LoRaWAN-Protokoll zur Kommunikation gewählt werden. Aus kommunaler Sicht stellen mögliche Einsatzfelder der kommunale Fuhrpark, der ÖPNV oder Leihfahrräder dar. Aus Sicht der Bürger können perspektivisch auch Haustiere, Kinder oder ältere Menschen mit einem GPS-Tracker ausgestattet werden. Für letzteres Anwendungsszenarium bieten eingebaute Notfall-Taster zur sofortigen Benachrichtigung des Pflegepersonals enorme Potentiale für das längere, selbstbestimmte Leben im Alter.

GPS-Tracker werden aufgrund der erfassbaren personenbezogenen Daten als „identifizierbar“ eingestuft. Als personenbezogene Daten gelten hierbei vor allem die Standortdaten. Diese ortsbezogenen Informationen über eine natürliche Person lassen indirekt Rückschlüsse auf die als besonders sensibel geltenden persönlichen Merkmale zu. Anhand der Analyse der Standortdaten oder der Verknüpfung mit weiteren (kommunalen) Datensätzen können so Rückschlüsse auf den Wohnort, Arbeitsort und tägliche Routinen gezogen werden. Das Tracking kommunaler Fuhrparke könnte darüber hinaus als Überwachung von Mitarbeitern bewertet werden und muss deshalb vor der Umsetzung rechtlich geprüft werden. Sollte der Einsatz von GPS-Trackern unvermeidbar sein, um digitale Services wie beispielsweise optimiertes Routing oder die Ortung von Leihfahrrädern zu ermöglichen, muss die Anonymisierung und Pseudonymisierung der Standortdaten gewährleistet sein.

### 4.3.5 Umwelt-Sensoren

Die in der Taxonomie identifizierten 23 IoT-Sensor-Typen in der Kategorie „Umwelt-Sensoren“ (s. Kapitel 4.2) können aufgrund der Identifizierbarkeit personenbezogener Daten weiter gruppiert werden.

#### De-Identifizierbar:

- | Durchflusssensoren (Gase & Flüssigkeiten), Feinstaubsensoren, Feuchtigkeitssensoren (Boden, Erde), Flüssigkeitssensoren, Füllstandssensoren, Kohlenmonoxid-Sensoren, Kohlenstoffdioxid-Sensoren (CO<sub>2</sub>), Luftdrucksensoren, Luftfeuchtigkeitssensoren, Luftqualitätssensoren, Luftstromsensoren, Oxygenium-Sensoren (O<sub>2</sub>), pH-Wert-Sensoren, Rauchmelde-Sensoren, Spannungssensoren, Stickoxid-Sensoren, Wasseraustrittssensoren, Wasseraustrittssensoren mit Seilsensor, Wasserqualitätssensoren, Wasserstandssensoren, Windgeschwindigkeitssensoren

#### Identifizierbar:

- | Gas & Fluid Smart Meter, Smart Meter

**Füllstandssensoren** werden der geometrischen Messgröße zugeordnet. Zur Messung des Füllstandes werden häufig Ultraschallsensoren zur Messung der Entfernung der Oberfläche des Behältnisses zum Sensor eingesetzt, wobei beispielsweise auch Lichtschranken zur Füllstandbestimmung oder kapazitive Füllstandssensoren möglich sind (Schanz 2004, S. 44-47).

Füllstandssensoren ermöglichen vielfältige Smart-Waste Anwendungsszenarien oder schaffen die Möglichkeit zur Überwachung von (Wasser-) Tankfüllständen. Die Herausforderungen im Einsatz, beziehungsweise bereits bei der Anbringung von Sensoren zur tatsächlichen, exakten Füllstandmessung, sind hauptsächlich auf die Form der Behältnisse und der Art der Füllung zurückzuführen. Erstgenannte Herausforderung lässt sich durch Anbringen von zwei Sensoren pro Behältnis überwinden: ein Sensor zur Minimumüberwachung am Boden sowie ein Sensor zur Maximumüberwachung oberhalb. Die Herausforderung, bei nicht flüssiger Füllung, liegt in der Bildung einer gewölbten Oberfläche innerhalb des Behältnisses. Mithilfe eines dritten (Ultraschall-) Sensors, der oberhalb des Behältnisses mittig angebracht wird, könnte der tatsächlichen Füllstand aus den drei Sensordaten abgebildet werden. Füllstandssensoren übertragen Datenpakete auf die urbane Datenplattform entweder bei Erreichen von Ober- oder Untergrenzen oder melden in definierten Intervallen einen Statusbericht. Zukünftig werden Entsorgungsbetriebe automatisch über den Status der Behältnisse informiert und optimale Routen zur Leerung geplant.

**Luftfeuchtigkeitssensoren und Feuchtigkeitssensoren** am Boden, im Boden oder an Blättern funktionieren nach demselben Messprinzip und werden

der klimatischen Messgröße zugeordnet. Feuchtigkeitssensoren erfassen im Allgemeinen die Luftfeuchtigkeit im jeweiligen Gasgemisch. Sensoren können sowohl die absolute Dichte als auch die relative Feuchte, also „...das Verhältnis der absoluten Feuchte zur Sättigungsfeuchte...“ erfassen (ebd., S. 99). Feuchtigkeitssensoren können neben der klassischen Luftfeuchtigkeitsmessung innerhalb von Räumen und Gebäuden oder im Außenbereich in vielseitigen Anwendungsszenarien eingesetzt werden. Im Kontext einer Smart City können kommunale Liegenschaften wie Büros, Schulen, Museen, Sporthallen, Schwimmbäder oder Lagerhallen von Betriebshöfen mit Luftfeuchtigkeitssensoren ausgestattet werden. Bodenfeuchtigkeitssensoren, verteilt in städtischen Parks, Blumenbeeten, Blumenkästen oder an Baumalleen, ermöglichen die Überwachung der städtischen Grünanlagen.

Luftfeuchtigkeitssensoren und Bodenfeuchtigkeitssensoren senden in Echtzeit oder in definierten Intervallen über Netzwerkprotokolle wie LoRaWAN erfasste Datenpakete, die auf urbanen Datenplattformen analysiert und in Dashboards zur Statusabfrage bereitgestellt werden. Letztendlich machen diese Sensoren bedarfsorientierte, effiziente Bewässerungen durch städtische Betriebe wie Gärtnereien möglich oder verhindern, durch Warnung vor anhaltend hoher Luftfeuchtigkeit in Räumen, die Schimmelbildung.

**Luftqualitätssensoren** und **Luftgütesensoren** werden den chemischen und biologischen Messgrößen zugeordnet. Luftqualitätssensoren sind Gasensoren in Form von Halbleitermaterialien, deren Widerstand sich bei unterschiedlichen Luftgemischen in der Umgebung ändert, beispielsweise wenn sich Gasanteile oder deren Konzentration verändern (ebd., S. 127).

Kohlenstoffdioxid-Sensoren ( $\text{CO}_2$ ), Oxygenium-Sensoren ( $\text{O}_2$ ), Kohlenmonoxid-Sensoren, et cetera werden häufig als Messstationen zur Luftqualitätsmessung zusammengefasst. Deren Ergebnisse können sowohl als Index für Luftqualität als auch deren Einzelmesswerte auf urbanen Datenplattformen integriert und im Smart City Cockpit dargestellt werden. Neben der Messung im Stadtgebiet ergeben sich auch Anwendungsszenarien für Messungen des  $\text{O}_2$ - und  $\text{CO}_2$ -Luftgehalts in Räumen oder Büros.

**Wasseraustrittssensoren** mit oder ohne Seilsensor werden der klimatischen Messgröße zugeordnet und funktionieren ähnlich wie Feuchtigkeitssensoren: In Folge von Wasseraustritt verändert sich der elektrische Widerstand am Sensor.

Seilsensoren bieten die Möglichkeit zur Überwachung über- und unterirdischer Rohrleitungen oder großer Flächen. Anwendungsszenarien sind die Überwachung von Rohrleitungen und Knotenpunkte der Wasserversorgung, der Abwasserkanäle oder Kellerräume. Zukünftig können durch



den Einsatz von Wasseraustrittssensoren Lecks in Echtzeit erkannt und große Rohrbrüche vermieden werden.

**Smart-Meter** können auch als intelligent vernetzte Stromzähler bezeichnet werden. Durch die Einbindung in Kommunikationsnetzwerke können Smart Meter nicht nur die aktuellen Verbrauchsdaten in Echtzeit oder in definierten Intervallen übermitteln, sondern auch Informationen wie Tarifänderungen von Energieversorgungsunternehmen erhalten. In Kombination mit Smart Grid, einem intelligenten Stromnetz, lassen sich die Ressourcenbedarfe im dezentralen Stromnetz besser steuern und sich letztendlich die Netzstabilität verbessern. Smart-Meter werden aufgrund der erfassbaren personenbezogenen Daten als „identifizierbar“ eingestuft. Als personenbezogene Daten gelten hierbei vor allem Verbrauchsdaten, die natürlichen Personen oder einem Haushalt indirekt zugeordnet werden können. Verbrauchsdaten lassen Rückschlüsse auf die Anzahl der im Haushalt lebenden, natürlichen Personen und deren Lebensstandard ziehen und werden deshalb als sensibel eingestuft. Durch Zustimmung der natürlichen Personen können Verbrauchsdaten zum Beispiel über das LoRaWAN-Netzwerkprotokoll automatisch an Stadtwerke zur Abrechnung gesendet werden. Verbraucher erhalten in Echtzeit Analysen zur Stromnutzung und persönliche Energiespartipps. Zukünftig könnten Verbrauchsdaten durch Anonymisierung und Pseudonymisierung zu statistischen Zwecken genutzt und anderen Verbrauchern als Vergleichsdaten zur Verfügung gestellt werden. Der Einsatz von Smart Metern in kommunalen Liegenschaften wie Schulen, Hallen, Schwimmbädern oder Verwaltungsgebäuden verhelfen zu Effizienzsteigerungen bei der Erfassung und Abrechnung von Verbrauchsdaten.

Ähnliche Potentiale und Anwendungsszenarien ergeben sich auch für **Gas Smart Meter** und **Fluid Smart Meter**.

#### 4.4 Anwendungsszenarien

In den vorangegangenen Abschnitten wurden bereits einige, besonders relevante, IoT-Sensor-Typen analysiert und erste Anwendungsbeispiele beschrieben. Im folgenden Kapitel wird beispielgebend an zwei konkreten Anwendungsszenarien sowie einem visionären Leitbild von Smart Urban Planning zukünftiges Potential durch den Einsatz von IoT-Sensoren skizziert. Hierbei liegt der Fokus zunächst stärker auf den Potentialen von IoT-Sensoren für eine nachhaltige, digitale Stadtentwicklung. Darauf aufbauend können konkrete, bürgerorientierte Anwendungen entwickelt werden.

##### 4.4.1 Smarte Versorgungsinfrastruktur

Hierbei geht es um die Realisierung der Vision einer smarten Wasser-, Strom- und Gasversorgung inklusive der Überwachung des gesamten

Versorgungs-netzes vom Versorger bis zum Endverbraucher durch den Einsatz von Sensoren.

Bisher läuft sowohl die Abrechnung der Versorgung als auch die Überwachung des Versorgungsnetzes analog ab. Jährlich werden durch Mitarbeiter der Versorgungsunternehmen, die oftmals kommunale Unternehmen sind, die Zählerstände der Haushalte manuell abgelesen. Alternativ müssen Verbraucher ihre Zählerstände persönlich ablesen und postalisch oder elektronisch übermitteln. Ebenso werden routinemäßig begehbare Versorgungsleitungen und -Schächte überprüft, obgleich unterirdische Leitungen nicht optisch überprüft werden können. Die aktuelle Herausforderung in der Versorgung lässt sich am besten am Beispiel der Wasserversorgung, die ebenso wie die Strom- und Gasversorgung zur Erfüllung der kommunalen Daseinsvorsorge zählt, beschreiben. Angesichts knapper Haushaltskassen und hohen Investitionsrückstaus in kommunalen Versorgungsnetzen sind viele Leitungen marode und veraltet. Lecks, Rohrbrüche oder Keimbelastung des Wassers sind die Folge maroder Infrastrukturen, wobei der anteilige Wasserverlust zum Bruttowasseraufkommen in Deutschland in der öffentlichen Wasserversorgung mit durchschnittlich 5,3% im Jahr 2017 im europäischen Vergleich eher gering ist (vgl. BDEW 2019). In Ländern wie Frankreich oder England beträgt der Wasserverlust mehr als das Doppelte bis Dreifache (vgl. ebd.). Dennoch können bereits kleine Lecks oder Rohrbrüche teuer und Reparaturen aufwendig werden.

Zukünftig soll dank smarterer IoT-Sensoren die gesamte Versorgungsinfrastruktur in Echtzeit überwacht sowie Verbräuche automatisiert erfasst und abgerechnet werden. Die Vision der smarten Wasser-, Strom- und Gasversorgung ist Teil der Sicherstellung der kommunalen Daseinsvorsorge und folgt gleichzeitig dem Leitbild „Resiliente Stadt“<sup>16</sup> und „Resiliente Infrastruktur“.

Zur automatisierten Erfassung und Abrechnung von Verbrauchsdaten in Echtzeit sollen in Haushalten und kommunalen Liegenschaften Smart Meter, Gas Smart Meter und Wasser Smart Meter eingesetzt werden. Informationen zu Tarifänderungen oder personalisierten Energiespartipps lassen sich auf Grundlage smarterer Verbrauchszähler ebenfalls realisieren.

---

<sup>16</sup> Vor dem Hintergrund des Klimawandels und einer nachhaltigen Stadtentwicklung werden Lösungsstrategien aus Stadtentwicklungs-, Standortplanungs- und Infrastrukturperspektive erarbeitet und unter dem Begriff „Resiliente Stadt“ zusammengefasst, die sich mit der Frage auseinandersetzen, wie sich Städte zukünftig unter äußeren Einflüssen, Störungen oder Stress behaupten und weiterhin handlungsfähig sein können. Ein Forschungsgutachten des Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH gibt Aufschluss über das Konzept „Resiliente Stadt“:  
[https://epub.wuppertalinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/6614/file/6614\\_Resiliente\\_Stadt.pdf](https://epub.wuppertalinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/6614/file/6614_Resiliente_Stadt.pdf)

Zur Überwachung von unterirdischen Versorgungsleitungen eignen sich besonders LoRaWAN-Sensoren, deren Funkstandard sich durch eine gute Durchdringung auch im Boden auszeichnet. So können Durchflusssensoren für Flüssigkeit und Gas die Durchflussmenge sowie die Durchflussgeschwindigkeit in Rohrleitungen in Echtzeit erfassen und über das LoRaWAN-Netzwerkprotokoll zum Abruf über die urbane Datenplattform verfügbar machen. Drucksensoren ergänzen die Überwachung des Leitungsdrucks von Wasser und Gas. Auf dieser Datengrundlage lassen sich neben großen Wasserrohrbrüchen auch kleinere Leckagen erkennen. Die flächendeckende Ausbringung von Sensoren ermöglicht darüber hinaus das Potential zur standortgenauen Erfassung von Leckagen und Rohrbrüchen. Außerdem können entlang von Rohrleitungen oder an Knotenpunkten durch lokale Wasseraustrittssensoren, Wasseraustrittssensoren mit Seilsensor<sup>17</sup> oder Feuchtigkeitssensoren Leckagen erkannt werden. Um die Schadstoff- und Keimbelastung maroder Versorgungsleitungen zu überwachen, können Wasserqualitätssensoren beim Endverbraucher Anschluss über die tatsächliche Wassergüte liefern. Präventiv können Bodenfrostsensoren in Kombination mit Temperatursensoren das Absinken der Temperaturen bei Annäherung an den Gefrierpunkt erfassen und einen Alarm senden, um über Gegenmaßnahmen entscheiden zu können. Das Einfrieren von Wasserleitungen soll dadurch zukünftig vermieden werden. Über Dashboards, im Optimalfall basierend auf Geodaten, werden die Versorgungsnetze inklusive der Sensoren, Sensorstandorte und Sensordaten visuell dargestellt. Im Sinne von Big Data werden auch Langzeitmessungen in Kombination mit Echtzeitdaten analysiert und nutzbar dargestellt.

#### 4.4.2 Smarte Klimaüberwachung

Hierbei geht es um die Realisierung der Vision einer smarten Klima- und Umweltüberwachung im Sinne einer nachhaltigen, digitalen Stadtentwicklung. Spätestens seitdem Konstanz am 02. Mai 2019<sup>18</sup> als erste Stadt Deutschlands den Klimanotstand ausgerufen hat, ist auch das Thema Klima- und Umweltüberwachung in den deutschen Kommunen angekommen. Seitdem haben zahlreiche Kommunen und Landkreise den Klimanotstand ausgerufen (vgl. Fritzen 2019). Bereits im Jahr 2017 wurde das Förderprogramm „Saubere Luft 2017-2020“ des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) zur Entwicklung von Green City-Masterplänen gestartet. Bei der Erstellung der Green City-Masterpläne geht es um konkrete Maßnahmen zur Reduktion der Stickstoffoxide in der Luft (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI 2019).

---

<sup>17</sup> Wasseraustrittssensoren mit Seilsensor können beispielsweise entlang eines gesamten Rohrleitungssystems angebracht werden und erkennen dadurch Leckagen über die gesamte Länge der Leitung.

<sup>18</sup> „Der Konstanzer Gemeinderat hat am 2. Mai 2019 einstimmig eine Resolution zum Aufrufen des Klimanotstands beschlossen“:  
<https://www.konstanz.de/service/pressereferat/pressemitteilungen/erster+jahrestag+klimanotstand>

Demgegenüber steht die aktuelle Herausforderung fehlender, flächen-deckender und permanenter Erfassung von Klima- und Umweltdaten. Bisher finden Messungen in definierten Perioden stichprobenartig statt, weshalb bestehende Datenbestände klein und oftmals veraltet sind. Im Sinne einer nachhaltigen digitalen Stadtentwicklung und dem Konzept „Resiliente Stadt“ sollen zukünftig die Potentiale der Erfassung von Klima- und Luftqualitätsdaten durch IoT-Sensoren genutzt werden. Durch einen flächen-deckenden Einsatz der in Kapitel 4.3.5 aufgeführten Umwelt-Sensoren zur Klima- und Luftqualitätsmessung in Kombination mit Thermo-Sensoren aus Kapitel 4.3.3 sowie UV- und Lichtsensoren aus Kapitel 4.3.2 lassen sich nicht nur die Luftqualität selbst, sondern auch die Luftzirkulation, Kaltluftströme und städtische Wärmeinseln identifizieren. IoT-Sensoren senden die erfassten Daten in Echtzeit, beispielsweise über das LoRaWAN-Netzwerkprotokoll. Daten können über APIs auf der urbanen Datenplattform abgerufen werden. Die Anbindung der Plattform an Big Data Cloud-Speicher ermöglicht darüber hinaus die Langzeitspeicherung und Analyse der Daten. Auch hier können auf Geodaten basierende Dashboards eine visuelle Darstellung und Analyse der Daten erzeugen.

#### **4.4.3 Smart Urban Planning**

Anthopoulos und Vakali (2012) untersuchen in ihrem Paper, unter Anwendung der städtebaulichen Dimensionen, die koexistierenden Konzepte Smart City und Urban Planning auf gemeinsame Schnittmengen und den Einfluss von der Smart City auf die Stadtplanung und umgekehrt. Städtebauliche Dimensionen umfassen demnach den Schutz der Umwelt, nachhaltiger Wohnungsbau, Ressourcenmanagement und kohärente, regionale Wachstumsförderung (vgl. Anthopoulos & Vakali 2012, S. 179 f.). Auf Grundlage der Gedanken von Anthopoulos und Vakali (2012) lässt sich ein neues, gesamtheitliches Leitbild von Smart Urban Planning erarbeiten.

Unter Smart Urban Planning versteht sich die Vision oder das Leitbild der nachhaltigen Stadtentwicklung auf Basis umfassender (Sensor-) Daten durch intelligente Vernetzung von smarten Objekten und cyberphysischen Systemen der Smart City. Dabei schaffen IoT-Sensoren erstmals die Möglichkeit, den realen, physischen und den virtuellen, digitalen Raum einer intelligent vernetzten Stadt in Echtzeit miteinander zu verknüpfen und neue Anwendungsszenarien zur ganzheitlichen Lösung urbaner Herausforderungen an der Schnittstelle zwischen Stadtplanung und Smart City zu erschließen.

Im Zentrum von Smart Urban Planning steht die Entwicklung einer virtuellen Darstellung der Stadt in einem erlebbaren 3D-Modell auf Basis von umfassenden Geoinformationen und Daten urbaner Datenplattformen. Auf der neu geschaffenen virtuellen Plattform lassen sich heterogene Datenbestände in Form von historischen Daten und Echtzeitdaten integrieren und

über verschiedene Darstellungsebenen erschließen, analysieren und letztendlich visuell nutzbar machen. Durch Smart Urban Planning kann darüber hinaus infolge eines umfassenden Datenbestands das Zukunftskonzepts der „Resilienten Stadt“ strategisch verfolgt werden. Die aktuelle Herausforderung, dass Entscheidungen aus Stadtentwicklungs-, Stadtplanungs- und Infrastrukturperspektiven auf Basis fehlender, unzureichender oder veralteter Datengrundlagen gefällt werden, kann zukünftig gelöst werden. Smart Urban Planning ermöglicht durch Big Data Analytics und unter Einsatz von KI die Modellierung und Entwicklung von Prognosen zukünftiger Auswirkungen, die im Zuge von Stadtentwicklung oder städtebaulicher Maßnahmen entstehen. Indes erfassen Modelle und Prognosen die Auswirkungen auf alle oben aufgeführten städtebaulichen Dimensionen.

Konkret geht es um die Beantwortung der Frage, wie sich beispielsweise der Neubau von großen Gebäuden und Brücken oder Verdichtung auf die Änderung von Luftzirkulation, Kaltluftströmen zur Durchlüftung der Stadt, den Schadstoffgehalt in der Luft oder die Wärmeentwicklung in Quartieren auswirkt. Ähnliche Fragestellungen lassen sich auf die Verkehrs- und Versorgungsinfrastruktur anwenden. Zudem lassen sich Auswirkungen von städtebaulichen Maßnahmen in Echtzeit verfolgen – sei es die Sperrung von Straßen und Brücken, der Neubau von Umgehungsstraßen oder die Einführung von Tempolimits. Modellieren lassen sich auch die Auswirkungen neuer Personenströme auf die Kerninfrastruktur, die durch Erschließung von Neubaugebieten, der Erweiterung von Wohnblöcken oder generell durch weitere Urbanisierung entstehen. Eine Smart Urban Planning-Plattform könnten zukünftig alle Ämter, lokale (Bau-) Unternehmen oder Bürger gleichermaßen nutzen, um stadtplanerische Entscheidungen treffen zu können oder den Status Quo in Form von Echtzeitdaten zu überwachen.

Aufgrund der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten setzt Smart Urban Planning eine flächendeckende Ausbringung von IoT-Sensoren zur Erfassung aller Dimensionen einer Stadt voraus, um die Potentiale vollständig nutzbar machen zu können. Zur prototypenhaften Umsetzung und Entwicklung einer Smart Urban Planning-Plattform eignet sich zunächst ein definiertes Stadtquartier als Experimentierfeld.

## 5 Anwendungsfälle am Beispiel der Stadt Ulm

### 5.1 Smart City Ulm

Die Geschäftsstelle Digitale Agenda der Stadt Ulm, unter Leitung von Sabine Meigel, hat die strategische und operative Gesamtprojektleitung aller städtischen Digitalisierungsvorgaben inne. Die Geschäftsstelle ist unter der Zentralstelle im Bereich des Oberbürgermeisters Gunter Czisch angesiedelt (Stadt Ulm 2019b).

Bereits seit dem Jahr 2015 bearbeitet die Stadt Ulm mit sehr großem Erfolg das Projekt Zukunftsstadt 2030+, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und hat sich deshalb frühzeitig als eine der Leuchtturmstädte in Deutschland etabliert (Kommune 21 2019; Stadt Ulm 2019f). Von 2017 bis 2018 konnte Ulm unter aktiver Bürgerbeteiligung erfolgreich die zweite Projektphase fortführen und sich somit als eine der wenigen Städte für die dritte Projektphase durchsetzen. Seit Mitte 2019 läuft nun die dritte Phase unter dem Motto „Nachhaltigkeit digital mitgestalten - Internet der Dinge für ALLE“ (Stadt Ulm 2019f).

Im Oktober 2018 startete zudem das Förderprojekt „Zukunftskommune @bw“.

In den kommenden Jahren wird die Stadt Ulm gemeinsam mit der Stadtgesellschaft, der Wissenschaft und Unternehmen eine offene und zentrale urbane Datenplattform als Basisinfrastruktur für digitale Lösungen für die Stadt von Morgen aufbauen (Stadt Ulm 2019e). Das Projekt Zukunftskommune@bw ist Teil der Digitalisierungsstrategie digital@bw der Landesregierung Baden-Württemberg.<sup>19</sup>

Im Juli 2019 konnte sich die Stadt Ulm bei der Ausschreibung „Smart Cities made in Germany“<sup>20</sup> des Bundesministeriums des Inneren, für Bau und Heimat (BMI) gegen andere Großstädte<sup>21</sup> durchsetzen und erhält nun ab Januar 2020 Fördermittel in Höhe von 8 Mio. Euro für die Entwicklung und Umsetzung einer sektorübergreifenden Strategie zwischen Stadtentwicklung und digitaler Transformation. Weitere 4 Mio. Euro steuert die Stadt selbst bei (vgl. Stadt Ulm 2019d). Obendrein läuft zum Zeitpunkt dieser Arbeit die Ausschreibung für die Dienste- und Datenplattform der Stadt Ulm, die im Laufe des Jahres 2020 entwickelt werden soll (Stadt Ulm 2019c). Bis zum Start dieser Plattform sollen in einem Ulmer Stadtquartier

---

<sup>19</sup> Digitalisierungsstrategie des Landes Baden-Württemberg: <https://www.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/dateien/PDF/Digitalisierungsstrategie-BW.pdf>.

<sup>20</sup> Weitere Informationen zum Förderprojekt unter: <https://www.smart-cities-made-in.de>.

<sup>21</sup> Als Großstädte gelten Städte mit über 100 000 Einwohner.

bereits vielfältige IoT-Sensoren unter dem Projektnamen LoRaPark installiert und getestet werden, um zum Start der Plattform bereits Sensordaten liefern zu können. Der LoRaPark stellt zukünftig ein öffentliches Experimentierfeld für LoRaWAN und IoT-Sensortechnik innerhalb der Stadt dar (Buchenschein, Schneider, Kargl, & Graf 2019).

Insgesamt orientieren sich die umfassenden Digitalisierungsvorhaben der Stadt Ulm an der Smart City Charta, deren Leitlinien sich im Ulmer Ansatz wiederfinden.<sup>22</sup> Der **Ulmer Ansatz** schließt nicht nur die zahlreichen beispielgebenden online und analog stattfindenden Bürgerbeteiligungsverfahren ein, sondern stellt auch die unterstützenden Ulmer Kernziele als feste Leitplanken zur Orientierung ins Zentrum der Entwicklung. Die Ulmer Kernziele sind: für alle, clever, sicher, nachhaltig und offen. An diesen Zielen müssen sich demgemäß alle konkreten Lösungen messen (vgl. Stadt Ulm 2019b, 2019a). Diesem Ansatz folgend wurden bereits zu Beginn der Digitalisierungsvorhaben Formate der Bürgerbeteiligung entwickelt, erprobt und seither verstetigt. Beispiele sind neben Bürgerwerkstätten, Keynotes und Abschlusspräsentationen vor allem auch Online-Beteiligungsformate wie im Projekt Zukunftsstadt 2030 über die Homepage [Zukunftsstadt-ulm.de](https://www.zukunftsstadt-ulm.de),<sup>23</sup> die auch zur Sammlung von Projektideen aus der Bürgerschaft genutzt wird. Die umfassenden Abschlussberichte der wissenschaftlichen Begleitforschung über Zukunftsstadt Phase 1 (von Lucke, Geiger, Schiller & Breuing 2016) und Phase 2 (Etscheid, von Lucke & Meigel 2018) stellen Ablauf, Ergebnisse und Weiterentwicklung der Projektideen aus den Bürgerbeteiligungsformaten ausführlich dar.

---

<sup>22</sup> Die Smart City Charta führt Leitlinien und konkrete Handlungsempfehlungen bei der strategischen Entwicklung und Umsetzung von Digitalisierungsvorhaben im Sinne einer nachhaltigen und integrierten Stadtentwicklung auf.  
<https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/veroeffentlichungen/themen/bauen/wohnen/smart-city-charta-kurzfassung-de-und-en.pdf>.

<sup>23</sup> Zukunftsstadt Ulm: <https://www.zukunftsstadt-ulm.de>.

## 5.2 Handlungsfelder und Anwendungsfälle der Stadt Ulm

In der Hauptausschusssitzung des Ulmer Gemeinderates vom 14.11.2019 wurden die im Projekt Zukunftskommune@bw vorgeschlagenen Projektideen (GD 404/19)<sup>24</sup> zur weiteren Umsetzung beschlossen. Darunter befinden sich unter anderem die folgenden, ausgewählten Anwendungsfälle, die in leicht abgewandelter Variante ebenfalls Teil der Leistungsbeschreibung zur Dienste- und Datenplattform<sup>25</sup> waren und alle dem Handlungsfeld „Umwelt, Energie, Ver- und Entsorgung“ im Projekt Zukunftskommune@bw zugeordnet werden können. In den anschließenden Abschnitten werden diese skizziert und auf Potentiale und mögliche Hemmnisse bewertet. Hintergrund der Auswahl von drei Anwendungsfällen aus diesem Handlungsfeld ist das große Potential, das durch den Einsatz von Sensoren in diesem Bereich entsteht. Zum aktuellen Zeitpunkt bieten Anwendungen aus anderen Handlungsfeldern im Projekt Zukunftskommune@bw keine vergleichbar umfangreichen Einsatzmöglichkeiten von Sensoren, um die Ergebnisse der Taxonomie und Analyse der Sensoren zu spiegeln.

### 5.2.1 Intelligente Abfallbehälter

Als erster Anwendungsfall der Leistungsbeschreibung ist der intelligente Abfallbehälter skizziert (vgl. Stadt Ulm 2019c, S. 13 f.), der später im Rahmen der Projektkonkretisierung als digitaler Füllstandsmelder für Wertstoffsammelplätze geschärft wurde (Stadt Ulm 2019a).

**Beschreibung des Anwendungsfalls:** Bisher haben die Ulmer Entsorgungsbetriebe keine Informationen zum aktuellen Füllstand der im gesamten Quartier verteilten Abfallbehälter und Wertstoffsammelplätze. Aus diesem Grund werden die Abfallbehälter im definierten Rhythmus in festen Touren einzeln angefahren und geleert. Die gegenwärtige Herausforderung besteht darin, dass einzelne Abfallbehälter überflüssig geleert werden oder andere Abfallbehälter bereits überquellen, was zusätzlicher Aufwand bei der Leerung und Reinigung zur Folge hat (Stadt Ulm 2019c, S. 13 f.).

Eine ähnliche Problematik stellen die nicht durch Mitarbeiter der Stadt betreuten Wertstoffsammelplätze dar (Stadt Ulm 2019a). Zukünftig sollen Füllstandssensoren die Überwachung einer Vielzahl von Abfallbehältern im Quartier sowie der Wertstoffsammelplätze ermöglichen. Abhängig vom Füllstand der Abfallbehälter und Wertstoffsammelplätze werden optimale Routen zur Leerung durch die Entsorgungsbetriebe errechnet. Infolge

---

<sup>24</sup> Die Beschlussvorlage (GD 404/19) zu den Umsetzungsprojekten sowie die umfangreichen Anhänge sind im Bürgerinformationssystem der Stadt Ulm abrufbar: <https://buengerinfo.ulm.de/infobi.php>.

<sup>25</sup> Bei der „Leistungsbeschreibung Dienste- und Datenplattform Stadt Ulm“ handelt es sich um ein vertrauliches, internes Dokument, das nur im Rahmen der Ausschreibung veröffentlicht wurde.



dieser bedarfsgerechten Leerungen gehören unnötige Leerfahrten der Vergangenheit an. Gleichzeitig können sich Bürger online über den Füllstand, insbesondere der Wertstoffsammelplätze, informieren und verhindern dadurch Doppelfahrten aufgrund Überfüllung der Sammelplätze (ebd.).

**Relevante Sensorik:** Für die Stadt Ulm empfehlen sich aufgrund der konkreten Anforderungen vor allem IoT-Sensor-Typen aus den Kategorien Optik-Sensoren und Umwelt-Sensoren. Für klassische Abfallbehälter oder Wertstoffcontainer, zum Beispiel für Glas, Papier, Dosen, et cetera, eignen sich vor allem Füllstandssensoren in Form von Ultraschallsensoren zur Abstandsmessung bei unförmigen Oberflächen. Kapazitive Füllstandssensoren können bei flüssigen oder pulverförmigen Abfällen zur Füllstandserfassung eingesetzt werden.

Bei Schnittgut-Sammelplätzen scheinen Ultraschallsensoren in Kombination mit Lichtschranken zur Füllstandsmeldung geeignet. Zur Überwachung von Wertstoffsammelplätzen, insbesondere für die Sammlung von Schnittgut in den Herbstmonaten, würden sich Kamera-Bild-Sensoren zur Videoüberwachung ebenfalls anbieten. Aufgrund der Erfassung personenbezogener Daten, wie bereits ausführlich in Kapitel 4.3.2 erläutert, sollte die Stadt Ulm jedoch auf den Einsatz von Kamera-Bild-Sensoren verzichten.

#### Potentiale

- Informationsgewinn für Entsorgungsbetriebe und Bürger
- Effizienzsteigerung durch bedarfsgerechte Leerung und optimiertes Routing
- Weniger Verschmutzung durch überquellende Abfalleimer
- Weniger Verkehr und Emission

#### Hemmnisse

- Genaue Erfassung von Füllständen freiliegender Schnittgutplätze aufwendig, Validität dieser Messergebnisse kann nicht gewährleistet werden
- Kamera-Bild-Sensoren erfassen personenbezogene Daten

Tabelle 3: Bewertung - Intelligente Abfallbehälter

## 5.2.2 Urban Gardening

Dieser Anwendungsfall ist ebenfalls Teil der Leistungsbeschreibung zur urbanen Datenplattform Ulm. Unter dem Begriff „Urban Gardening“ werden intelligente, autarke Hochbeete verstanden (vgl. Stadt Ulm 2019c, S. 15 f.).

**Beschreibung des Anwendungsfalls:** Im Ulmer Stadtgebiet beziehungsweise im Projektgebiet sollen urbane Hochbeete Bürgern oder Institutionen die Möglichkeit geben, ihr eigenes Obst und Gemüse anbauen zu können. Dabei sollen moderne IoT-Sensoren eine intelligente Steuerung und Überwachung der Hochbeete gewährleisten, damit Bürger sich lediglich um die Bepflanzung der Beete sowie das Ernten ihres Anbaus kümmern müssen. Zur autarken Versorgung sollen die Hochbeete mit integriertem Wassertank, Wasserpumpe und Solarzellen zur Energieversorgung ausgestattet werden. Eine Webcam ermöglicht den Bürgern das Wachstum der Pflanzen in Echtzeit zu verfolgen (Stadt Ulm 2019a).

**Relevante Sensorik:** Für diesen Anwendungsfall sind eine Vielzahl an IoT-Sensor-Typen relevant, die im Zusammenspiel eine autarke Versorgung sowie intelligente Steuerung und Überwachung ermöglichen. Zunächst erfassen Bodenfeuchtesensoren, Temperatursensoren, UV-Sensoren und Luftstrommesser die erforderlichen Werte zur Bestimmung der benötigten Wassermenge. Über LoRaWAN sind diese Daten auf der Datenplattform zur Analyse und Visualisierung abrufbar. Im Anschluss erfolgt die automatische Bewässerung, wobei kapazitive Füllstandssensoren den Füllstand des integrierten Wassertanks überwachen und alarmieren, sollte ein Grenzwert unterschritten werden. Lichtsensoren erfassen die Globalstrahlung zur Sicherstellung der autarken Energieversorgung durch die Solarzellen. Von der Überwachung der Hochbeete mit Kamera-Bild-Sensoren in Form von Webcams, deren Daten in Echtzeit im Smart City Cockpit dargestellt werden können, sollte die Stadt Ulm zum Schutz personenbezogener Daten jedoch absehen.

### Potentiale

- IoT-Sensoren ermöglichen intelligente Steuerung und Überwachung autarker Hochbeete
- Bürgerpartizipation mit Lerneffekt

### Hemmnisse

- Kamera-Bild-Sensoren erfassen personenbezogene Daten
- Trotz Sensorik hoher Pflegeaufwand
- Diebstahlgefahr der Sensoren

Tabelle 4: Bewertung - Urban Gardening

### 5.2.3 Luftqualitätsmessung

Der Anwendungsfall „Luftqualitätsmessung“ ist einer der vom Gemeinderat zur weiteren Umsetzung beschlossener Projektideen der Zukunftskommune@bw und ist im Rahmen der Bürgerbeteiligung entstanden (Stadt Ulm 2019a).

**Beschreibung des Anwendungsfalls:** Im Stadtgebiet beziehungsweise im Projektgebiet sollen verschiedene IoT-Sensoren zur Klima- und Luftqualitätsmessung ausgebracht werden. Die durch die Sensoren erfassten Messwerte werden über Netzwerkprotokolle wie LoRaWAN an die urbane Datenplattform übermittelt, analysiert und in Dashboards im Smart City Cockpit dargestellt (ebd.). Zusätzlich sollen die Daten als Open-Data zum Abruf verfügbar gemacht werden. Zielgruppe sind neben Bürgern auch die Stadtverwaltung und Forschungseinrichtungen. Im Zentrum des Anwendungsfalls steht auch der Vergleich von Präzision und Zuverlässigkeit zwischen einfachen LoRaWAN-Sensoren und professionellen, geeichten Wetterstationen (ebd.).

Sensoren sollen ferner zur Bewusstseinsbildung über das Stadtklima und der Luftqualität beitragen.

**Relevante Sensorik:** Im Mittelpunkt der Luftqualitätsmessung stehen zunächst die bekannten Umwelt-Sensoren wie Feinstaubsensoren, Kohlenmonoxid-Sensoren, Kohlenstoffdioxid-Sensoren (CO<sub>2</sub>), Oxygenium-Sensoren (O<sub>2</sub>) und Stickoxid-Sensoren. Zur Erfassung von Klimadaten können Thermosensoren, Luftdrucksensoren, Luftfeuchtigkeitssensoren, Luftstromsensoren, Windgeschwindigkeitssensoren, UV-Sensoren oder Lichtsensoren zur Messung der Globalstrahlung eingesetzt werden.

#### Potentiale

- Flächendeckende Luftqualitätsdaten im Quartier
- Förderung zur Bewusstseinsbildung für Luftqualität/Klima
- Vergleich der Messergebnisse von geeichten und nicht geeichten Sensoren ermöglicht zukünftig bessere Auswahl geeigneter Sensoren, je nach Anforderung der Anwendungsfälle

#### Hemmnisse

- Bei der Anbringung der Sensoren und bei der Erfassung selbst müssen eine Vielzahl an DIN-Normen und VDI Richtlinien eingehalten werden, um die Repräsentativität der Messergebnisse gewährleisten zu können
- Diese Normen hemmen eine bürgergetriebene Entwicklung

Tabelle 5: Bewertung - Luftqualitätsmessung

## **6 Diskussion und Handlungsempfehlungen**

Ziel dieser Arbeit sind Handlungsempfehlungen und ein Orientierungsrahmen für die Auswahl von IoT-Sensoren im öffentlichen Raum. Bereits in Kapitel 4 wurden die Ergebnisse der Taxonomie zusammengefasst und anschließend in Kapitel 5 IoT-Sensor-Typen analysiert. Die Taxonomie sowie die Analyse stellen einen umfassenden Orientierungsrahmen dar. Auf dieser Grundlage können im folgenden Handlungsempfehlungen abgeleitet werden, deren Umsetzung bereits im Zeithorizont der Strategieentwicklung, spätestens aber in der Umsetzungsplanung angedacht ist.

### **6.1 Handlungsempfehlungen**

#### **Auswahl von IoT-Sensor-Typen:**

Allgemein sollten bei der Auswahl von IoT-Sensoren zunächst de-identifizierbare Sensoren ausgewählt werden. Insgesamt stehen 53 von 62 IoT-Sensor-Typen aus allen fünf Anwendungsbereichen für den unkritischen Einsatz im öffentlichen Raum zur Auswahl. (s. Kapitel 4)

Dass de-identifizierbare Sensor-Typen keine personenbezogenen Daten erfassen, die natürlichen Personen zugeordnet werden können, ist ein entscheidender Vorteil für den Einsatz im öffentlichen Raum. Folglich können diese ohne aufwendige Prüfung der DSGVO-Konformität eingesetzt werden.

Auf den Einsatz identifizierbarer IoT-Sensor-Typen sollten bürgergetriebene beziehungsweise bürgerorientierte Städte im öffentlichen Raum aus drei Gründen verzichten: (1.) kann auch durch Anonymisierung und Pseudonymisierung von personenbezogenen Sensordaten nach der Erfassung durch einen identifizierbaren IoT-Sensor-Typ die Sicherheit zum Beispiel bei Cyber-Angriffen nicht gewährleistet werden, (2.) könnten Daten zu einem späteren Zeitpunkt anders als vorgesehen verwendet werden, (3.) könnte der Einsatz von identifizierbaren IoT-Sensor-Typen Widerstände in der Stadtbevölkerung aufgrund von Angst vor Überwachung auslösen und ein Gefühl der Überwachung entstehen. Identifizierbare IoT-Sensor-Typen im privaten Raum, zum Beispiel zur Überwachung der Infrastruktur, können jedoch unkritisch eingesetzt werden. Im öffentlichen Diskurs muss über die Notwendigkeit von identifizierbaren Sensor-Typen für digitale Geschäftsmodelle diskutiert werden.

## **Öffentlicher Diskurs und Bürgerbeteiligung:**

Von Lucke (2018, S. 189) analysiert in einem Beitrag technische Möglichkeiten für Smart Government und stellt die Frage, ob der technische Fortschritt nicht automatisch zu einem Überwachungsstaat führt. Kritisch stellt er heraus, dass drei von vier Narrative zu smarten Städten und Smart Government „ziemlich direkt in die dystopische Richtung eines Überwachungsstaates“ führen.

Damit eine Entwicklung in Richtung eines Überwachungsstaates verhindert werden kann, soll zukünftig in einer öffentlichen Debatte von Bürgern und Staat über die Akzeptanz und Ablehnung von Smart City diskutiert und die weiteren Entwicklungen aus der Bürgerschaft heraus mitentschieden werden. Dabei soll es auch um die Fragen gehen, welche IoT-Sensor-Typen in einer Stadt für welche Anwendungsszenarien eingesetzt werden sollen. Der Diskurs soll ebenfalls Aufschluss über die Notwendigkeit von identifizierbaren Sensoren geben.

Auf kommunaler Ebene sollen Bürger, dem Ansatz einer bürgergetriebenen Smart City folgend, nicht nur im Mittelpunkt der Entwicklungen und Maßnahmen stehen, sondern sich vielmehr, gemäß dem Bottom-Up-Prinzip, aktiv an der digitalen Transformation beteiligen. Zur Schaffung der Rahmenbedingung sind geeignete Bürgerbeteiligungsformate wie Bürgerwerkstätten, Arbeitsgruppen, Online-Beteiligungskanäle oder Informationsveranstaltungen empfehlenswert. Beinrott (2015, S. 84) warnt zugleich vor, dass „...Beteiligungsprozesse in der Stadtplanung nur erfolgreich sind, wenn sie ernsthaft verfolgt werden.“ Geeignete Beteiligungsformate müssen zur Motivation und Arbeit auf Augenhöhe deshalb auf einem partnerschaftlichen Grad der Beteiligung stattfinden.

## **Schaffung von Transparenz:**

Im Sinne einer bürgerorientierten Smart City, die auf Transparenz und Vertrauen gegenüber den Bürgern und deren Bedürfnissen setzt, soll zukünftig Transparenz über den Prozess der Auswahl von Sensoren und Anwendungen geschaffen werden. Zusätzlich sollen Städte auch Transparenz, über die im öffentlichen Raum installierten Sensoren und deren Eigenschaften, herstellen. Kleine Schilder, Aufkleber oder Informationstafeln direkt am Standort des Sensors, sollen zukünftig die wichtigsten Informationen über den Sensor in einer bürgerfreundlichen, einfachen Sprache und unterstützt durch einprägsame Symbole auf einen Blick kennzeichnen.

Alphabet's Stadtentwicklungs- und Innovationsorganisation ‚Sidewalk Labs'<sup>26</sup> (Sidewalk Labs 2019b) haben in einem umfangreichen Co-Design-

---

<sup>26</sup> Sidewalk Labs: <https://www.sidewalklabs.com>.

Prozess eine einheitliche Bildsprache als offenen Standard für mehr Transparenz im öffentlichen Raum entwickelt (vgl. Sidewalk Labs 2019a). Diese sollen als Grundlage zur Kennzeichnung von Sensoren im öffentlichen Raum dienen und von anderen Städten adaptiert oder angepasst werden. Aus Sicht dieser Arbeit sind darin jedoch nicht alle, für Bürger relevante, Informationen enthalten. Dazu zählen auch Informationen über die Erfassung personenbezogener Daten und deren Bereitstellung im Internet. Deshalb wurde, aufbauend auf den Ergebnissen der Taxonomie und der Analyse von IoT-Sensor-Typen in dieser Arbeit, die Darstellung der Bildsprache an die Anforderungen einer bürgerorientierten Smart City angepasst und um relevante Informationen erweitert. Das Ergebnis einer ersten Version einer Bildsprache zur Kennzeichnung von IoT-Sensoren im öffentlichen Raum ist folgend beigefügt und könnte als Grundlage für eine iterative Weiterentwicklung gemeinsam mit der Bürgerschaft dienen.

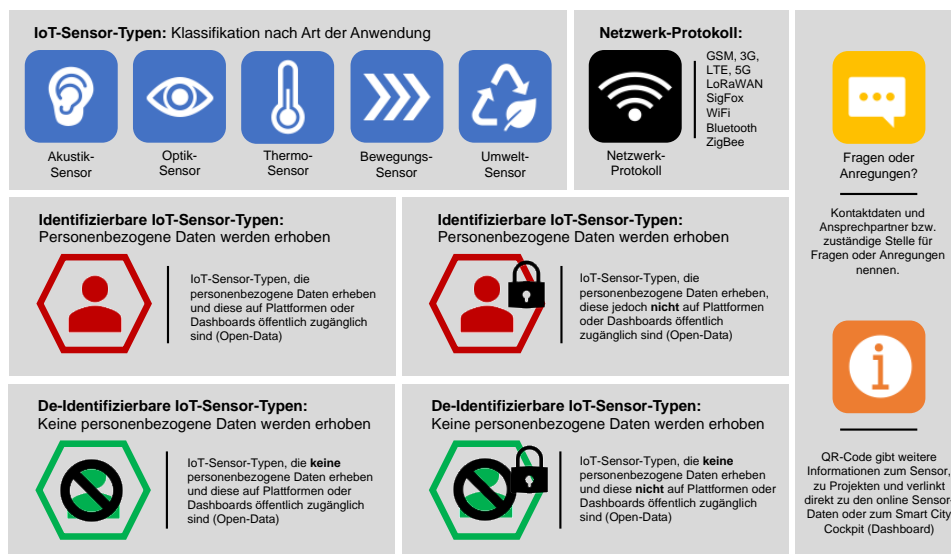


Abbildung 6: Bildsprache zur Kennzeichnung von IoT-Sensoren (eigene Darstellung)

## 6.2 Impulse für die Umsetzung

Für den zukünftigen, nachhaltigen und sicheren Gestaltungsrahmen von IoT-Sensoren sowie die darauf aufbauenden Anwendungen empfiehlt sich die Entwicklung und Umsetzung einer verbindlichen Data-Governance und eines Daten-Ethik-Konzepts. Beispielsweise hat die Stadt Eindhoven eine geeignete „Smart Society Charter“ mit Grundsätzen und Richtlinien für IoT entwickelt (Stadt Eindhoven 2016). Im Rahmen der Entwicklung dieser Konzepte müssen beispielsweise die Fragen zur Datensouveränität, Datensparsamkeit und Datenhoheit beantwortet werden. Auch eine Diskussion über Zugriffsrechte auf Sensoren oder Datenplattformen, zum Beispiel durch Sicherheitsbehörden oder der Polizei, muss in einer öffentlichen Debatte geführt werden.

Darüber hinaus müssen zukünftig weitere de-identifizierbare Sensoren entwickelt werden, um diese im öffentlichen Raum einsetzen zu können.

## 7 Abschließende Bewertung und Limitation

Mit der Methodik der Taxonomie-Entwicklung konnte in dieser Arbeit eine umfangreiche Klassifikation von IoT-Sensor-Typen entwickelt und letztlich nicht nur ein wertvoller Orientierungsrahmen erstellt, sowie zentrale Handlungsempfehlungen bei der Auswahl von IoT-Sensor-Typen abgeleitet, sondern auch eine relevante Forschungslücke geschlossen werden. Die Methodik der Taxonomie ist darüber hinaus jederzeit durch weitere identifizierte Objekte in zusätzlichen Iterationen erweiterbar.

Im systematischen Vorgehensmodell der Taxonomie-Entwicklung in dieser Arbeit wurden, gegeben durch den Umfang dieser Arbeit, lediglich die obligatorischen Endbedingungen gewählt. Zukünftig könnten noch weitere adaptierbare Endbedingungen zusätzlich gewählt werden und die Taxonomie um weitere Iterationen erweitert werden (vgl. Nickerson et al. 2013, S. 9).

Diese Arbeit beschränkt sich außerdem auf die Klassifikation und Analyse der zum Zeitpunkt der Arbeit auf dem Markt verfügbarer IoT-Sensor-Typen. Durch den schnell fortschreitenden technischen Wandel kommen immer neue IoT-Sensoren und Sensor-Typen auf den Markt, weshalb die Taxonomie keinen Anspruch auf Vollständigkeit der identifizierten Objekte erhebt. Zudem können durch die Kombination zweier Sensoren neue Sensor-Typen entstehen, die in dieser Arbeit noch nicht berücksichtigt sind. Ebenfalls ist der Übergang in der Differenzierung eines Sensors und eines Sensor-Typs in der Realität oft fließend. Aus den genannten Gründen sollte die Taxonomie regelmäßig in weiteren Iterationen um neue, identifizierbare Objekte ergänzt und auf zusätzliche Dimensionen und Merkmale überprüft werden (vgl. ebd.).

Des Weiteren sind die Ergebnisse und Handlungsempfehlungen in dieser Arbeit primär auf bürgergetriebene und bürgerorientierte Smart Cities anwendbar, wie bereits durch die Fragestellung limitiert wurde. Zwar ist auch in technologisch-orientierten Smart Cities die Unterscheidung zwischen identifizierbaren und de-identifizierbaren IoT-Sensor-Typen relevant, die Handlungsempfehlungen mit Bezug auf den öffentlichen Diskurs, Bürgerbeteiligung und Transparenz spielen jedoch eine eher untergeordnete Rolle.



## 8 Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Fragestellung nachgegangen, wie am Markt verfügbare IoT-Sensor-Typen anwendungsorientiert klassifiziert werden können und Anwendungsszenarien sich für bürgergetriebene Smart Cities ergeben. Ziel dieser Arbeit war es, durch die Entwicklung und Anwendung eines systematischen Vorgehensmodells die Methode der Taxonomie auf am Markt verfügbare IoT-Sensor-Typen anzuwenden und die identifizierten IoT-Sensor-Typen anschließend zu analysieren und Handlungsempfehlungen abzuleiten. Dafür wurden zunächst in einer umfangreichen Analyse am Markt verfügbarer IoT-Sensor-Typen identifiziert und anschließend in der Taxonomie klassifiziert.

Die Ergebnisse der Taxonomie bilden bereits einen Orientierungsrahmen in Form einer umfangreichen Auflistung und Klassifikation von am Markt verfügbarer IoT-Sensor-Typen. Aus der daran anschließenden Analyse und Spiegelung an konkreten Anwendungsbeispielen der Stadt Ulm konnten drei zentrale Handlungsempfehlungen für die zukünftige Auswahl und Implementierung von IoT-Sensor-Typen im öffentlichen Raum abgeleitet werden. Die thematische Einführung zu Beginn dieser Arbeit hat die theoretische Grundlage geschaffen und komplexe Konzepte und Begriffe im Kontext dieser Arbeit definiert. Der Orientierungsrahmen in Form einer Auflistung und Klassifikation (s. Kapitel 4.2) sowie die abgeleiteten Handlungsempfehlungen können zukünftig zu einer besseren Entscheidungsgrundlage bei der Auswahl von IoT-Sensor-Typen durch kommunale Entscheider, Mitarbeiter von Smart City-Projekten sowie Bürgern beitragen. Darüber hinaus stellt das Smart City Architekturmodell aus Perspektive der Sensorik eine Grundlage für die Einordnung der Sensoren dar.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die opportune Auswahl von IoT-Sensor-Typen für bürgergetriebene Smart Cities erfolgsrelevant ist und der öffentliche Diskurs, Bürgerbeteiligung und Transparenz die erfolgreiche Auswahl unterstützen können. Bürgergetriebene Smart Cities sollten sich deshalb auf den Einsatz von de-identifizierbaren IoT-Sensor-Typen beschränken.

Zukünftig ergeben sich weitere Forschungsbedarfe, insbesondere wenn es um die Frage geht, welche smarten Objekte und cyberphysischen Systeme in einer Smart City eingesetzt werden sollen oder welche konkreten Potentiale sich aus Smart Urban Planning unter Einsatz von KI ergeben.

## **Anhang**

Anhang 1: Systematische Recherche .....	66
Anhang 2a: Iteration 1.....	67
Anhang 2b: Iteration 2.....	69
Anhang 2c: Iteration 3.....	71
Anhang 3: Identifizierbare IoT-Sensor-Typen.....	73
Anhang 4: De-Identifizierbare IoT-Sensor-Typen.....	74
Anhang 5: IoT-Sensor-Typen geordnet nach Alphabet und „Messung nach Anwendung“ .....	76

## **Anhang 1: Systematische Recherche**

Systematische Recherche auf Grundlage folgender zur Verfügung stehender Internetquellen, um Objekte für die Taxonomie zu bestimmen:

### **Internetauftritte von Herstellern von IoT-Sensoren, inkl. Online-Shops**

- <https://www.thinxtra.com/solutions/thinxtraproducts/>
- <https://www.sensirion.com/de/>
- <https://www.decentlab.com/products>
- <https://www.gemtteks.com/en/products/lora-iot/sensor>
- <http://www.netvox.com.tw/index.html>
- <http://www.greencityzen.fr/en/produits-en/>
- <https://iotracker.nl/en/>

### **Händler/Portale/Online-Marktplätze**

- <https://www.iot-store.com.au>
- <https://iot-shop.de/typ/sensor>
- <https://www.thethingsnetwork.org/marketplace>
- <https://www.alliot.uk/sensors/>
- <https://www.elecomes.com/collections/lorawan-sensor>

## Anhang 2a: Iteration 1 (Teil 1)

IoT-Sensor-Typen	Messung nach Anwendung				
	Akustik-Sensoren	Optik-Sensoren	Thermo-Sensoren	Bewegungs-Sensoren	Umwelt-Sensoren
Berührungssensoren				x	
Beschleunigungssensoren (3-A.-Beschl.)				x	
Bewegungsmelder				x	
Bewegungszähler				x	
Bodenfrostsensoren			x		
Drehmomentsensoren				x	
Drehzahlsensoren				x	
Drucksensoren				x	
Durchflusssensoren (Gase & Flüssig.)					x
Erdbbensensoren				x	
Farbsensoren		x			
Feinstaubsensoren					x
Feuchtigkeitssensoren (Boden, Erde)					x
Flüssigkeitssensoren					x
Füllstandssensoren					x
Gas & Fluid Smart Meter					x
Geräuschpegelsensoren	x				
Geschwindigkeitssensoren				x	
GPS-Tracker				x	
Hitzesensoren			x		
Höhenmesser				x	
Infrarot-Kamera-Sensoren		x			
Infrarotsensoren (Lichtmessung)		x			
Kältesensoren			x		
Kamera-Bild-Sensoren		x			
Kohlenmonoxid-Sensoren					x
Kohlenstoffdioxid-Sensoren (CO2)					x
Kraftsensoren				x	
Lichtschranken		x			
Lichtsensoren		x			
Linienverfolgungssensoren		x			

## Anhang 2a: Iteration 1 (Teil 2)

IoT-Sensor-Typen	Messung nach Anwendung				
	Akustik-Sensoren	Optik-Sensoren	Thermo-Sensoren	Bewegungs-Sensoren	Umwelt-Sensoren
Luftdrucksensoren					x
Luftfeuchtigkeitssensoren					x
Luftqualitätssensoren					x
Luftstromsensoren					x
Magnetfeldsensoren				x	
Mikrofon-Sensoren	x				
Näherungssensoren				x	
Niedriglichtsensoren		x			
Oxygenium-Sensoren (O2)					x
Pax-Counter (WLAN und Bluetooth)				x	
pH-Wert-Sensoren					x
Push-Button				x	
Rauchmelde-Sensoren					x
Reed-Schalter (offen/zu)				x	
RFID-Sensoren (Reader/Scanner)				x	
Smart Meter					x
Spannungssensoren					x
Stickoxid-Sensoren					x
Tastschalter				x	
Temperatursensoren (Thermosensoren)			x		
Ultraschallsensoren (Abstandssensoren)				x	
Ultraschallsensoren (Gegenst.-Erk.)		x			
UV-Sensoren		x			
Vibrationssensoren				x	
Voice-Sensoren	x				
Wasseraustrittssensoren					x
Wasseraustrittssensoren mit Seilsensor					x
Wasserqualitätssensoren					x
Wasserstandssensoren					x
Wegesensoren (Abstandssensoren)				x	
Windgeschwindigkeitssensoren					x

## Anhang 2b: Iteration 2 (Teil 1)

IoT-Sensor-Typen	Messung nach Anwendung					Ident.	
	Akustik-Sensoren	Optik-Sensoren	Thermo-Sensoren	Bewegungs-Sensoren	Umwelt-Sensoren	De-ID	ID
Berührungssensoren				x		x	
Beschleunigungssensoren (3-A.-Beschl.)				x		x	
Bewegungsmelder				x		x	
Bewegungszähler				x		x	
Bodenfrostsensoren			x			x	
Drehmomentsensoren				x		x	
Drehzahlsensoren				x		x	
Drucksensoren				x		x	
Durchflusssensoren (Gase & Flüssig.)					x	x	
Erdbebensensoren				x		x	
Farbsensoren		x				x	
Feinstaubsensoren					x	x	
Feuchtigkeitssensoren (Boden, Erde)					x	x	
Flüssigkeitssensoren					x	x	
Füllstandssensoren					x	x	
Gas & Fluid Smart Meter					x		x
Geräuschpegelsensoren	x					x	
Geschwindigkeitssensoren				x		x	
GPS-Tracker				x			x
Hitzesensoren			x			x	
Höhenmesser				x		x	
Infrarot-Kamera-Sensoren		x					x
Infrarotsensoren (Lichtmessung)		x				x	
Kältesensoren			x			x	
Kamera-Bild-Sensoren		x					x
Kohlenmonoxid-Sensoren					x	x	
Kohlenstoffdioxid-Sensoren (CO2)					x	x	
Kraftsensoren				x		x	
Lichtschranken		x				x	
Lichtsensoren		x				x	
Linienverfolgungssensoren		x				x	

## Anhang 2b: Iteration 2 (Teil 2)

IoT-Sensor-Typen	Messung nach Anwendung					Ident.	
	Akustik-Sensoren	Optik-Sensoren	Thermo-Sensoren	Bewegungs-Sensoren	Umwelt-Sensoren	De-ID	ID
Luftdrucksensoren					x	x	
Luftfeuchtigkeitssensoren					x	x	
Luftqualitätssensoren					x	x	
Luftstromsensoren					x	x	
Magnetfeldsensoren				x		x	
Mikrofon-Sensoren	x						x
Näherungssensoren				x		x	
Niedriglichtsensoren		x				x	
Oxygenium-Sensoren (O2)					x	x	
Pax-Counter (WLAN und Bluetooth)				x			x
pH-Wert-Sensoren					x	x	
Push-Button				x		x	
Rauchmelde-Sensoren					x	x	
Reed-Schalter (offen/zu)				x		x	
RFID-Sensoren (Reader/Scanner)				x			x
Smart Meter					x		x
Spannungssensoren					x	x	
Stickoxid-Sensoren					x	x	
Tastschalter				x		x	
Temperatursensoren (Thermosensoren)			x			x	
Ultraschallsensoren (Abstandssensoren)				x		x	
Ultraschallsensoren (Gegenst.-Erk.)		x				x	
UV-Sensoren		x				x	
Vibrationssensoren				x		x	
Voice-Sensoren	x						x
Wasseraustrittssensoren					x	x	
Wasseraustrittssensoren mit Seilsensor					x	x	
Wasserqualitätssensoren					x	x	
Wasserstandssensoren					x	x	
Wegesensoren (Abstandssensoren)				x		x	
Windgeschwindigkeitssensoren					x	x	

## Anhang 2c: Iteration 3 (Teil 1)

IoT-Sensor-Typen	Messung nach Anwendung					Ident.		Art der Messgröße										
	Akustik-Sensoren	Optik-Sensoren	Thermo-Sensoren	Bewegungs-Sensoren	Umwelt-Sensoren	De-ID	ID	akustisch	Bilderfassung	chemisch & biologisch	dynamisch	elektrisch	geometrisch	Klimatisch	magnetisch	mechanisch	optisch	thermisch
Berührungssensoren				x		x										x		
Beschleunigungssensoren (3-A.-Beschl.)				x		x					x							
Bewegungsmelder				x		x											x	
Bewegungszähler				x		x											x	
Bodenfrostsensoren			x			x												x
Drehmomentsensoren				x		x										x		
Drehzahlsensoren				x		x										x		
Drucksensoren				x		x										x		
Durchflusssensoren (Gase & Flüssig.)					x	x				x								
Erdbebensensoren				x		x								x				
Farbsensoren		x				x											x	
Feinstaubsensoren					x	x				x								
Feuchtigkeitssensoren (Boden, Erde)					x	x							x					
Flüssigkeitssensoren					x	x				x								
Füllstandssensoren					x	x							x					
Gas & Fluid Smart Meter					x		x				x							
Geräuschpegelsensoren	x					x		x										
Geschwindigkeitssensoren				x		x					x							
GPS-Tracker				x			x						x					
Hitzesensoren			x			x												x
Höhenmesser				x		x							x					
Infrarot-Kamera-Sensoren		x					x											x
Infrarotsensoren (Lichtmessung)		x				x											x	
Kältesensoren			x			x												x
Kamera-Bild-Sensoren		x					x		x									
Kohlenmonoxid-Sensoren					x	x				x								
Kohlenstoffdioxid-Sensoren (CO2)					x	x				x								
Kraftsensoren				x		x										x		
Lichtschranken		x				x											x	
Lichtsensoren		x				x											x	
Linienverfolgungssensoren		x				x											x	



## Anhang 2c: Iteration 3 (Teil 2)

IoT-Sensor-Typen	Messung nach Anwendung					Ident.		Art der Messgröße										
	Akustik-Sensoren	Optik-Sensoren	Thermo-Sensoren	Bewegungs-Sensoren	Umwelt-Sensoren	De-ID	ID	akustisch	Bilderfassung	chemisch & biologisch	dynamisch	elektrisch	geometrisch	klimatisch	magnetisch	mechanisch	optisch	thermisch
Luftdrucksensoren					x	x											x	
Luftfeuchtigkeitssensoren					x	x							x					
Luftqualitätssensoren					x	x			x									
Luftstromsensoren					x	x				x								
Magnetfeldsensoren				x		x								x				
Mikrofon-Sensoren	x						x	x										
Näherungssensoren				x		x											x	
Niedriglichtsensoren		x				x											x	
Oxygenium-Sensoren (O2)					x	x			x									
Pax-Counter (WLAN und Bluetooth)				x			x				x							
pH-Wert-Sensoren					x	x			x									
Push-Button				x		x										x		
Rauchmelde-Sensoren					x	x											x	
Reed-Schalter (offen/zu)				x		x								x				
RFID-Sensoren (Reader/Scanner)				x			x				x							
Smart Meter					x		x				x							
Spannungssensoren					x	x					x							
Stickoxid-Sensoren					x	x			x									
Tastschalter				x		x										x		
Temperatursensoren (Thermosensoren)			x			x												x
Ultraschallsensoren (Abstandssensoren)				x		x		x										
Ultraschallsensoren (Gegenst.-Erk.)		x				x											x	
UV-Sensoren		x				x											x	
Vibrationssensoren				x		x									x			
Voice-Sensoren	x						x	x										
Wasseraustrittssensoren					x	x								x				
Wasseraustrittssensoren mit Seilsensor					x	x								x				
Wasserqualitätssensoren					x	x			x									
Wasserstandssensoren					x	x						x						
Wegesensoren (Abstandssensoren)				x		x						x						
Windgeschwindigkeitssensoren					x	x					x							

### Anhang 3: Identifizierbare IoT-Sensor-Typen

IoT-Sensor-Typen	Messung nach Anwendung					Ident.		Art der Messgröße												
	Akustik-Sensoren	Optik-Sensoren	Thermo-Sensoren	Bewegungs-Sensoren	Umwelt-Sensoren	De-ID	ID	akustisch	Bilderfassung	chemisch & biologisch	dynamisch	elektrisch	geometrisch	klimatisch	magnetisch	mechanisch	optisch	thermisch		
Gas & Fluid Smart Meter					x		x				x									
GPS-Tracker				x			x					x								
Infrarot-Kamera-Sensoren		x					x										x			
Kamera-Bild-Sensoren		x					x	x												
Mikrofon-Sensoren	x						x	x												
Pax-Counter (WLAN und Bluetooth)				x			x				x									
RFID-Sensoren (Reader/Scanner)				x			x				x									
Smart Meter					x		x				x									
Voice-Sensoren	x						x	x												

## Anhang 4: De-Identifizierbare IoT-Sensor-Typen (Teil 1)

IoT-Sensor-Typen	Messung nach Anwendung					Ident.		Art der Messgröße												
	Akustik-Sensoren	Optik-Sensoren	Thermo-Sensoren	Bewegungs-Sensoren	Umwelt-Sensoren	De-ID	ID	akustisch	Bilderfassung	chemisch & biologisch	dynamisch	elektrisch	geometrisch	klimatisch	magnetisch	mechanisch	optisch	thermisch		
Berührungssensoren				x		x										x				
Beschleunigungssensoren (3-A.-Beschl.)				x		x				x										
Bewegungsmelder				x		x											x			
Bewegungszähler				x		x											x			
Bodenfrostsensoren			x			x												x		
Drehmomentsensoren				x		x										x				
Drehzahlsensoren				x		x										x				
Drucksensoren				x		x										x				
Durchflusssensoren (Gase & Flüssigk.)					x	x				x										
Erdbebensensoren				x		x									x					
Farbsensoren		x				x											x			
Feinstaubsensoren					x	x			x											
Feuchtigkeitssensoren (Boden, Erde)					x	x							x							
Flüssigkeitssensoren					x	x			x											
Füllstandssensoren					x	x						x								
Geräuschpegelsensoren	x					x		x												
Geschwindigkeitssensoren				x		x				x										
Hitzesensoren			x			x												x		
Höhenmesser				x		x						x								
Infrarotsensoren (Lichtmessung)		x				x											x			
Kältesensoren			x			x												x		
Kohlenmonoxid-Sensoren					x	x			x											
Kohlenstoffdioxid-Sensoren (CO2)					x	x			x											
Kraftsensoren				x		x										x				
Lichtschranken		x				x											x			
Lichtsensoren		x				x											x			
Linienverfolgungssensoren		x				x											x			

## Anhang 4: De-Identifizierbare IoT-Sensor-Typen (Teil 2)

IoT-Sensor-Typen	Messung nach Anwendung					Ident.		Art der Messgröße										
	Akustik-Sensoren	Optik-Sensoren	Thermo-Sensoren	Bewegungs-Sensoren	Umwelt-Sensoren	De-ID	ID	akustisch	Bilderfassung	chemisch & biologisch	dynamisch	elektrisch	geometrisch	klimatisch	magnetisch	mechanisch	optisch	thermisch
Luftdrucksensoren					x	x										x		
Luftfeuchtigkeitssensoren					x	x							x					
Luftqualitätssensoren					x	x			x									
Luftstromsensoren					x	x				x								
Magnetfeldsensoren				x		x								x				
Näherungssensoren				x		x											x	
Niedriglichtsensoren		x				x											x	
Oxygenium-Sensoren (O2)					x	x			x									
pH-Wert-Sensoren					x	x			x									
Push-Button				x		x										x		
Rauchmelde-Sensoren					x	x												x
Reed-Schalter (offen/zu)				x		x								x				
Spannungssensoren					x	x					x							
Stickoxid-Sensoren					x	x			x									
Tastschalter				x		x										x		
Temperatursensoren (Thermosensoren)			x			x												x
Ultraschallsensoren (Abstandssensoren)				x		x		x										
Ultraschallsensoren (Gegenst.-Erk.)		x				x											x	
UV-Sensoren		x				x											x	
Vibrationssensoren				x		x									x			
Wasseraustrittssensoren					x	x							x					
Wasseraustrittssensoren mit Seilsensor					x	x							x					
Wasserqualitätssensoren					x	x			x									
Wasserstandssensoren					x	x						x						
Wegesensoren (Abstandssensoren)				x		x						x						
Windgeschwindigkeitssensoren					x	x				x								

## Anhang 5: IoT-Sensor-Typen geordnet nach Alphabet und „Messung nach Anwendung“ (Teil 1)

IoT-Sensor-Typen	Messung nach Anwendung					Ident.		Art der Messgröße												
	Akustik-Sensoren	Optik-Sensoren	Thermo-Sensoren	Bewegungs-Sensoren	Umwelt-Sensoren	De-ID	ID	akustisch	Bilderfassung	chemisch & biologisch	dynamisch	elektrisch	geometrisch	Klimatisch	magnetisch	mechanisch	optisch	thermisch		
Geräuschpegelsensoren	x					x		x												
Mikrofon-Sensoren	x						x	x												
Voice-Sensoren	x						x	x												
Farbsensoren		x				x											x			
Infrarot-Kamera-Sensoren		x					x										x			
Infrarotsensoren (Lichtmessung)		x				x											x			
Kamera-Bild-Sensoren		x					x		x											
Lichtschranken		x				x											x			
Lichtsensoren		x				x											x			
Linienverfolgungssensoren		x				x											x			
Niedriglichtsensoren		x				x											x			
Ultraschallsensoren (Gegenst.-Erk.)		x				x											x			
UV-Sensoren		x				x											x			
Bodenfrostsensoren			x			x												x		
Hitzesensoren			x			x												x		
Kältesensoren			x			x												x		
Temperatursensoren (Thermosensoren)			x			x												x		
Berührungssensoren				x		x										x				
Beschleunigungssensoren (3-A.-Beschl.)				x		x				x										
Bewegungsmelder				x		x											x			
Bewegungszähler				x		x											x			
Drehmomentsensoren				x		x											x			
Drehzahlsensoren				x		x											x			
Drucksensoren				x		x											x			
Erdbebensensoren				x		x								x						
Geschwindigkeitssensoren				x		x				x										
GPS-Tracker				x			x						x							
Höhenmesser				x		x							x							
Kraftsensoren				x		x										x				
Magnetfeldsensoren				x		x									x					
Näherungssensoren				x		x											x			

## Anhang 5: IoT-Sensor-Typen geordnet nach Alphabet und „Messung nach Anwendung“ (Teil 2)

IoT-Sensor-Typen	Messung nach Anwendung					Ident.		Art der Messgröße										
	Akustik-Sensoren	Optik-Sensoren	Thermo-Sensoren	Bewegungs-Sensoren	Umwelt-Sensoren	De-ID	ID	akustisch	Bilderfassung	chemisch & biologisch	dynamisch	elektrisch	geometrisch	klimatisch	magnetisch	mechanisch	optisch	thermisch
Pax-Counter (WLAN und Bluetooth)				x			x					x						
Push-Button				x		x										x		
Reed-Schalter (offen/zu)				x		x									x			
RFID-Sensoren (Reader/Scanner)				x		x						x						
Tastschalter				x		x										x		
Ultraschallsensoren (Abstandssensoren)				x		x		x										
Vibrationssensoren				x		x									x			
Wegensensoren (Abstandssensoren)				x		x						x						
Durchflusssensoren (Gase & Flüssigk.)					x	x					x							
Feinstaubsensoren					x	x				x								
Feuchtigkeitssensoren (Boden, Erde)					x	x								x				
Flüssigkeitssensoren					x	x				x								
Füllstandssensoren					x	x							x					
Gas & Fluid Smart Meter					x		x				x							
Kohlenmonoxid-Sensoren					x	x				x								
Kohlenstoffdioxid-Sensoren (CO2)					x	x				x								
Luftdrucksensoren					x	x										x		
Luftfeuchtigkeitssensoren					x	x								x				
Luftqualitätssensoren					x	x				x								
Luftstromsensoren					x	x					x							
Oxygenium-Sensoren (O2)					x	x				x								
pH-Wert-Sensoren					x	x				x								
Rauchmelde-Sensoren					x	x											x	
Smart Meter					x		x					x						
Spannungssensoren					x	x						x						
Stickoxid-Sensoren					x	x				x								
Wasseraustrittssensoren					x	x								x				
Wasseraustrittssensoren mit Seilsensor					x	x								x				
Wasserqualitätssensoren					x	x				x								
Wasserstandssensoren					x	x							x					
Windgeschwindigkeitssensoren					x	x					x							

## Literaturverzeichnis

**Adam/Busch/Nickolay 1997: Adam, Wolfgang; Busch, Manfred und Nickolay, Bertram:** Sensoren für die Produktionstechnik, Springer, Berlin und Heidelberg 1997.

**Anthopoulos 2017: Anthopoulos, Leonidas G.:** Understanding Smart Cities: A Tool for Smart Government or an Industrial Trick?, Band 22, Springer Nature, Cham 2017. Online: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-57015-0>.

**Anthopoulos/Vakali 2012: Anthopoulos, Leonidas G. und Vakali, Athena:** Urban Planning and Smart Cities: Interrelations and Reciprocities, in: Álvarez, Federico et al. (Hrsg.): The Future Internet, Springer, Berlin und Heidelberg 2012, S. 178-189.

**Atzori/Iera/Morabito 2010: Atzori, Luigi; Iera, Antonio und Morabito, Giacomo:** The Internet of Things: A survey, in: Computer Networks, 2010, 54(15), S. 2787-2805, Online: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128610001568>.

**Bailey 1994: Bailey, Kenneth D.:** Typologies and Taxonomies - An Introduction to Classification Techniques, in: Saga University Paper series on Quantitative Applications in the Social Sciences, Sage University Paper, Thousand Oaks 1994, series no. 07-102.

**Barillaro/Rhee/Kacker/Badger/Kuhn/Escudero 2019: Barillaro, Sebastian; Rhee, Sokwoo; Kacker, Raghu N.; Badger, Lee; Kuhn, D. Rick und Escudero, Gustavo:** Low-Power Wide Area Networks (LPWAN) for Communications of Mobile Sensor Data, Proceedings of the 2nd ACM/EIG SCC Symposium On Smart Cities and Communities. Online: <https://doi.org/10.1145/3357492.3358629>.

**BDEW (2010): Bundesverband der Energie- und Wirtschaft:** Wasserverluste im öffentlichen Trinkwassernetz in ausgewählten europäischen Ländern im Jahr 2007 (in Prozent des Wasseraufkommens) [Graph]. Online: <https://de-statista-com.zu.idm.oclc.org/statistik/daten/studie/165182/umfrage/wasserverluste-im-oeffentlichen-trinkwassernetz-in-europa/>.

**BDEW (2019): Bundesverband der Energie- und Wirtschaft:** Wasserverluste in der öffentlichen Wasserversorgung in Deutschland in den Jahren 1991 bis 2017 (in Prozent vom Bruttowasseraufkommen) [Graph]. Online: <https://de-statista-com.zu.idm.oclc.org/statistik/daten/studie/155684/umfrage/wasserverluste-in-der-oeffentlichen-wasserversorgung-seit-1991/>.

**Beinrott 2015: Beinrott, Viktoria:** Bürgerorientierte Smart City: Potentiale und Herausforderungen, The Open Government Institute (TOGI), Friedrichshafen 2015.

**BITKOM 2019a: Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V.:** Smart-City-Atlas - Die kommunale digitale Transformation in Deutschland. Online: <https://www.bitkom.org/sites/default/files/2019-03/190318-Smart-City-Atlas.pdf>.

**BITKOM 2019b: Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V.:** Smart City Index. Online: [https://www.bitkom.org/sites/default/files/2019-10/191015\\_smart-city-index\\_gesamt.pdf](https://www.bitkom.org/sites/default/files/2019-10/191015_smart-city-index_gesamt.pdf).

**Buchenscheit/Schneider/Kargl/Graf 2019: Buchenscheit, Andreas; Schneider, Matthias, Kargl, Frank und Graf, Philipp:** LoRa Park – Ein Experimentierfeld und öffentlicher Showroom für das Internet der Dinge. Online: [https://lora.ulm-digital.com/LoRa\\_Park\\_v1.1.pdf](https://lora.ulm-digital.com/LoRa_Park_v1.1.pdf).

**BBSR/BMUB 2017: Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit:** Smart City Charta: Digitale Transformation in den Kommunen nachhaltig gestalten. Online: <https://www.smart-cities-made-in.de/media/wbzeimtx/smart-city-charta-dl.pdf>.

**BMVI 2019: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur:** Masterpläne „Green City“. Online: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/masterplaene-green-city.html>.

**Bunz/Meikle 2018: Bunz, Mercedes und Meikle, Graham:** The Internet of Things, Polity, Cambridge 2018.

**Caragliu/Del Bo/Nijkamp 2011: Caragliu, Andrea; Del Bo, Chiara und Nijkamp, Peter:** Smart cities in Europe, *Journal of Urban Technology*, 18(2), 2011, S. 65-82. Online: <https://doi.org/10.1080/10630732.2011.601117>.

**Cocchia 2014: Cocchia, Annalisa:** Smart and Digital City: A Systematic Literature Review, in: Renata Paola Dameri & Camille Rosenthal-Sabroux (Hrsg.): *Smart City - How to Create Public and Economic Value with High Technology in Urban Space*, S. 13-43. Online: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-06160-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-06160-3_2).

**Dameri 2013: Dameri, Renata Paola:** Searching for Smart City definition: a comprehensive proposal, *International Journal of Computers & Technology*, 11(5), 2013, S. 2544-2551. Online: <https://doi.org/https://doi.org/10.24297/ijct.v11i5.1142>.

**Difu 2019: Deutsches Institut für Urbanistik:** OB-Barometer 2018. Online: <https://difu.de/projekte/ob-barometer>.



**DIN 2017a: Deutsches Institut für Normierung e.V.:** DIN SPEC 91357 - Referenzarchitekturmodell Offene Urbane Plattform (OUP). Online: <https://www.beuth.de/de/technische-regel/din-spec-91357/281077528>.

**DIN 2017b: Deutsches Institut für Normierung e.V.:** Smart City: Impulspapier zu Normen und Standards. Online: <https://www.din.de/blob/237630/4a7ee615d0ae296706f6a95705f584c1/smart-city-impulspapier-zu-normen-und-standards-data.pdf>.

**DIN/DKE 2015: Deutsches Institut für Normierung e.V. und Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE:** Deutsche Normungsroadmap Smart City, S. 1-32. Online: <https://www.dke.de/resource/blob/778220/58cd28fd645861c82e2cfd0274c6c679/die-deutsche-normungs-roadmap-smart-city-version-1-1--update--data.pdf>.

**Du/Santi/Xiao/Vasilakos/Fischione 2019: Du, Rong; Santi, Paolo; Xiao, Ming; Vasilakos, Athanasios V. und Fischione, Carlo:** The Sensable City: A Survey on the Deployment and Management for Smart City Monitoring, IEEE Communications Surveys and Tutorials, 21(2), 2019, S. 1533-1560. Online: <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2881008>.

**Duden 2019: Duden:** Taxonomie, Duden Online, Mannheim 2019. Online: <https://www.duden.de/node/180077/revision/180113>.

**Etscheid/von Lucke/Meigel 2018: Etscheid, Jan; von Lucke, Jörn und Meigel, Sabine:** Wettbewerb Zukunftsstadt Ulm - Pläne für 2030+: Abschlussbericht der zweiten Projektphase mit den Ergebnissen der Begleitforschung. Online: [https://www.ulm.de/-/media/ulm/zda/downloads/zukunftsstadt/abschlussberichtzukunftsstadt\\_phase2.pdf](https://www.ulm.de/-/media/ulm/zda/downloads/zukunftsstadt/abschlussberichtzukunftsstadt_phase2.pdf).

**FOKUS/IAIS/IML 2018: Fraunhofer-Institut für Offene Kommunikationssysteme; Fraunhofer-Institut für Intelligente Analyse und Informationssysteme und Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik:** Urbane Datenräume – Möglichkeiten von Datenaustausch und Zusammenarbeit im urbanen Raum. Online: [https://cdn0.scrvt.com/fokus/774af17bdc0a18cd/69f7a401c168/UDR\\_Studie\\_062018.pdf](https://cdn0.scrvt.com/fokus/774af17bdc0a18cd/69f7a401c168/UDR_Studie_062018.pdf).

**Fritzen 2019: Fritzen, Florentine:** Extreme Temperaturen: Was die Städte mit „Klimanotstand“ bezwecken. Online: <https://www.faz.net/aktuell/politik/inland/wieso-immer-mehr-staedte-in-deutschland-den-klimanotstand-ausrufen-16305725.html>.

**Gaur/Scotney/Parr/McClean 2015: Gaur, Aditya; Scotney, Bryan; Parr, Gerard und McClean, Sally:** Smart city architecture and its applications based on IoT, Procedia Computer Science, 52(1), 2015, S. 1089-1094. Online: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.05.122>.

**Geisberger/Broy 2012: Geisberger, Eva und Broy, Manfred:** agendaCPS - Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems, acatech Studie, acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V., München/Garching 2012.

**von Grafenstein/Wernick/Olk 2019: von Grafenstein, Max; Wernick, Alina und Olk, Christopher:** Data Governance: Enhancing Innovation and Protecting Against Its Risks, *Intereconomics*, 54(4), 2019, S. 228-232. Online: <https://doi.org/10.1007/s10272-019-0829-9>.

**Grandke/Hesse 1989: Grandke, Thomas und Hesse, Joachim:** Sensor Fundamentals – Introduction, in: Thomas Grandke (Hrsg.): *Fundamentals and general aspects*, S. XII, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim 1989.

**Kaczorowski 2014: Kaczorowski, Willi:** Die smarte Stadt - Den digitalen Wandel intelligent gestalten: Handlungsfelder, Herausforderungen, Strategien, Boorberg, Stuttgart 2014.

**Kaczorowski 2017: Kaczorowski, Willi:** Neue digitale Daten für die Entwicklung smarter Städte und Regionen. Online: [https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/Projekte/Smart\\_Country/LK\\_Neue\\_digitale\\_Daten\\_2017.pdf](https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/Projekte/Smart_Country/LK_Neue_digitale_Daten_2017.pdf).

**Kazmi/Serrano/Lenis 2019: Kazmi, Aqeel; Serrano, Martin und Lenis, Angelos:** Smart governance of heterogeneous internet of things for smart cities, *Proceedings of the International Conference on Sensing Technology, ICST*, 2018, S. 58-64. Online: <https://doi.org/10.1109/ICSensT.2018.8603657>.

**Kommune 21 2019: Kommune 21:** Smart Cities - Der Weg ist das Ziel. Online: [https://www.kommune21.de/meldung\\_31986\\_Der+Weg+ist+das+Ziel.html](https://www.kommune21.de/meldung_31986_Der+Weg+ist+das+Ziel.html).

**Krause/Strauß/Scheffler/Kett/Lehmann/Renner 2017: Krause, Tobias; Strauß, Oliver; Scheffler, Gabriele; Kett, Holger; Lehmann, Kristian und Renner, Thomas:** IT-Plattformen für das Internet der Dinge (IoT): Basis intelligenter Produkte und Services. Online: [https://www.i40-bw.de/wp-content/uploads/Marktstudie\\_IoT\\_Plattformen.pdf](https://www.i40-bw.de/wp-content/uploads/Marktstudie_IoT_Plattformen.pdf).

**Kuma 2017: Kuma, Kengo:** IoT - The foundation of the Super Smart Society, *Focus NEDO*, 63, S. 1-20. Online: <https://www.nedo.go.jp/content/100862682.pdf>.

**Lion 1969: Lion, Kurt S.:** Transducers: Problems and Prospects, in: *IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation*, 16(1), 1969, S. 2-5. Online: <https://doi.org/10.1109/TIECI.1969.229858>.

**LoRa Alliance 2019a: LoRa Alliance:** About LoRa Alliance. Online: <https://loralliance.org/about-lora-alliance>.

**LoRa Alliance 2019b: LoRa Alliance:** What is the LoRaWAN Specification? Online: <https://loro-alliance.org/about-lorawan>.

**von Lucke 2015: von Lucke, Jörn:** Smart Government - Wie uns die intelligente Vernetzung zum Leitbild „Verwaltung 4.0“ und einem smarten Regierungs- und Verwaltungshandeln führt, The Open Government Institute (TOGI), Friedrichshafen 2015. Online: <https://www.zu.de/institute/togi/assets/pdf/ZU-150914-SmartGovernment-V1.pdf>.

**von Lucke 2018: von Lucke, Jörn:** In welcher smarten Welt wollen wir eigentlich leben? In: VM Verwaltung & Management, 24/4, 2018, S. 177-196. Online: <https://www.nomos-elibrary.de/10.5771/0947-9856-2018-4-177/in-welcher-smarten-welt-wollen-wir-eigentlich-leben-jahrgang-24-2018-heft-4>.

**von Lucke/Geiger/Schiller/Breuing 2016: von Lucke, Jörn; Geiger, Christian; Schiller, Anna Lena und Breuing, Eli:** Wettbewerb Zukunftsstadt Ulm Vision 2030+ - Abschlussbericht der ersten Phase mit den Ergebnissen der Begleitforschung. Online: <https://www.zukunftsstadt-ulm.de/sites/default/files/unit/files/togi-160616-ulm-abschlussbericht-zukunftsstadt-ulm-v1.pdf>.

**Morozov/Bria 2017: Morozov, Evgeny und Bria, Francesca:** Die smarte Stadt neu denken - Wie Urbane Technologien demokratisiert werden können, Rosa-Luxemburg-Stiftung, Berlin 2017. Online: [https://www.rosalux.de/fileadmin/rls\\_uploads/pdfs/sonst\\_publicationen/Die\\_smartere\\_Stadt\\_neu\\_denken\\_01.pdf](https://www.rosalux.de/fileadmin/rls_uploads/pdfs/sonst_publicationen/Die_smartere_Stadt_neu_denken_01.pdf).

**Müller-Seitz/Seiter/Wenz 2016: Müller-Seitz, Gordon; Seiter, Mischa und Wenz, Patrick:** Was ist eine Smart City?: Betriebswirtschaftliche Zugänge aus Wissenschaft und Praxis, Springer, Wiesbaden 2016. Online: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-12642-1>.

**Nickerson/Varshney/Muntermann 2013: Nickerson, Robert C.; Varshney, Upkar und Muntermann, Jan:** A method for taxonomy development and its application in information systems, European Journal of Information Systems, 22(3), 2013, 336-359. Online: <https://doi.org/10.1057/ejis.2012.26>.

**Nickerson/Varshney/Muntermann/Isaac 2009: Nickerson, Robert C.; Varshney, Upkar; Muntermann, Jan und Isaac, Henri:** Taxonomy development in information systems: Developing a taxonomy of mobile applications, 17th European Conference on Information Systems, ECIS 2009. Online: Abgerufen von <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00375103/document>.

**Oniga/Dadarlat/De Poorter/Munteanu 2017: Oniga, Bogdan; Dadarlat, Vasile; De Poorter, Elie und Munteanu, Adrian:** A secure LoRaWAN sensor network architec-

ture, Proceedings of IEEE Sensors, 2017, S. 1-3.  
Online: <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2017.8233990>.

**Püschel/Röglinger/Schlott 2016: Püschel, Louis; Röglinger, Maximilian und Schlott, Helen:** What's in a Smart Thing? Development of a Multi-Layer Taxonomy, 2016 International Conference on Information Systems, ICIS 2016, S. 4801. Online: <https://www.fim-rc.de/Paperbibliothek/Veroeffentlicht/571/wi-571.pdf>.

**Sadowski/Pasquale 2015: Sadowski, Jathan und Pasquale, Frank:** Smart City: Überwachung und Kontrolle in der Intelligenten Stadt, Analysen, Nr. 23, 2015, S. 1-43. Online: [https://www.rosalux.de/fileadmin/rls\\_uploads/pdfs/Analysen/Analysen23\\_Smart\\_City.pdf](https://www.rosalux.de/fileadmin/rls_uploads/pdfs/Analysen/Analysen23_Smart_City.pdf).

**Santana/Chaves/Gerosa/Kon/Milojicic 2017: Santana, Eduardo F. Z.; Chaves, Ana P.; Gerosa, Marco Aurelio; Kon, Fabio und Milojicic, Dejan S.:** Software platforms for smart cities: Concepts, requirements, challenges, and a unified reference architecture, ACM Computing Surveys, 50(6), 2017. Online: <https://doi.org/10.1145/3124391>.

**Schanz 2004: Schanz, Günther W.:** Sensoren: Sensortechnik für Praktiker, 3. Auflage, Hüthig, Heidelberg 2004.

**Schaumburg 1992: Schaumburg, Hanno:** Sensoren, Werkstoffe und Bauelemente der Elektrotechnik, Teubner, Stuttgart 1992.

**Schaumburg 1995: Schaumburg, Hanno (Hrsg.):** Sensoranwendungen, Werkstoffe und Bauelemente der Elektrotechnik, Teubner, Stuttgart 1995.

**Schnell 1991: Schnell, Gerhard:** Sensoren in der Automatisierungstechnik, Vieweg, Braunschweig 1991.

**Sidewalk Labs 2019a: Sidewalk Labs:** Designing for Digital Transparency in the Public Realm. Online: <https://www.sidewalklabs.com/dtpr/>.

**Sidewalk Labs 2019b: Sidewalk Labs:** Mission and Values. Online: <https://www.sidewalklabs.com/mission/>.

**Smart City Solutions GmbH 2019: Smart City Solutions GmbH:** LoRaWAN. Online: <https://www.smart-city-solutions.de/lorawan/>.

**Stadt Eindhoven 2016: Stadt Eindhoven:** Smart Society Charter. 1-3. Online: [https://www.eindhoven.nl/sites/default/files/2018-01/Smart\\_Society\\_IoT\\_charter\\_Eindhoven\\_v01.pdf](https://www.eindhoven.nl/sites/default/files/2018-01/Smart_Society_IoT_charter_Eindhoven_v01.pdf).

**Stadt Konstanz 2020:** Stadt Konstanz: Erstes Jahr Klimanotstand, Pressemitteilung, 12.05.2020. Online:

<https://www.konstanz.de/service/pressereferat/pressemitteilungen/erster+jahrestag+klimanotstand>.

**Stadt Ulm 2019a: Stadt Ulm:** GD 404/19: Zukunftskommune@bw – Beschluss Umsetzungsprojekte. Online: [https://buengerinfo.ulm.de/vo0050.php?\\_\\_kvonr=6286](https://buengerinfo.ulm.de/vo0050.php?__kvonr=6286).

**Stadt Ulm 2019b: Stadt Ulm:** Geschäftsstelle Digitale Agenda der Stadt Ulm. Online: <https://www.ulm.de/leben-in-ulm/digitale-stadt/geschaeftsstelle-digitale-agenda>.

**Stadt Ulm 2019c: Stadt Ulm:** Leistungsbeschreibung Dienste- und Datenplattform Stadt Ulm [internes Dokument], 12.08.2019, S. 1–48.

**Stadt Ulm 2019d: Stadt Ulm:** Ulm4CleverCity - Das Smart City-Projekt. Online: <https://www.ulm.de/leben-in-ulm/digitale-stadt/ulm4clevercity>.

**Stadt Ulm 2019e: Stadt Ulm:** Zukunftskommune. Online: <https://www.ulm.de/leben-in-ulm/digitale-stadt/zukunftskommune>.

**Stadt Ulm 2019f: Stadt Ulm:** Zukunftsstadt 2030. Online: <https://www.ulm.de/leben-in-ulm/digitale-stadt/zukunftsstadt>.

**The Things Network 2019: The Things Network:** LoRaWAN: Fundamental. Online: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/#fundamental>.

**TTN Ulm & LoRa 2019: The Things Network Ulm & LoRa:** TTN Ulm & LoRa – Home. Online: <https://lora.ulm-digital.com>.

**Varsheny/Nickerson/Muntermann 2013: Varsheny, Upkar; Nickerson, Robert C. und Muntermann, Jan:** Taxonomy Development in Health-IT, Proceedings of the Americas Conference on Information Systems (AMCIS), (1), 2013, S. 1-10. Online: <https://pdfs.semanticscholar.org/bc2d/9bf0bc3bb39a8327a22c2d12b2b2c8caab3a.pdf>.

**Voigt/Bussche 2018: Voigt, Paul und von dem Bussche, Axel:** EU-Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO): Praktikerhandbuch, Springer, Berlin 2018. Online: <https://www.springer.com/de/book/9783662561867>

**Wuppertal Institut/plan + risk consult 2016: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH und plan + risk consult - Prof. Dr. Greiving & Partner:** „Resiliente Stadt – Zukunftsstadt“, Forschungsgutachten, November 2016. Online: [https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/6614/file/6614\\_Resiliente\\_Stadt.pdf](https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/6614/file/6614_Resiliente_Stadt.pdf)

## Quellenverzeichnis IoT-Sensor-Typen

**Alliot Technologies 2019: Alliot Technologies:** LoRaWAN IoT Sensors.

Online: <https://www.alliot.uk/sensors/>.

**Decentlab 2019: Decentlab:** LoRaWan Products.

Online: <https://www.decentlab.com/products>.

**Elecom Electronics Supply 2019: Elecom Electronics Supply:** LoRaWan Sensor.

Online: <https://www.elecomes.com/collections/lorawan-sensor>.

**Gemtek 2019: Gemtek:** Gemtek: LoRa IoT.

Online: <https://www.gemteks.com/en/products/lora-iot/sensor>.

**Green Cityzen 2019: Green Cityzen:** Products: Hummbox Catalog.

Online: <http://www.greencityzen.fr/en/produits-en/>.

**iot-shop.de. 2019: iot-shop.de:** Produkt Typ: Sensor.

Online: <https://iot-shop.de/typ/sensor>.

**IOTRACKER 2019: IOTRACKER:** Track & Trace without charging.

Online: <https://iotracker.nl/en/>.

**Netvox 2019: Netvox:** Netvox - Home.

Online: <http://www.netvox.com.tw/index.html>.

**Sensirion 2019: Sensirion:** Sensirion - Experten für smarte Sensorlösungen.

Online: <https://www.sensirion.com/de/>.

**The IoT Store 2019: The IoT Store:** Home: IoT Essential Engredients.

Online: <https://www.iod-store.com.au>.

**The Things Network 2019: The Things Network:** Marketplace.

Online: <https://www.thethingsnetwork.org/marketplace>.

**Thinextra 2019: Thinextra:** Thinextra Products.

Online: <https://www.thinextra.com/solutions/thinxtraproducts/>.