

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum (DFD)

Abteilung Landoberfläche (LAX)

Endbericht

zum Vorhaben:

Konzeptentwicklung für die Informationsgewinnung zum Gebäudebestand in Deutschland aus Fernerkundungsdaten - G-DAT DE -

Vertrag:

SWD – 10.08.17.7-18.13

Laufzeit des Vorhabens:

11.12.2019 – 30.06.2021



Auftraggeber: Die Bundesrepublik Deutschland, letztvertreten durch das
Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR),

Deichmanns Aue 31 - 37, 53179 Bonn

Auftragnehmer: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.,
Linder Höhe, 51147 Köln
vertreten durch den Vorstand, handelnd durch das Institut DFD Münchener
Str. 20, 82234 Weßling

Bearbeitung: Dr. Thomas Esch
Sina Starmans
Dr. Wieke Heldens
Dr. Benjamin Leutner
Julian Zeidler
Chaonan Ji

Oberpfaffenhofen, den 30. Juni 2021

Zusammenfassung - Zentrale Inhalte und Ergebnisse

Der Bericht schließt neben einer zusammenfassenden Projektbeschreibung die systematische Auflistung und Darstellung geeigneter (Geo-)Datenbestände zu Gebäude- und Siedlungscharakteristika (AP2.1 - Datensichtung) sowie notwendige Aufbereitungsschritte (AP2.2 – Datenaufbereitung) ein. Darüber hinaus werden anhand ausgesuchter Datenproben dezidierte Fallbeispiele zur Beschreibung und Analyse von Einzelgebäuden und Gebäudeumgebungen dargestellt (AP3 – Fallbeispiele).

Auf Basis dieser Grundlagensammlung in der ersten Phase des Projektes erfolgte im Hinblick auf die nun anstehende zweite Hälfte des Vorhabens unter Einbeziehung spezifischer Evaluierungskriterien eine Bewertung aller zuvor gesichteten Datenbestände und zugehöriger Methodiken. Eine erste Listung geeigneter Bewertungskriterien wurde in Kapitel 4 vorgelegt.

In der zweiten Projektphase wurde dieser Katalog zunächst in enger Zusammenarbeit mit dem BBSR finalisiert, um dann anhand der festgesetzten Kriterien eine konkrete Bewertung der Datenbestände sowie zugehörigen Erhebungs- und Analyseverfahren vorzunehmen. In einer abschließenden Zusammenschau wurden dann unter Berücksichtigung der Evaluierungsergebnisse abschließend konkrete Vorschläge zu gangbaren und praxistauglichen Datenmodellen erarbeitet.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung - Zentrale Inhalte und Ergebnisse	I
Inhaltsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
1 Projektbeschreibung	1
1.1 Anforderungsprofil	1
1.2 Zielsetzung	1
1.3 Methodische Vorgehensweise und Aufgabengliederung	2
2 Datengrundlagen	5
2.1 Basisdaten	5
2.1.1 Geobasisdaten des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie	5
2.1.2 Europäisches Copernicus Programm	10
2.1.3 Amtliche Geodaten auf Ebene der Länder und Kommunen.....	13
2.1.4 Nicht-operationelle Datenerhebungen	14
2.2 Erdbeobachtungsdaten.....	15
2.2.1 Datenzugang	25
2.2.2 Datenaufbereitung.....	29
2.2.3 Datenauswertung	31
3 Fallbeispiele	33
3.1 Informationen zu Einzelgebäuden	33
3.1.1 Bauvolumen und Geschossflächenzahl.....	34
3.1.2 Gebäudenutzung.....	35
3.1.3 Dachform	37
3.1.4 Dachbegrünung.....	38
3.1.5 Dachaufbauten, Solaranlagen und Solarflächenpotenzial	40
3.2 Informationen zu Gebäudeumgebung und Siedlungskörper	41
3.2.1 Versiegelungsgrad und Versiegelungseffizienz	41
3.2.2 Bebauungsdichte	45

3.2.3	Verkehrsflächen und Bedeckungsart	46
3.2.4	Typ, Anteil und Volumen der Vegetation	47
3.2.5	Wasserflächen	50
3.2.6	Oberflächentemperatur, Hitzeinseln	51
3.2.7	Albedo	55
3.2.8	Luftschadstoffe	56
3.2.9	Nachtaufnahmen	59
3.2.10	Nahwärmepotenzial	60
3.3	Experimentelle Fernerkundungsverfahren	62
3.3.1	Hyperspektralfernerkundung	62
3.3.2	Fassadenauswertung	67
3.3.3	Gebäudetomograph	68
4	Methodenbewertung und Datenmodell	70
4.1	Methodenbewertung	70
4.2	Datenmodell	80
4.2.1	Bauvolumen und Geschossflächenzahl	80
4.2.2	Gebäudenutzung	82
4.2.3	Dachform	85
4.2.4	Dachbegrünung	87
4.2.5	Solaranlagen und weitere Dachaufbauten	89
4.2.6	Dachmaterialien	93
4.2.7	Versiegelungsgrad und Versiegelungseffizienz	95
4.2.8	Bebauungsdichte	96
4.3	Fazit	97
5	Anhang	98
	Quellenverzeichnis	102

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ausgesuchte Geobasisdaten des BKG am Beispiel des Digitalen Basis Landschaftsmodells (DLM-DE®), Hausumringen (HU-DE®) und des 3D Gebäudemodells (LoD1-DE®).....	7
Abbildung 2: 3D Gebäudedaten im Rasterformat und als Vektormodell (City GML) mit der Detailstufe LoD2.	8
Abbildung 3: Digitales Orthophoto (DOP20-DE®) in Falschfarbendarstellung mit nahem Infrarot, überlagert durch eine flächenhafte Darstellung der Hausumringe (HU-DE®).....	9
Abbildung 4: Detaillierungsgrad unterschiedlicher geometrischer Auflösungen von Multispektralaufnahmen der Satelliten MODIS, Landsat 8 und Sentinel-2 im Vergleich zum Luftbild.....	17
Abbildung 5: Spektrale Signatur unterschiedlicher Landbedeckungstypen (Wasser, Vegetation, Boden) und Lage der sechs multispektralen Aufnahmekanäle des Landsat-Satelliten.	18
Abbildung 6: Aufnahme des Satelliten Landsat 7 dargestellt in Echtfarben sowie als Falschfarbenkomposit.	19
Abbildung 7: Unterschiede zwischen einem multispektralen Satellitenbild des Sentinel-2 (oben) und einer radarbasierten Aufnahme des Sentinel-1 (unten).	20
Abbildung 8: Erscheinungsbild verschiedener Landbedeckungsarten in einem TimeScan Falschfarbenkomposit.	21
Abbildung 9: Exemplarische Auflistung kommerzieller und öffentlicher Missionen optischer Satellitensysteme zwischen 1985 bis 2020, untergliedert in drei Auflösungsstufen.	23
Abbildung 10: Übersicht der bereits aktiven sowie geplanten Sentinel Satellitenmissionen, sortiert nach Anwendung und geplantem Missionsstart.....	24
Abbildung 11: Darstellung der Zeitleiste zum Landsat Programm mit seinen bislang neun Missionen vom Programmstart im Jahr 1972 bis zum geplanten Start des Landsat 9 im Jahr 2021.	24
Abbildung 12: 3D Darstellung der Gebäudehöhen für die Innenstadt Münchens, erstellt auf Grundlage eines LoD1 Gebäudemodells, unterlegt mit DOP20® Luftbilddaten.	34
Abbildung 13: 3D Darstellung des Bauvolumens gemittelt über die Baublöcke in der Stadt München, erstellt auf Grundlage eines LoD1-DE® Gebäudemodells.	35
Abbildung 14: Illustration der Gebäudefunktionen anhand entsprechender Attribute des LoD1-DE® Gebäudemodells.	37
Abbildung 15: Darstellung des Reichstagsgebäudes sowie dessen Dachformen durch einen CityGML LoD2 Datensatz.	38

Abbildung 16: Falschfarbeninfrarot-Luftbild kombiniert mit Hausumringen (links) und Ergebnis einer automatisierten Identifizierung von Gründächern sowie deren Begrünungsintensität.	39
Abbildung 17: Versiegelungskartierung für das Gebiet München, basierend auf Landsat Aufnahmen (30 m) sowie linienhaften Strukturelementen aus ATKIS®.	42
Abbildung 18: Prozentuale Versiegelung der Münchener Innenstadt, basierend auf DOP20 Luftbilddaufnahmen (20 cm, oben) und Sentinel-2 Aufnahmen (10 m, unten).	43
Abbildung 19: Darstellung der Versiegelungseffizienz anhand von drei Beispielen in der Stadt München.	44
Abbildung 20: Mittlere Bebauungsdichte der Stadt München pro Baublock, berechnet über ATKIS® (Gebäude) und HU-DE® des BKG.	45
Abbildung 21: Oberflächentypen der Verkehrsflächen für Stuttgart, abgeleitet aus OSM, klassifiziert nach den Klassenanforderungen des Stadtklimamodells PALM-4U.	47
Abbildung 22: Vegetationstypen der Stadt Berlin.	48
Abbildung 23: Vegetationshöhen der Stadt Berlin.	48
Abbildung 24: Prozentualer Grünanteil per Flurstück in Berlin.	49
Abbildung 25: Grünvolumen in per Flurstück in Berlin.	49
Abbildung 26: Wasserflächen von Hamburg, dargestellt anhand von ATKIS® Daten zu Gewässern.	51
Abbildung 27: Oberflächentemperatur in München gemessen mittels Landsat und über Deadalus.	52
Abbildung 28: Die städtische Hitzeinsel von München und umliegenden Siedlungen, 20.6.2007. Aufgenommen vom Satellit-basierter Sensor NOAA (LST Produkt, 90 m Pixelauflösung).	53
Abbildung 29: Gegenüberstellung der mittleren Oberflächentemperatur von versiegelten und unversiegelten Pixeln in 18 weltweit verteilten Städten.	54
Abbildung 30: Thermalaufnahmen von München am 12.7.2011, aufgenommen mit der flugzeuggetragenen AHS Kamera am Tag (links) sowie in der Nacht (rechts).	54
Abbildung 31: Albedo als Mittelwert über alle Wellenlängen für den Ausschnitt eines HyMap-Datensatzes in der Umgebung des Nymphenburger Parks in München.	55
Abbildung 32: Städtische Verschmutzungsinsel von München beobachtet von Sentinel-5P.	56
Abbildung 33: NO ₂ Verteilung in der Umgebungsluft für den Großraum München.	57
Abbildung 34: Simulation von NO ₂ im Bereich der Landshuter Allee, München.	58

Abbildung 35: Nachtaufnahmen von München (links) und Berlin (rechts)	59
Abbildung 36: Räumlich detaillierte Modellierung des Wärmenetzpotenzials auf Quartiersebene, dargestellt am Beispiel Münchens.....	61
Abbildung 37: Vergleich der Vegetationsspektren abgeleitet aus Fernerkundungsdaten des hyperspektralen HyMAP Sensors und des multispektralen Landsat bzw. IKONOS Satelliten.....	63
Abbildung 38: Vergleich der Spektren von offenem Boden und Betondachziegeln.	64
Abbildung 39: Falschfarbendarstellung eines HyMap Hyperspektralbildes von München (Ostbahnhof) und Kartierung von Oberflächenmaterialien mittels spektraler Entmischung.	65
Abbildung 40: Ergebnis einer Kartierung von Solaranlagen basierend auf Hyperspektraldaten.....	66
Abbildung 41: Kartierung des Fensteranteils an Fassaden mittels Methoden der künstlichen Intelligenz (Deep Learning).....	68
Abbildung 42: Gesamtes Bauvolumen je Bundesland in Milliarden m ³ (links) und je Bezirk der Stadt Berlin in Millionen m ³ (rechts).....	81
Abbildung 43: Klassifizierung der Gebäudenutzung in die drei Klassen Wohngebäude, Gemischte Nutzung, Nicht-Wohngebäude und jeweilige Unterklassen..	83
Abbildung 44: Gründächer Berlin..	87
Abbildung 45: Fläche der Dachbegrünung in m ² je Dach für die Stadt Berlin..	88
Abbildung 46: Anteil der Dachbegrünung in Prozent je Dach für die Stadt Berlin.....	88
Abbildung 47: Prozentualer Anteil der 12 Bezirke der Stadt Berlin an der gesamten Gründachfläche....	89
Abbildung 48: Automatisiert erkannte Solaranlagen mittels Hyperspektraldaten in drei Untersuchungsgebieten in der Stadt Oldenburg.	90
Abbildung 49: Ausschnitt der Stadt Oldenburg, grün markiert Häuser mit Solaranlagen, grau markiert Häuser ohne Solaranlagen.....	91
Abbildung 50: Spektrale Signatur von Asbest..	93
Abbildung 51: Dachmaterialien der Stadt Oldenburg berechnet auf Basis von HySpex Befliegungsdaten..	94
Abbildung 52: Durchschnittliche Versiegelung je 10m Pixel im besiedelten Raum je Bundesland (links) und je Bezirk der Stadt Berlin (rechts) in Prozent.....	95
Abbildung 53: Durchschnittliche Bebauungsdichte der Bundesländer (links) und der Bezirke der Stadt Berlin (rechts) in Prozent.....	96

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Produktinformation.....	71
Tabelle 2: Kosten und Implementierungsaufwand in Verwaltungsstrukturen	75
Tabelle 3: Effizienz in der Anwendbarkeit	79
Tabelle 4: Gebäudenutzung Berlin	84
Tabelle 5: Einordnung der Dachformen und deren Vorkommen in Berlin und Deutschland. Grün umrandete Dachformen kommen für Gründächer in Frage	85
Tabelle 6: Unterteilung der Nicht-Wohngebäude in Berlin nach ihrer Gebäudenutzung	98

Abkürzungsverzeichnis

AAA	AFIS-ALKIS-ATKIS
AdV	Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland
AFIS	Amtliches Festpunktinformationssystem
ALKIS	Amtliches Liegenschaftskataster-Informationssystem
ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
ALK	Automatisierte Liegenschaftskarte
B	Blau
Basis-DLM	Digitales Basis-Landschaftsmodell
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
CityGML	City Geography Markup Language
CMLS	Copernicus Land Monitoring Service
CORINE	Coordination of Information on the Environment
DE	Digital Earth
DFD	Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum des DLR
DFK	Digitale Flurkarte
DGM	Digitales Geländemodell
DGM10	Digitales Geländemodell 10 m Gitterweite
DGM25	Digitales Geländemodell 25 m Gitterweite
DGM50	Digitales Geländemodell 50 m Gitterweite
DIAS	Copernicus Data and Information Access Service
DLM	Digitales Landschaftsmodell
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DOM	Digitales Oberflächenmodell
DOP	Digitales Orthophoto
DOP20	Digitales Orthophoto 20 cm Auflösung
DTK	Digitale Topographische Karte
DTK25	Digitale Topographische Karte 1:25 000

DTK50	Digitale Topographische Karte 1:50 000
DTK100	Digitale Topographische Karte 1:100 000
DWD	Deutscher Wetterdienst
EFH	Einfamilienhaus
ESA	European Space Agency
ESM	European Settlement Maps
EU	Europäische Union
FUA	Functional Urban Areas
G	Grün
GIS	Geographisches Informationssystem
GMES	Global Monitoring for Environment and Security
HK	Hauskoordinaten
HRSLs	hochauflösende Layer
HU-DE	Hausumringe Deutschland
IBU	Impervious Built-up
IMD	Imperviousness Density
KI	Künstliche Intelligenz
LiDAR	Light detection and ranging
LoD	Level of Detail
LoD1	Level of Detail 1
LoD2	Level of Detail 2
LUCAS	Land Use and Coverage Area frame Survey
MFH	Mehrfamilienhaus
NDBI	Normalized Difference Built-up Index (Index zur Bebauung)
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index (Index zum Vegetationszustand)
NDWI	Normalized Difference Water Index (Index zu Wasserbedeckung)
NIR	Near Infrared, Aufnahmekanal im Nahen Infrarot
NOx	Stickstoffoxide
OID	Objektidentifikator

OSM	Open Street Map
R	Red
RE	Red Edge
RGB	Rot Grün Blau - Echtfarben
STL	Street Tree Layer
SUHI	Städtische Oberflächen Wärme Insel (Surface Urban Heat Island)
TN	Tatsächliche Nutzung
UTM	Universal Transversal Mercator
VHR	Very High Resolution
WGS	World Geodetic System
WMS	Web Map Service
ZFH	Zweifamilienhaus

1 Projektbeschreibung

1.1 Anforderungsprofil

In Deutschland sind die Informationen zum gesamten Gebäudebestand sehr lückenhaft. Dies betrifft insbesondere den Bereich der Nichtwohngebäude aber beispielsweise auch viele Aspekte von Wohngebäuden und Siedlungen. Von verschiedenen Seiten gibt es Ansätze den Informationsstand zu verbessern.

Im Projekt sollen die Möglichkeiten der Gewinnung gebäuderelevanter Informationen aus praktizierten Fernerkundungsverfahren in Deutschland beschrieben und bewertet werden. Dabei sollen Aufwand und Nutzen der unterschiedlichen Verfahren dargelegt und Aussagen zur Fortschreibungsfähigkeit getroffen werden. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse sollen in die Erstellung eines Konzeptes zur Implementierung der als sinnvoll erachteten Verfahren einfließen.

Den Schwerpunkt der zu betrachtenden Fernerkundungsverfahren bilden die ohnehin stattfindenden Datenerhebungen beispielsweise der ESA aus Satellitenbeobachtung sowie die aus regelmäßigen Befliegungen im Auftrag von Bund, Ländern und Kommunen gewonnenen Daten. Es sollen aber auch andere technisch etablierte, jedoch bisher noch nicht standardmäßig eingesetzte Messmethoden der Fernerkundung (z.B. Hyperspektralaufnahmen) in die Betrachtungen einbezogen werden.

1.2 Zielsetzung

Vor dem Hintergrund des dargelegten Anforderungsprofils liegt das übergeordnete Ziel dieses Vorhabens in einer Bewertung des Potenzials von Daten und Techniken der Fernerkundung zur Unterstützung der laufenden Raumbesichtigung zum Gebäude- und Siedlungsbestand in Deutschland. Neben einer Darstellung der grundsätzlichen Möglichkeiten zur Erhebung neuer oder verbesserter gebäude- und siedlungsbezogener Merkmale spielen dabei insbesondere praxis- und umsetzungsrelevante Aspekte wie Aufwand-Nutzen-Verhältnis und Fortschreibungsfähigkeit der Erhebungsmethoden und Messverfahren eine zentrale Rolle.

Vor diesem Hintergrund ist die gezielte Nutzung von Synergien zu - und Einbindung von - etablierten Mechanismen der Daten- und Informationserhebung auf Ebene von Bund, Ländern und Kommunen ein zentrales Element. Dazu zählen insbesondere Luftbild-, Kataster- und Vermessungsdaten und daraus abgeleitete Informationen wie etwa Hausumringe und 3D-Gebäudemodelle (LoD). Zudem gilt es, Erdbeobachtungsmissionen wie jene der europäischen Sentinel-Flotte

und ggf. die darauf basierenden Services des Copernicus-Programms (z.B. Urban Atlas, High Resolution Layer Imperviousness) aktiv einzubinden.

Die beiden unterschiedlichen Informationsebenen - nationale behördliche Daten einerseits und fernerkundungsbasierte Informationen andererseits - sollen dabei im Sinne eines kombinierten Bottom-up (behördlichen Daten) und Top-down Ansatzes (Fernerkundung) miteinander verknüpft werden. Darüber hinaus können ergänzend bislang nicht standardmäßig eingesetzte bzw. voll-operationelle Fernerkundungsverfahren in die Analysen und Bewertungen einbezogen werden, wenn dies sinnvoll und zielführend erscheint. Dies gilt insbesondere für Ansätze der Hyperspektralmessungen, die gerade mit Blick auf die Bereitstellung bislang nicht großflächig verfügbarer Informationen zu Oberflächenmaterialien, deren physikalischen Eigenschaften und Umweltgefahrenstoffen ein hohes Innovationspotenzial versprechen.

1.3 Methodische Vorgehensweise und Aufgabengliederung

Unter Berücksichtigung der übergeordneten Zielsetzung umfasst das Vorhaben vier Aufgabenbereiche, die sich entsprechend der Leistungsanforderungen und methodisch-technischen Aufgaben wiederum in verschiedene Arbeitspakete untergliedern:

1) *Arbeitspaket 1: Projektkoordination*

Die Leitung und Koordination des Vorhabens obliegt dem Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR). In die Verantwortlichkeit des Projektmanagements fallen neben der administrativen Abwicklung auch die Betreuung der wissenschaftlich-technischen Fragestellungen und die enge Abstimmung mit dem Auftraggeber sowie ggf. den Ansprechpartnern auf Ebene von Bund, Ländern und Kommunen. Darüber hinaus zeichnet sich die Projektkoordination für die vollständige Zusammenfassung der Ergebnisse, die Erstellung des Endberichts, die Präsentation der Projektinhalte auf der Auftakt- und Abschlussveranstaltung sowie mögliche Hinweise auf zukünftig potenziell umsetzbare Erweiterungen der laufenden Beobachtung durch die aufgezeigten Verfahren und Daten verantwortlich.

2) *Arbeitspaket 2: Datengrundlagen*

Dieses Arbeitspaket umfasst zum Einen die systematische Identifizierung und Bewertung aller Datenbestände (AP2.1 - Datensichtung) zu Gebäude- und Siedlungscharakteristika, die auf Ebene von Bund, Ländern und Kommunen vorliegen und potenziell für die erforderlichen Zwecke nutzbar sind (u.a. Luftbild-, Kataster- und Vermessungsdaten wie ATKIS® Basis-DLM, tatsächliche Nutzung, Topographie, Hausumringe, Gebäudemodelle, CityGML, Messnetze). Darüber schließt das Arbeitspaket die Prüfung der Bestände an nutzbaren Satellitendaten - insbesondere der kostenfrei

zu beziehenden Aufnahmen der europäischen Sentinel-Flotte - sowie die Geoinformationsdienste des Copernicus-Programms (u.a. Urban Atlas, High Resolution Layer Imperviousness) ein. Ferner wird geprüft, in welchem Umfang weitere öffentlich zugängliche Informationsquellen - z.B. freiwillig erhobene geographische Informationen wie Open Street Map (OSM) - einsetzbar sind. Letztlich werden weitere fernerkundliche Messverfahren betrachtet, die bislang noch nicht in der laufenden Raumbbeobachtung und Vermessung etabliert sind, aber mit Blick auf die Zielsetzung des Vorhabens von besonderem Interesse sein dürften. Allem voran ist hier das am DLR vorhandene, umfangreiche Archiv hyperspektraler Daten zu nennen, das dem Projekt vollständig zur Verfügung steht. Dabei sind insbesondere die urbanen Befliegungsdaten mit den Sensoren HyMap und HySpex von besonderem Interesse. Ferner werden aber auch zusätzliche Verfahren wie etwa Thermalbefliegungen, Nachtaufnahmen oder Luftschadstoffmessungen mit in die Betrachtungen einbezogen.

Im Anschluss an die Identifizierung der relevanten Informationsbestände werden im Arbeitspaket AP2.2 – Datenaufbereitung ausgesuchte Datenzusammenstellungen für eine konkrete Auswertung im Rahmen dezidierter Fallstudien (s. AP3) extrahiert, konvertiert und aufbereitet.

3) *Arbeitspaket 3: Fallbeispiele*

Im Anschluss an die Identifizierung der als zielführend eingestuften Grundlagendaten in AP2 wird im Arbeitspaket 3 anhand praxisnaher Fallbeispiele demonstriert, auf welche Weise ausgesuchte Datenproben zur Bereitstellung neuer oder verbesserter Merkmale zum Gebäudebestand und zur Siedlungsstruktur eingesetzt werden können. Die Untersuchungs- bzw. Demonstrationsgebiete werden nach Sichtung der Datengrundlagen (AP2) festgelegt. Aus derzeitiger Sicht sind die Städte München, Berlin, Ulm und Ludwigsburg vielversprechende Kandidaten.

Vor dem Hintergrund der am DLR aufgebauten Erfahrung und Expertise im Bereich der siedlungsbezogenen Fernerkundung kann dabei auf ein einzigartiges Spektrum an Konzepten, Datenproben, Auswertetechniken und Hochleistungsrecheninfrastrukturen zurückgegriffen werden. Diese sollten im Zuge des geplanten Projektes beispielhaft gezielt zur Ableitung der gewünschten Informationen zum Gebäudebestand eingesetzt und dabei effektiv durch amtliche Datenbestände ergänzt und veredelt werden. Die Auswahl der im Zuge der Fallstudien zu betrachtenden gebäude- und siedlungsbezogenen Informationen stellt sich wie folgt dar:

AP 3.1 – Informationen zu Einzelgebäuden.

- Dachform.
- Dachmaterial und Umweltgefahrenstoffe (z.B. Asbestdächer).
- Dachbegrünung.

- Bauvolumen, Geschossflächenindex.
- Gebäudenutzung.
- Solaranlagen/Dachaufbauten.
- Solarflächenpotenzial.
- Fassadenauswertung (z.B. Fenstererfassung aus Schrägluftbildern).

AP 3.2 - Informationen zu Gebäudeumgebung und Siedlungskörper.

- Bebauungsdichte.
- Blaue-Grüne-Graue Infrastruktur.
- Versiegelungsgrad, Versiegelungseffizienz.
- Verkehrsflächen und Bedeckungsart.
- Oberflächentemperatur, Hitzeinseln.
- Albedo.
- Vegetationsanteil und -typ.
- Vegetationsvolumen.
- Luftschadstoffmessungen – grob aufgelöst (z.B. NOx).

4) *Arbeitspaket 4: Methodenbewertung und Datenmodell*

Im Arbeitspaket AP4.1 - Methodenbewertung erfolgt eine zusammenfassende Betrachtung der Ergebnisse aus den Arbeitspaketen 2 und 3, wobei neben methodisch-technischen Aspekten vor allem auch praxis- und umsetzungsrelevante Merkmale wie Aufwand-Nutzen-Verhältnis, Datenzugang (v.a. unter Berücksichtigung der föderalen Struktur in der Bundesrepublik und den sich daraus ergebenden Zuständigkeiten), Fortschreibungsfähigkeit der Erhebungsmethoden und Messverfahren sowie der rechtlichen Rahmenbedingungen, etwa hinsichtlich Nutzungsrechten und Datenschutz.

Basierend auf den Erkenntnissen und Einschätzungen aus AP4.1. werden dann schließlich in AP4.2 – Datenmodell konkrete Vorschläge erarbeitet, wie die gewonnenen Informationen effizient für eine Verwendung durch Nutzer des öffentlichen Sektors bereitgestellt werden können. Dabei sollen auch Aspekte wie Online-Portale und Informationsplattformen in Betrachtung einbezogen werden.

Aufgrund der sehr kurzen Laufzeit des Vorhabens wird auf eine schlanke Managementstruktur gesetzt, so dass mit Blick auf die konkreten Liefergegenstände aus den einzelnen Arbeitspaketen alle relevanten Arbeiten, Vorgehensweisen, Ergebnisse und Schlussfolgerungen zentral und ausführlich in Form eines kontinuierlich fortzuschreibenden (End-)Berichts dargelegt werden. Zudem werden in Absprache mit dem Auftraggeber Datenproben und -produkte auf Wunsch als digitale

Geodaten (Geotiff, shp-File) oder – sofern technisch sinnvoll und möglich – in Form von Kennwerten in Excel-Tabellen bereitgestellt.

2 Datengrundlagen

2.1 Basisdaten

Für die Bearbeitung der Fragestellung ist es sinnvoll, zunächst einmal bereits bestehende Informationen zu Gebäude- und Siedlungscharakteristika auf Ebene von Bund, Ländern und Kommunen in die Betrachtungen bzw. praktischen Auswertungen einzubeziehen. Dies umfasst primär die Geobasisdatenbestände des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (Kap. 2.1.1), aber auch die Produkte des Copernicus Programmes (Kap. 2.1.2). Darüber hinaus werden auf kommunaler Ebene vielfach zusätzliche Geodatenbestände geführt, etwa Informationen zur tatsächlichen Nutzung von Gebäuden (Kap. 2.1.3). Ferner besteht die Möglichkeit zur Nutzung frei zugänglicher Datensätze wie beispielsweise Open Street Map (Kap. 2.1.4).

2.1.1 Geobasisdaten des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie

Das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) ist der zentrale Dienstleister des Bundes für topographische Grundlagendaten, Kartographie und geodätische Referenzsysteme. Über das BKG werden geodätische Bezugssysteme und geotopographische Referenzdaten für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland bereit gestellt (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2020a). Mit Blick auf die Analyse des Gebäudebestandes in Deutschland kommen insbesondere die im Folgenden dargelegten Datensätze des BKG in Betracht:

a) *Digitales Basis-Landschaftsmodell (Basis-DLM)*

Das Basis-DLM ist Bestandteil des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems (ATKIS®) und basiert auf dem gemeinsamen Datenmodell für AFIS®, ALKIS® und ATKIS®. Das Basis-DLM beschreibt die topographischen Objekte der Landschaft im Vektorformat. Die Objekte werden einer bestimmten Objektart (u.a. Gebäude, Siedlung, Verkehr, Vegetation und Gewässer) zugeordnet und durch ihre räumliche Lage, ihren geometrischen Typ, beschreibende Attribute und Beziehungen zu anderen Objekten definiert. Die räumliche Lage wird für das Basis-DLM maßstabs- und abbildungsunabhängig angegeben. Jedes Objekt besitzt einen deutschlandweit eindeutigen Objektidentifikator (OID), der über die gesamte Lebenszeit des Objektes gleichbleibt (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2016a).

b) Digitales Geländemodell (DGM)

Die Digitalen Geländemodelle (DGM) des BKG beschreiben die Geländeformen der Erdoberfläche durch eine in einem regelmäßigen Gitter angeordnete, in Lage und Höhe georeferenzierte Punktmenge. Die Gitterweite (Auflösung) beträgt 10 m (DGM10), 25 m (DGM25) oder 50 m (DGM50) und deckt das Territorium der Bundesrepublik Deutschland ab. Die aktuelle Höhen- sowie Lagegenauigkeit ist abhängig von den Gitterweiten. Für das DGM10 beträgt die aktuelle Höhengenaugigkeit geländetypabhängig $\pm 0,5$ bis 2 m, für das DGM25 ± 1 bis 3 m und für das DGM50 ± 1 bis 4m. Die Lagegenauigkeit beträgt für das DGM10 $\pm 0,5$ bis 2 m und für das DGM25 sowie DGM50 ± 1 bis 3 m. Die primären Datenbestände der DGMs werden durch die Landesvermessungseinrichtungen in Form von Digitalisierung von Höhenfolien, Photogrammetrische Bestimmung von Höheninformationen und Laserscanning erstellt. Das BKG bereitet die Datensätze weiter auf und kontrolliert diese, um schlussendlich die einzelnen Datenbestände der Landesvermessungseinrichtungen zu einem Datenbestand mit einheitlicher Gitterweite zusammenzuführen (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2015a, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2012, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2015b).

c) Digitale Topographische Karten (DTK)

Die Digitalen Topographischen Karten, DTK25 (1:25 000), DTK50 (1:50 000) und DTK 100 (1: 100 000) sind aus dem Basis-DLM und dem DGM erzeugte topographische Karte im Rasterformat für die Bundesrepublik Deutschland. Die Datenbestände der Länder werden am BKG zu einem blattschnittfreien bundesweiten Datensatz zusammengeführt. Inhaltliche Veränderungen finden keine statt und bestehende Unterschiede der Kartographie zwischen den Bundesländern bleiben bestehen. Die Rasterdaten sind nach thematischen Inhaltselementen in verschiedene Ebenen (Layer) gegliedert. Die DTKs verfügen alle über einen Summenlayer, welcher alle Ebenen beinhaltet, sowie über 24 thematische Einzellayer (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2020b, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2014, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2018a).

d) Hauskoordinaten (HK) und Hausumringe Deutschland (HU-DE)

Die Ableitung der Hauskoordinaten (HK) erfolgt aus ALKIS. Es werden ausschließlich Hauptgebäude, aber keine Nebengebäude für die Hauskoordinaten herangezogen. Die Unterscheidung von Haupt- und Nebengebäuden in ALKIS geschieht in Abhängigkeit zur Lagebezeichnung und zur Gebädefunktion. Hauptgebäude sind alle im Liegenschaftskataster nachgewiesenen Gebäude mit einer Lagebezeichnung mit Hausnummer/n oder einer Lagebezeichnung mit Pseudonummer ohne laufende Nummer und gleichzeitiger Kennzeichnung als Hauptgebäude in der Liste „Gebäudezuordnung“ (Gebädefunktion) (Landesamt für Digitalisierung, 2017).

Der Datensatz Hausumringe Deutschland (HU-DE) des BKG enthält georeferenzierte Umringspolygone von Gebäudegrundrissen der Automatisierten Liegenschaftskarte (ALK) bzw. der Digitalen Flurkarte (DFK) in Bayern. Ausgestaltungsgeometrien, Dächer und unterirdische Gebäude werden in dem Datensatz nicht berücksichtigt. Er basiert auf dem Datensatz der amtlichen Hausumringe der Zentralen Stelle Hauskoordinaten und Hausumringe (ZSHH) (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2018b).

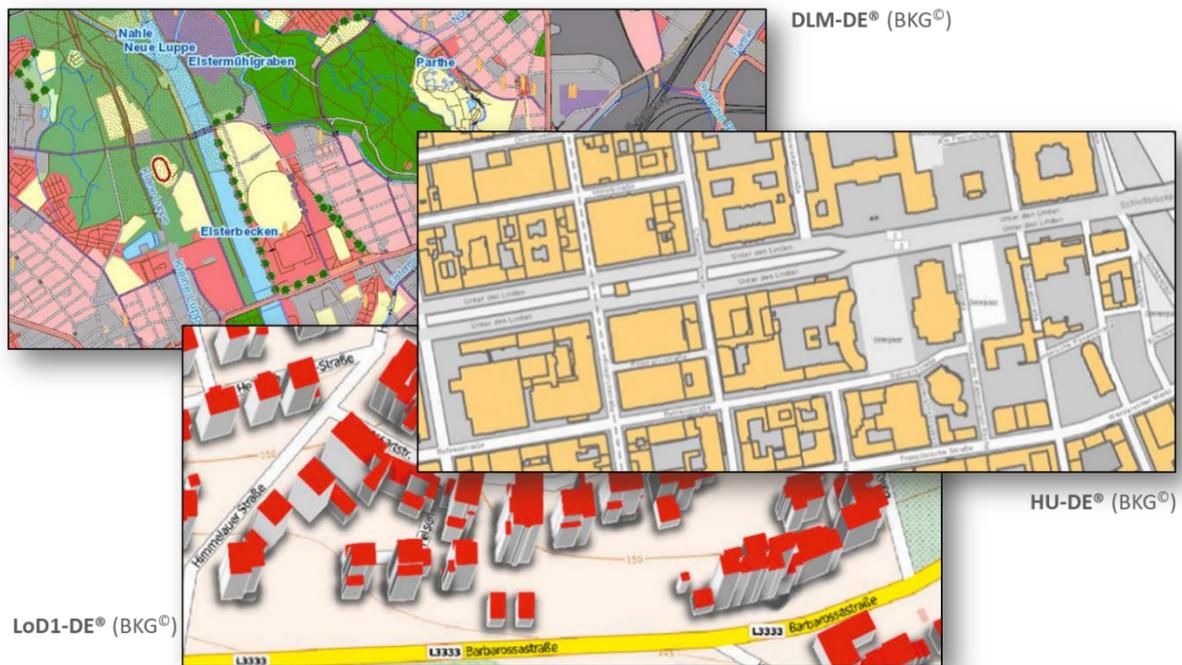


Abbildung 1: Ausgesuchte Geobasisdaten des BKG am Beispiel des Digitalen Basis Landschaftsmodells (DLM-DE®), der Hausumringe (HU-DE®) und des 3D Gebäudemodells im Detaillierungsgrad 1 (LoD1-DE®). © BKG

e) 3D-Gebäudemodelle

Ein 3D-Gebäudemodell ist ein digitales, numerisches Oberflächenmodell der Erdoberfläche, reduziert auf die in ALKIS definierten Objektbereiche Gebäude und Bauwerke und somit eine Erweiterung des Datensatzes der Hausumringe um die dritte Dimension. Die Gebäudedarstellung erfolgt als „Klötzchen“ im Detaillierungsgrad 1 – dem sogenannten Level of Detail 1 (LoD1). Alle Gebäude werden mit einem Flachdach dargestellt. Die Lagegenauigkeit entspricht der des zu Grunde liegenden Gebäudegrundrisses. Die Höhengenaueigkeit beträgt größtenteils 5 m. Grobe Abweichungen sind in Einzelfällen bei komplexen Dachformen möglich (Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV), 2015). Neben der Geometriebeschreibung des Körpers umfasst der Gebäudedatensatz eines Gebäudes folgende Attribute:

- Die Höhe des Gebäudes (Differenz in Metern zwischen dem höchsten Bezugspunkt und dem tiefsten Bezugspunkt des Gebäudes).
- Objektidentifikator.
- Gebäudefunktion.
- Qualitätsangaben (Metadaten).
- Amtlicher Gemeindeschlüssel.
- Name (wenn geführt).

Im Folgenden wird teilweise nur der Detailierungsgrad LoD1 und LoD2 als Synonym für den ganzheitlichen Begriff LoD1/2 Gebäudemodell verwendet.



Abbildung 2: 3D Gebäudedaten im Rasterformat und als Vektormodell (City GML) mit der Detailstufe LoD2.

Quelle: DLR

f) Digitale Orthophotos (DOP)

Digitale Orthophotos (DOP) sind verzerrungsfreie und georeferenzierte Luftbilder welche durch die Vermessungsverwaltungen der Bundesländer erzeugen werden. Das BKG führt die Rasterdaten länderübergreifend zusammen und generiert deutschlandweite Datensätze mit Bodenauflösungen von 20 cm (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2020c). Aufgrund ihres einheitlichen Maßstabs verfügen sie über alle charakteristischen Merkmale einer klassischen Karte. Das Messen von Strecken oder die Berechnung von Flächen ist daher möglich. Ebenso können die

Orthophotos durch weitere ausgewählte Inhalte ergänzt werden, z.B. aus Digitalen Landschaftsmodellen (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2016b).



Abbildung 3: Digitales Orthophoto (DOP20-DE®) in Falschfarbendarstellung mit nahem Infrarot, überlagert durch eine flächenhafte Darstellung der Hausumringe (HU-DE®). Quelle: DLR\BKG

g) Web Map Service Sentinel2-DE

Neben den oben genannten geotopographischen Referenzdaten und den Digitalen Orthophotos, verwertet das BKG auch Satellitendaten der Sentinel-2 Mission (s. Kap. 2.1.2) und stellt diese im Rahmen eines Web Map Services (WMS) zu Nutzung bereit. Der WMS Sentinel2-DE ist ein Service des BKG, welcher es ermöglicht, vorprozessierte und aufbereitete Fernerkundungsinformationen der Sentinel-2 Mission des Erdbeobachtungsprogrammes Copernicus in eigene Analysen mit einzubinden. Im Rahmen des Services wurden Sentinel-2 Daten von Deutschland aus den Jahren 2018 und 2019 zu einem Mosaik zusammengefügt und ein frei verfügbares Produkt mit 10 m Bodenauflösung generiert. Das Mosaik setzt sich aus den fünf Bändern, R (Rot), G (Grün), B (Blau),

NIR (Nahes Infrarot) und RE (Red Edge) zusammen. Die Wolkenbedeckung beträgt über das gesamte Gebiet weniger als 3 %. Über den Webservice können vier verschiedene Layer aufgerufen werden – z.B. verschiedene Kanalkombinationen der aufbereiteten Sentinel-2-Daten. Über den vierten Layer kann auf Basis der Metadaten die Aktualität (Aufnahmezeitpunkt) des jeweiligen Satellitenbildes abfragt werden. Das Produkt wird jährlich erweitert (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2020d).

2.1.2 Europäisches Copernicus Programm

Das Copernicus-Programm ist ein Grundstein der Bemühungen der Europäischen Union (EU), die Erde und ihre vielfältigen Ökosysteme zu überwachen und sicherzustellen, dass die europäischen Bürger auf natürliche oder vom Menschen verursachte Katastrophen vorbereitet und vor diesen geschützt sind (European Commission, 2016). Das Programm wurde 2012 ins Leben gerufen, aufbauend auf dem vorhergehenden Programm Global Monitoring for Environment and Security (GMES), und wird von der Europäischen Kommission in Partnerschaft mit der European Space Agency (ESA), den EU-Mitgliedstaaten und EU-Agenturen koordiniert und verwaltet (Copernicus, 2020a). Ziel von Copernicus ist es, eine globale, kontinuierliche, autonome, qualitativ hochwertige und weitreichende Erdbeobachtungskapazität zu erreichen, indem im Weltraum, am Boden, auf See und in der Luft gesammelte Daten zusammengeführt werden, um zeitnahe, zuverlässige und leicht zugängliche Informationen zu produzieren. Darüber hinaus gewährt es einen einfachen, autonomen und unabhängigen Zugang zu solchen Informationen, um Dienstleister, Behörden und andere internationale Organisationen bei der Verbesserung der Lebensqualität der europäischen Bürger zu unterstützen. Copernicus umfasst drei verschiedene Komponenten: Raumfahrt, In-Situ-Daten und Services (European Commission, 2016). Die Copernicus Services lassen sich in sechs Bereiche unterteilen: Überwachung der maritimen Umwelt, Land- und Atmosphärenüberwachung, Katastrophenschutz, Sicherheit und Klimawandel. In diesen Bereichen gibt es eine Vielzahl von Produkten, welche sich mit den unterschiedlichen Bedürfnissen der Nutzer befassen (Copernicus, 2020a). Für die Konzeptentwicklung zur Informationsgewinnung zum Gebäudebestand in Deutschland sind besonders die Produkte des Copernicus Land Monitoring Services (CMLS) von Interesse. Im Rahmen des CMLS werden Produkte generiert, welche den aktuellen Stand sowie die Entwicklung der Landoberfläche auf lokaler und globaler Ebene zeigen (Copernicus, 2020b). Der Service umfasst die folgenden Hauptkomponenten:

- Eine globale Komponente, die in mittlerer bis niedriger räumlicher Auflösung eine Reihe von biogeophysikalischen Produkten über den Zustand und die Entwicklung der Landoberfläche liefert (z.B. Albedo, Landoberflächentemperatur, Top-of-Canopy

Reflexionsvermögen), die zur Überwachung der Vegetation, des Wasserkreislaufs, des Energiehaushalts und der terrestrischen Kryosphäre verwendet werden.

- Eine gesamteuropäische Komponente, die darauf abzielt, Landnutzungs- und Landbedeckungskarten (z.B. CORINE Landcover - CLC) und hochauflösende Layer (HRSLs) zu erstellen, die die fünf wichtigsten Landbedeckungstypen – künstliche Flächen, Waldgebiete, landwirtschaftliche Flächen (Dauergrünland), Feuchtgebiete und Gewässer – beschreiben.
- Eine lokale Komponente, die spezifische und detailliertere Informationen liefert, die die gesamteuropäische Komponente ergänzen und sich auf bestimmte Hotspots konzentriert (z.B. Großstädte in der EU, Auengebiete, graslandreiche Standorte), die für verschiedene Umweltprobleme anfällig sind.
- Eine Bild- und Referenzdatenkomponente, die Satellitenbilder und In-situ-Daten sammelt und die Grundlage für die Bereitstellung vieler Informationsprodukte und -dienste bildet (z.B. die Rahmenerhebung des Land Use and Coverage Area Frame Survey – LUCAS) (Copernicus, 2020b).

Im Folgenden werden einige der im Rahmen des CMLS erstellten Produkte detaillierter vorgestellt:

a) Urban Atlas

Der Urban Atlas ist ein Produkt der lokalen Copernicus Komponente, der europaweit vergleichbare Daten zur Bodenbedeckung und Bodennutzung von europäischen Städten - Functional Urban Areas (FUA) genannt - liefert (Copernicus, 2020c).

Die erste Version des Urban Atlas stammt aus dem Jahr 2006 und deckt 319 FUAs ab. Die Folgeversion von 2012 beinhaltet bereits 785 FUAs sowie Schätzungen zu der Bevölkerungsdichte pro Polygon und den sogenannten Street Tree Layer (STL) in ausgewählten FUAs und die Gebäudehöhen in Hauptstädten. Der Urban Atlas von 2018 soll mit Fertigstellung über 788 FUAs verfügen sowie bis Ende 2020 auch über die Bevölkerungsdichte der einzelnen Polygone. Des Weiteren wird es folgende Produkte geben (Copernicus, 2020d):

- Landbedeckung/Landnutzung 2018.
- Veränderungen 2012-2018.
- Überarbeitete Version des Urban Atlas von 2012.
- . Street Tree Layer (STL).

b) Imperviousness

Im Bereich der gesamteuropäischen Komponente wurden verschiedene hochaufgelöste Layer erstellt, welche Informationen zur Landbedeckung beinhalten. Von besonderem Interesse ist hierbei der Imperviousness Layer, der den Grad der Bodenversiegelung angibt (Copernicus, 2020e). Dieser

erfasst die Veränderung der Bodenversiegelung, wo ursprüngliche (halb-) natürliche Bodenbedeckung oder Wasseroberfläche durch eine künstliche, oft undurchlässige, Abdeckung ersetzt wurde. Es wird die räumliche Verteilung der künstlich versiegelten Flächen, einschließlich des Versiegelungsgrades des Bodens pro Flächeneinheit erfasst. Der Grad der Bodenversiegelung (Undurchlässigkeitsgrad 1-100%) wird mit Hilfe einer halbautomatischen Klassifizierung auf der Grundlage kalibrierter Vegetationsindizes (hier des Normalized Difference Vegetation Index - NDVI) ermittelt. Der Datensatz steht für die Jahre 2006, 2009, 2012, 2015 und 2018 zu Verfügung und besteht jeweils aus zwei Produkten, dem Status Layer und dem Change Layer. Der Status Layer beschreibt die Imperviousness Density (IMD) - welche den prozentualen Anteil der versiegelten Fläche beschreibt - und die Impervious Built-up (IBU), die die versiegelten Gebiete ausweist. Der Change Layer besteht zum einen aus einem Datensatz, der den Prozentsatz der Versiegelungszunahme oder -abnahme für jene Pixel abbildet, die eine tatsächliche Versiegelungsveränderung im erfassten Zeitraum aufweisen. Zum anderen umfasst der Change Layer ein klassifiziertes Änderungsprodukt, das die relevantesten Kategorien von Versiegelungsänderungen abbildet (unverändert keine Versiegelung, neue Bedeckung, Verlust der Bedeckung, unverändert versiegelt, erhöhte Versiegelung, verminderte Versiegelung). Die Auflösung der genannten Layer beträgt 10 m, 20 m oder 100 m, abhängig vom genauen Produkt (Copernicus, 2020f).

c) European Settlement Map

Ein weiteres Produkt der gesamteuropäischen Komponente ist die Europäische Siedlungskarte (ESM), ein räumlicher Rasterdatensatz, der menschliche Siedlungen in Europa auf der Grundlage von SPOT5 und SPOT6 Satellitenbildern kartiert. Mit Hilfe von maschinellem Lernen wurden aus den multispektralen und panchromatischen Daten der oben genannten SPOT Missionen Siedlungsflächen extrahiert. Hierfür wurden morphologische und texturbezogene Merkmale in Beziehung zueinander gesetzt und ausgewertet. Das Produkt stellt den Prozentsatz der bebauten Fläche pro Raumeinheit dar und weist mit 2,5 m eine deutlich höhere Auflösung als das zuvor beschriebene Produkt Imperviousness auf. Es werden nur bebauten Flächen berücksichtigt (Copernicus, 2020g).

d) European Image Mosaics

Im Rahmen des CLMS wurde auch eine Vielzahl von Satellitendaten gesammelt, um Referenzdatensätze zu erstellen. Einer dieser Referenzdatensätze ist ein aufbereitetes Mosaik aus Satellitendaten mit europaweiter Abdeckung. Seit 2000 wurde die ESA beauftragt, Europa lückenlos in regelmäßigen Zeitintervallen aufzunehmen, um so eine Überwachung der Landoberfläche zu ermöglichen. Die Erstellung solcher Mosaik umfasst verschiedene Verarbeitungsschritte, wie radiometrische Glättung zwischen Szenen aus verschiedenen Daten und von verschiedenen Sensoren,

geometrische Korrektur von orthokorrigierten Produkten oder aber die Minimierung des Bewölkungseinflusses (Copernicus, 2020h).

Bislang wurden hochaufgelöste Bildmosaik aus den Jahren 2006, 2009, 2012, 2015 und 2018 veröffentlicht - mit 5 m, 10 m oder 20 m Auflösung (Copernicus, 2020i), sowie ein sehr hochaufgelöstes (VHR) Bildmosaik mit 2,5 m Auflösung. Das VHR Mosaik besteht aus Aufnahmen der Sensoren SPOT-5 und -6 sowie von FORMOSAT, deren Auflösungen zwischen 1,5 und 2,5 m liegt und aus den Jahren 2011 bis 2013 stammen. Das Mosaik wurde erstellt um eine Basis für diverse Copernicus Services, wie z.B. dem Urban Atlas, zu stellen (Copernicus, 2020j).

e) Land Use and Coverage Area Frame Survey

Die LUCAS Studie wird seit 2006 alle drei Jahre vom Statistischen Amt der Europäischen Union (EUROSTAT) durchgeführt, konzentriert sich auf den Zustand und die Dynamik der Veränderungen der Landnutzung und -bedeckung in der EU. Die Studie wird europaweit vor Ort durchgeführt. Seit 2012 wurden alle 27 EU Länder erfasst und über 270.000 Erhebungspunkte zu verschiedenen Bodenbedeckungstypen (u.a. Ackerland, Grünland, Wald, bebaute Flächen, Verkehrsnetz) analysiert. Hierfür wurden an den definierten Punktkoordinaten die Bodenbedeckung und Bodennutzung, das Bewässerungsmanagement und strukturelle Elemente in der Landschaft untersucht und in einer Karte dargestellt (Copernicus, 2020k).

2.1.3 Amtliche Geodaten auf Ebene der Länder und Kommunen

Neben den zentral gesammelten Geobasisdaten des BKG gibt es auf Ebene der Länder und auch Kommunen vielfach zusätzliche Geodatenbestände, welche sich auf eine Charakterisierung des Gebäudebestandes beziehen.

a) Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem

Das Amtliche Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS) ersetzt seit Dezember 2015 in allen Bundesländern die Automatisierte Liegenschaftskarte (ALK) und das Automatisierte Liegenschaftsbuch (ALB). Die Liegenschaftskataster wurden im Rahmen der Umstellung durch das AdV zusammengeführt. Das AdV ist seitdem auch für die Pflege des Datenmodells zuständig. Das Liegenschaftskataster wird auf Ebene der Bundesländer hoheitlich organisiert. Jedes Bundesland ist individuell für Erstellung und Fortführung auf Basis der Rahmenvorgaben des AdV verantwortlich. (Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV), 2020). Von besonderem Interesse für die Informationsgewinnung zu Gebäuden und Siedlungskörper in Deutschland, ist die tatsächliche Nutzung Gebäude.

Die tatsächliche Nutzung von Gebäuden und Informationen zur Gebäudeumgebung kann dem Datensatz Tatsächliche Nutzung (TN) von ALKIS entnommen werden. Dieser ist erstmals mit der Einführung von ALKIS 2009 erschienen und wird im dreijährigen Turnus aktualisiert. Insbesondere in Siedlungsgebieten können die Daten jedoch auch deutlich aktueller sein. Der Datensatz TN beschreibt die Nutzung der Landoberfläche in den vier Hauptgruppen Siedlung, Verkehr, Vegetation und Gewässer, welche wiederum in 140 unterschiedliche Nutzungsarten wie etwa Wohnbaufläche, Landwirtschaft oder Straßenverkehr unterteilt sind. Als Grundlage für die Erfassung der TN dienen digitale Orthophotos und Daten der land- und forstwirtschaftlichen Verwaltung sowie Informationen vor Ort, die etwa im Zuge von Katastervermessungen erhoben wurden. Als Teil von ALKIS wird die TN flächendeckend für das gesamte Gebiet der Bundesrepublik Deutschland jeweils von den Bundesländern einheitlich erhoben und fortgeführt. Auf Grund des Erfassungsmaßstabes von 1:1.000 werden Bereiche ähnlicher Eigenschaft ab einer Fläche von ca. 1.000 m² (mit Ausnahmen auch geringfügig darunter) flächendeckend detektiert. Die Erfassung erfolgt nicht flurstückbezogen, so dass die Objektartengrenzen der TN somit nicht zwingend entlang von Flurstücksgrenzen verlaufen. Ein Sachbearbeiter fasst nahe beieinander liegende Flächen als eine der oben genannten Hauptgruppen zusammen. Durch den Erfassungsmaßstab kommt es jedoch auch zu Fehlern, etwa bei Einzelgebäuden, Waldflächen, Einzelbäumen oder Straßenbegleitgrün, da diese oft nicht einer Fläche von 1.000 m² entsprechen (Landesamt für Digitalisierung Breitband und Vermessung, 2020, Meßner, 2019).

Die Integration weiterer Datenbestände wie etwa Stadtstrukturtypen- oder Biotoptypenkartierung wird in der zweiten Projektphase mit dem BBSR abgestimmt.

2.1.4 Nicht-operationelle Datenerhebungen

Neben den Datensätzen des Copernicus Programmes gibt es mitunter noch weitere frei zugängliche Datensätze, die bei der Beschaffung von Informationen zum Gebäudebestand sowie zur Gebäudeumgebung hilfreich sind.

a) Open Street Map

Bei OSM werden weltweit Daten über Straßen, Eisenbahnen, Flüsse, Wälder, Häuser, Informationen zu Infrastruktur und weitere Karteninformationen von freiwilligen Nutzern weltweit erhoben und gepflegt. Dies ermöglicht es, dass OSM Daten lizenzkostenfrei eingesetzt und beliebig weiterverarbeitet werden dürfen. Seit OSM im Jahr 2004 gegründet wurde werden die entsprechenden Datenbestände stetig verbessert und aktualisiert sowie neue Informationen hinzugefügt, mit dem Ziel eine freie Weltkarte zu erschaffen (OpenStreetMap, 2020). Aufgrund dieser

Erhebungsmethodik und -charakteristik erfolgt die Erstellung des OSM Datensatz zeitlich und räumlich nicht systematisch, vollständig und homogen. Nichtsdestotrotz ist die Güte von OSM in den meisten deutschen Städten von sehr guter Qualität (Haklay, 2010). OSM Daten können somit durchaus einen Aufschluss über die Funktionalität einzelner Gebäude, deren Höhe sowie versiegelte Flächen und Landnutzung geben.

2.2 Erdbeobachtungsdaten

Neben den zuvor genannten etablierten Datenquellen bietet die satellitengestützte Erdbeobachtung vielversprechende Möglichkeiten zur Erhebung weiterer Informationen zum Gebäudebestand in Deutschland. Dazu steht eine Vielzahl von Satellitenmissionen zur Verfügung, welche die Erdoberfläche permanent mit den unterschiedlichsten Auflösungsstufen und Sensortypen aufnehmen und somit einen großen Archivbestand an nutzbaren Erdbeobachtungsdaten sammeln. Die entsprechenden Missionen sind dabei entweder aus öffentlichen Mitteln finanziert – d.h. deren Daten sind in der Regel kostenfrei zu beziehen und auszuwerten - oder werden von kommerziellen Anbietern betrieben. Satellitenaufnahmen von kommerziellen Anbietern sind in der Regel hoch- und höchstauflöst (bis zu 28 cm pro Pixel – d.h. ein Bildpixel entspricht bei dieser Auflösung einer Fläche von 28x 28 cm auf der Erdoberfläche). Solche höchstauflösenden kommerziellen Satellitenbilder nähern sich in ihrer Auflösung Luftbilddaten wie den aktuellen DOPs des BKG (bis zu 20 cm pro Bildpunkt) an.

Bei öffentlich finanzierten Satellitenmissionen handelt es sich meist um hochauflöste Sensorsysteme mit einem räumlichen Auflösungsvermögen zwischen 5-30m. Die Aufnahmen des europäischen Sentinel-2 etwa erreichen eine Auflösung von 10 m (European Space Agency, 2020a), die der weit verbreitete US Landsat Satelliten hingegen bis 30 m im multispektralen Bereich (USGS, 2020a). Ein Bildpixel entspricht demnach einer Fläche von 10x10 m bzw. 30x30 m auf der Erdoberfläche. Trotz der gegenüber kommerziellen Satellitendaten meist deutlich schlechteren Auflösung bieten Systeme wie Sentinel und Landsat den Vorteil, dass sich über deren Aufnahmen kostenfrei Daten in großen Mengen – d.h. beliebiger flächenhafter Abdeckung und in zeitlicher Wiederholrate von wenigen Tagen- beziehen lassen.

Mit Blick auf die räumliche Auflösung gilt grundsätzlich die Faustformel, dass mit verringertem räumlichen Detaillierungsgrad die flächenhafte Abdeckung pro Szene steigt. So kann der Sentinel-2 Satellit während eines Überfluges einen Streifen mit einer Breite von 290 km aufnehmen (European Space Agency, 2020a), während der hochauflöste kommerzielle Satellit WorldView-3 (Auflösung 31 cm) hingegen nur auf eine Streifenbreite von 13,1 km kommt (European Space

Imaging, 2020). Des Weiteren werden von kommerziellen Satelliten in der Regel nur von Kunden angefragte Gebiete aufgezeichnet, weshalb der existierende Datenbestand – zumindest für größere Gebiete – oftmals räumlich oder zeitlich vergleichsweise heterogen ist. Dies soll sich zukünftig jedoch mit neuen Missionen wie etwa jene von Planet (Planet, 2020) ändern. Zudem sei erwähnt, dass seitens der kommerziellen Anbieter oftmals bestimmte „Hotspots“ (z.B. Hauptstädte) sehr häufig aufgenommen werden, wohingegen periphere Gebiete ohne besondere Exposition (z.B. Gefährdungszonen) vergleichsweise selten oder aufgenommen werden. Im Gegensatz dazu wird die Erdoberfläche bei den geringer aufgelösten nicht-kommerziellen Systemen in der Regel systematisch und damit zeitlich und räumlich nahezu lückenlos abgetastet und kartiert.

Je nach Auflösung sind auf Fernerkundungsdaten unterschiedliche Detailgrade der Erdoberfläche erkennbar. In Abbildung 4 wird jeweils derselbe Ausschnitt, aufgenommen von drei verschiedenen Satelliten mit unterschiedlicher räumlicher Auflösung und einmal von einem flugzeuggetragenen System, dargestellt. Die erste Aufnahme, aufgenommen durch den Satelliten MODIS, hat eine Auflösung von 500 m, d.h. die Größe eines Pixels entspricht 500 x 500 m auf der Erdoberfläche. Es ist nicht möglich, Strukturen zu erkennen und einzuordnen. Die zweite Aufnahme, aufgenommen von dem Satelliten Landsat 8, hat eine Auflösung von 30 m. Es sind die einzelnen Landschaftsstrukturen mit einzelnen Feldern, kleinen Siedlungen und Straßen erkennbar. Auf der nächsten Aufnahme, von Sentinel-2, mit 10 m Auflösung sind diese Strukturen noch deutlicher zu erkennen und klarer differenzierbar. Die letzte Aufnahme ist ein Luftbild mit 20 cm Auflösung. Die Strukturen werden noch einmal klarer als bei der Sentinel-2 Aufnahme. Die Stärke der räumlichen Auflösung des Luftbildes wird jedoch erst bei einem kleineren Maßstab deutlicher sichtbar.

Die beschriebenen Aufnahmen wurden alle von optischen Sensorsystemen aufgenommen. Das heißt, dass der abgebildete Spektralbereich im für das menschliche Auge sichtbaren Bereich lag. Dieser Spektralbereich liegt in einem Wellenlängenbereich zwischen circa 380 und 780 Nanometern (nm) (s. Abbildung 5) und wird durch die Aufnahmekanäle Rot, Grün und Blau (RGB) des Satellitensensors abgedeckt. Sie geben die Erdoberfläche wie ein normales Foto wieder und werden meist als RGB Aufnahme oder Echtfarben-Aufnahme bezeichnet. Neben dem sichtbaren Bereich, ist es über Fernerkundungsdaten zusätzlich möglich, auch Wellenlängen im Bereich des Nahen Infrarots (NIR) sowie des mittleren Infrarots (MIR) aufzunehmen (s. Abbildung 5). Darstellungen der Erdoberfläche außerhalb des sichtbaren Bereiches werden oft Falschfarben-Aufnahmen genannt. Diese optischen Sensorsysteme werden unter dem Begriff multispektral zusammengefasst. Die spektrale Auflösung charakterisiert die Anzahl der Spektralkanäle eines Sensors, mit denen die Erdoberfläche aufgenommen wird. Sentinel-2 verfügt z.B. über 13 Spektralkanäle (European Space Agency, 2020b).



Abbildung 4: Detaillierungsgrad unterschiedlicher geometrischer Auflösungen von Multispektralaufnahmen der Satelliten MODIS, Landsat 8 und Sentinel-2 im Vergleich zum digitalen Luftbild. Quelle: DLR

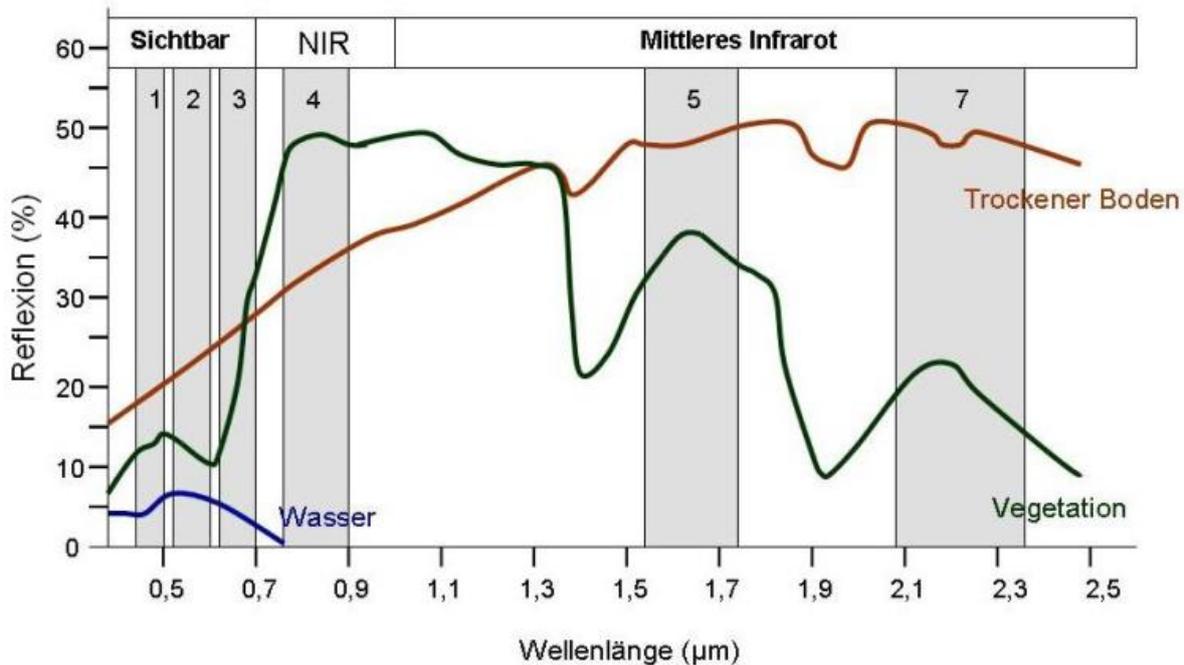


Abbildung 5: Spektrale Signatur unterschiedlicher Landbedeckungstypen (Wasser, Vegetation, Boden) und Lage der sechs multispektralen Aufnahmekanäle des Landsat-Satelliten. Quelle: DLR

Abbildung 6 zeigt München, dargestellt im sichtbaren Bereich mit der Kanalkombination RGB als Echtfarben-Aufnahme (links) und dargestellt als Falschfarben-Aufnahme (rechts). Zusätzlich zu den Kanälen RGB werden nun auch das nahe und mittlere Infrarot (NIR und MIR) gezeigt. Dies ermöglicht es, unterschiedliche Strukturen der Erdoberfläche teils besser zu erkennen und abgrenzen zu können, wie hier z.B. Wald- und Wasserflächen, sowie weitere, sonst nicht sichtbare Elemente erkennen zu können.

Zu den optischen Aufnahmesystemen sind zählen auch Hyperspektralsensoren. Hierbei wird der spektrale Bereich mittels einer Vielzahl an Aufnahmekanälen (meist über 100) vom sichtbaren über das nahe bis hin zum Wellenlängenbereich des mittleren Infrarots aufgezeichnet. Hyperspektral-daten werden detailliert in Kapitel 3.3.1 beschrieben.

Bei optischen Aufnahmesystemen wie multispektralen und hyperspektralen Sensoren handelt es sich um passive Aufnahmesysteme. Sie nutzen dabei die natürliche Strahlung in der Umwelt, wie etwa Sonnenlicht oder Wärmestrahlung die von Körpern abgegeben wird. Optische Satelliten wie Sentinel-2 sind somit, ähnlich wie bei einer herkömmlichen Fotoaufnahme, abhängig von den Lichtverhältnissen. Bei Satelliten kommt noch hinzu, dass die Aufzeichnung der von der

Erdoberfläche reflektierten oder emittierten Strahlung auch Störeinflüssen durch die Atmosphäre unterliegt - beispielsweise durch Wolken oder Dunst.

Neben optischen und somit passiven Aufnahmesystemen gibt es auch aktive Aufnahmesysteme, wie Radarsensoren. Radarbasierte Systeme senden aktiv ein Signal im Mikrowellenbereich auf die Erdoberfläche und empfangen dann die von dort zurückgestreute Mikrowellenstrahlung. Je nach physikalischer, chemischer und geometrischer Beschaffenheit der Strukturen auf der Erdoberfläche werden die Mikrowellen unterschiedlich intensiv reflektiert bzw. gestreut, so dass die am Satelliten gemessene Rückstreuung je nach Oberflächenart variiert.



Abbildung 6: Aufnahme des Satelliten Landsat 7 dargestellt in Echtfarben der drei Kanäle Rot-Grün-Blau (links) sowie als Falschfarbenkomposit der fünf Kanäle Rot-Grün-Blau-nahes Infrarot-mittleres Infrarot.

Quelle: DLR

Der Satellit Sentinel-1 verfügt über ein radarbasiertes Aufnahmesysteme (s. Abbildung 6). Dadurch, dass es sich bei Radar um ein aktives System handelt, dass seine eigene Strahlung darstellt, ist dies unabhängig von Licht und einschränkenden Sichtfaktoren wie Wolken. Dies ermöglicht es, die Erdoberfläche auch bei Nacht oder Wolkenbedeckung aufzunehmen.

Neben der räumlichen sowie spektralen Auflösung spielt auch die zeitliche Auflösung eine wichtige Rolle für Analysen mittels Erdbeobachtungsdaten. Für die Erstellung der DOPs des BKG wird meist einmal im Jahr eine deutschlandweite Befliegung durchgeführt. Satelliten der Sentinel Missionen und weiterer Missionen nehmen denselben Punkt der Erdoberfläche deutlich häufiger auf. Dadurch ist es möglich Zeitverläufe darzustellen, aber auch saisonbedingte Unterschiede zu berücksichtigen. Durch Schwarmmissionen, wie z.B. die Planet Scope Satelliten der Firma

Planet, ist es teilweise bereits möglich, täglich Aufnahmen zu beziehen. In Zukunft soll dies sogar mehrmals am Tag ermöglicht werden. Die Planet Scopes verfügen über eine Auflösung zwischen 3 und 4 m und es befinden sich bereits über 100 dieser Kleinstsatelliten in der Umlaufbahn der Erde (Planet, 2020).



Abbildung 7: Unterschiede zwischen einem multispektralen Satellitenbild des Sentinel-2 (oben) und einer radarbasierten Aufnahme des Sentinel-1 (unten). Quelle: DLR

Mit dem TimeScan Prozessor wurde am DLR ein Verfahren entwickelt, das den spektralen und temporalen Informationsgehalt von umfangreichen Zeitserien an Satellitendaten komprimiert in einem Bildkomposit bereitstellt (Esch et al., 2018). Das in Abbildung 8 dargestellte TimeScan Produkt setzt sich aus Indizes zum Vegetationszustand (NDVI), der Wasserbedeckung (NDWI) sowie Bebauung (NDBI) zusammen.

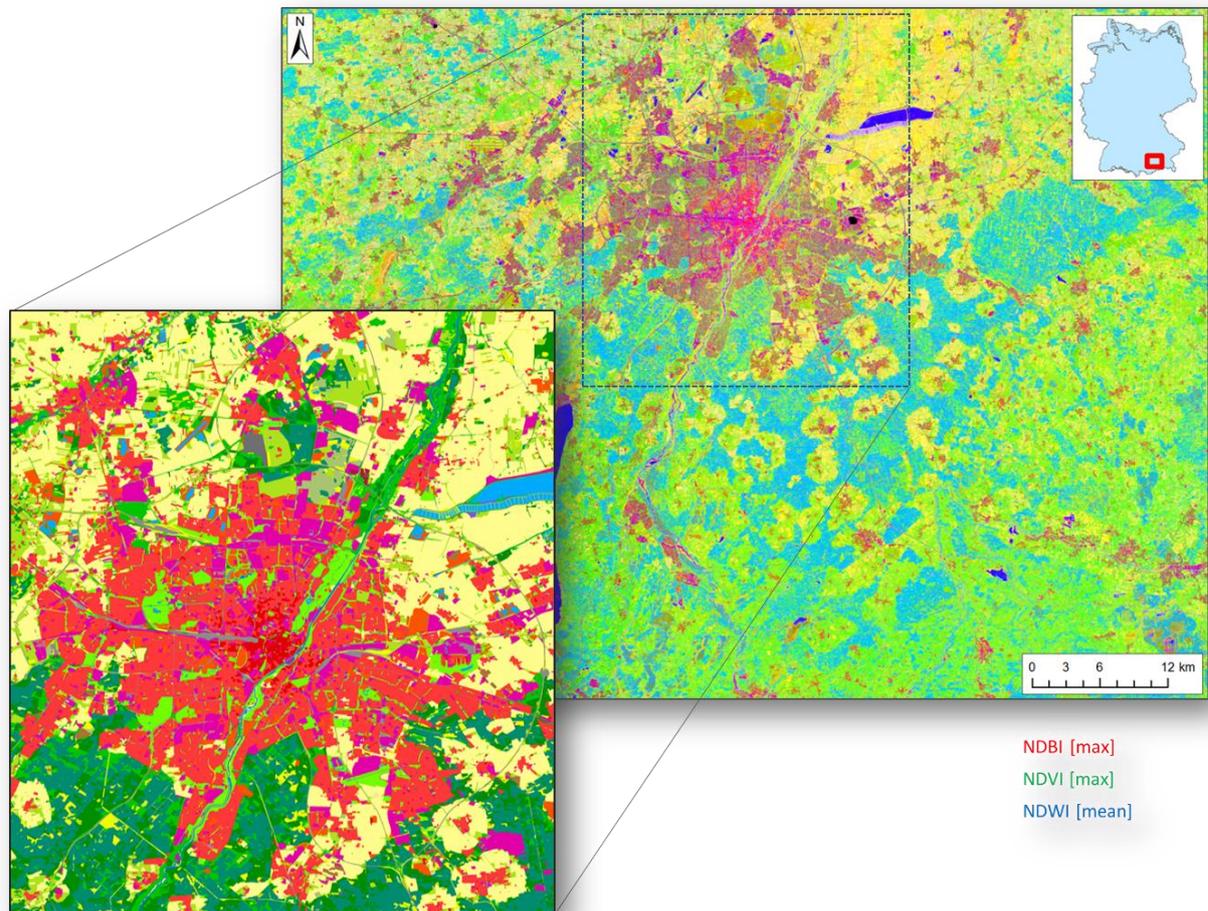


Abbildung 8: Erscheinungsbild verschiedener Landbedeckungsarten in einem TimeScan Falschfarbenkomposit aus Landsat Daten, das multitemporale und spektrale Eigenschaften der Landoberfläche widerspiegelt. Zum Vergleich ist ein Ausschnitt der CORINE Landnutzungskartierung aufgeführt (unten).

Quelle: DLR

Satellitenbilder weisen aufgrund der Vielzahl an Missionen sowie durch die kontinuierliche Aufnahme der Erdoberfläche, eine zeitlich deutlich höhere Auflösung auf als es bei Luftbildern möglich ist. Dies ermöglicht z.B. Zeitreihenanalysen um z.B. Veränderungen zu erkennen und Vergleiche tätigen zu können. Des Weiteren sind Luftbilder meist Echtfarben-Aufnahmen, d.h. es wird nur der für das Auge sichtbare Bereich aufgenommen. Teilweise gibt es noch Systeme die auch Infrarot zusätzlich aufnehmen, meist aber nur nahes Infrarot (NIR). Satellitenmission sind meist mit umfassenderen Aufnahmesystemen ausgestattet, die weitere nicht sichtbare Wellenlängen erfassen können und somit eine höhere spektrale Auflösung haben. Gerade bei öffentlichen Missionen

wie den Sentinel und Landsat Missionen, aber auch bei kommerziellen Missionen, ist der Aufwand der Datenerfassung und der Kosten geringer als bei Luftbildern, sollten diese nicht bereits durch das BKG zur Verfügung gestellt worden sein. Aufgrund der hohen Auflösung ist die Datenmenge bei Luftbildern meist deutlich höher als bei Satellitendaten. Allerdings, gerade bei kostenfreien Missionen, ist dies auch ein Nachteil der Satellitenaufnahmen. Aufgrund der geringeren Auflösung sind nur Analysen bis zu einem bestimmten Detailgrad, abhängig von der jeweiligen Auflösung, möglich. Öffentliche Satellitendaten eignen sich demnach besonders für großräumige Analysen und die Betrachtung umfassender Zeitreihen. Kommerzielle Satellitendaten, welche oft eine höhere Auflösung haben, sind hingegen für die Analyse kleinräumiger Strukturen oder Objekte (z.B. Einzelhäuser, Infrastrukturelemente, Fahrzeuge) unabdingbar, sofern nicht bereits Luftbilddaten aus der amtlichen Vermessung vorliegen. Ein weiterer bedeutsamer Faktor sind jedoch auch hier die Datenkosten von kommerziellen Satellitendaten – so würde eine komplette Abdeckung von Deutschland mit Archivaufnahmen des Satelliten WorldView-3 in 30 cm Auflösung mit Kosten im einstelligen Millionenbereich (Euro) verbunden sein. Eine komplette Neuerhebung mit aktuellen Satellitendaten wäre mit nochmals deutlich erhöhten Kosten verbunden. Im Kontext flächendeckender Kartierungen ist es demnach wichtig, zu überprüfen, ob kommerzielle Daten mit einem hohen räumlichen Detaillierungsgrad notwendig sind oder ob die Aufgabe auch mit Systemen geringerer Auflösung durchgeführt werden kann, um die bereits immensen Kosten einer Datenbeschaffung zu minimieren.

Abbildung 9 gibt einen Überblick zu einigen optischen Satellitenmissionen mit multispektralem Spektrum, sowohl aus dem kommerziellen als auch aus dem öffentlichen Bereich, sortiert nach Auflösung in drei Klassen – sehr hohe Auflösung (< 1 m), hohe Auflösung (1 - 10m) und mittlere Auflösung (10 – 100m).

Mit Blick auf die Zielsetzung der vorliegenden Studie sind vorzugsweise die kostenfrei zu beziehenden Aufnahmen der europäischen Sentinel-Flotte (s. Abbildung 10) und des US-amerikanischen Landsat-Programms (s. Abbildung 11) von Interesse, da sie mit Blick auf deutschlandweit flächendeckende Analysen ergänzend zu den bestehenden Datenbeständen einen kostengünstigen Mehrwert generieren können.

Die Familie der europäischen Sentinel-Satelliten umfasst die sechs multispektralen bzw. radarbasierten Missionen Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3, Sentinel-5P und Sentinel-6, während Sentinel-4 und Sentinel-5 spezielle Messinstrumente sind, die auf Satelliten von Eumetsat angebracht sind. Eingehende Informationen zu den Sentinel-Missionen finden sich unter [Copernicus - Sentinel Missionen](#).

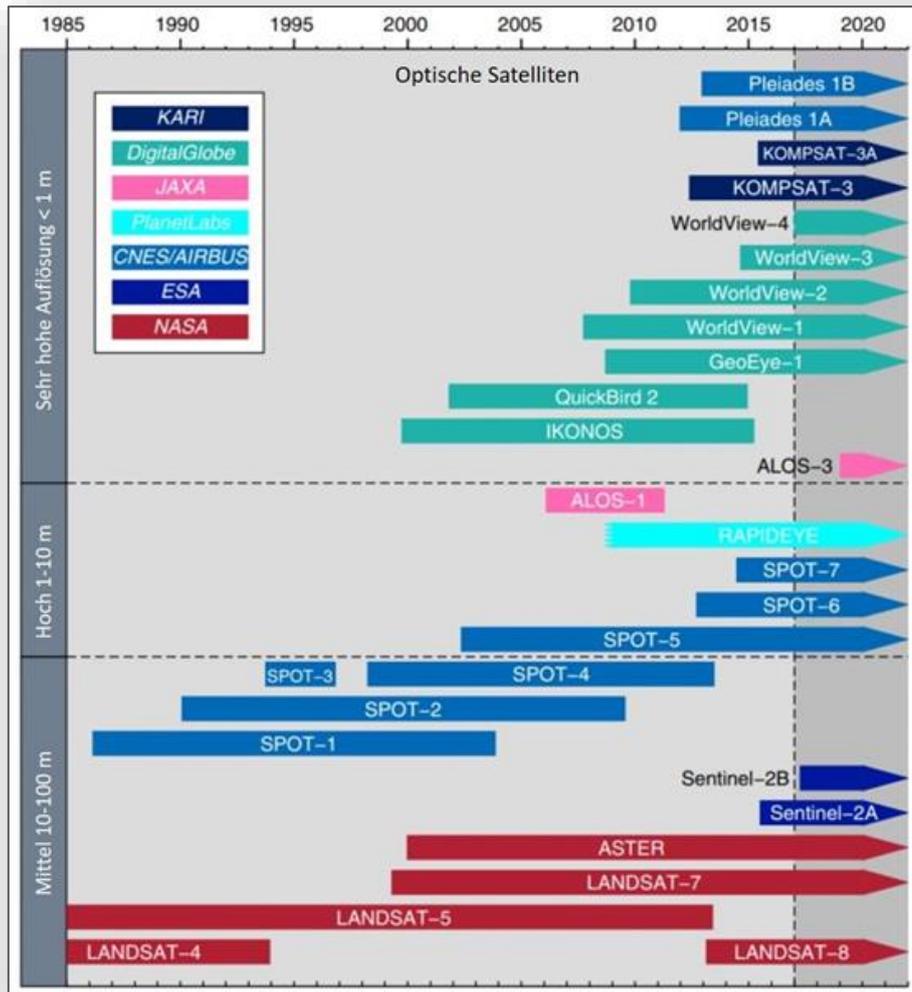


Abbildung 9: Exemplarische Auflistung kommerzieller und öffentlicher Missionen optischer Satellitensysteme zwischen 1985 bis 2020, untergliedert in drei Auflösungsstufen (< 1 m, 1-10 m und 10-100 m).
Quelle:(Elliott et al., 2016)

Die Auflösung der aktuell aktiven Landsat Missionen, Landsat 7 und Landsat 8, beträgt 30 m Auflösung im RGB Bereich und ist somit geringer als die der Sentinel-2 Mission mit 10 m Auflösung (NASA, 2020a, NASA, 2020b). Sie eignen sich jedoch besonders für Zeitreihenanalysen, da es seit 1972 Landsat Satellitenbilder gibt. Die Auflösung älterer Landsat Missionen ist entsprechend schlechter (60-120 m).

Im Folgenden werden nun zunächst verschiedene Datenzugänge zu den Satellitenmissionen der Sentinels bzw. von Landsat beschrieben und anschließend die grundlegenden Schritte zur Aufbereitung von Satellitendaten und deren Auswertung erläutert.

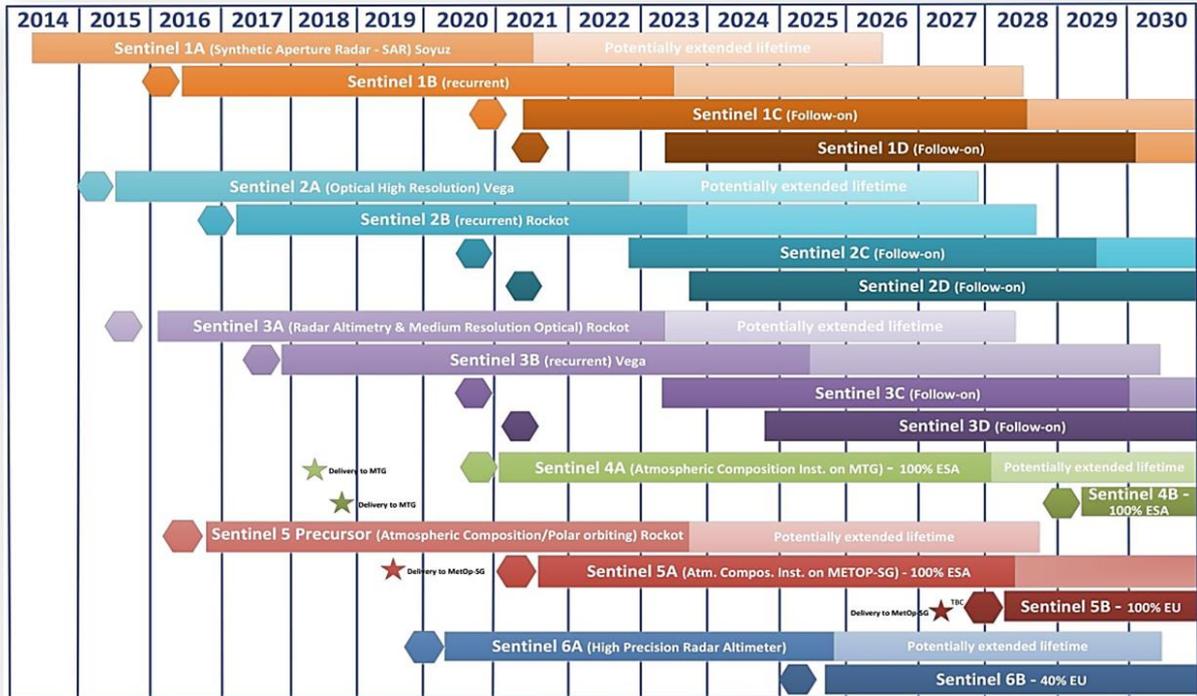


Abbildung 10: Übersicht der bereits aktiven sowie geplanten Sentinel Satellitenmissionen, sortiert nach Anwendung und geplantem Missionsstart. © Copernicus

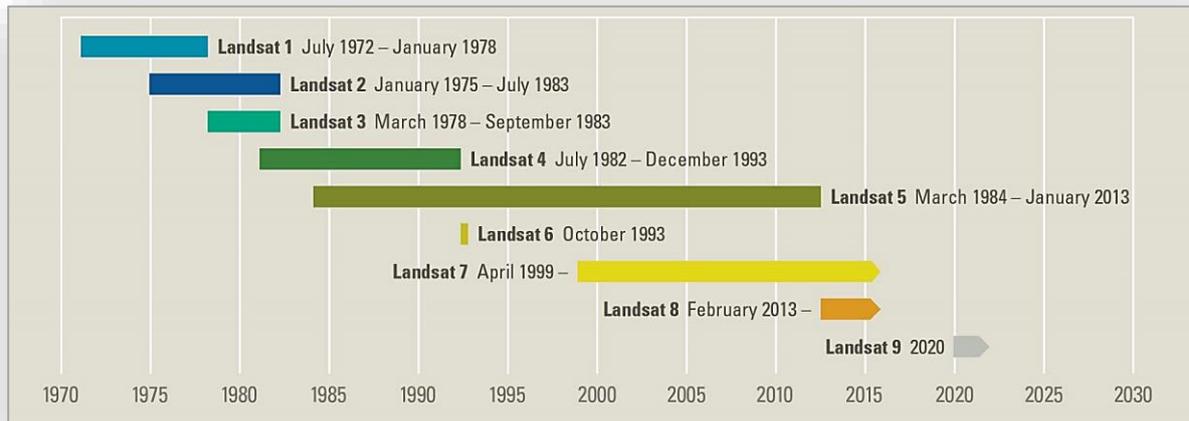


Abbildung 11: Darstellung der Zeitleiste zum Landsat Programm mit seinen bislang neun Missionen vom Programmstart im Jahr 1972 bis zum geplanten Start des Landsat 9 im Jahr 2021. © (USGS, 2020b)

2.2.1 Datenzugang

Während Satellitenaufnahmen kommerzieller Anbieter meist direkt über den Betreiber der Satelliten oder spezialisierte Firmen für deren Vertrieb erworben werden können, stehen zum Bezug von Daten nicht-kommerzieller Satellitenmissionen in der Regel Online-Plattformen zur Verfügung. Hier können Interessentinnen und Interessenten die gewünschten Daten gewöhnlich nach der Erstellung eines Nutzerkontos auf der jeweiligen Plattform kostenfrei suchen, inspizieren und per Download beziehen. Zum Teil besteht auch die Möglichkeit, die Aufnahmen auf oder über eine solche Plattform weitergehend zu bearbeiten bzw. auszuwerten. Neben dem Copernicus Open Access Hub sind hier die Copernicus Data and Information Access Service (DIAS) Plattformen sowie die Copernicus Data and Exploitation Platform – DE (CODE-DE) zu nennen, die im Folgenden eingehender erläutert werden.

a) Copernicus Open Access Hub

Im Rahmen des Copernicus Programmes wurden für die Komponente Raumfahrt die Sentinel Missionen entwickelt (s. Kap. 2.1.2). Sie stellen die Kernelemente des Copernicus Programmes dar und ersetzen ältere europäische Erdbeobachtungsmissionen. Jede der Sentinel Missionen (Sentinel-1 – Sentinel-6 sowie Sentinel-5P) ist auf einen speziellen Aufgabenbereich hin optimiert, etwa die Kartierung der Landoberfläche oder die Erfassung von Atmosphärenparametern. Über das Copernicus Open Access Hub können alle Daten der Sentinel Missionen (die bereits in Betrieb sind, d.h. aktuell Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3 und Sentinel-5P) weltweit bezogen werden. Die Satellitenaufnahmen werden dort mit unterschiedlichen Vorverarbeitungsstufen (s. Kap. 2.2.2) zum Download bereitgestellt (European Space Agency, 2020c).

Der Zugriff den Copernicus Open Access Hub ist über folgenden Link möglich: [Copernicus Open Access Hub](#).

b) Copernicus Data and Information Access Service (DIAS)

Um einen standardisierten und zentralen Zugang zu Copernicus-Daten und -services – allem voran Sentinel-Satellitenaufnahmen - zu ermöglichen, hat die Europäische Kommission die Bereitstellung von fünf konkurrierenden Cloud-basierten Plattformen finanziert. Diese sogenannten Data and Information Access Services (DIAS) bieten neben Datenrecherche und Download auch weiterführende Dienste und Funktionen (Open Source oder auch Pay-per-Use) zur Aufbereitung, Verarbeitung und Analyse der Satellitenszenen an.

Auf den Plattformen können somit archivierte Sentinel-Daten sowie bereits generierte Informationsprodukte heruntergeladen oder auch direkt auf der Plattform bearbeiten werden. Außerdem

können die Plattformen genutzt werden, um eigene Anwendungen zu entwickeln und Mehrwertdienste anzubieten. Mit ihnen wurde also ein zentraler Zugriff auf Copernicus-Daten und Informationen, aber auch auf Verarbeitungswerkzeuge ermöglicht. Dadurch, dass sperrige Dateien nicht von mehreren Zugangspunkten heruntergeladen und lokal verarbeitet werden müssen, ist eine einfachere und nutzerfreundlichere Nutzung verschiedenster Daten möglich. Auch der Zugang zu zusätzlichen kommerziellen Satelliten- oder Nichtraum-Datensätzen ist über die DIAS Plattformen direkt durchführbar. Es gibt fünf DIAS-Plattformen, die alle einen Zugang zu den Daten von Copernicus Sentinel sowie zu den Informationsprodukten aus den sechs Betriebsdiensten von Copernicus bieten. Dadurch entsteht ein Wettbewerb zwischen den DIAS Plattformen, der dafür sorgt, dass den Nutzern der beste Service geboten wird, und verhindert, dass sich die Kunden auf eine bestimmte Plattform unter den fünf festlegen (Copernicus, 2020I, Marconcini et al., 2020).

Jede DIAS Plattform besteht funktionell aus drei Arten von Diensten:

- Back-Office-Dienste, die Zugang zu Copernicus-Daten und -Informationen (unbegrenzt, kostenlos und vollständig) sowie zu allen anderen vom DIAS-Anbieter angebotenen Daten bieten, in der die Benutzer ihre eigenen Dienste aufbauen und betreiben können.
- Schnittstellendienste, die Werkzeuge umfassen, die den Benutzern die Entwicklung ihrer eigenen Anwendungen erleichtern. Diese Umgebung wird von den DIAS-Dienstanbietern (entsprechend ihren spezifischen Geschäftsmodellen) entwickelt und verwaltet und bietet den Benutzern skalierbare Rechen- und Speicherressourcen zu wettbewerbsfähigen kommerziellen Bedingungen.
- Front-Office-Dienste, die von Dritten (z.B. EU-Projekten, ESA, EUMETSAT sowie Entwicklern und Unternehmen) bereitgestellt werden und auf der Nutzung der Copernicus-Daten und -Produkte basieren, die über die Back-Office-Dienste verfügbar sind (Marconcini et al., 2020).

Der Zugriff auf jede der fünf DIAS Plattformen ist über den folgenden Link möglich: [Copernicus DIAS](#).

c) *Copernicus Data and Exploitation Platform – Deutschland (CODE-DE)*

CODE-DE bietet Zugang zu allen Copernicus Datensätzen über Deutschland und ist zugleich eines der größten Online-Datenarchive für Satellitendaten der europäischen Copernicus Missionen. CODE-DE ist ein Teil der Geoinformationsstrategie Deutschlands und ermöglicht einen einfachen und effizienten Zugang zu Fernerkundungsdaten der Missionen Sentinel und Landsat und bietet darüber hinaus eine virtuelle Arbeitsumgebung für die Prozessierung der Daten und

umfangreiches Informationsmaterial und Schulungen, um Nutzer zu unterstützen. Die CODE-DE Cloud steht für:

- Sichere Arbeitsumgebung für Behörden und andere öffentliche Einrichtungen.
- BSI zertifiziertes Rechenzentrum in Frankfurt.
- Einfach zu bedienende Anwendungen zur Datenauswertung.
- Hohe Flexibilität für die Entwicklung und Ausführung eigener Prozessketten.
- Skalierbare Rechenleistung und breitbandige Datenanbindung.
- Speicherung aller nationalen Geodaten im Rechenzentrum in Frankfurt.
- Synergie mit der europäischen DIAS Plattform CREODIAS: Zugriff auf mehr als 18 PB an Daten der Sentinels und von Landsat.

Neben der Datensuche und -visualisierung ist es durch vordefinierte Prozessoren möglich, schnell und einfach (z.T. „on-the-fly“) erste Analysen - wie etwa die Berechnung eines Vegetationsindex - durchzuführen. Neben der direkten Prozessierung von Sentinel und Landsat Daten können diese auch über die CODE-DE Cloud lediglich heruntergeladen werden. Des Weiteren wird auf Produkte verwiesen, welche im Rahmen des Copernicus-Programmes erstellt wurden ((Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), 2020).

Der Zugriff auf die CODE-DE Plattform erfolgt über den folgenden Link: [CODE-DE](#).

d) Thematic Exploitation Platforms (TEP)

Mit den thematischen Plattformen zur Nutzung von Erdbeobachtungsdaten hat die ESA eine Initiative mit dem Ziel gestartet, auf europäischer Ebene ein System miteinander verbundener thematischer Auswertungsplattformen (TEPs) für Erdbeobachtungssatelliten – allen voran der Sentinel-Missionen - zu schaffen. Sie wurden mit dem Anspruch konzipiert, den Providern und Entwicklern von Daten, Infrastruktur, Werkzeugen, Algorithmen und Services einen leichten und effektiven Zugang zu Satellitendaten zu ermöglichen und Informationen aus ihnen extrahieren zu, ohne dass die mitunter erheblichen Datensätze lokal zum Nutzer heruntergeladen werden müssen. Außerdem können sich die Nutzer der TEPs untereinander austauschen und von den Entwicklungen der übrigen TEPs profitieren. Grundsätzlich sind die aktuell sieben TEPs jeweils auf eines der folgenden Anwendungsfelder fokussiert: Küste, Forstwirtschaft, Hydrologie, Georisiken, Polar und Urban.

TEPs sind eine virtuelle, offene und kollaborative Umgebung, die Erdbeobachtungsdaten und weitere Datenbestände (u.a. Geoinformationen, statistische Erhebungen, Bodenmessungen) mit Rechenressourcen, Werkzeugen zur Unterstützung der Datenverwertung, Algorithmenentwicklung, Zusammenarbeit und Kommunikation (z.B. über soziale Netzwerke, Foren und

Marktplatzfunktionalitäten) verknüpft und online zur Verfügung stellt. Die einzelnen TEPs stellen hierdurch die Basis für die Entwicklung und den Einsatz von Open-Source Ansätzen sowie eine unabhängige Infrastruktur dar. Außerdem ermöglichen sie einen leichten Wissensaustausch (European Space Agency, 2020d).

Details zum Zugang auf die TEPs sind über folgenden Link abrufbar: [ESA Thematic Exploitation Platforms](#).

e) USGS Earth Explorer

Seit 1972 wird die Erdoberfläche durch die einzelnen Landsat Missionen lückenlos aufgenommen, um ununterbrochene Datenreihen zur Verfügung zu stellen. Die Landsat Missionen sind Teil des Landsat Programmes der NASA und des USGS (U.S: Geological Survey) und sollen als Grundlage für die Entscheidungsfindung bezüglich Ressourcen und Umwelt dienen (USGS, 2020b, NASA, 2020c). Landsat Daten stehen wie Sentinel Daten kostenfrei zur Verfügung und können zum Beispiel über den USGS EarthExplorer heruntergeladen werden. Ferner können hier auch weitere Datensätze, wie Landbedeckungskarten oder Sentinel-2 Aufnahmen bezogen werden. Wie bei den Sentinel Daten ist es möglich, diese in verschiedenen Prozessierungslevel zu erhalten (s. Kap. 2.2.2).

Der Zugriff auf den USGS Earth Explorer erfolgt über den folgenden Link: [USGS Earth Explorer](#).

f) Amazon Web Services (AWS)

Die Amazon Webservices (AWS) stellen eine kommerzielle Plattform zur Prozessierung und Analyse von Geodaten in einer leistungsfähigen Cloud-Umgebung dar. Im Open Data Bereich der AWS stehen Daten der Sentinel-Missionen und Landsats sowie weitere Satellitendaten im Bereich Umweltfernerkundung, aber auch Geländemodelle, OSM-Daten und eine Vielzahl an lokalen Datensätzen zur Verfügung. Die Daten, die über AWS angeboten werden, gehören ausschließlich Drittanbietern. Die AWS verfügt über enorme Rechen- und Speicherkapazitäten und ermöglicht daher problemlos großflächige Analysen direkt auf der Plattform (AWS, 2020).

Der Zugriff auf die AWS erfolgt über den folgenden Link: [Amazon AWS](#).

g) Google Earth Engine (GEE)

Die Google Earth Engine ist ebenfalls eine enorm leistungsfähige Plattform zur Verarbeitung und Auswertung von Geodaten. Auf die GEE Services kann dabei je nach Nutzungs- bzw. Anwendungsprofil kostenfrei oder kostenpflichtig zugegriffen werden. Auf der GEE kann neben Sentinel-1 und Sentinel-2 Daten auf das gesamte Landsat-Archiv der letzten 40 Jahre sowie weitere öffentlich zugängliche Satellitendaten zugegriffen werden (u.a. Landbedeckung, Topographie,

Höhenmodelle und eine Vielzahl an Vektordaten). Ebenso wie AWS ermöglicht die GEE durch ihre enormen Rechen- und Speicherkapazitäten großflächige Analysen durch nutzerdefinierte Algorithmen und Programme direkt auf der Plattform (Google, 2020).

Der Zugriff auf die GEE ist über den folgenden Link möglich: [Google Earth Engine](#).

2.2.2 Datenaufbereitung

Über die zuvor beschriebenen Zugangsmöglichkeiten zu Satellitendaten lassen sich Satellitendaten mit unterschiedlichen Verarbeitungs- bzw. Aufbereitungsstufen – sogenannten Produkt-Leveln - beziehen. Dabei ist grundsätzlich zu berücksichtigen, dass Satellitenbilddaten nur dann effektiv (automatisiert) analysiert werden können, wenn die Daten zuvor mittels diverser Schritte der Vorprozessierung aufbereitet und dadurch in gewisser Weise standardisiert wurden. Im Allgemeinen wird in diesem Zusammenhang zwischen Rohdaten (Level 0), aufbereiteten, korrigierten bzw. georeferenzierten Daten (Level 1) sowie höherwertigen Ableitungen (Level 2) unterschieden, die bereits radiometrisch standardisiert und kalibriert sind (z.B. Atmosphärenkorrektur).

Im Folgenden werden die wichtigsten Schritte der Datenaufbereitung kurz beschrieben und grob dargelegt, mit welchem zeitlichen und ggf. finanziellen Aufwand diese verbunden sind.

Schritt 1: Georeferenzierung

Georeferenzierung ist notwendig um für das zu analysierende Satelliten- oder Luftbild einen Raum- bzw. Geobezug herzustellen, d.h. bestimmten Bildpunkten der Aufnahmen werden Koordinatenwerte zugeordnet damit diese in ein georäumliches Koordinatensystem wie UTM eingeordnet werden können und somit festgelegt werden kann, welchen Teil der Erdoberfläche das Luft- oder Satellitenbild tatsächlich abdeckt.

Schritt 2 Orthorektifizierung

Durch unterschiedliche Bodenhöhen der Erdoberfläche sowie durch die Kameraneigung bzw. den Aufnahmewinkel des Aufnahmesystems kommt es zu Verzerrungen innerhalb des Luft- oder Satellitenbildes. Durch die Orthorektifizierung wird die jeweilige Aufnahme entzerrt und an die Gegebenheiten der Erdoberfläche angepasst. Dies geschieht z.B. durch die Korrektur mittels eines digitalen Geländemodelles. Das daraus resultierende Produkt ist dann maßstabsgetreu korrigiert und das abgebildete Gelände wird lagerichtig dargestellt.

Schritt 3 Atmosphärenkorrektur

Die spektralen und radiometrischen Eigenschaften von Luftbildern und im besonderen Maße von Satellitenbildern werden von den atmosphärischen Bedingungen zum Zeitpunkt der Aufnahme beeinflusst. Bei der Atmosphärenkorrektur handelt es sich demnach um die Beseitigung von durch

Streuung und Absorption in der Atmosphäre bedingten Einflüssen auf das Fernerkundungssignal während dessen Durchgang durch die Atmosphäre. Es ist also ein Verfahren zur Beseitigung des Einflusses der Atmosphäre, besonders bedingt durch den Aerosol- und Wasserdampfgehalt der Atmosphäre, auf das tatsächliche Reflexionsvermögens des Untergrundes. Die Reflexion des Untergrundes gibt in weiterführenden Analysen des Luft- oder Satellitenbildes z.B. Aufschluss darüber um welche Art der Oberfläche (Siedlung, offener Boden, Wasser oder Vegetation) es sich handelt und lässt die Berechnung von einer Vielzahl von bio- und geophysikalischen Parametern zu. Um genaue Informationen über die Erdoberfläche zu erhalten und auch um optische Fernerkundungsdaten räumlich, z.B. für eine flächendeckende Analyse, und zeitlich vergleichbar zu machen, muss also der Einfluss der Atmosphäre korrigiert werden.

Schritt 4 Histogrammkorrektur

Da nach der Korrektur der atmosphärischen Einflüsse die radiometrischen Eigenschaften zwischen den Szenen noch leicht variieren können ist ein Ausgleich der Histogramme oft notwendig. Unter Histogramm versteht man die Häufigkeitsverteilung der Pixelwerte (Grauwerte) für jeden einzelnen Aufnahmekanal eines fernerkundlichen Aufnahmesystems (Albertz, 2001). Wenn die Histogramme nicht angepasst werden, kommt es zu Einschränkungen bei der Anwendung eines einheitlichen Regressionsmodells auf verschiedene Satellitenszenen. Auch für die Berechnung eines Mosaiks erstellt aus mehreren Luft- oder Satellitenbildern ist eine Histogrammkorrektur sinnvoll.

Schritt 5 Mosaikierung

Ein Mosaik ist ein aus mehreren benachbarten digitalen Fernerkundungsbildern zusammengesetztes Übersichtsbild, welches benötigt wird, wenn eine größere Fläche analysiert wird. Für die Mosaikierung von Luft- oder Satellitenbildern ist eine geometrische sowie radiometrische Anpassung notwendig. Die geometrische Anpassung erfolgt, indem benachbarte und sich überlappende Aufnahmen anhand von Pass- und Verknüpfungspunkten geometrisch zusammengefügt werden. Bei der radiometrischen Anpassung werden die radiometrischen Differenzen (Helligkeits-, Kontrast- und Farbunterschiede) zwischen Einzelbildern ausgeglichen. Diese fallen je nach Aufnahmebedingungen und Sensor unterschiedlich aus und werden durch die Anpassung der Histogramme der einzelnen Szenen vereinheitlicht.

Für tiefgreifendere Informationen bezüglich der Vorprozessierung eigenen sich verschiedene Werke zu den Grundlagen der Fernerkundung, wie die Einführung in die Fernerkundung von Jörg Albertz.

Luft- und Satellitenbilder können meist mit unterschiedlichen Prozessierungsleveln bestellt werden. Dies gilt sowohl für kostenfreie Fernerkundungsdaten wie Sentinel als auch für kommerzielle Satellitendaten. Die Luftbilder des BKG, welche als digitale Orthophotos zur Verfügung gestellt

werden (s. Kap. 2.1.1), haben die oben genannten Prozessierungslevel bereits durchlaufen. Kommerzielle Satellitendaten können sowohl als Rohdaten als auch mit unterschiedlichen Prozessierungsleveln bezogen werden, was jedoch immer mit einem Anstieg der Datenkosten verbunden ist. Meist sind Satellitenbilder ohne weitere Kosten bereits georeferenziert, jedoch die Bearbeitungsschritte der Orthorektifizierung, der Atmosphärenkorrektur sowie der Mosaikierung müssen jeweils extra vergütet werden. Werden nur Rohdaten bezogen, ist jedoch der Arbeitsaufwand im Nachgang deutlich höher. Die Datengrundlage für eine Analyse ist meist der Hauptkostenfaktor. Was bei allen kommerziellen Fernerkundungsdaten jedoch gilt, ist, dass Archivdaten deutlich günstiger in der Anschaffung sind als Neuaufnahmen und je höher die räumliche Auflösung des Produktes ist sowie je intensiver die Vorprozessierung bereits war, desto höher sind generell die Datenkosten. Es ist also sinnvoll abzuwägen was mit einer Analyse erreicht werden möchte und welche Fernerkundungsdaten hierfür in Frage kommen.

Sentinel-Daten, welche kostenfrei online zur Verfügung stehen (s. Kap. 2.2), lassen sich in zwei Prozessierungsleveln bestellen. Level 1C Daten beinhalten bereits eine erste radiometrische und eine geometrische Korrektur, d.h. die Daten sind georeferenziert und orthorektifiziert. Level 2A Daten beinhalten zusätzlich eine Atmosphärenkorrektur.

Um die vorprozessierten Daten für eine Analyse verwenden zu können, müssen diese des Weiteren über ein einheitliches geographisches Bezugssystem (z.B. Universal Transversal Mercator (UTM) mit dem Datum WGS 84) verfügen und eventuell in dieses transformiert werden. Dies gilt nicht nur für die oben beschriebenen Rasterdatensätze (Luft- und Satellitenbilder), sondern auch für Vektordatensätze wie Straßennetze oder Hausumringe (s. Kap. 2.1.1), welche für eine Analyse, z.B. des Gebäudebestandes, benötigt werden. Außerdem, besonders wenn danach statistische Aussagen getroffen werden sollen, ist es sinnvoll die Datensätze auf die jeweiligen raumstrukturellen Einheiten, z.B. administrative Grenzen, zuzuschneiden. Vektordaten beinhalten oft mehrere Objektarten innerhalb eines Vektordatensatzes, von denen oft nur ein Teil benötigt wird, oder es werden Objektarten aus unterschiedlichen Vektordatensätzen benötigt. In diesen Fällen ist es notwendig, Teile der Objektarten zu entfernen oder verschiedenen Vektordatensätze miteinander zu verschneiden.

2.2.3 Datenauswertung

Aufgrund der stark steigenden Zahl an verfügbaren Satellitendaten ist es gerade bei großflächigen Kartierungen und Zeitreihenanalysen üblich, die Daten automatisiert auszuwerten. Dazu kommen insbesondere Ansätze des maschinellen Lernens zum Einsatz, wobei ein Algorithmus entwickelt wird, der auf Basis von Trainingsdatensätzen erlernt, Satellitendaten nach der Lernphase

unabhängig auszuwerten. Im Rahmen der (überwachten) Lernphase des maschinellen Lernens werden dem Algorithmus für repräsentative Gebiete Trainingsdaten zugeführt, welche den reellen Zustand bzw. Wert des abzuschätzenden Parameters bzw. die zu kartierenden Landbedeckungsklassen oder Objektarten ausweist. Für die identischen Areal werden dann auch Satellitendaten bereitgestellt, so dass der Algorithmus des maschinellen Lernens dann einen Zusammenhang (Muster) mit den spektralen, geometrischen und zeitlichen Eigenschaften erstellen kann. Ziel ist es, dass der Algorithmus nach dem Erlernen des Beziehungsmusters zwischen Trainingsdaten und Satellitenaufnahmen nun beliebige Satellitendaten automatisiert auf die trainierten Inhalte hin auswerten kann (z.B. versiegelte Flächen, Straßen und Gebäude, etc.). Die Qualität der automatisierten Analyse steht im Zusammenhang mit der Güte und Anzahl der Trainingsdaten. Dennoch kann es aber auch bei einer guten Basis an Trainingsdaten zu Fehlklassifikationen kommen. In der Regel kann mit Ansätzen des maschinellen Lernens – je nach Komplexität der abzuleitenden Information – eine thematische Güte von 80-90% erreicht werden.

Die Auswertung von Satellitendaten ist durch die Möglichkeit der Automatisierung sehr schnell und kostengünstig möglich, was besonders für ein großflächige oder langfristige Auswertungen von Vorteil ist (z.B. für ein kontinuierliches Monitoring).

Bei der manuellen Auswertung von Satellitendaten können Fehler durch Fehlklassifikationen minimiert werden, allerdings ist eine solche Methodik in der Regel bedeutend zeit- und kostenintensiver. Neueste Ansätze des Crowd Sourcings könnten hier jedoch in naher Zukunft neue Perspektiven bieten. Grundsätzlich ist eine manuelle Form der Auswertung ist besonders dann sinnvoll, wenn es nicht nur darum geht flächendeckende Analysen durchzuführen, sondern die Daten später auch als exakte Grundlage für kritische Fragestellungen genutzt werden sollen. Jedoch kann es auch bei der manuellen Analyse zu Fehlern durch den jeweiligen Sachbearbeiter kommen (Subjektivität der Auswertung). Da eine manuelle Auswertung mit viel Zeitaufwand verbunden ist, eignet sich diese besonders für kleinflächigere Analysen, bei denen eine hohe Genauigkeit bzw. die Ableitung sehr komplexer Sachverhalte (z.B. Gebäude oder Flächennutzung) im Vordergrund steht, die nicht ohne weiteren Kontext über reine Spektral-, Form- oder Textureigenschaften in den (Satelliten-)Bilddaten abgeleitet werden kann.

3 Fallbeispiele

In Kapitel 3 werden ausgewählte Fallbeispiele - vornehmlich aus der Forschungs- und Anwendungspraxis des DLRs - dargelegt, um die verschiedenen Möglichkeiten einer kombinierten Auswertung von Geobasisdaten (s. Kap. 2.1) und Fernerkundungsaufnahmen (s. Kap. 2.2) in Bezug auf die Informationsgewinnung zum Gebäudebestand in Deutschland aufzuzeigen. Dabei wird konkret demonstriert, auf welche Weise ausgesuchte Datenproben zur Bereitstellung neuer oder verbesserter Merkmale zum Gebäudebestand und zur Siedlungsstruktur eingesetzt werden können. In Kapitel 3.1 erfolgt dies zunächst mit Bezug auf Informationen zu Einzelgebäuden, während der Fokus im nachfolgenden Kapitel 3.2 auf Informationen zur Gebäudeumgebung und Siedlungskörper liegt.

Es ist vorgesehen, die zum aktuellen Berichtsstand aufgeführten Anwendungsbeispiele nach entsprechender Diskussion mit dem BBSR und der sich daraus ergebenden weiteren Schwerpunktsetzung bei Bedarf in der zweiten Projektphase durch weitere Demonstratoren zu ergänzen.

3.1 Informationen zu Einzelgebäuden

Eine Großzahl der Primärdatenerhebung zur Erfassung der Struktur von Gebäuden wurde in der Vergangenheit für Wohngebäude getätigt. Nichtwohngebäude werden oft nicht einmal in groben Zügen durch amtliche Statistiken erfasst und es ist deswegen kaum möglich eine Aussage über deren Struktur, in Bezug auf deren räumliche Verteilung und Fläche, Gebäudekategorie oder Bauwerkstyp, zu tätigen. Daher wurde im Rahmen des Verbundprojektes „ENOB: dataNWG“ erstmals ein neuer Datenbestand über Nichtwohngebäude in Deutschland erhoben, der Analysen und Bewertungen in den Bereichen Immobilienwirtschaft, Energie sowie Geoinformation unterstützen soll (Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung, 2020). Dabei wurden auf Basis der Hausumringe (s. Kap. 2.1.1) 100.000 Stichproben erhoben, um deren Richtigkeit zu überprüfen sowie deren Nutzung zu definieren. Die Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude diente hier als Grundlage für detaillierte Auswertungen von Strukturdaten wie Anzahl, Fläche, Kompaktheit, Nutzung und Standort der Gebäude (Institut Wohnen und Umwelt, 2020). Des Weiteren wurden für die Gebäude der Stichprobe mit Hilfe geoinformatischer Methoden die Hüllfläche (richtungsbezogene Aufsummierung der Fassadenfläche je Gebäude) berechnet, um besonders Aufschluss über die energetische Beschaffenheit der Gebäude zu geben. Diese, sowie weitere geometrische Eigenschaften der Gebäude, können gegebenenfalls als Trainingsdaten für die Ermittlung von Nichtwohngebäuden mittels Erdbeobachtungsdaten verwendet werden, was in der zweiten Phase des Vorhabens eingehender getestet wird.

Nachfolgend werden jedoch zunächst Auswertungen zur flächendeckenden Charakterisierung von Einzelgebäuden aufgezeigt, die unter Verwendung von verfügbaren Geobasisdaten und/oder Fernerkundungsaufnahmen durchgeführt werden können.

3.1.1 Bauvolumen und Geschossflächenzahl

Das Bauvolumen (i.d.R. angegeben in m^3) kann durch die Multiplikation von Gebäudegrundfläche und Gebäudehöhe berechnet werden. Als Datengrundlage wird somit neben dem Gebäudegrundriss auch die Höheninformation zum jeweiligen Bauwerk benötigt. Diese kann einerseits aus einem Gebäudemodell mit dem CityGML LoD1 entnommen werden. Zudem bieten höchst-aufgelöste Digitale Oberflächenmodelle (DOM) – etwa abgeleitet aus Laserscan- oder stereoskopischen Luftbildbefliegungen - eine Möglichkeit, die Höhen der Gebäude mittels Verfahren der digitalen Bildauswertung abzuleiten. Die Höheninformationen werden dann mit der Grundfläche der Gebäude, definiert über die Hausumringe (s. Kap. 2.1.1) kombiniert (s. Abbildung 12). Diese Kombination kann entweder pro Pixel erfolgen, wodurch eine Rasterkarte mit dem Volumen pro Pixel entsteht, oder es wird ein Mittelwert pro Hausumriss bzw. Hauspolygon berechnet. Die gewonnenen Informationen pro Pixel oder Gebäude können anschließend auf beliebigen räumlichen Ebenen zusammengefasst und gemittelt werden. Beispiele hierfür sind das durchschnittliche Bauvolumen auf Flurstück-, Baublock- oder Landkreisebene. Abbildung 13 illustriert dies am Beispiel von München, wo das Bauvolumen gemittelt über die Baublöcke dargestellt ist.



Abbildung 12: 3D Darstellung der Gebäudehöhen für die Innenstadt Münchens, erstellt auf Grundlage eines LoD1 Gebäudemodells, unterlegt mit DOP20® Luftbilddaten. Quelle: DLR/BKG

Auf Basis des Bauvolumens kann unter Verwendung der Flurstücke oder Baublöcke das Maß der baulichen Nutzung (Geschossflächenzahl) berechnet werden.

Da diese zur Bestimmung des Bauvolumens erforderlichen Daten vorliegen, ist es ohne weiteres möglich, einen bundesweit einheitlichen Datensatz zum Bauvolumen zu erstellen.

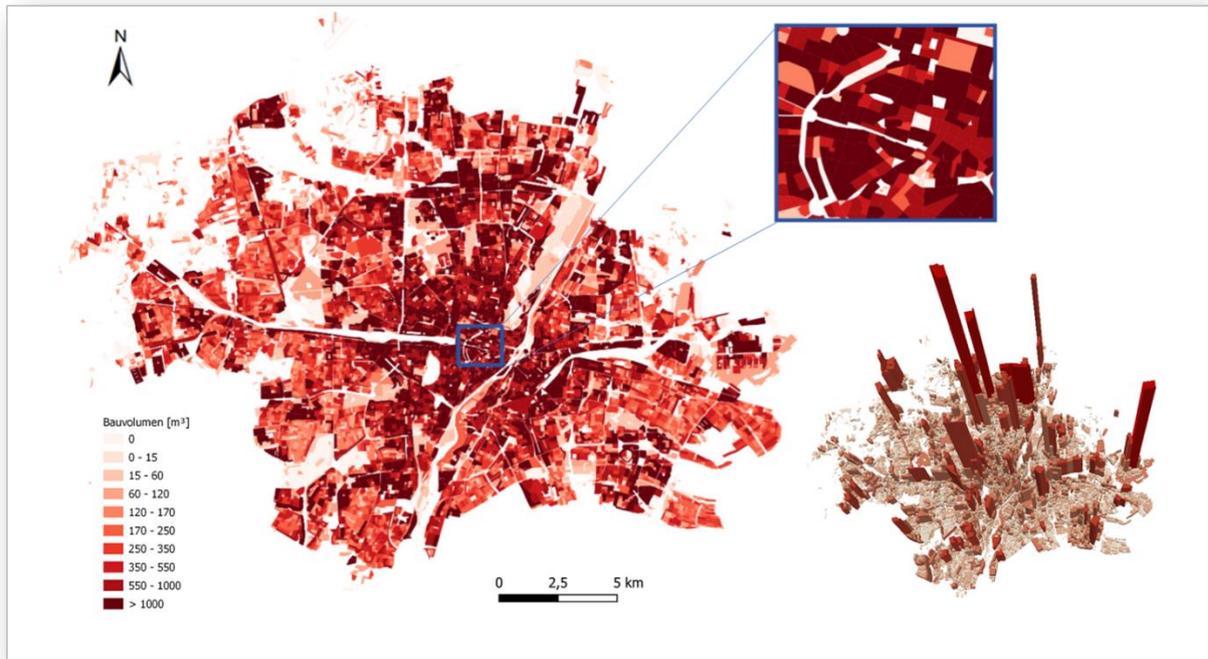


Abbildung 13: 3D Darstellung des Bauvolumens gemittelt über die Baublöcke in der Stadt München, erstellt auf Grundlage eines LoD1-DE® Gebäudemodells. Quelle: DLR/BKG

3.1.2 Gebäudenutzung

Informationen über die Gebäudenutzung sind für viele Fragestellungen wie etwa Energieverbrauch, Verkehrsaufkommen oder Bevölkerungsverteilung von hoher Relevanz. Obwohl Fernerkundung sich sehr gut für die Kartierung der Landbedeckung eignet, ist es nur indirekt möglich, die Landnutzung zu kartieren, da sich die Nutzung einer Fläche in der Regel nicht in charakteristischen spektralen oder texturbezogenen Merkmalen widerspiegelt. Daher sind etwa Daten wie das CityGML LoD1 für diesen Zweck besser geeignet, da hier jedes einzelne Haus über Attribute verfügt, denen u.a. die Funktion eines Gebäudes entnommen werden kann. Vor der Einführung von ALKIS (s. Kap. 2.1.3) wurden die Gebäude nur in Haupt- und Nebengebäude unterschieden, seither werden die Gebäude- und Bauwerksfunktionen jedoch gemäß des ALKIS-Objektartenkatalogs eingeteilt. In Bayern werden dabei folgende Funktionen geführt:

- Wohngebäude.
- Gebäude für Wirtschaft oder Gewerbe.
- Jugendherberge.
- Parkhaus.
- Tiefgarage.
- Wasserbehälter.
- Umformer.
- Gebäude für öffentliche Zwecke.
- Rathaus.
- Kreisverwaltung.
- Bezirksregierung.
- Gebäude für Bildung und Forschung.
- Schloss.
- Burg, Festung.
- Kirche.
- Synagoge.
- Kapelle.
- Moschee.
- Tempel.
- Kloster.
- Krankenhaus.
- Heilanstalt, Pflegeanstalt, Pflegestation.
- Kinderkrippe, Kindergarten, Kindertagesstätte.
- Polizei.
- Feuerwehr.
- Kaserne.
- Justizvollzugsanstalt.
- Bahnhofsgebäude.
- Sanatorium.
- Touristisches Informationszentrum.
- Nach Quellenlage nicht zu spezifizieren.
- Überdachung.

Abbildung 14 zeigt beispielhaft die Gebäudenutzung an einem Ausschnitt der Stadt München, generiert auf Basis von LoD1 Daten.



Abbildung 14: Illustration der Gebäudefunktionen anhand entsprechender Attribute des LoD1-DE® Gebäudemodells. Quelle: DLR/BKG

Auch OSM Daten enthalten oft Nutzungsklassen, da es für die Freiwilligen, die an OSM mitarbeiten, meistens am intuitivsten, ist die Nutzung eines Gebäudes zu beschreiben. Allerdings unterliegen OSM Kartierungen keinem strikten und einheitlichen Standard wie dies bei den ALKIS Daten der Fall ist. Die Definition und Zuweisung der Klassen können daher sehr große Unterschiede aufweisen, etwa zwischen unterschiedlichen Städten oder auch innerhalb von Siedlungsflächen je nach Bearbeiter.

3.1.3 Dachform

Teilweise beinhalten die Datensätze der Hausumringe (s. Kap. 2.1.1) bereits Angaben zum Dachtyp (Flachdach, Mischdach, Satteldach, etc.) und somit zur Dachform. Liegt eine Attributierung im Datensatz der Hausumringe nicht vor, kann dieser Wert als sekundäre Option auch aus einem digitalen 3D Gebäudemodell mit der Detaillierungsstufe LoD2 oder höher entnommen werden (Ansel et al., 2015). Der LoD2 Datensatz enthält, zusätzlich zu dem in Kapitel 2.1.1 näher dargestellten LoD1 Datensatz, Informationen zur Dachform. Allen Gebäuden werden standardisierte Dachformen zugeordnet und entsprechend des tatsächlichen Firstverlaufs ausgerichtet

(Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2020e). Alternativ dazu lassen sich diese Eigenschaften auch aus einem höchstauflösenden Digitalen Oberflächenmodell (DOM) ableiten (räumliche Auflösung <30 cm). Angewendet wurden diese Methoden im Rahmen der Erkennung von Grünflächen auf Dächern sowie der Erkennung von Dächern, die aufgrund Ihrer Form und Neigung für Grünflächen geeignet sind (s. Kap. 3.1.4).

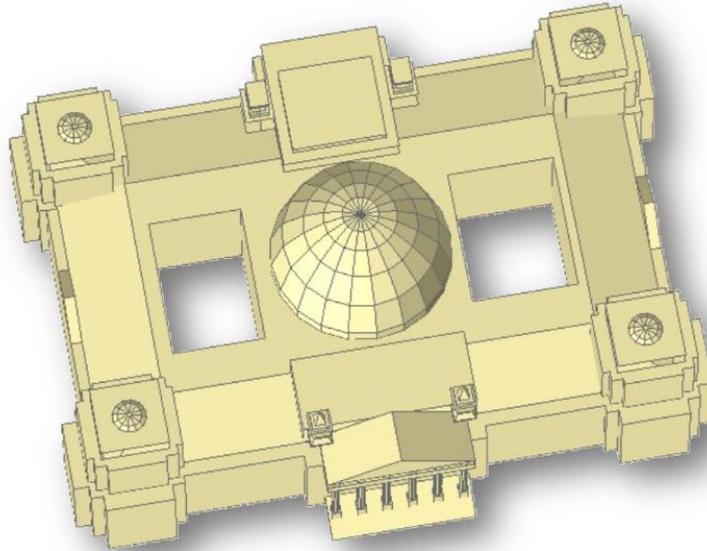


Abbildung 15: Darstellung des Reichstagsgebäudes sowie dessen Dachformen durch einen CityGML LoD2 Datensatz. Quelle: DLR/Stadt Berlin

3.1.4 Dachbegrünung

Für die fernerkundliche Erfassung von Vegetation im Allgemeinen und von begrünten Dächern im Speziellen werden sogenannte Falschfarbeninfrarot-Luftbilder oder multispektrale Satellitenbildaufnahmen benötigt. Diese decken mit ihren Spektralbändern neben der Reflektion im sichtbaren Spektralbereich (rot, grün, blau) auch den Bereich des nahen Infrarots (NIR) ab. Der zusätzliche NIR-Bildkanal bietet die Möglichkeit, Vegetationsflächen im Luft- oder Satellitenbild zu identifizieren, sowie über Vegetationsindizes deren Intensität und Vitalität zu bewerten. Bei der automatisierten, computergestützten Auswertung eines Falschfarbeninfrarotbildes zur Vegetationserkennung macht man sich den Umstand zu Nutze, dass Sonnenstrahlung, die auf einen Körper oder eine Oberfläche trifft, als Funktion der Wellenlänge und in Abhängigkeit von den physikalischen und chemischen Eigenschaften des Oberflächenmaterials in variierenden Anteilen reflektiert, absorbiert oder transmittiert wird (s. Kap. 2.2). Somit weisen jedes Material bzw. jeder Oberflächentyp über das gesamte elektromagnetische Spektrum gesehen einen charakteristischen Verlauf der

Reflektion auf – die so genannte spektrale Signatur. Photosynthetisch aktive Vegetation weist dabei eine spektrale Signatur auf, die sich deutlich von anderen Flächen bzw. Bedeckungsarten wie etwa trockenem Boden oder Wasser unterscheidet. Anhand dieser spektralen Signatur lässt sich der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI, normalisierter differenzierter Vegetationsindex) berechnen. Mit Hilfe des NDVIs können somit vegetationslose Flächen von vegetationsbedeckten Flächen unterschieden werden, sowie ein Aufschluss über die Dichte und den Zustand der identifizierten Vegetation erlangt werden (Ansel et al., 2015).

Als zweiter Datensatz für die Inventarisierung von Dachbegrünung werden die Hausumringe (s. Kap. 2.1.1) der betrachteten Städte oder Kommunen benötigt, um die Dachflächen in den Luft- oder Satellitenbilddaufnahmen präzise abgrenzen zu können. Für die Analyse ist es außerdem vorteilhaft, Informationen zu Gebäudehöhen und zu Dachformen zu haben. Die Gebäudehöhe ermöglicht es, begrünte Tiefgaragen von begrünten Hausdächern zu unterscheiden. Die Dachform gibt Aufschluss darüber, ob es sich tatsächlich um ein begrüntes Dach handelt oder etwa um ein bemoostes Dach, da Gründächer meist nur bis 10° Dachneigung vorkommen. Wie bereits in Kapitel 3.1.3 beschrieben, beinhalten die Datensätzen der Hausumringe teilweise Angaben zum Dachtyp, aber auch zur der Geschoszahl (oberirdisch bzw. unterirdisch bei Tiefgaragen) und der Dachhöhe als Attribute. Diese Werte können alternativ auch aus einem Digitalen Gebäudemodell (Detaillierungsstufe LoD2 oder höher) entnommen werden oder lassen sich aus einem Digitalen Oberflächenmodell (DOM) ableiten.



Abbildung 16: Falschfarbeninfrarot-Luftbild kombiniert mit Hausumringen (links) und Ergebnis einer automatisierten Identifizierung von Gründächern sowie deren Begrünungsintensität (hellgrün: gering; dunkelgrün: hoch). Quelle: DLR/Stadt München

Durch die Kombination von hochaufgelösten Falschfarbeninfrarot-Luftbildaufnahmen und Gebäudebasisdaten ist es möglich vorhandene Dachbegrünungen mit einer hohen Genauigkeit zu identifizieren (Ansel et al., 2015).

Des Weiteren können qualitative und quantitative Werte (u.a. Stärke des Vegetationssignals, Deckungsgrad der Begrünung) erfasst werden, die einen Rückschluss auf den Zustand der Dachvegetation erlauben (Ansel et al., 2015).

Die Auswertemöglichkeiten umfassen Einzelgebäude, Quartiere oder bei entsprechender Aufsummierung auch das gesamte Stadtgebiet. Durch die Kombination mit unterschiedlichen raumstrukturellen Einheiten lässt sich der Anteil von Dachbegrünungsflächen für die jeweilige Einheit flexibel bestimmen, wodurch quantitative Werte für das gesamte Stadtgebiet abgeleitet werden können, wie:

- Anzahl aller Dächer mit Dachbegrünung im Stadtgebiet.
- Prozentualer Anteil der Gründächer an der Gesamtzahl aller Dachflächen.
- Vegetationsfläche aller begrüneten Dachflächen.

Die zuvor beschriebene Kartierung der Dachbegrünung wurde zum Beispiel für die Städte Hamburg, Karlsruhe, Stuttgart, Nürtingen und München durchgeführt. Die Anzahl der Dachbegrünungen in den untersuchten Städten ist teilweise deutlich höher als erwartet. So wurden in München mehr als 50.000 Gebäude mit einer Gesamtfläche von 3,1 Millionen m² Dachbegrünung identifiziert. Gleichzeitig ist nach wie vor der größte Teil der städtischen Dächer unbegrünt. Bei den flach geneigten Dächern zeigt sich in München hier beispielsweise ein Wert von 13,5 Millionen m². Sofern die Gebäudebasisdaten eine Aufteilung in oberirdische Gebäude und Tiefgaragen ermöglichen oder Angaben zum Gebäudealter oder den Nutzungsklassen enthalten, können die Kenngrößen weiter differenziert werden. So wurden in München zusätzlich zu den oben aufgeführten Werten noch knapp 1,4 Millionen m² Dachbegrünungen auf Tiefgaragen identifiziert (Ansel et al., 2015).

3.1.5 Dachaufbauten, Solaranlagen und Solarflächenpotenzial

Mit hochauflösenden Fernerkundungsdaten wie Luftbildern und auch Laserscan- (LiDAR) und Hyperspektraldaten besteht in begrenztem Umfang, Dachaufbauten und Solaranlagen (automatisiert) zu identifizieren. Größere Dachaufbauten sind im CityGML LoD3 Daten enthalten, liegen allerdings nicht deutschlandweit vor. Mittels LiDAR Befliegungen können diese kartiert werden, operationelle und großflächige Kartierungsmethoden hierfür sind aber noch in der Entwicklung. Kleine Dachaufbauten wie Antennen u.ä. lassen sich aufgrund ihres geringen Querschnitts oftmals nur in höchstaflösenden Daten mit 5-10 cm Auflösung erkennen und mittels visueller und

manueller Auswertung kartieren. Die Möglichkeiten einer operationellen, automatisierten Erfassung sind jedoch weiterhin begrenzt. Hier dürften sich die Perspektiven allerdings in Verbindung mit der Nutzung von Ansätzen der künstlichen Intelligenz (z.B. Deep Learning) verbessern, da diese vielversprechende Ergebnisse bei der Erkennung und Abgrenzung spezifischer Objekte liefern. Voraussetzung für einen effizienten und letztlich erfolgreichen Einsatz ist allerdings die Sammlung bzw. Einbindung sehr umfassender Trainingsdaten.

Zur Ermittlung des Solarflächenpotenzials werden die Dächer hinsichtlich ihrer Neigung, Ausrichtung und Beschattung durch umliegende Objekte und Strukturen bewertet. Dazu werden typischerweise LiDAR Daten mittels GIS-Methoden analysiert (Gagnon et al., 2018, Mansouri Kouhestani et al., 2019, Sánchez-Aparicio et al., 2021). Entsprechende Services werden schon seit mehreren Jahren kommerziell angeboten.

Die Kartierung von Solaranlagen funktioniert sehr gut mit hochaufgelösten Hyperspektraldaten, wie sie bislang allerdings ausschließlich über flugzeuggetragene Sensoren erhoben werden können. Detaillierte Informationen zu dieser Methodik werden in Kapitel 3.3.1 gegeben.

3.2 Informationen zu Gebäudeumgebung und Siedlungskörper

3.2.1 Versiegelungsgrad und Versiegelungseffizienz

Zur Erfassung versiegelter Flächen eignet sich besonders die Bestimmung des Versiegelungsgrades über den Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Der NDVI stellt ein Maß für die photosynthetische Aktivität dar und lässt sich daher auch zur Identifizierung vegetationsbestandener sowie vegetationsloser Areale einsetzen. Vegetationsbedeckte Flächen, bis auf wenige Ausnahmen, wie begrünte Dächer, sind als unversiegelt anzusehen. Für vegetationslose Areale, wie Wasser, offener Boden und versiegelte Flächen werden weitere Schwellenwerte für den spektralen Reflexionsgrad des Nahen Infrarot (NIR) verwendet. Mit Hilfe dieser hierarchischen Klassifikation lassen sich die drei Klassen, Vegetation, Boden und Wasser, der Kategorie „unversiegelte Flächen“ von der Klasse versiegelte Flächen differenzieren.

Zur Erfassung der unversiegelten Flächen wurde beispielsweise im Rahmen des REFINA Projektes „Entwicklung und Evaluierung eines fernerkundungsbasierten Flächenbarometers als Grundlage für ein nachhaltiges Flächenmanagement“ erstmals eine Methode konzipiert, welche auf Basis flächendeckender Satellitendaten (in diesem Fall Landsat) sowie Geobasisdaten des BKGs versiegelte und nicht versiegelte Flächen über eine Modellierung mittels des NDVI bestimmt (Esch et al., 2009). Im Detail wurden dabei die über Satellitendaten mit ATKIS-Vektordaten verschnitten, um die Auswertung auf Siedlungsflächen zu fokussieren und darüber hinaus linienhafte

Infrastrukturelemente (z.B. Straßen und Gleisanlagen), die in den 30m Landsat-Aufnahmen nicht eindeutig erkannt werden können, dennoch als versiegelte Areale zu erfassen und entsprechend in den räumlichen Analysen zu berücksichtigen. In der Berechnung der versiegelten Fläche gehen die Straßen mit ihrer jeweiligen mittleren Straßenbreite je Kategorie ein. Diese Methode wurde bereits mehrfach erfolgreich angewendet um etwa die versiegelte Fläche in Bayern in den Studien „Satellitengestützte Erfassung der Bodenversiegelung in Bayern“ zu den Jahren 2007 und 2015 zu bestimmen (Üreyen und Thiel, 2017).

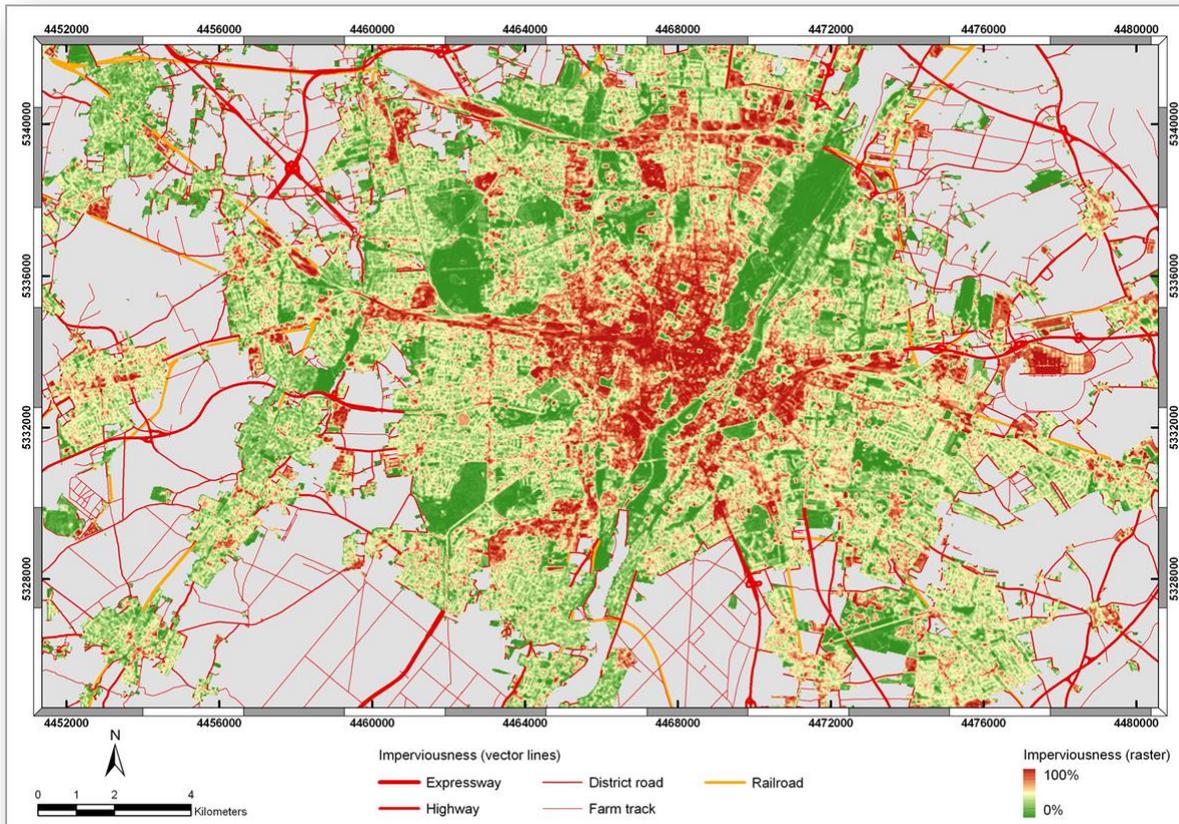


Abbildung 17: Versiegelungskartierung für das Gebiet München, basierend auf Landsat Aufnahmen (30 m) sowie linienhaften Strukturelementen aus ATKIS®. Quelle: DLR/BKG

Mit neuen Satelliten wie jene der Sentinel-2 Mission ist es mittlerweile möglich, räumlich bedeutend detailliertere Ergebnisse zu erhalten, als dies mit Landsat Aufnahmen der Fall ist. Zudem kann aber auch aus den DOPs mit einem IR-Band, wie sie deutschlandweit über das BKG bereitgestellt werden, ein NDVI abgeleitet. Somit kann der zuvor dargelegte Modellierungsansatz grundsätzlich auch für eine Kartierung im cm-Bereich heranziehen. Abbildung 18 zeigt eine Detailansicht der Versiegelung vom Zentrum Münchens, berechnet auf Basis von den DOPs des BKG (20 cm) und auf Basis von Sentinel- 2 Aufnahmen (10 m).



Abbildung 18: Prozentuale Versiegelung der Münchener Innenstadt, basierend auf DOP20 Luftbildaufnahmen (20 cm, oben) und Sentinel-2 Aufnahmen (10 m, unten). Quelle: BKG/DLR

Die Bestimmung der versiegelten Fläche mittels Fernerkundungsdaten, ermöglicht eine flächendeckende Auswertung mit vergleichsweise hohem räumlichen Detailierungsgrad und geringem Zeitaufwand. Durch das Versiegelungsraster ist es möglich, die versiegelten Flächen auf beliebige administrative und geographisch-raumstrukturelle Einheiten zu aggregieren und ist somit räumlich und zeitlich deutlich flexibler als Informationen amtlicher Statistiken einzusetzen. Durch

Verschneidung mit Geobasisdaten lassen sich zudem Versiegelungsmaße wie Versiegelungsgrad der Siedlungs- und Verkehrsfläche oder die versiegelte Fläche pro Einwohner auf verschiedenen Raumebenen berechnen. Neben dem Versiegelungsgrad, kann ein Großteil der in den beschriebenen Fallbeispielen berechneten Parameter, sinnvoll mit Bevölkerungsdaten verschritten werden.

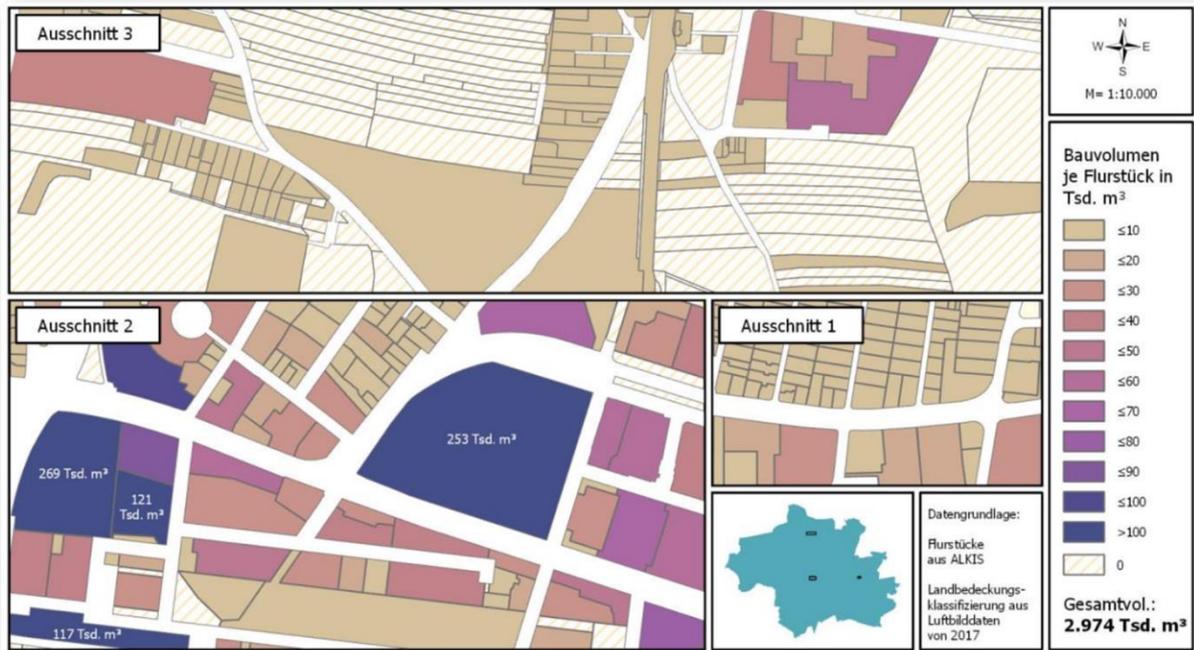


Abbildung 19: Darstellung der Versiegelungseffizienz anhand von drei Beispielen in der Stadt München.
(Meßner, 2019)

Mit Hilfe des Versiegelungsgrades kann außerdem, durch Hinzunahme eines weiteren Parameters, eine wichtige Kenngröße, die Versiegelungseffizienz, berechnet werden. Der Versiegelungsgrad gibt lediglich Aufschluss darüber, wo sich versiegelte Flächen befinden. Wird dieser mit dem Parameter Bauvolumen (s. Kap. 3.1.1), welcher die Grundfläche eines Gebäudes multipliziert mit der mittleren Gebäudehöhe beschreibt, kombiniert, ist es möglich festzustellen, wie hoch die Effizienz der Versiegelung einer raumstrukturellen Einheit ist. Die Versiegelungseffizienz ist somit eine Kombination der beiden Datensätze Bauvolumen und Versiegelungsgrad. Sie berechnet sich mittels Division des Bauvolumens durch den Versiegelungsgrad je administrative Einheit, wie Baublock oder Flurstück. Findet eine Bautätigkeit für Gebäude auf einem z.B. unbebauten Flurstück statt, so lässt sich dies anhand einer Versiegelungskarte illustrieren. In dieser Karte ist jedoch nicht enthalten, ob ein Gebäude, ein Parkplatz oder eine gepflasterte Einfahrt für die Erhöhung des Versiegelungsgrades verantwortlich sind. Es kann also nicht ausgedrückt werden, bis zu welcher Höhe

sich die Versiegelung erstreckt, oder ob eine bereits vorhandene Versiegelung durch Aufstockung der Gebäude effizienter genutzt werden kann. Die Einheit der Versiegelungseffizienz ist Meter und könnte auch so ausgedrückt werden, dass sie die mittlere Bebauungshöhe auf bereits versiegelten Flächen je gewählter administrativer Einheit abbildet. Damit kann einerseits dargestellt werden, wo die Bebauungshöhe versiegelter Flächen sehr gering, bzw. die Effektivität der Versiegelung niedrig ist. Dies ist zum Beispiel bei Straßen, Parkplätzen, künstlichen Sportplätzen oder Gleisanlagen der Fall. Andererseits wo durch eine hohe Bebauung die Versiegelungseffizienz der versiegelten Fläche ausgeschöpft wird. Je höher die Meterangabe der Versiegelungseffizienz, desto höher ist die Bebauung der versiegelten Fläche (Meßner, 2019).

3.2.2 Bebauungsdichte

Zur Berechnung der Bebauungsdichte werden einerseits die Gebäudegrundrisse sowie eine räumliche Bezugseinheit benötigt, welcher die Grundfläche für die jeweilige Dichteberechnung definiert. Als Datenbasis für die Gebäudeumrisse eignen sich die Hausumringe des BKG, da diese die georeferenzierten Grundrisse aller Gebäude in Deutschland beinhalten (s. Kap. 2.1.1).



Abbildung 20: Mittlere Bebauungsdichte der Stadt München pro Baublock, berechnet über ATKIS® (Gebäude) und HU-DE® des BKG. Quelle: DLR\BKG

Die Bebauungsdichte kann auf Basis verschiedener Bezugsgrößen berechnet werden, wie raumstrukturellen Einheiten unterschiedlicher Ebenen oder eines Gitternetzes mit beliebiger

Maschenweite. Der Nachteil eines Gitternetzes ist jedoch, dass einzelne Gebäude durch diese geometrisch strikte Aufteilung virtuell durchtrennt und dadurch auf mehrere Zellen des Gitternetzes aufgeteilt werden können. Besonders geeignet als Bezugsgröße sind Flurstücke oder Baublöcke, da diese eine raumstrukturelle Einheit darstellen, welche es möglich macht, das Ergebnis der Bebauungsdichte für planerische Fragestellungen, wie etwa des Zusammenhangs von Bebauungs- und Bevölkerungsdichte, zu verwenden. Die Baublöcke können dem Basis-DLM des BKG (s. Kap. 2.1.1) entnommen werden. Abbildung 20 stellt die Bebauungsdichte der Stadt München dar, berechnet auf Basis der Hausumringe und der Baublöcke als Bezugsgröße.

3.2.3 Verkehrsflächen und Bedeckungsart

In ATKIS sind die Lage und Nutzungsart (z.B. Verkehrsart und Straßenkategorie) der Verkehrsflächen enthalten. Informationen über den Straßenbelag sind nicht vorhanden. Diese sind jedoch von Interesse für verschiedene Anwendungen, wie etwa stadtklimatologische Fragestellungen oder die Bestimmung des Versiegelungsgrades. Verschiedene Datensätze können hier jedoch weiterhelfen. Zum Beispiel in Open Street Map (OpenStreetMap, 2020) gibt es einen Eintrag für den Straßenbelag für viele (Verkehrs-) Flächen. Diese Information wurde u.a. genutzt, um Eingangsdaten für das Stadtklimamodell PALM-4U zu erstellen (Heldens et al., 2020). Wo Informationen zum Straßenbelag nicht vorhanden waren, wurden diese auf Basis des Straßentyps (Hauptstraße, Wohnstraße, etc.) der für die Stadt typische Straßenbelag und die zugehörige Breite geschätzt. Dies tritt vor allem da auf, wo in den OSM Daten keine Parkplätze am Straßenrand ausgewiesen sind und daher die angenommene normale Straßenbreite die echte Breite unterschätzt. Das Ergebnis dieses Datensatzes, mit Oberflächentypen für die Verkehrsflächen welche den Klassen des Stadtklimamodell entsprechen, ist in Abbildung 21 beispielhaft für Stuttgart gezeigt.

Genauere Informationen zu dem Straßen- bzw. Oberflächenbelägen unbebauter Flächen können auf Basis hyperspektraler Befliegungsdaten abgeleitet werden. Analog zu Dachmaterialien können durch die detaillierten spektralen Informationen in Kombination mit der hohen räumlichen Auflösung die Materialien der meiste Straßen erfasst werden. Eingehendere Informationen dazu finden sich in Kapitel 3.3.1. Grundlegend kann bei ausreichender räumlicher Auflösung auch mittels Hyperspektraldaten (bei geeigneten Kanälen auch über Multispektralaufnahmen) der Zustand vom Straßenbelag (z.B. Asphalt) gekennzeichnet werden (Abdellatif et al., 2020, Politis et al., 2020).

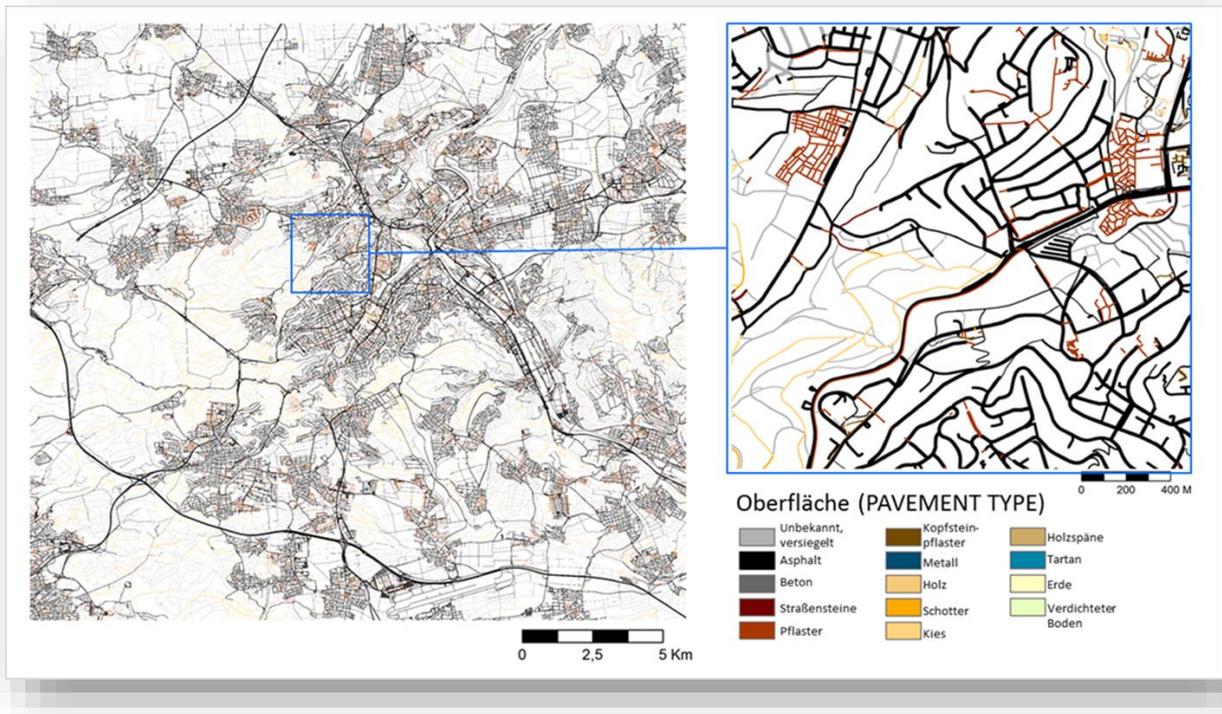


Abbildung 21: Oberflächentypen der Verkehrsflächen für Stuttgart, abgeleitet aus OSM, klassifiziert nach den Klassenanforderungen des Stadtklimamodells PALM-4U. Quelle: DLR/BKG

3.2.4 Typ, Anteil und Volumen der Vegetation

Deutschlandweit können viele Informationen zur Vegetation dem ATKIS Datensatz entnommen werden. Abbildung 22, welche auf Basis von ATKIS Daten generiert wurde, zeigt die Vegetationstypen der Stadt Berlin.

Zur Berechnung des Vegetationsanteils sowie des Vegetationsvolumens werden zusätzlich zu ATKIS Daten weiterer Datenquellen benötigt, wie die Vegetationshöhen. Für das Fallbeispiel der Stadt Berlin wurden diese dem Umweltatlas Berlin entnommen (s. Abbildung 23).

Auf Basis der Vegetationshöhen sowie der ATKIS Bezugsgröße Flurstücke lassen sich der Vegetationsanteil sowie das Vegetationsvolumen berechnen.

Der Grünanteil wurde berechnet über die Anzahl begrünter Pixel im Verhältnis zu der Gesamtzahl an Pixeln im Bezugsgebiet, im Beispiel in Abbildung 24 sind dies die Flurstücke. Ob ein Pixel begrünt ist, wurde in diesem Beispiel aus der Vegetationshöhenkartierung der Umweltatlas Berlin abgeleitet. Andere mögliche Quellen hierfür sind ATKIS, Satellitenbilder (z.B. mittels NDVI) oder falschfarbenen Luftbilder.

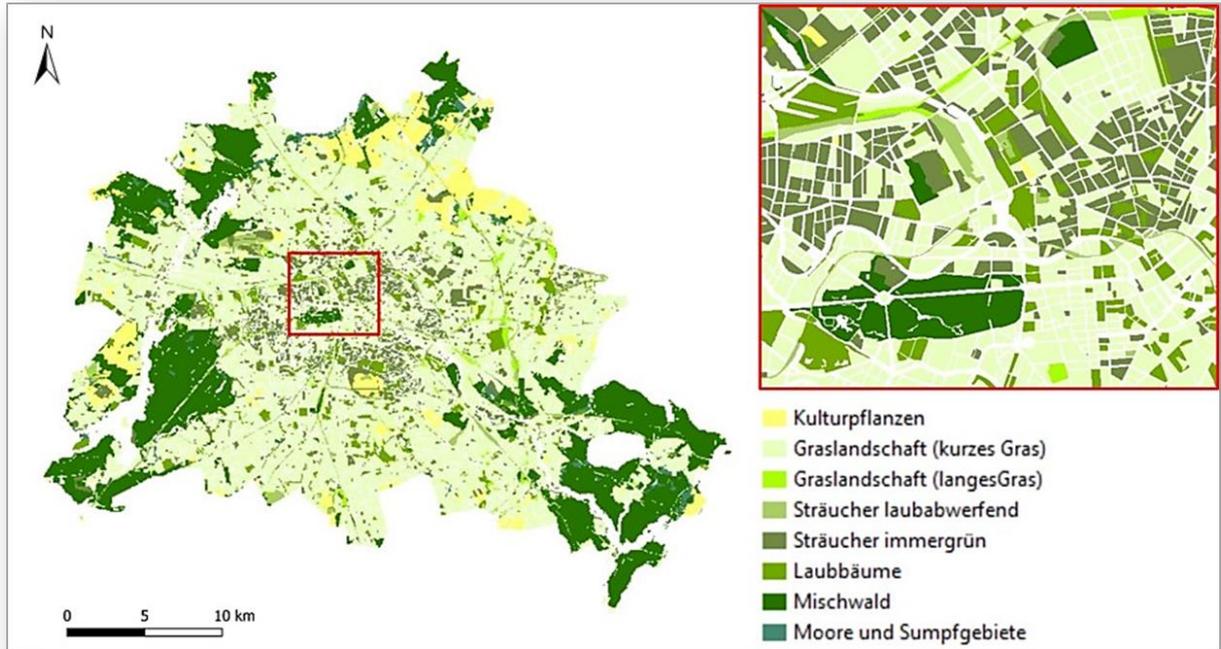


Abbildung 22: Vegetationstypen der Stadt Berlin. Quelle: DLRUmweltatlas Berlin



Abbildung 23: Vegetationshöhen der Stadt Berlin. Quelle: DLRUmweltatlas Berlin

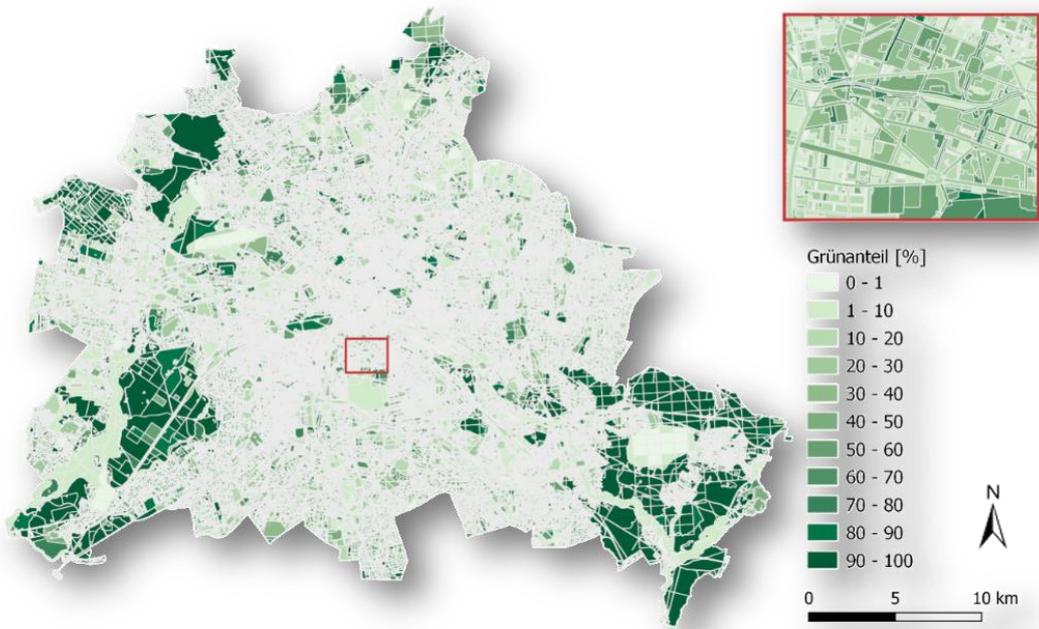


Abbildung 24: Prozentualer Grünanteil per Flurstück in Berlin. Quelle: DLRUmweltatlas Berlin

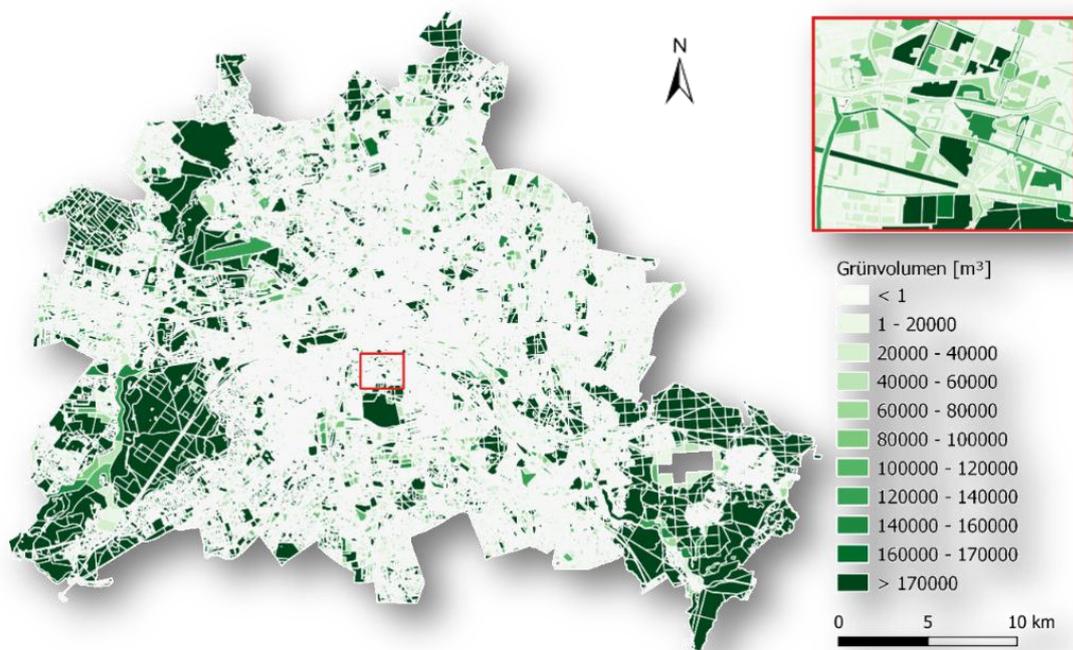


Abbildung 25: Grünvolumen in per Flurstück in Berlin. Quelle: DLRUmweltatlas Berlin

Das Grünvolumen wurde berechnet als die Summe der Vegetationshöhen per m² im Bezugsgebiet, im Beispiel in Abbildung 25 sind dies die Flurstücke. Die Vegetationshöhen stammen aus dem Umweltatlas Berlin, wofür diese Information aus einer LiDAR-Befliegung abgeleitet wurde (Umweltatlas Berlin, 2014). Die Vegetationshöhe kann also grundsätzlich mit der gleichen LiDAR Befliegung erhoben werden wie die Gebäudehöhen. Erst in der Aufbereitung dieser Daten werden die Höhen von Vegetation und Gebäuden getrennt und entsprechend klassifiziert.

3.2.5 Wasserflächen

Wasserflächen deutschlandweit können dem ATKIS Basis-DLM (s. Kap. 2.1.1) entnommen werden. Das digitale Landschaftsmodell verfügt über eine große Anzahl an Objektartengruppen, u.a. der Gruppe Gewässer. Diese umfasst die mit Wasser bedeckten Flächen und wird in folgende Objektarten unterteilt: Fließgewässer, Wasserlauf, Kanal, Gewässerachse, Hafenbecken, Stehendes Gewässer und Meer. Die Gewässer werden durch ihre jeweilige Uferlinie, bei mittlerem Wasserstand bzw. bei der Objektart Meer bei mittlerem Tidenhochwasser, geometrisch begrenzt (Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV), 2018). Von besonderem Interesse für die Berechnung der Wasserflächen sind Fließgewässer und stehende Gewässer, dargestellt als flächenhafte Elemente, sowie Gewässerachsen, dargestellt als Linienelemente.

Als Fließgewässer gelten Gewässer mit einer Breite <12 m, die ständig Wasser führen. Nicht ständig Wasser führende Gewässer werden ab einer Länge ≥ 500 m erfasst. Die Gewässerachse beinhaltet Wasserflächen, die eine geringere Breite als Fließgewässer aufweisen. Je nach Breite des Gewässers werden diese in drei Klassen eingeteilt:

- Klasse 3 (von >0 m bis ≤ 3 m Breite des Gewässers)
- Klasse 6 (von >3 m bis ≤ 6 m Breite des Gewässers)
- Klasse 12 (von >6 m bis ≤ 12 m Breite des Gewässers)

Bei der Objektart Stehendes Gewässer werden alle natürlich oder künstlich mit Wasser gefüllten, allseitig umschlossene Hohlform der Landoberfläche ohne unmittelbaren Zusammenhang mit der Objektklasse Meer, mit einer Fläche $\geq 0,1$ ha berücksichtigt (Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV), 2018).

Eine detailliertere Beschreibung der oben genannten sowie weiterer Objektarten der Objektartengruppe Gewässer kann dem ATKIS-Objektartenkatalog Basis-DLM entnommen werden.

Die Lagegenauigkeit für Gewässer beträgt 3 m. Die Aktualität des Basis-DLM und somit auch der Objektartengruppen ist deutschlandweit unterschiedlich und kann der Aktualitätsübersicht des

BKG entnommen werden ([BKG Geodatenzentrum - Web Map](#)). Generell gilt eine Grundaktualität von 3 bis 5 Jahren (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2020f).

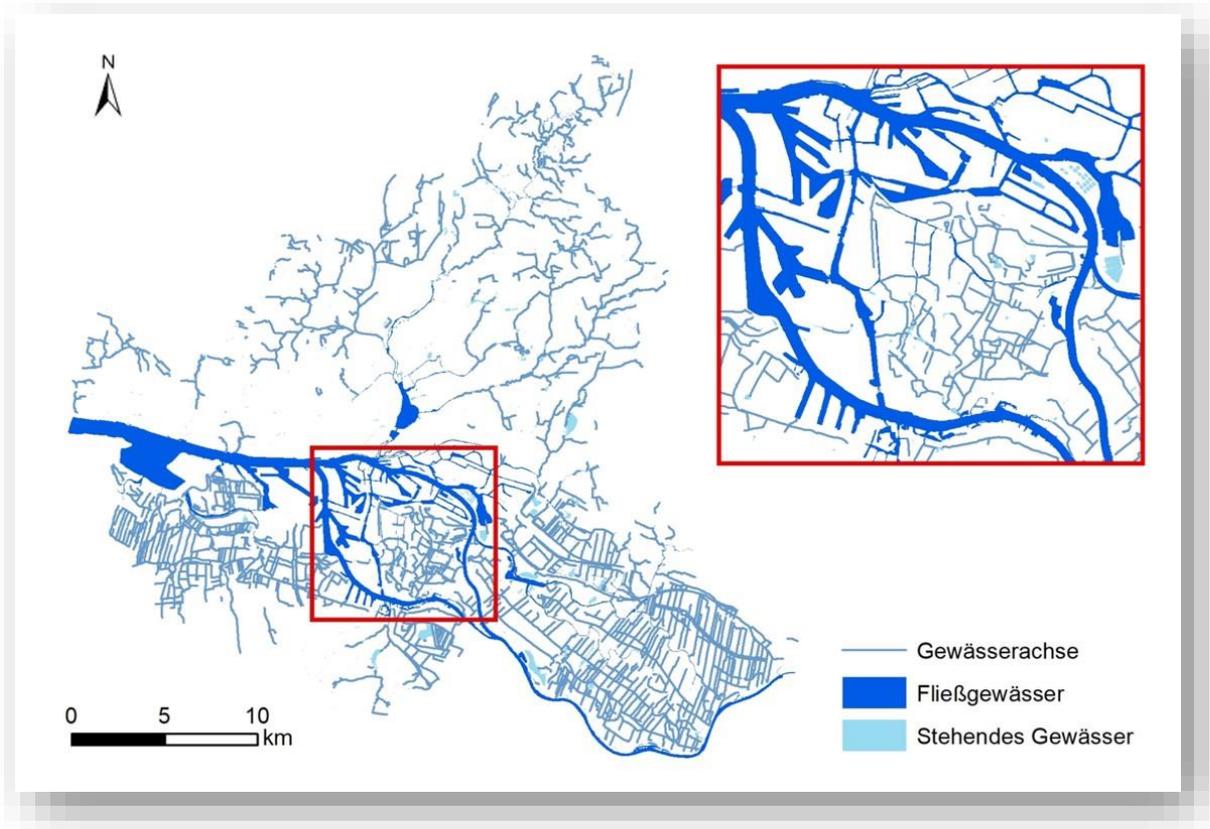


Abbildung 26: Wasserflächen von Hamburg, dargestellt anhand von ATKIS® Daten zu Gewässern.
Quelle: DLR/BKG

3.2.6 Oberflächentemperatur, Hitzeinseln

Mit Thermalkameras kann die Infrarotstrahlung, die Oberflächen emittieren, gemessen werden. Solche Sensoren gibt es als „hand-held“ Kameras oder montiert auf Drohnen, Flugzeugen und Satelliten. Mit Zunahme der Flughöhe verschlechtert sich die räumliche Auflösung. Einfache Sensoren haben nur wenige und Kanäle im thermalen Bereich des Spektrums, wobei die Breite des spektralen Aufnahmeband recht groß ist.

Die Thermalsensoren werden meist so kalibriert, dass die Oberflächentemperatur berechnet werden kann. Leistungsstarke Systeme haben mehrere Spektralkanäle im Thermalbereich, so dass ähnlich wie das Reflexionsspektrum bei den Hyper- oder Multispektraldaten ein Emissionsspektrum abgeleitet werden kann. Auch die Emission ist eine materialspezifische Eigenschaft, die man zur

Klassifikation von Oberflächenmaterialien zur Hilfe ziehen kann. Aber meistens werden Thermalbilder benutzt um Oberflächentemperaturen zu kartieren. Hiermit kann auf regionaler Ebene die städtische (Oberflächen-)Wärmeinsel (engl. Surface Urban Heat Island – SUHI) kartiert werden.

Abbildung 27 und Abbildung 28 zeigen Oberflächentemperaturen für München in verschiedenen Auflösungen, gemessen mittels des flugzeuggetragenen Daedalus-Sensors und des Landsat-Satelliten einerseits, und über den NOAA-Satelliten andererseits. Beide zeigen die SUHI, einmal für das gesamte Stadtgebiet und deren Umgebung (Abbildung 28) und einmal kleinere Hitzeinseln innerhalb des Stadtgebietes (Abbildung 27).

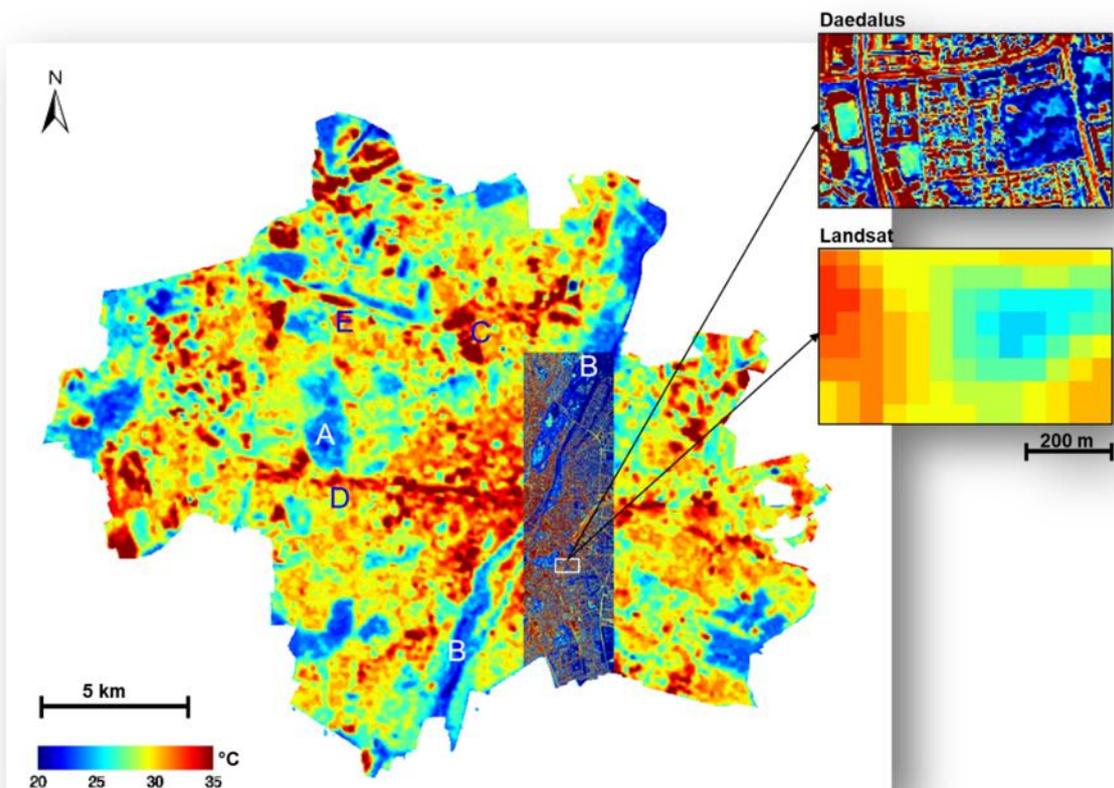


Abbildung 27: Oberflächentemperatur in München gemessen mittels Landsat (60 m Auflösung, Aufnahme von 26. August 2007, 11:56) und über Daedalus (5 m Auflösung, Aufnahme von 25 Juni 2007, 12:05). Die Karte zeigt typische Muster der Oberflächentemperaturen für bestimmte städtische Bereiche: der Nymphenburger Park (A), die Isarauen (B) sind kühler. Das Stadtzentrum so wie größere Industriegebiete (z.B. bei C) und die Bahnstrecken und Rangierbahnhöfe (D, E) erscheinen deutlich wärmer als die Wohngebiete der Stadt. Quelle: DLR

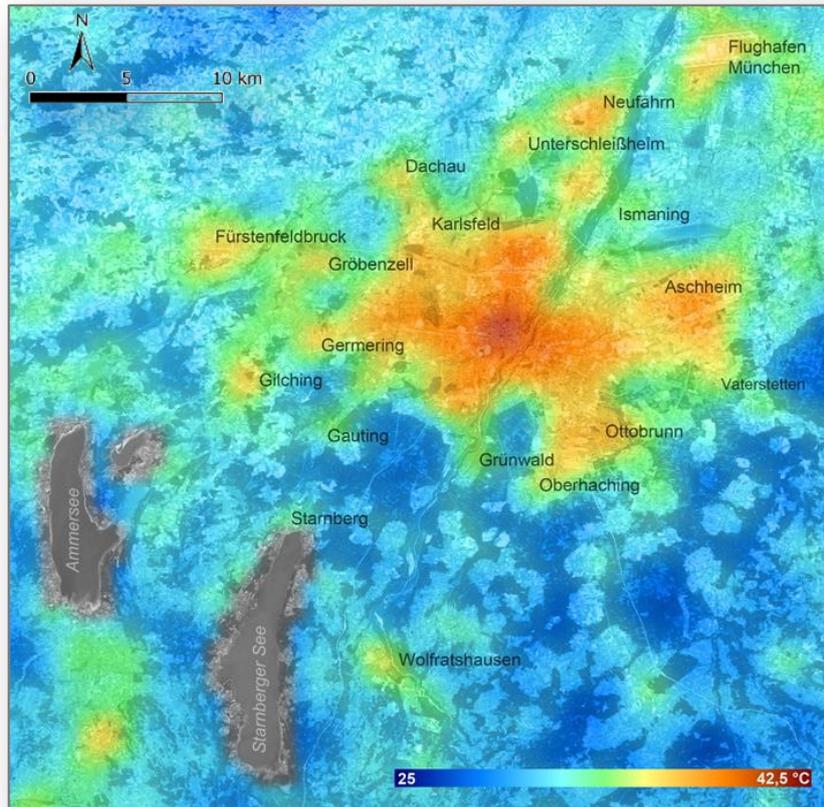


Abbildung 28: Die städtische Hitzeinsel von München und umliegenden Siedlungen, 20.6.2007. Aufgenommen vom Satellit-basierter Sensor NOAA (LST Produkt, 90 m Pixelauflösung). Quelle: DLR

Ein Maß, um die SUHI zu quantifizieren und damit vergleichbar zwischen Städte zu analysieren, ist die SUHI Intensität. Hierfür gibt es unterschiedliche Methoden (Wang, 2020). Die Intensität kann beispielsweise als das Verhältnis der Oberflächentemperatur von versiegelter und unversiegelter Fläche ausgedrückt werden (Abbildung 29).

Bei hinreichender räumlicher Auflösung der Thermaldaten, wie z.B. bei Befliegungsdaten, kann die Wärmeabstrahlung von verschiedenen Oberflächen auch als Indikator für die Qualität der Gebäudeisolation dargestellt werden (Bauer et al., 2020) oder die Information kann benutzt werden um unterirdische Leitungen zu überwachen, wie z.B. städtische Wärmenetze (Friman et al., 2014).

Neben den oben genannten Thermalaufnahmen besteht auch die Möglichkeit der Thermalnachtsaufnahmen, z.B. mit der Satellit ASTER. Dieser ermöglicht Nachtaufnahmen der Oberflächentemperatur mit 90 m räumlicher Auflösung, welche wiederum für die SUHI Bestimmung sehr hilfreich sind. Nachts können mittels Thermalaufnahmen andere Muster sichtbar gemacht werden, z.B. das Straßennetz und auch die SUHI sind deutlicher sichtbar als tagsüber. Abbildung 30 veranschaulicht dies durch eine Tag- und eine Nachtaufnahme von dem Thermalsensor AHS über München.

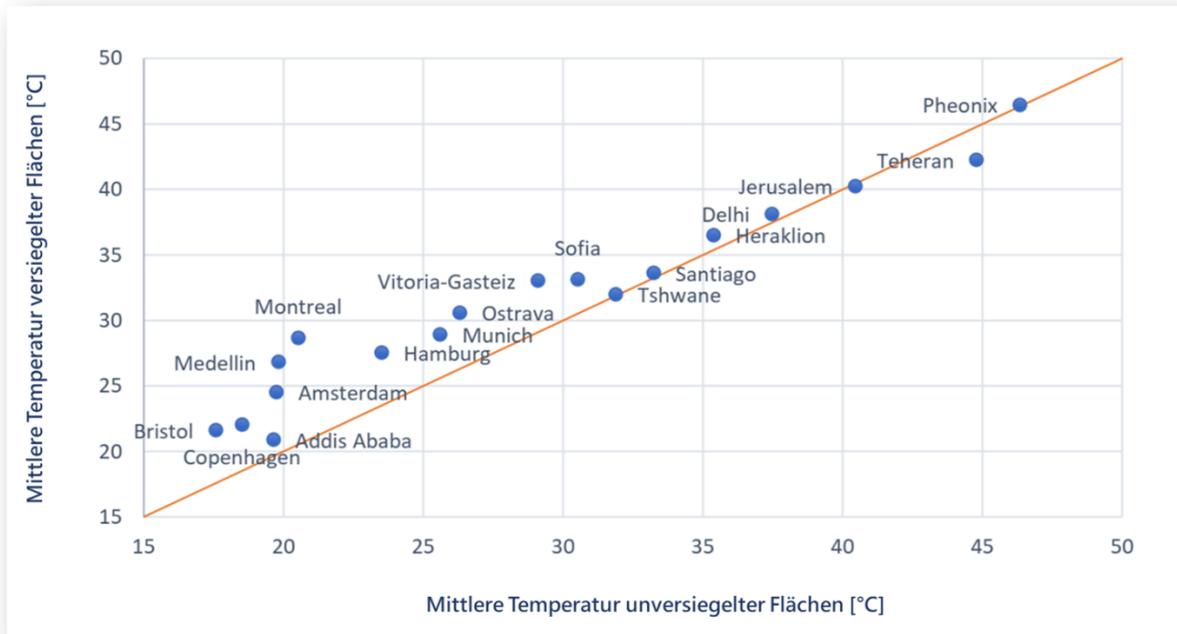


Abbildung 29: Gegenüberstellung der mittleren Oberflächentemperatur von versiegelten und unversiegelten Pixeln in 18 weltweit verteilten Städten auf Grundlage von Landsat Aufnahmen und WSF Imperviousness Daten des DLR. Städte oberhalb der orangen Linie weisen eine Hitzeinsel auf, Städte unter der Linie hingegen eine Kälteinsel. Quelle: (Wang, 2020)

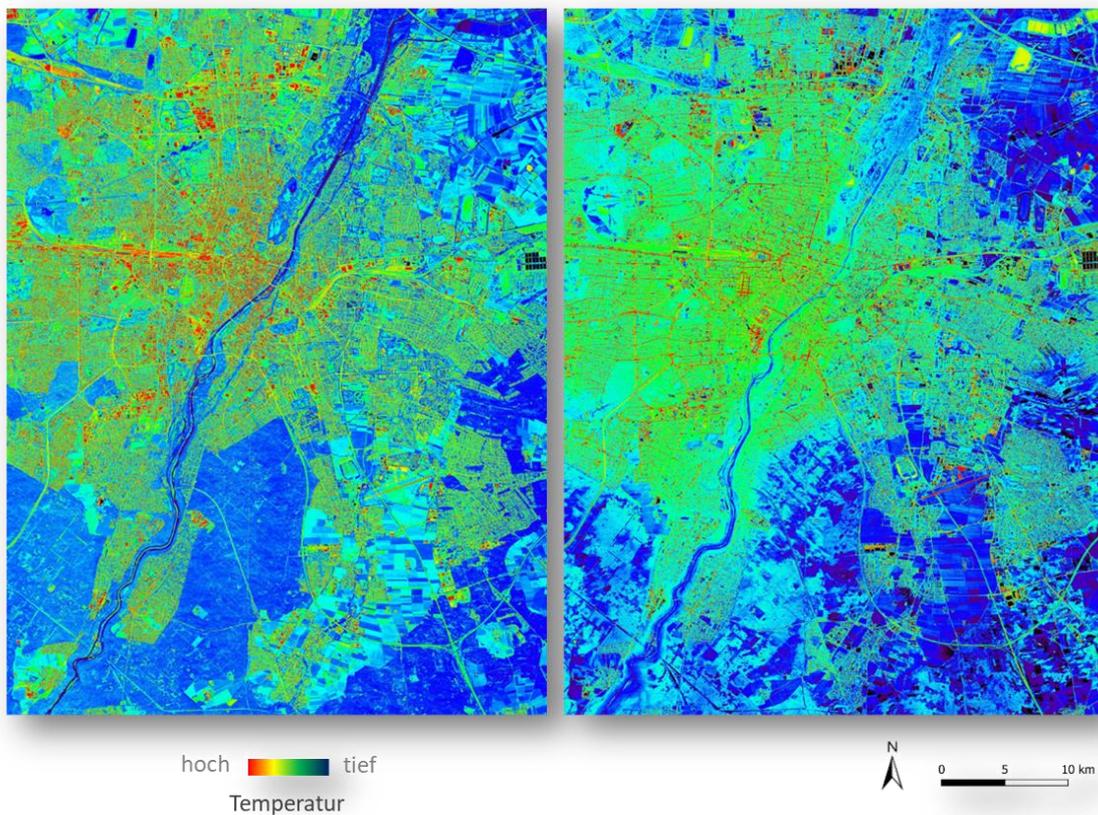


Abbildung 30: Thermalaufnahmen von München am 12.7.2011, aufgenommen mit der flugzeuggetragenen AHS Kamera am Tag (links) sowie in der Nacht (rechts). Quelle: DLR

3.2.7 Albedo

Für viele Anwendungen, z.B. für stadtklimatologische oder energetische Fragestellungen, ist die Albedo der Oberflächen relevant. Die Albedo ist die bi-hemisphärische Reflektion von einem Material oder einer Oberfläche. Die hemisphärische-direktionale Reflektion kann mit Fernerkundungssensoren gemessen werden (Schaepman-Strub et al., 2006) und wird anschließend über alle Wellenlängen integriert oder gemittelt um die Oberflächenalbedo als Oberflächen- bzw. Pixelmerkmal darzustellen. Da die Reflektion und damit die Albedo für viele Materialien mit dem Lichteinfallswinkel und Blickwinkel variiert (Extrembeispiele: Spiegel oder Wasser), sollte dies auch bei der Verwendung von Albedo aus Fernerkundungsdaten bedacht werden, da dieser Effekt je nach Blickwinkel des Sensors und Sonneneinfallswinkel sehr stark sein kann. Wie man in Abbildung 31 sehen kann, hat Wasser (unter den meisten Blickwinkel) eine niedrige Albedo (schwarze Flächen) und offene Böden eine hohe Albedo (helle Flächen). Viele Straßen haben eine niedrige Albedo (dunkle Flächen), was ein Merkmal von Asphalt ist. Gebäudedächer haben sehr unterschiedliche Albedowerte, welche nach Dachmaterial und Ausrichtung variieren.



Abbildung 31: Albedo als Mittelwert über alle Wellenlängen für den Ausschnitt eines HyMap-Datensatzes in der Umgebung des Nymphenburger Parks in München. Quelle: DLR

3.2.8 Luftschadstoffe

Städte und Agglomerationen gelten als globale Brennpunkte der Luftverschmutzung. Die Satellitenfernerkundung ermöglicht Luftschadstoffe global, kontinuierlich und flächendeckend auf einem konsistenten und räumlich integrierenden Gitter zu erfassen (Erbertseder et al., 2015). Die Satellitenfernerkundung von Luftqualität bietet dadurch eine Fülle von Möglichkeiten, die städtische Umwelt zu überwachen, Gesundheitsdienste und Planungsprozesse zu unterstützen, die Verfügbarkeit relevanter Informationen zu verbessern, die nachhaltige und resiliente Stadt zu gestalten und die Lebensqualität der Menschen zu verbessern. In Ergänzung zu traditionellen Messverfahren, wie der in-situ Messung der Umgebungsluft am Boden und der numerischen Modellierung, hat sich die Satellitenfernerkundung daher in den letzten Jahren als komplementäre Daten- und Informationsquelle zu etablieren begonnen. Satellitengestützte Beobachtungen von operativen meteorologischen Plattformen aus werden zunehmend zur Quantifizierung von troposphärischen Spurengasen und Aerosolen sowie Wolken eingesetzt. Mit Hilfe verschiedener Satelliten ist es möglich Luftschadstoffe wie NO₂, CO, PM₁₀, PM_{2.5} zu messen.

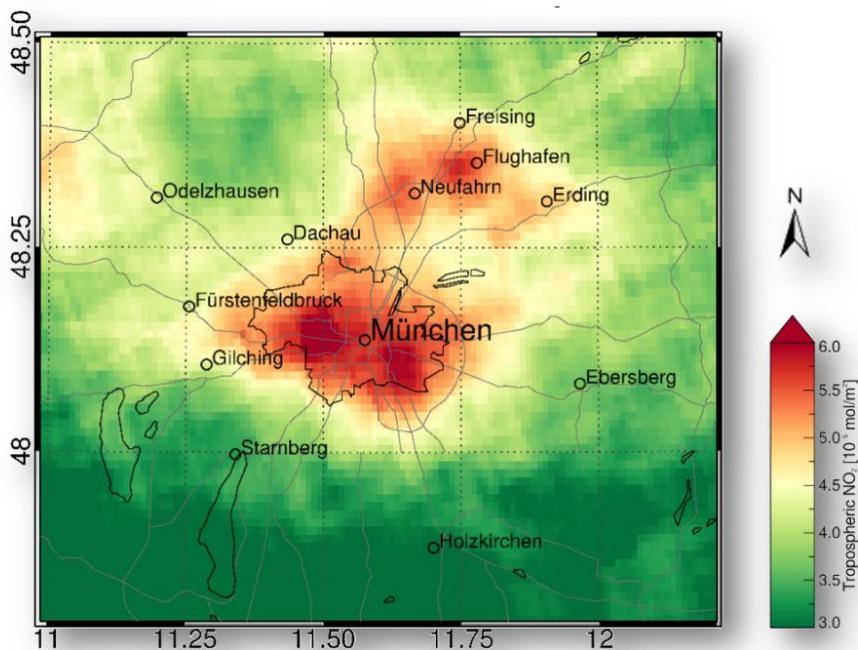


Abbildung 32: Städtische Verschmutzunginsel von München beobachtet von Sentinel-5P. Dargestellt ist das Monatsmittel des troposphärischen NO₂ für Juli 2018. Quelle: DLR

Eine besondere Rolle nimmt hierbei der Satellit Sentinel-5P des Copernicus Erdbeobachtungsprogrammes ein, welcher in einer, vergleichbar zu anderen Satelliten, sehr hohen Auflösung die Beobachtung von Schwefeldioxid, Ozon, Formaldehyd, Stickstoffdioxid, Kohlenstoffmonoxid,

Methan und Aerosolen ermöglicht. Der Satellit Sentinel-5P bietet bisher unerreichte Möglichkeiten für die tägliche Überwachung der globalen Luftverschmutzung. Außerdem kann durch Sentinel-5P erstmalig die Luftverschmutzung in städtischen Agglomerationen samt ihrer Variabilität detailliert beobachtet werden. Von besonderem Interesse ist hierbei die Verschmutzung durch den bodennahen Luftschadstoff NO₂, welcher aus anthropogenen Verbrennungsprozessen resultiert und aufgrund seiner kurzen Lebensdauer an seine Emissionsquellen gebunden ist. Abbildung 32 zeigt hierzu die städtische Verschmutzungsinsel von München für den Juli 2018. Die Werte sind in troposphärischen Vertikalsäulen in mol/m² angegeben und repräsentieren damit nicht nur die bodennahe NO₂-Konzentration, sondern eine vertikal integrierte Größe aller NO₂ Moleküle in der Luftsäule.

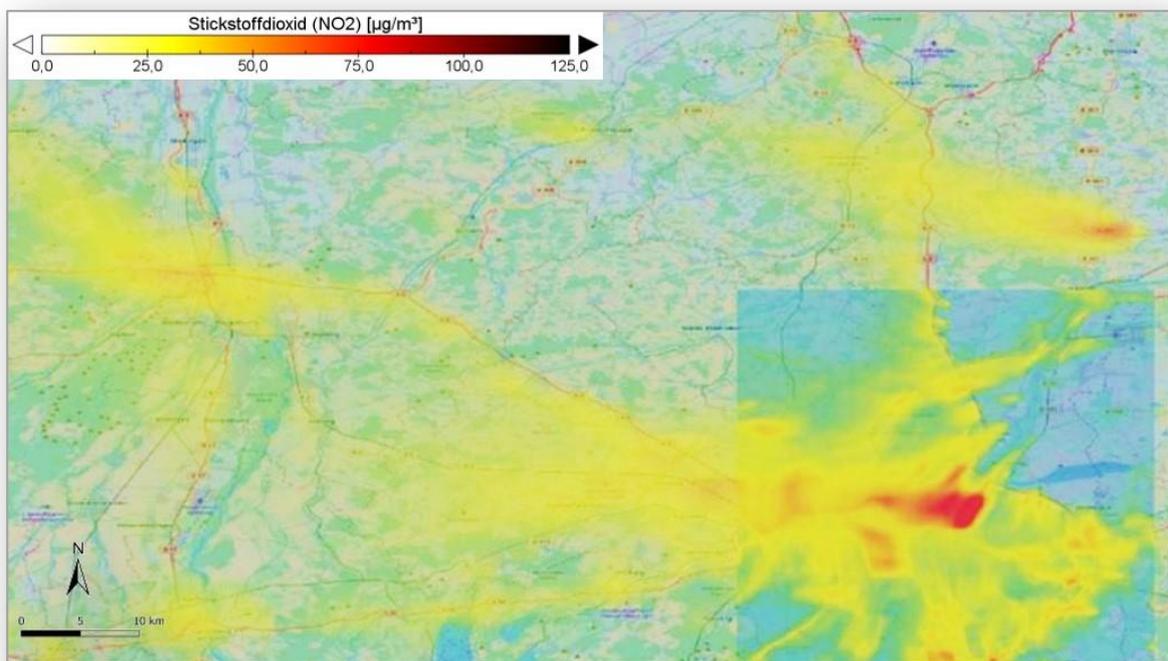


Abbildung 33: NO₂ Verteilung in der Umgebungsluft für den Großraum München, abgeleitet aus der Kombination von chemischer Transportmodellierung, Emissionsmodellierung, in-situ Messungen und satellitengestützten Beobachtungen. Dieser auf dem Luftqualitätsanalyse- und Vorhersagesystem Polyphemus/DLR basierende Datenassimilationsansatz erlaubt, die Luftschadstoffkonzentrationen stündlich mit einer räumlichen Auflösung von 100 m zu modellieren. Quelle: DLR

Neben NO₂ haben auch bodennahe Feinstaubkonzentrationen (PM_{2.5} und PM₁₀) einen starken Einfluss auf die Luftverschmutzung. Diese können aus Satellitendaten der Aerosol Optischen Dicke abgeleitet werden (Hoff et al., 2009, Rohde, 2017, Handschuh et al., 2020). Bei Spurengasen wie NO₂ verhält sich dies anders. Hier ist meistens die Verknüpfung mit einem Chemie-

Transportmodell notwendig. Die Satellitendaten und das numerische Modell werden dabei mittels Verfahren der Datenassimilation oder Inversion mit einander kombiniert, um aus vertikalen Säulendichten bodennahe Massenkonzentrationen der Umgebungsluft zu gewinnen (Daley, 1992, Khorsandi et al., 2018). Abbildung 33 und Abbildung 34 sind Beispiele für NO₂-Verteilungen, abgeleitet aus der Kombination von chemischer Transportmodellierung, Emissionsmodellierung, in-situ Messungen und satellitengestützten Beobachtungen. Abbildung 33 zeigt die NO₂-Verteilung in der Umgebungsluft für den Großraum München. Abbildung 34 zeigt eine Simulation von NO₂ im Bereich der Landshuter Allee, München.

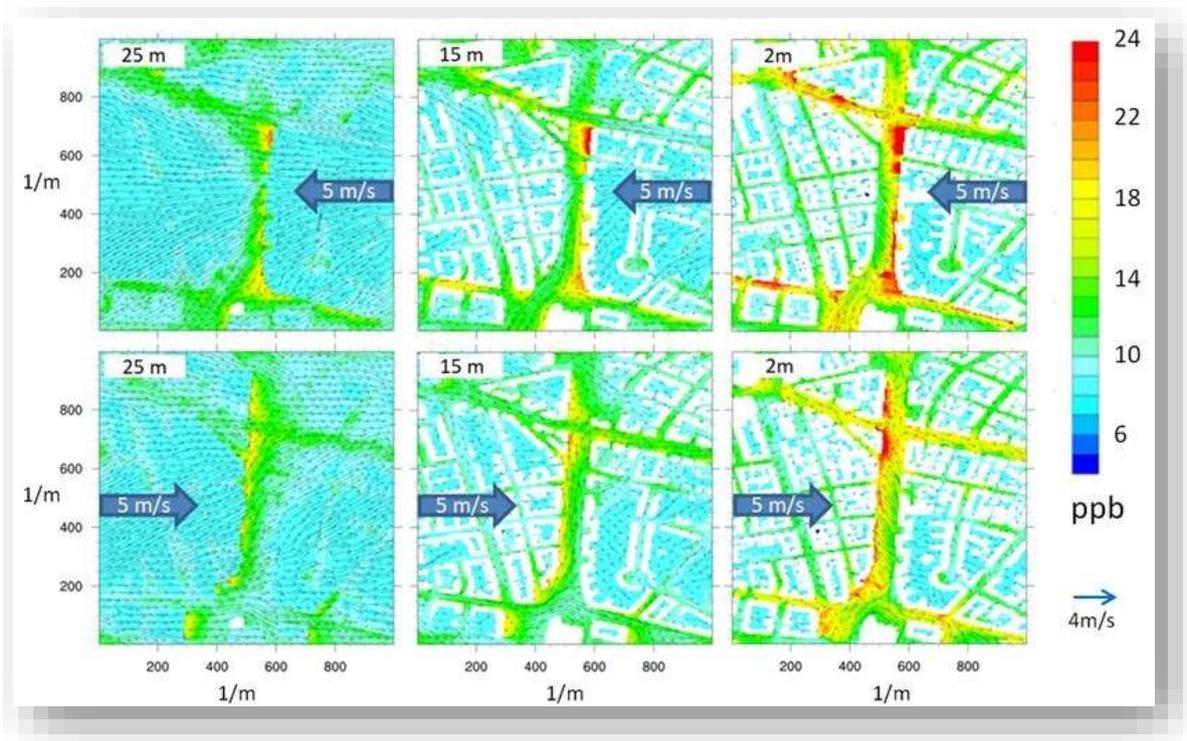


Abbildung 34: Simulation von NO₂ im Bereich der Landshuter Allee, München durch das PALM-4U Modellsystem unter Nutzung von Satellitendaten für Luftschadstoffe, Gebäudehöhe und Landnutzung. Die NO₂ Konzentration ist für verschiedene Höhen über Straßenniveau (fallend von links nach rechts) und einer konstanten Windanströmung von 5 m/s angegeben. Die obere Reihe zeigt östliche, die untere Reihe westliche Anströmung. Quelle: DLR

Dies sind nur einige Beispiele für die Möglichkeiten der Satellitenfernerkundung von Luftschadstoffen. Die Forschung hierfür wurde gefördert durch das BMBF im Projekt Stadtklima im Wandel – 3DO+M (Teilprojekt 5) (Förderkennzeichen 01LP1912E) und das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz im Projekt JOSEFINA (Förderkennzeichen TLK01 U-70606).

3.2.9 Nachtaufnahmen

Mit optischen Sensoren lassen sich u.a. Nachtaufnahmen (Nighttime Lights – NTL) der Siedlungsfläche aufzeichnen, um etwa Stadtlichter und Straßenbeleuchtungen von einzelnen Straßenzügen und Vierteln bis hin zu ganzen Megastädten erfassen. Analysen zu Urbanisierungsprozessen und sozio-ökonomischen Verhaltensweisen stehen im direkten Zusammenhang mit NTL. Es gibt operationelle Satellitenprodukte wie die City Night Lights, welche die nächtliche Beleuchtung regelmäßig aufzeichnen und so im Zeitverlauf auf die Entwicklungen schließen lassen (Levin et al., 2020).



Abbildung 35: Nachtaufnahmen von München (links) und Berlin (rechts), aufgenommen mit der flugzeuggetragenen 3K-Kamera bzw. von Astronauten mit einer Kamera aus der internationalen Raumstation ISS. In Berlin sind gut die Unterschiede in der Art der Straßenbeleuchtung zwischen dem ehemals geteilten Osten und Westen der Stadt zu erkennen.

Quelle: DLR \ © Image Science and Analysis Laboratory, NASA Johnson Space Center

Mit Hilfe einer höheren räumlichen und spektralen Auflösung von Nachtaufnahmen, wäre es möglich Unterschiede in Beleuchtungsfarben festzustellen. Diese können Indikatoren für die Nutzung oder das Baujahr von Gebäuden oder die Art der Straßenbeleuchtung sein. Verfahren hierzu sind momentan noch im innovativen Stadium.

Im Rahmen der N8 Mission, eine Erdbeobachtungsmission der ESA für Nachtaufnahmen mit höherer räumlicher Auflösung als bisheriger Missionen, soll es ermöglicht werden, detaillierter zu erkennen, wann, wie (spektrale Wellenlängen, Lichttyp) und wo (Standort der Lichtquelle und Lichtverteilung) künstliches Licht freigesetzt und emittiert wird. Um diese Informationen weltweit zu erhalten, sind häufige, hochauflösende, mehrwinklige, multispektrale und wolkenfreie Aufnahmen von anthropogenen nächtlichen Niedriglichtern erforderlich. Neben der frühen Erkennung von Naturkatastrophen und Konflikten, sollen die Daten auch dafür dienen, urbane Prozesse sowie sozio-ökonomisches Verhalten, welches oft Einfluss auf urbane Prozesse hat, zu identifizieren und verfolgen und somit verstehen zu können.

3.2.10 Nahwärmepotenzial

Wärmenetze spielen eine gewichtige Rolle im Kontext von Klimaschutz und Energieeffizienz. So ist der verstärkte Einsatz effizienter Energietechniken sowohl zur Erreichung von Klimaszutzziele als auch zur Etablierung einer nachhaltigen Energieversorgung unabdingbar. Vor diesem Hintergrund ist die Bewertung des aktuellen bundesweiten Wärmenetzpotenzials ein wichtiger Baustein.

Entscheidend für die Durchführung einer bundesweiten, räumlich und thematisch hoch detaillierten Auswertung siedlungsstruktureller Gegebenheiten zur Berechnung des Wärmenetzpotenzials ist die Verfügbarkeit geeigneter raumbezogener Daten sowie die Nutzung einer zeit- und kosteneffizienten Methodik zur Erstellung der notwendigen Geoinformationsprodukte. Hinsichtlich der Methodik kann das Wärmenetzpotenzial unter Nutzung von Verfahren der digitalen Bildanalyse und geographischer Informationssysteme über eine Kombination von Top-down und Bottom-up Ansatz für das gesamte Gebiet Deutschlands ermittelt werden (Esch et al., 2011). Der Top-down Ansatz kommt bei der Abschätzung des Wärmebedarfs auf Grundlage von Daten zum Gebäudebestand und der klimatischen Situation zum Einsatz. Der Gebäudebestand wird dabei durch Infas-Geodaten zu Gebäudetyp (Ein-/Zwei-Familienhäuser, kleine und große Mehrfamilienhäuser) und Gebäudealter (neun Bauperioden) sowie Informationen des Statistischen Bundesamtes zur Gebäudenutzung (Wohngebäude, Nichtwohngebäude) bestimmt. Die klimatischen Gegebenheiten können mit Hilfe der vom Deutschen Wetterdienst bereitgestellten Gradtagzahlen dargestellt werden. Die Berechnung der leitungsgebundenen Investitionskosten erfolgt Bottom-up unter Einbeziehung von Daten des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems zur Lage

von Siedlungsflächen und dem Verlauf des Straßennetzes (Ermittlung Hauptverteilungs- und Hausanschlussleitungen) sowie unter Nutzung von Informationen zum Gebäudebestand (Lage, Grundfläche), der aus Digitalen Topographischen Karten (Maßstab 1:25.000) extrahiert wird. Die Ergebnisse der bundesweiten Auswertung zeigen, dass das Wärmenetzpotenzial neben dem örtlichen Wärmebedarf stark von der Länge der Wärmeverteilungen abhängt.

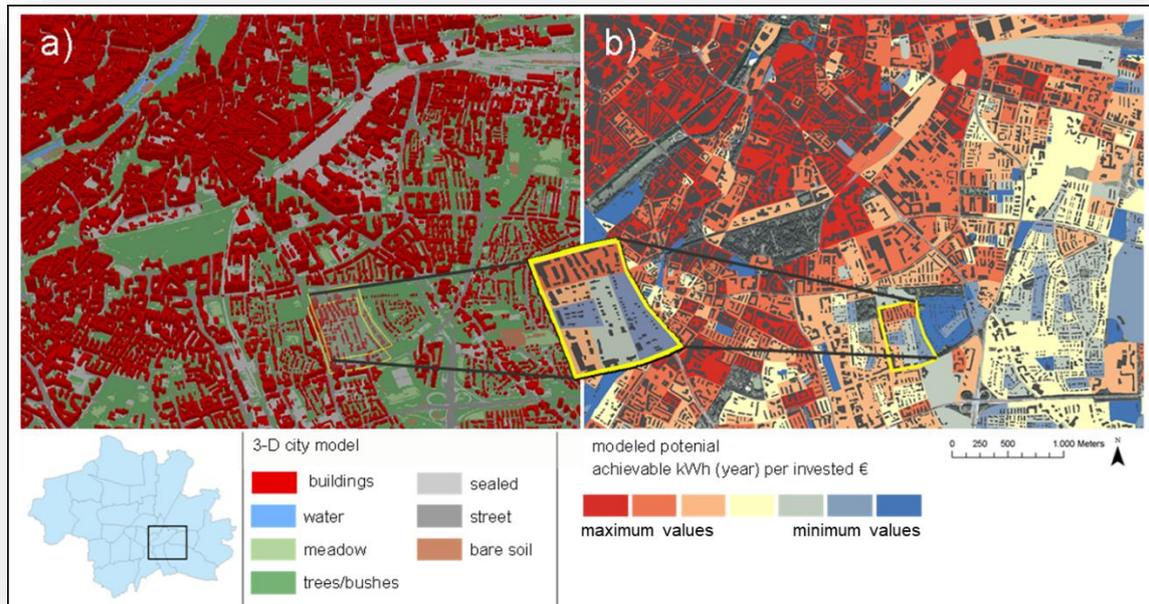


Abbildung 36: Räumlich detaillierte Modellierung des Wärmenetzpotenzials auf Quartiersebene, dargestellt am Beispiel Münchens. Quelle: DLR

Neben der bundesweit flächendeckend durchgeführten Abschätzung des Wärmenetzpotenzials können zudem räumlich hoch detaillierte, energiebezogene Analysen auf Quartiersebene durchgeführt werden. Dazu wurde beispielsweise anhand von Fallstudien in der Stadtregion München das Anwendungsspektrum siedlungsstrukturbezogener Inventarisierungen auf Quartiersebene bezüglich energierelevanter Fragestellungen demonstriert. Die Anwendungsbeispiele umfassten die Typisierung der Stadtstruktur und die Kartierung der urbanen Landbedeckung, die Erfassung von begrünten Dächern und Solarflächen, die Bewertung des Photovoltaikpotenzials sowie die Modellierung des quartiersbezogenen Wärmenetzpotenzials und der mikroklimatischen Situation. Die Auswertungen basierten auf einer Datengrundlage aus fernerkundlichen Informationen (multispektrale, hyperspektrale und thermale Erdbeobachtungsdaten, digitales Oberflächenmodell basierend auf Daten eines flugzeuggetragenen Sensors) und kommerzieller Daten zum Gebäudebestand (häuserscharfe Infas-Geodaten zu Bauperioden) und den klimatischen Gegebenheiten (Gradtagzahlen des Deutschen Wetterdienstes). Die Resultate legen dar, dass eine physisch-

strukturelle Charakterisierung von Siedlungsquartieren auf Grundlage einer Analyse räumlich und thematisch höchstaufgelöster Geodaten vielseitig verwendbare Informationen über die lokalen und regionalen Standortbedingungen liefert. Dies eröffnet auch für Betrachtungen und Analysen zum Klimaschutz sowie der Energieeffizienz auf lokaler Ebene bislang nicht gekannte Möglichkeiten.

3.3 Experimentelle Fernerkundungsverfahren

3.3.1 Hyperspektralfernerkundung

Neben den bereits dargelegten Möglichkeiten zur Charakterisierung von Oberflächentypen mittels multispektraler Satellitenaufnahmen bietet die Hyperspektralfernerkundung ein nochmals bedeutend gesteigertes Potenzial zur präzisen Identifizierung und Kartierung von verschiedensten Oberflächenmaterialien. Da die Hyperspektralsensorik von Satellitensystemen bislang keine hinreichende räumliche Auflösung zur detaillierten Erfassung der kleinräumigen Siedlungsstrukturen bietet, ist diese Art der Auswertung für Analysen im Gebäudekontext weiterhin auf flugzeuggestützte Erhebungen begrenzt. Dies führt dazu, dass Hyperspektralaufnahmen im Gegensatz zu multispektralen und radarbasierten Kartierungen nicht flächendeckend für Deutschland vorliegen.

Grundsätzlich lassen sich optische Fernerkundungssensoren nach Anzahl und Bandbreite der spektralen Kanäle unterscheiden, wobei die Fähigkeiten zur Differenzierung und Identifizierung diverser Oberflächenmaterialien und -zustände mit der Anzahl an (vorzugsweise spektral eng begrenzten) Aufnahmekanälen ansteigt, da dies eine hochgenaue Analyse der materialspezifischen spektralen Signatur begünstigt (s. Kap. 2.2). Rot-Grün-Blau Echtfarben- aber auch Falschfarbinfrarot-Luftbilder basieren auf Sensoren mit drei (RGB) bzw. vier (RGB und NIR) spektralen Aufnahmekanälen. Bei den meisten satellitengestützten Sensoren - wie etwa jene von Sentinel-2 oder Landsat - handelt es sich um multispektrale Sensoren, mit in rund 5-15 Spektralbändern aufzeichnen. Daher werden neben dem für das menschliche Auge sichtbaren Bereich der elektromagnetischen Strahlung (von blau über grün nach rot) auch zusätzliche Wellenlängen im nahen und mittleren Infrarot sowie zum Teil auch thermale Bereich abgedeckt.

Hyperspektrale Sensoren zeichnen meist auch im sichtbaren und nahinfraroten Bereich auf, wobei sie im Gegensatz zu herkömmlichen optischen Systemen allerdings sehr viele und schmale spektrale Kanäle besitzen - üblicherweise mehr als 100. Mit diesen kann die spektrale Signatur eines einzelnen Pixels wesentlich genauer abgebildet werden als mit den Kanälen multispektraler Sensoren, da die spektrale Eigenschaft eines Pixels durch die Vielzahl an spektralen Kanälen die

erfassen viel weiter differenziert wird als es bei der geringeren Anzahl an multispektraler Kanäle möglich ist. Abbildung 37 illustriert die Unterschiede zwischen multi- und hyperspektraler Pixelinformation anhand eines Vegetationsspektrums für die Sensoren IKONOS, Landsat und dem flugzeuggetragenen hyperspektralen Sensorsystem HyMap.

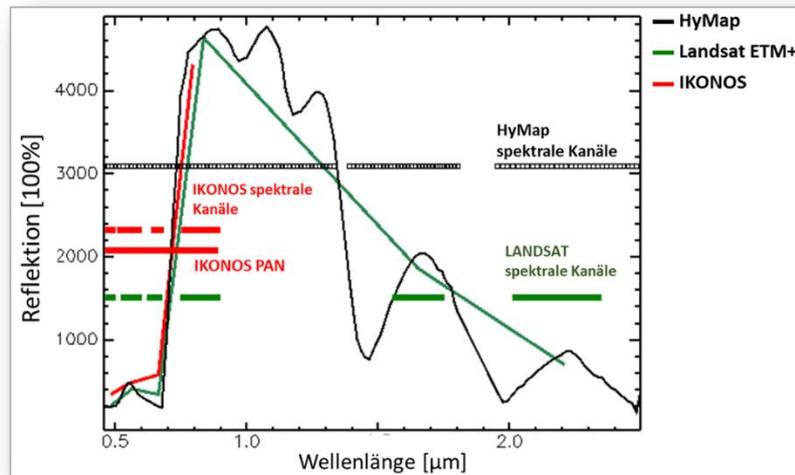


Abbildung 37: Vergleich der Vegetationsspektren abgeleitet aus Fernerkundungsdaten des hyperspektralen HyMAP Sensors und des multispektralen Landsat bzw. IKONOS Satelliten. Quelle: DLR

Da für jeden spektralen Kanal eine ausreichende Menge Licht aufgefangen werden muss, sind bei hyperspektralen Sensoren die Pixel entweder sehr groß (ca. 30 m, wie bei der geplanten Satellitenmission EnMAP) oder die Abdeckung des Gebiets ist relativ klein, wie bei den flugzeuggetragenen Sensoren HyMAP oder HySpex. Mit den flugzeuggetragenen Sensoren können räumliche Auflösungen von unter 2 m erreicht werden, bei einem Aufnahmestreifen mit einer Bildbreite von ca. 2 km (die Flugstreifen können aber 10 km lang sein). Da solche Sensoren hauptsächlich im Forschungsbetrieb geflogen werden, ist es noch nicht üblich, wie es bei RGB Luftbildkameras der Fall ist, ganze Städte zu befliegen.

Aufgrund der vielen Kanäle besteht bei Hyperspektralsensoren eine Aufnahme nicht etwa aus 5-10 Einzelaufnahmen wie bei multispektralen Systemen, sondern aus >100 Bändern (ein Grauwertbild für jeden spektralen Kanal, d.h. eine Aufnahme pro Kanal). Dementsprechend sind die Datengröße und damit der Speicherbedarf wesentlich höher als bei herkömmlichen Bilddaten, was wiederum großflächige Analysen von hochaufgelöste Hyperspektraldaten auf Standardrechnerinfrastruktur schwierig macht. Durch geeignete Algorithmen und leistungsfähige Rechner kann diese Herausforderung aber mittlerweile bewerkstelligt werden.

Wie bereits erwähnt gibt es in einem Hyperspektralbild für jedes Pixel nicht nur RGB Daten, sondern fast kontinuierliche Pixelwerte über das Spektrum im sichtbaren und nahinfraroten Bereich. Das Spektrum oder die spektrale Signatur beschreibt die physischen Merkmale der Oberfläche, wie Farbe oder Gehalt an Wasser oder bestimmten chemischen Verbindungen. Jedes Material hat dabei eine individuelle spektrale Signatur (Herold et al., 2004). Bei einer (automatisierten) Auswertung wird diese Information letztlich genutzt, um die Materialien im Bild zu identifizieren und klassifizieren. Die kann Dach- und Oberflächenmaterialien umfassen oder aber chemische Merkmale wie den Eisengehalt (Heiden et al., 2007). Abbildung 38 zeigt einen Vergleich von Hyperspektraldaten und Multispektraldaten für die Spektren von offenem Boden und roten Betondachziegeln. Mit dem Spektrum der Hyperspektralaufnahme ist es möglich weiter zu differenzieren. Es kann nicht nur offener Boden und rote Betondachziegel erkannt werden, sondern z.B. das Eisen im Boden oder der Kohlenwasserstoff in der Anstrichfarbe.

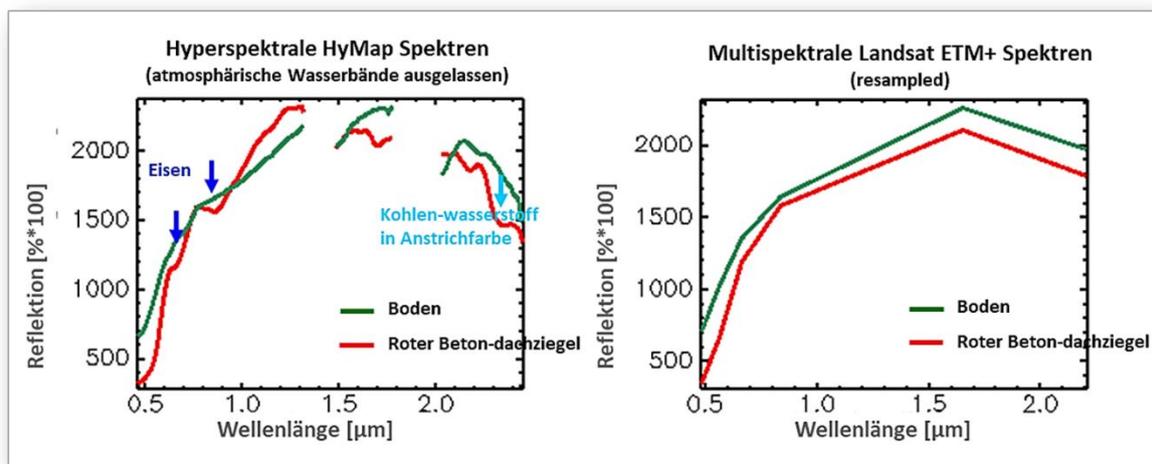


Abbildung 38: Vergleich der Spektren von offenem Boden und Betondachziegeln. Der Hyperspektralsensor HyMap bildet das ganze Spektrum ab und ermöglicht somit die Differenzierung beider Materialien, was auf Basis des Spektrums multispektraler Satelliten wie Landsat oder Ikonos nicht mehr möglich ist. Quelle: DLR

Wie die Abbildung 38 illustriert, eignen sich Hyperspektraldaten auch, um Informationen zu Gebäuden zu erheben. So ist es möglich, über Hyperspektralaufnahmen diverse Dachmaterialien und auch Umweltgefahrenstoffe zu identifizieren. Urbane Flächen sind sowohl durch Gebäude als auch durch offene Flächen, wie Vegetations-, Wasser- und Bodenflächen und asphaltierte Bereiche wie Straßen und Plätze gekennzeichnet. Die Oberflächenmaterialien in urban geprägten Gebieten lassen sich in künstliche und natürliche Materialien unterteilen. Mit Hyperspektraldaten könne die einzelnen Oberflächenmaterialien auf Grund der Vielzahl von spektralen Signaturen, wie oben bereits erklärt, besonders gut differenziert werden.

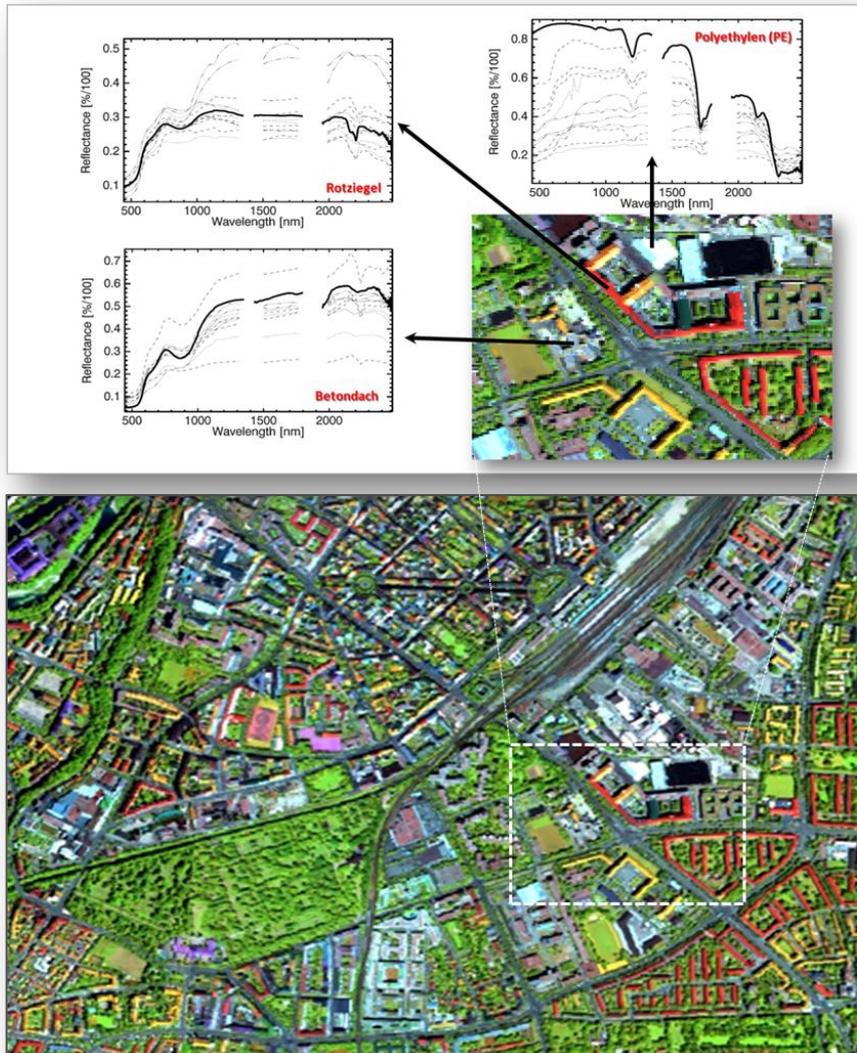


Abbildung 39: Falschfarbendarstellung eines HyMap Hyperspektralbildes von München (Ostbahnhof) und Kartierung von Oberflächenmaterialien mittels spektraler Entmischung. Quelle: DLR

Dächer lassen sich z.B. in die Gruppen mineralisch, metallisch, aus Kohlenwasserstoffverbindungen oder aus organischen Materialien unterteilen. Je nach Land und Aufnahmesystem weist die spektrale Signatur der einzelnen Baustoffe jedoch Unterschiede auf, die auch noch weiter durch Farbe, Beschichtung, Verwitterung und Abnutzung verändert werden. Um diese Effekte zu minimieren, ist es notwendig diese Variationen zu ermitteln und deren Einfluss auf die spektrale Reflexion festzustellen. In spektralen Bibliotheken sind detailliert die spektralen Eigenschaften der einzelnen Materialien gespeichert, aufgenommen in Feldkampagnen und über Bildanalysen. Dies ermöglicht es Materialien anhand ihrer spektralen Signatur in Daten unterschiedlicher spektraler und räumlicher Auflösung sowie unter diversen Umweltbedingungen zu erkennen. Spektrale Bibliotheken sind eine wichtige Informationsquelle, Hyperspektralaufnahmen zu prozessieren und klassifizieren (Roessner et al., 2011). Bei der Klassifikation können entweder bereits bestehende

spektrale Bibliotheken verwendet werden oder eine eigens für das Untersuchungsgebiet erstellte Bibliothek, meist aus dem zu untersuchenden Bild selbst abgeleitet.

Abbildung 39 zeigt eine falschfarbenen Darstellung eines Hyperspektraldatensatzes des flugzeuggetragenen Sensors HyMap. Diese Darstellung hebt schon optisch die verschiedenen Dachmaterialien hervor: die roten Ziegeldächer erscheinen gelb, schwarze Ziegeldächer rot, die Metaldächer lila, die Straßen grau und die Vegetation grün.

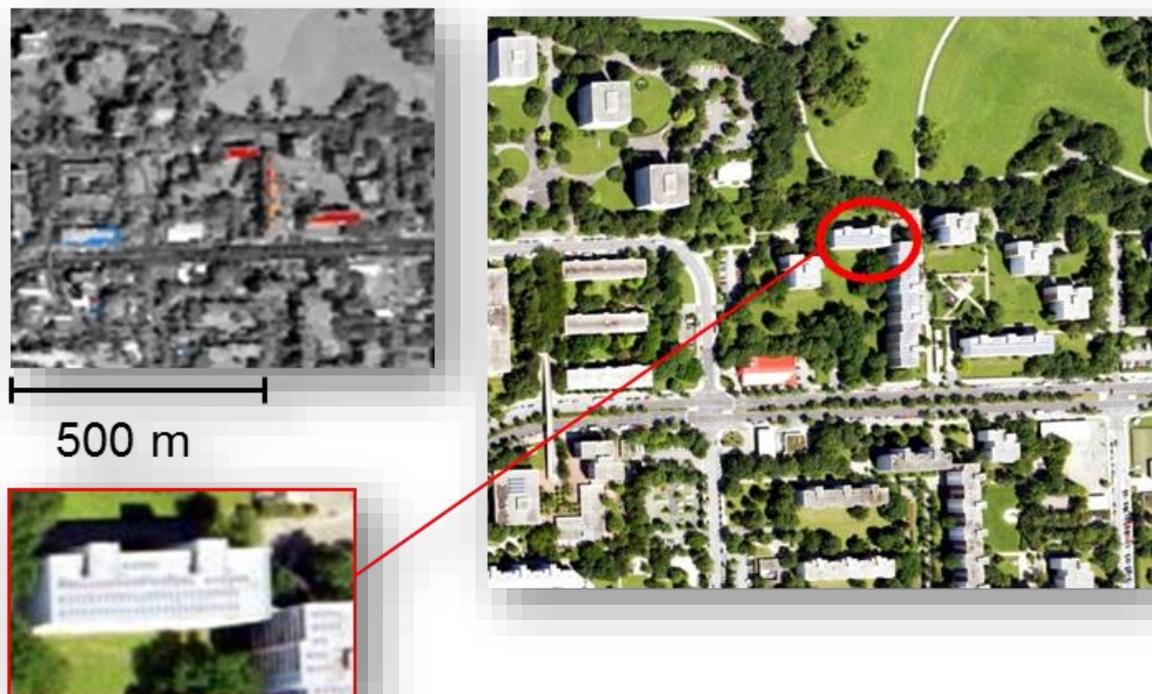


Abbildung 40: Ergebnis einer Kartierung von Solaranlagen basierend auf Hyperspektraldaten. Quelle: DLR

Diese Unterschiede können mit verschiedenen Methoden zu Nutzen gemacht werden, um eine Kartierung der Dach- und Oberflächenmaterialien zu erstellen. Um ein solches Material abzuleiten, wird – wie in Abbildung 40 illustriert - beispielsweise ein spektraler Entmischungsansatz verwendet (Heiden et al., 2012). Da innerhalb von einem Pixel auf Grund der kleinräumigen Objekte in der Stadt meist mehrere Materialien sind, ist auch das gemessene Spektrum im Bild eine Mischung diese Materialien. Um sie zu ‚entmischen‘ sind reine Spektren, also von nur ein Material nötig.

Diese können aus dem Bild selbst abgeleitet werden (Rogge et al., 2007), oder auch aus einer externen spektralen Bibliothek, wie oben bereits erklärt.

Darüber hinaus können weitere Oberflächen unterschieden werden, etwa vollversiegelte Materialien wie Asphalt und teilversiegelte bzw. verdichtete wie Kies oder Splitt (Heiden et al., 2012), was wiederum für detaillierte Versiegelungsstudien interessant ist.

Hyperspektraldaten eignen sich auch um bestimmte Umweltgefahrenstoffen zu detektieren, wie z.B. Asbest. Bassani et al. (2007) zeigten die Identifikation von Asbest mittels des Hyperspektralsensors MIVIS. Für die Identifikation und eine anschließende Klassifikation, wobei unterschiedliche Alterungsstufen unterschieden werden, ist vor allem der kurzwellige Infrarot-Bereich sehr wichtig (Bonifazi et al., 2018).

Neben Dachmaterialien und Umweltgefahrenstoffen können Photovoltaikanlagen auf Dächern sehr gut erkannt und problemlos von optisch ähnlichen Dachfenstern oder Wintergärten unterschieden werden (Czirjak, 2017).

Hyperspektralfernerkundung im urbanen Bereich ist aktuell nur mit flugzeuggetragenen Systemen möglich, da es nur wenige Satelliten gibt, die mit Hyperspektral aufnehmen und diese auch nur mit einer Auflösung, die zu gering und somit nicht nutzbar ist für Analysen zum Gebäudebestand oder Siedlungskörper. Mit dem Satelliten EnMAP sollte die hyperspektrale Satellitenfernerkundung in Zukunft aber besser möglich sein. Der Satellitenstart ist für Ende 2021 geplant. Über EnMap könnten dann deutlich größere Flächen aufgenommen werden als mit flugzeuggetragenen Systemen. Jedoch ist zu beachten, dass die Auflösung auch nur bei 30 m liegen wird. Aktuell sind die Verfahren im Bereich der Hyperspektralfernerkundung noch experimentell.

3.3.2 Fassadenauswertung

Für die energetische Beschreibung der Gebäude sind die Fassaden ein wichtiger Parameter. Mit gängigen Fernerkundungsdaten sind Fassaden allerdings nicht sichtbar. Neue Datensätze, wie von mobile Sensoren auf fahrenden Autos (z.B. Google Streetview) oder auch Schrägluftbilder (z.B. im CityGML von Berlin - (Geoportal Berlin, 2013), bieten hier neue Möglichkeiten. Meistens werden diese Fotos nur zur Visualisierung benutzt - zum Beispiel zur Texturierung der Fassaden in 3D Gebäudemodellen - und sind daher meist nicht spektral kalibriert. Aber über die Form und Farbe der Objekte können mit Methoden der künstlichen Intelligenz wichtige Merkmale systematisch abgeleitet werden. Dies zeigt z.B. die Arbeit von Mönks (2019), in deren Rahmen neuronale Netze trainiert wurden, um Fensterflächen an Fassaden auf Basis von Schrägluftbilddaten aus dem CityGML Daten von Berlin zu identifizieren (s. Abbildung 41).

Häufig werden auch Thermaldaten benutzt, um in Aufnahmen für einzelne Gebäude die Fassadendämmung zu untersuchen. Auf Grund der meist fehlenden Georeferenzierung solcher

Thermalbilder ist hier eine systematische und großflächige Auswertung noch Gegenstand der Forschung (Lin et al., 2019).

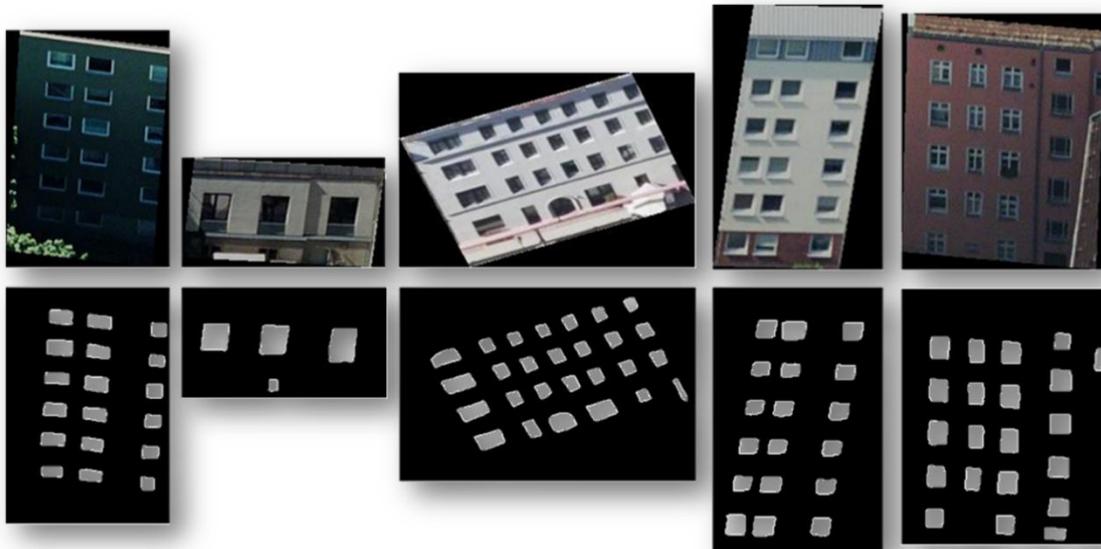


Abbildung 41: Kartierung des Fensteranteils an Fassaden mittels Methoden der künstlichen Intelligenz (Deep Learning). Quelle: (Mönks, 2019)

3.3.3 Gebäudetomograph

Ein weiterer experimenteller Ansatz ist das Projekt Gtom des DLR. Im Rahmen des Projektes Gtom soll ein Messsystem für die berührungslose energetische Analyse von Gebäudehüllen entwickelt werden. Vier DLR-Institute ermitteln mit Hilfe von Fernerkundungsdaten Verfahren für die Untersuchung der energetischen Eigenschaften von Gebäudehüllen, um in Zukunft Schwachstellen in Gebäudehüllen identifizieren zu können und Rückschlüsse auf Ursachen von erhöhtem Energieverlust ermöglichen zu können. Eine großflächige Erfassung des Gebäudebestandes in Deutschland ist notwendig um sanierungsbedürftige Gebäude zu identifizieren, sowie die Entwicklung von Methoden energetische Eigenschaften einzelner Gebäude präzise und kostengünstig zu vermessen. Im Projekt Gtom werden mit moderner Mess- und Sensortechnik Daten gewonnen und in Gebäudemodellen zusammengeführt. Die Modelle können dann u.a. die Grundlage für energetische Simulationen und individuell angepasste Sanierungspläne bilden sowie Messungen nach der Durchführung von Sanierungsmaßnahmen zur Qualitätssicherung dienen können. Neben optischen Aufnahmen im sichtbaren und Infrarotbereich sowie Hyperspektralaufnahmen sind Radar-

und Ultraschallmessungen eine weitere Datenquelle um eine dreidimensionale Analyse der Außenhülle eines Gebäudes durchführen zu können (Institut für Solarforschung (DLR), 2020).

4 Methodenbewertung und Datenmodell

4.1 Methodenbewertung

Im Folgenden werden die Methoden zur Berechnung von 10 Parametern der in Kapitel 3 vorgestellten Fallbeispiele bewertet. Die Bewertung erfolgt anhand von drei Tabellen zu den Themen Produktinformation, Kosten und Implementierungsaufwand in Verwaltungsstrukturen sowie Effizienz in der Anwendbarkeit.

Tabelle 1: Produktinformation

Parameter	Quelle / Produktname	Aktualität / Kontinuität	Flächende- ckung	Räumliche Detaillierung	Lagegenauigkeit	Thematische Detaillierung	Dateiformat (Raster/Vektor)
Bauvolumen	HU LoD1/2 Bezugseinheit*	HU: 01.04.2019 / 1 Jahr LoD1: 04/2020 / 1 Jahr	deutschland- weit	gebäudescharf	hohe geometrische Genauigkeit** (LoD Höhen Genauigkeit: meist LoD1 5 m, LoD2 1 m)	Kontinuierliche Daten (m ³)	HU: Vektor (Shape-Format) LoD1/2: CityGML
Geschossflä- chenzahl	HU LoD1/2 Grundstückskata- ster***	HU: 01.04.2019 / 1 Jahr LoD1: 04/2020 / 1 Jahr	deutschland- weit	gebäudescharf	hohe geometrische Genauigkeit** (LoD Höhen Genauigkeit: meist LoD1 5 m, LoD2 1m)	Kontinuierliche Daten (m ² Ge- schossfläche je m ² Grund- stücksfläche)	HU: Vektor (Shape-Format) LoD1/2: CityGML
Nutzung	LoD1/2	LoD1: 04/2020 / 1 Jahr LoD2: 01.10.2020 / 1 Jahr	deutschland- weit	gebäudescharf	hohe geometrische Genauigkeit** (Hö- hengenaugkeit: meist LoD1 5 m, LoD2 1m)	3 oder 11 Klas- sen	LoD1/2: CityGML

Parameter	Quelle / Produktname	Aktualität / Kontinuität	Flächende- ckung	Räumliche Detaillierung	Lagegenauigkeit	Thematische Detaillierung	Dateiformat (Raster/Vektor)
Dachform	LoD2	LoD2: 01.10.2020 / 1 Jahr	deutschland- weit	gebäudescharf	hohe geometrische Genauigkeit** (Hö- hengenaugkeit: meist LoD1 5 m, LoD2 1 m)	15 Klassen	LoD2: CityGML, 3DShape, DXF, 3DS
Gründächer	LoD2 DOP20	LoD2: 01.10.2020 / 1 Jahr DOP20: 2014 – 2020 / laufend, 3- jähriger Aktuali- sierungszyklus der Länder	deutschland- weit	gebäudescharf DOP20: 20 cm	LoD2: hohe geo- metrische Genauig- keit** (Höhen- genaugkeit: meist LoD1 5 m, LoD2 1 m) DOP20: < 0,4 m	2 Klassen (zus. Flächen- anteil prozen- tual oder in m ² möglich)	LoD2: CityGML, 3DShape, DXF, 3DS DOP20: Raster
Solaranlagen	HU DOP20 HySpex	HU: 01.04.2019 / 1 Jahr DOP20: 2014 – 2020 / laufend	HU, DOP20, MaStR: deutschland- weit	HU: gebäude- scharf DOP20: 20 cm Hyperspektral: abhängig vom	DOP20: < 0,4 m Hyperspektral: ab- hängig vom Auf- nahmesystem, hier: 1,2 - 2,4 m	2 Klassen	HU: Vektor DOP20/ Hyper- spektral: Raster MaStR: CSV

Parameter	Quelle / Produktname	Aktualität / Kontinuität	Flächende- ckung	Räumliche Detaillierung	Lagegenauigkeit	Thematische Detaillierung	Dateiformat (Raster/Vektor)
Solaranlagen	Marktstammdatenregister (MaStR)	Hyperspektral: auf Anfrage/konkreter Bedarf MaStR: kontinuierlich	Hyperspektral nur lokal	Aufnahmesystem, hier 1,2m MaStR: Adresse			
Dachmaterial	HySpex	auf Anfrage/konkreter Bedarf	lokal	abhängig vom Aufnahmesystem, hier 1,2m	abhängig vom Aufnahmesystem, hier: 1,2 - 2,4 m	13 Klassen	Raster
Versiegelungsgrad	Sentinel-2	S-2: seit 23.06.2015 / 5 Tage	deutschlandweit	10 m	3 m	Kontinuierliche Daten (Prozent)	Raster
Versiegelungseffizienz	Sentinel-2 LoD2	S-2: seit 23.06.2015 / 5 Tage LoD2: 01.10.2020 / 1 Jahr	deutschlandweit	S-2: 10 m LoD2: gebäudescharf	S-2: 3 m LoD2: hohe geometrische Genauigkeit**	Kontinuierliche Daten (m ³)	S-2: Raster LoD2: CityGML, 3DShape, DXF, 3DS

Parameter	Quelle / Produktname	Aktualität / Kontinuität	Flächende- ckung	Räumliche Detaillierung	Lagegenauigkeit	Thematische Detaillierung	Dateiformat (Raster/Vektor)
Versiege- lungseffizienz					(Höhengenauigkeit: meist LoD1/2 5 m/1 m)		
Bebauungs- dichte	HU Bezugseinheit*	HU: 01.04.2019 / 1 Jahr	deutschland- weit	gebäudescharf	HU: hohe geometri- sche Genauigkeit**	Kontinuierliche Daten (Prozent)	Vektor (Shape- Format)

* mögliche Bezugseinheiten: Baublöcke, Quartiere, Bezirke, Städte, Kreise, Regionen, Bundesländer

** entsprechend der BKG Produktspezifikationen

*** Produktinformation abhängig vom jeweiligen Bundesland

Tabelle 2: Kosten und Implementierungsaufwand in Verwaltungsstrukturen

Parameter	Beschaffungskosten (Grundlagendaten)	Beschaffungsaufwand (Grundlagendaten)	Nutzungsrechte / -beschränkungen	Implementierung in Verwaltungsstrukturen	Form der Lieferung (Web Dienst/Digitale Daten)
Bauvolumen	keine (s. Nutzungsrechte)	gering	s. BKG Nutzungsrechte; Datenurheber Vermessungsverwaltungen der Länder; Nutzungsberechtigte Bundesbehörden, Zuwendungsempfänger	Zugriff gewährleistet (BKG Daten)	Digitale Daten
Geschossflächenzahl	keine (s. Nutzungsrechte)	gering	s. BKG Nutzungsrechte; Datenurheber Vermessungsverwaltungen der Länder; Nutzungsberechtigte Bundesbehörden, Zuwendungsempfänger	Zugriff gewährleistet (BKG Daten)	Digitale Daten
Nutzung	keine (s. Nutzungsrechte)	gering	s. BKG Nutzungsrechte; Datenurheber Vermessungsverwaltungen der Länder;	Zugriff gewährleistet (BKG Daten)	Digitale Daten

Parameter	Beschaffungskosten (Grundlagendaten)	Beschaffungsaufwand (Grundlagendaten)	Nutzungsrechte / -beschränkungen	Implementierung in Verwaltungsstrukturen	Form der Lieferung (Web Dienst/Digitale Daten)
Nutzung			Nutzungsberechtigte Bundesbehörden, Zuwendungsempfänger		
Dachform	keine (s. Nutzungsrechte)	gering	s. BKG Nutzungsrechte; Datenurheber Vermessungsverwaltungen der Länder; Nutzungsberechtigte Bundesbehörden, Zuwendungsempfänger	Zugriff gewährleistet (BKG Daten)	Digitale Daten
Gründächer	keine (s. Nutzungsrechte)	gering	s. BKG Nutzungsrechte; Datenurheber Vermessungsverwaltungen der Länder; Nutzungsberechtigte Bundesbehörden, Zuwendungsempfänger	Zugriff gewährleistet (BKG Daten)	Digitale Daten
Solaranlagen	BKG Daten: keine (s. Nutzungsrechte)	KI Methode: mittel	s. BKG Nutzungsrechte; Datenurheber Vermessungsverwaltungen der	Zugriff gewährleistet (BKG Daten)	Digitale Daten

Parameter	Beschaffungskosten (Grundlagendaten)	Beschaffungsaufwand (Grundlagendaten)	Nutzungsrechte / -beschränkungen	Implementierung in Verwaltungsstrukturen	Form der Lieferung (Web Dienst/Digitale Daten)
Solaranlagen	Befliegungskampagne Hyperspektral: Individuell (abhängig von Anbieter, Messtechnik und örtlichen Gegebenheiten, ca. 3000 €/h)	Hyperspektralmethode: hoch	Länder; Nutzungsberechtigte Jedermann Hyperspektral: abhängig von Befliegungskampagne s. MaStR Nutzungsrechte*	Hyperspektral: Individuell (abhängig von Befliegungskampagne)	
Dachmaterial	Individuell (abhängig von Anbieter, Messtechnik und örtlichen Gegebenheiten, ca. 3000 €/h)	hoch	abhängig von Befliegungskampagne	Individuell (abhängig von Befliegungskampagne)	Digitale Daten
Versiegelungsgrad	Kostenfreie Fernerkundungsdaten	mittel	s. Copernicus Nutzungsrechte**	Zugriff gewährleistet (BKG Daten, Copernicus-Dienste)	Digitale Daten

Parameter	Beschaffungskosten (Grundlagendaten)	Beschaffungsaufwand (Grundlagendaten)	Nutzungsrechte / -beschränkungen	Implementierung in Verwaltungsstrukturen	Form der Lieferung (Web Dienst/Digitale Daten)
Versiege- lungseffizi- enz	Kostenfreie Ferner- kundungsdaten keine (s. Nutzungs- rechte)	mittel	s. Copernicus Nutzungs- rechte** s. BKG Nutzungsrechte; Datenurheber Vermes- sungsverwaltungen der Länder; Nutzungsberech- tigte Bundesbehörden, Zu- wendungsempfänger (LoD2)	Zugriff gewährleistet (BKG Daten, Copernicus- Dienste)	Digitale Daten
Bebauungs- dichte	keine (s. Nutzungs- rechte)	gering	s. BKG Nutzungsrechte; Datenurheber Vermes- sungsverwaltungen der Länder; Nutzungsberech- tigte Bundesbehörden, Zu- wendungsempfänger	Zugriff gewährleistet (BKG Daten)	Digitale Daten

* <http://www.gesetze-im-internet.de/mastrv/BJNR084210017.html#BJNR084210017BJNG000400000>

** <https://www.copernicus.eu/de/wie-man-es-macht/urheberrecht-und-lizenzen>

Tabelle 3: Effizienz in der Anwendbarkeit

Parameter	Vorverarbeitungsaufwand	Entwicklungsstatus	Automatisierungsgrad
Bauvolumen	mittel	Prototypisch	automatisiert
Geschossflächenzahl	mittel	Prototypisch	teilautomatisiert
Nutzung	mittel	Prototypisch	teilautomatisiert
Dachform	gering	Prototypisch	automatisiert
Gründächer	hoch	Operationell	teilautomatisiert
Solaranlagen	hoch	Prototypisch	teilautomatisiert
Dachmaterial	hoch	Prototypisch	teilautomatisiert
Versiegelungsgrad	hoch	Operationell	automatisiert
Versiegelungseffizienz	hoch	Prototypisch	teilautomatisiert
Bebauungsdichte	mittel	Prototypisch	automatisiert

4.2 Datenmodell

Als Basis für das Datenmodell wurde das aus den GMLS City Daten generierte Shapefile mit dem Gebäude als kleinste Einheit gewählt. Die einzelnen Gebäude und Gebäudeteile, welche sich über einen eindeutigen Objektidentifikator unterscheiden lassen, wurden mit Attributen zu den jeweiligen Parametern der jeweiligen Methode versehen. Der Objektidentifikator beginnt immer mit „DE“ und einer zweistelligen Kurzbezeichnung für das Land „BL“, gefolgt von einem einmaligen Zahlencode, wie "DEMV_110e8edf-dda2-4130-a564-87b2a3cb3f35" (Bezirksregierung Köln, 2014). Das Shapefile lässt sich mit beliebigen Bezugseinheiten kombinieren um räumliche Strukturen erkennen zu können und eine Aussage über diverse administrative Ebenen treffen zu können. Bezugseinheiten können Grundstücke, Baublöcke, Quartiere, Bezirke, Städte, (Land)Kreise, Verwaltungsgemeinschaften, Regierungsbezirke, Länder o.ä. sein. Die Bundesländer verfügen über eine unterschiedliche Einteilung ihrer administrativen Ebenen.

Im Folgenden wird die Herangehensweise für die betrachteten Parameter beschrieben, welche notwendig war um das Datenmodell entsprechend mit Informationen zu den einzelnen Gebäuden zu befüllen. Des Weiteren wird noch auf die Herangehensweise für die Parameter Versiegelung und Bebauungsdichte, welche den Siedlungskörper und nicht einzelne Gebäude betreffen, eingegangen.

4.2.1 Bauvolumen und Geschossflächenzahl

Das Bauvolumen, wie in Kapitel 3.1.1 detaillierter beschrieben, lässt sich auf Basis der Gebäudeumrisse und -höhe berechnen. Durch die Kombination mit einer beliebigen Bezugsgröße kann ein Flächenbezug der Gebäude zu einer betrachteten Raumeinheit hergestellt werden, um beispielsweise eine Aussage über das Bauvolumen eines Stadtviertels treffen zu können. Mögliche Bezugsgrößen sind einzelne Grundstücke, Baublöcke, Quartiere, Bezirke, Städte, Kreise, Länder usw. Das Bauvolumen wurde im Rahmen des Projektes für ganz Deutschland berechnet und beispielhaft auf die administrative Einheit der Bundesländer sowie die Bezirke der Stadt Berlin bezogen (Abbildung 42).

Die kleinste für das Projekt zur Verfügung stehende Bezugseinheit sind Baublöcke. Baublöcke sind Flächen, welche sich an städtebaulichen und natürlichen Strukturen orientieren und somit räumliche Einheiten, welche von allen Seiten von Straßen, natürlichen Grenzen wie Wasserläufen oder baulichen Grenzen wie Bahnlinien umschlossen sind (Hochschule Bochum, 2021). Bezogen auf die Baublöcke der Stadt Berlin beträgt das durchschnittliche Bauvolumen je Baublock ca. 49.316 m³. Je Gebäude liegt das durchschnittliche Bauvolumen Berlins bei ca. 1352 m³. Die Summe des

Bauvolumens für Berlin beträgt ca. 1.31 Milliarden m³. Abbildung 42 zeigt die Verteilung des Bauvolumens auf die 12 Stadtbezirke Berlins.

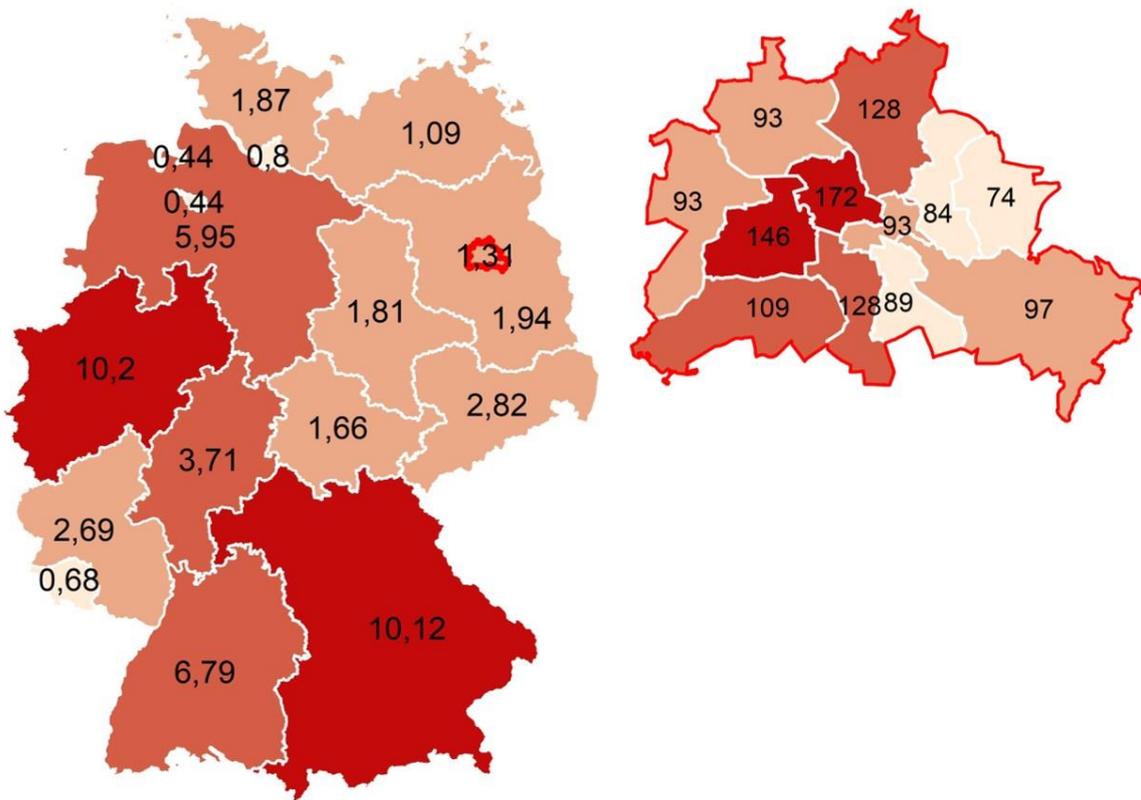


Abbildung 42: Gesamtes Bauvolumen je Bundesland in Milliarden m³ (links) und je Bezirk der Stadt Berlin in Millionen m³ (rechts). Quelle: DLR/BKG.

Die Geschossflächenzahl gibt das Verhältnis aller Vollgeschossflächen zu der Baugrundstücksfläche an, d.h. wie viel Quadratmeter Stockwerksfläche je Quadratmeter Grundstücksfläche gebaut werden dürfen (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2017). Für die Berechnung der Geschossflächenzahl wird neben der Grundfläche des Gebäudes und der Gebäudehöhe noch die durchschnittliche Stockwerkshöhe sowie die Grundstücksfläche benötigt. Die durchschnittliche Stockwerkshöhe dient, um an Hand der Gebäudehöhe berechnen zu können, wie viele Stockwerke ein Haus hat, umso wiederum die Geschossfläche des gesamten Gebäudes in Quadratmetern zu berechnen (Anzahl der Stockwerke x Gebäudegrundfläche). Die durchschnittliche Stockwerkshöhe ist abhängig von der Gebäudenutzung, welche den LoD2 Daten entnommen werden kann. Für Wohnhäuser beträgt die Standardgeschosshöhe 2,75 Meter, für Bürogebäude 3,5 m. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass nur Vollgeschosse als Geschosse zählen und nur die Quadratmeterzahl der Vollgeschoss bei der Berechnung der gesamten Geschossfläche eines Gebäudes zu berücksichtigen ist. Da auf Grund der Datenbasis jedoch nicht festgestellt werden

kann, ob Gebäude z.B. ein ausgebautes Dach oder Keller haben oder nicht, muss dies vernachlässigt werden. Für Industrie- und Lagerhallen gilt die Baumassezahl, das Volumen vom Gebäude, als Einheit und nicht die Geschossflächenzahl (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2017). Auf Grund der Nutzung können diese Gebäude bei der Berechnung der GFZ vernachlässigt werden. Die Grundstücksflächen können bei den jeweiligen Katasterämtern der Bundesländer bezogen werden. Das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie verfügt bislang noch nicht über einen deutschlandweiten Datensatz zu den Grundstücksflächen. Die Geschossflächenzahl lässt sich anhand der gesamten Geschossfläche des Gebäudes und der Grundstücksfläche des jeweiligen Gebäudes wie folgt berechnen (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2017):

$$GFZ = \text{Geschossfläche in m}^2 / \text{Grundstücksfläche in m}^2$$

Da für die Berechnung der GFZ die Grundstücksflächen im Rahmen des laufenden Projektes nicht zu Verfügung stehen, gibt es hierzu, zusätzlich zu der Theorie, keine beispielhafte Berechnung für Deutschland.

4.2.2 Gebäudenutzung

Die Gebäudenutzung wurde in zwei Formen der Einteilung für die Stadt Berlin durchgeführt. Bei Einteilung 1 wurde die genaue Gebäudenutzung, welche Teil der Attribute der LoD1 und LoD2 Daten ist, jeweils einer der drei Klassen Wohngebäude, Gemischte Nutzung und Nichtwohngebäude zugeteilt.

Bei Einteilung 2 wurden die Klassen Wohngebäude und Nichtwohngebäude nochmals detaillierter, mit Bezug auf ihre spezifische Nutzung, in weitere Unterklassen unterteilt. Für die Klasse Wohngebäude wird zwischen Ein- und Zweifamilienhäuser (EFH/ZFH) und Mehrfamilienhäusern (MFH) unterschieden. Diese Unterteilung war teils Anhand der spezifischen Nutzung auf Basis der LoD2 Daten möglich, wenn aus diesen klar hervorging, dass es sich um ein Gebäude mit mehreren Wohneinheiten (z.B. Studentenwohnheim) oder nur einer Wohneinheit (z.B. Forsthaus) handelt. Um jedoch eine Unterteilung der Objektarten Wohnhaus und -gebäude in EMH/ZFM und MFH zu ermöglichen, musste auf ein weiteres Attribut, die Gebäudehöhe, zurückgegriffen werden, da aus den zwei Objektarten die tatsächliche Nutzung nicht hervorging, diese jedoch ein Großteil der Wohngebäude ausmachen. Hierbei wurde angenommen, dass es sich bei Gebäuden mit einer Höhe von ≤ 10 Metern um ein EFH/ZFH handelt und bei Gebäuden mit einer Höhe > 10 Metern um ein MFH. Die 10 Meter Grenzhöhe wurde auf Basis von höchstens drei Stockwerken mit durchschnittlicher Geschosshöhe von je 2,75 für EFH/ZFH angesetzt. Diese Berechnung ermöglicht nur eine grobe Einschätzung der Nutzung der Wohngebäude als EFH/ZFH oder MFH, da

Gebäudehöhen beider Unterklassen von dieser Annahme abweichen können. Durch die Hinzunahme weiterer Parameter wie die Geschossfläche, könnte das Ergebnis weiter verfeinert werden. Die Unterteilung der Klasse Nichtwohngebäude erfolgte in die folgenden acht Unterklassen: Gewerbe/Dienstleistungen, Industrie, Freizeit/Erholung, Regierungsgebäude, Bildung/Forschung, Gesundheit, Sicherheit, Sakrale Gebäude. Die Nutzungsformen der Nichtwohngebäude mit 203 verschiedenen Nutzungen, 176 davon gab es auch in Berlin, ist weitaus diverser als die der Wohngebäude mit lediglich 12, 11 davon in Berlin, Nutzungsformen. Für Gebäude gemischter Nutzung gibt es 12 Formen, 7 davon traten in Berlin auf. Diese wurden nicht weiter unterteilt. Die vier Nutzungsformen – Überdachung, Garage, Carport, Nach Quellenlage nicht zu spezifizieren – vielen in die Klasse „Sonstiges“. Abbildung 43 zeigt, welche in Berlin vorkommende genaue Gebäudenutzung welcher Klasse und Unterklasse zugehört.

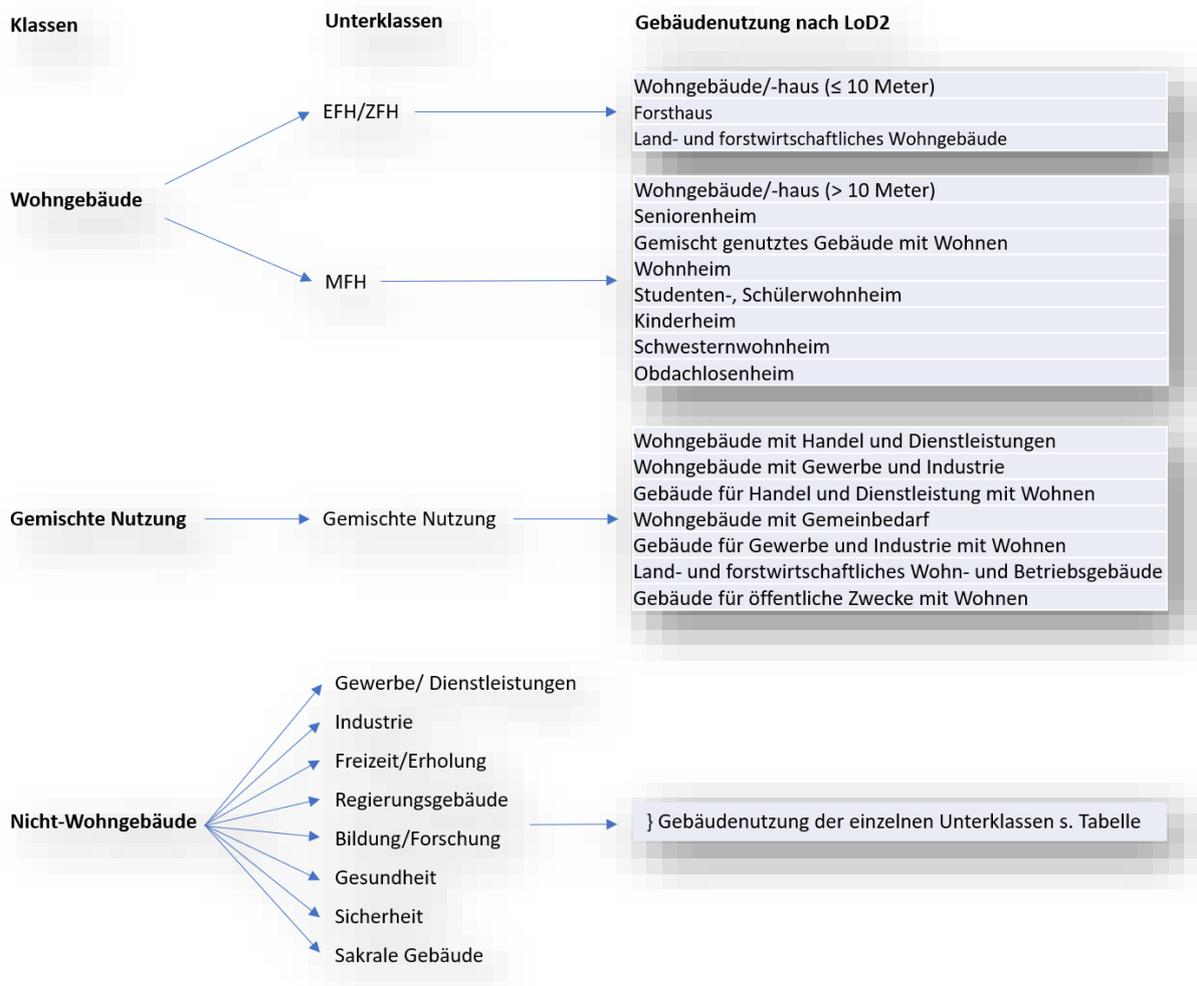


Abbildung 43: Klassifizierung der Gebäudenutzung in die drei Klassen Wohngebäude, Gemischte Nutzung, Nicht-Wohngebäude und jeweilige Unterklassen. Quelle: Eigene Darstellung.

Die exakte Gebäudenutzung die in die jeweilige Unterklasse der Nichtwohngebäude fällt, kann Tabelle 6 im Anhang entnommen werden.

Durch die Einteilung der Gebäude in die drei Klassen Wohngebäude, Gemischte Nutzung und Nicht-Wohngebäude, können räumliche Muster in der Gebäudenutzung erkannt werden. Die jeweilige Klassifizierung der drei Klassen in Unterklassen lassen eine feinere Einordnung zu und ermöglichen eine besondere Prägung von räumlichen Einheiten, wie Stadtvierteln, zu identifizieren.

In Tabelle 4 ist die Gebäudenutzung der drei Klassen sowie der 11 Unterklassen in Berlin nach absolutem Anteil sowie prozentualem Anteil an allen Gebäuden aufgeschlüsselt.

Tabelle 4: Gebäudenutzung Berlin. Quelle: DLR

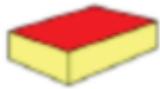
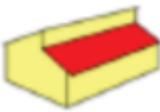
Klasse	Anteil		Unterklasse	Anteil	
	absolut	%		absolut	%
Wohngebäude	503150	56,89	EFH/ZFH	301964	34,14
			MFH	201186	22,75
Gemischte Nutzung	39225	4,44	Gemischte Nutzung	39225	4,44
Nicht-Wohngebäude	342021	38,67	Gewerbe/Dienstleistung	107865	12,20
			Industrie	29131	3,29
			Freizeit/Erholung	31760	3,59
			Regierungsgebäude	4348	0,49
			Bildung/Forschung	18260	2,06
			Gesundheit	5512	0,62
			Sicherheit	2006	0,23
			Sakrale Gebäude	4458	0,50
Sonstiges	138681	15,68			

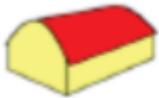
Das Ergebnis der Klassifikation ist abhängig von der Qualität der Eingangsdaten. Bei den LoD1 und LoD2 Daten sind Gebäude teilweise in Gebäudeteile unterteilt, dies kann Einfluss auf die Anzahl der Gebäude in den jeweiligen Klassen haben.

4.2.3 Dachform

Den LoD2 Daten lässt sich die generalisierte Dachform der einzelnen Gebäude entnehmen (s. Kap. 3.1.3). Die Dachform gibt nur die vereinfachte Dachform des jeweiligen Gebäudes wieder, jedoch nicht die tatsächliche Dachgeometrie und somit die reale Form des Daches. Für die Einordnung der Dächer werden diese deutschlandweit einer der 15 möglichen Dachformen der LoD2 Daten zugeordnet (Bayerische Vermessungsverwaltung, 2018). Tabelle 5 zeigt die 15 möglichen Dachformen des LoD2 Datensatzes und deren absolutes und prozentuales Vorkommen in Berlin und Deutschland. Die dominierende Dachform in Berlin sind Flachdächer, gefolgt von Satteldächern. Sie machen gemeinsam mit ca. 33% und ca. 28% über die Hälfte der Dächer Berlins aus. In Deutschland hingegen ist mit ca. 49 % das Satteldach die dominierende Dachform, gefolgt von Flachdächern mit ca. 26 %.

Tabelle 5: Einordnung der Dachformen und deren Vorkommen in Berlin und Deutschland. Grün umrandete Dachformen kommen für Gründächer in Frage. Quelle: DLR; (Bayerische Vermessungsverwaltung, 2018)

Dachform	Berlin		Deutschland		Beispiel
	absolut	%	absolut	%	
Flachdach	494654	33,02	28092669	25,86	
Pultdach	44900	3,00	6320947	5,82	
Versetztes Pultdach	0	0	31661	0,03	
Satteldach	425620	28,41	53339102	49,11	

Dachform	Berlin		Deutschland		Beispiel
	absolut	%	absolut	%	
Walmdach	107881	7,20	6347816	5,84	
Krüppelwalmdach	800	0,05	1673352	1,54	
Mansardendach	0	0	98373	0,09	
Zeltdach	31628	2,11	1373340	1,26	
Kegeldach	0	0	103510	0,10	
Kuppeldach	0	0	387632	0,36	
Sheddach	0	0	31003	0,03	
Bogendach	0	0	122383	0,11	
Turmdach	0	0	78875	0,07	
Mischform	182895	12,21	7442237	6,85	
Sonstiges	209516	13,99	3176815	2,92	

Die generalisierten Dachformen sind eine wichtige Basis für weiter Berechnungen zu den einzelnen Gebäuden, wie Dachbegrünung und Gründachpotential.

4.2.4 Dachbegrünung

Die Berechnung von Gründächern erfolgte am Beispiel der Stadt Berlin. Als Datenbasis dienten hierfür die LoD2 Daten, um sowohl die Dachform, als auch den Gebäudeumriss zu erhalten und die DOP20 Luftbilder für die Berechnung der Vegetationssignale von Dächern (s. Kap. 3.1.4). Nur die Fläche des Gebäudeumrisses wurde bei der Berechnung des Vegetationssignales auf Basis der DOP20 Luftbilddaten berücksichtigt. Gründächer sind nur bis zu einer bestimmten Dachneigung möglich, weshalb nur Dächer der Typen Flachdach, Pultdach und versetztes Pultdach (s. Tabelle 5 grün umrandet) als mögliche Gründächer in Betracht gezogen wurden. Gebäudeumrisse mit anderen Dachformen konnten von vornherein ausgeschlossen werden. Die Berechnung der Gründächer ist besonders von dem Vegetationssignal abhängig, welches u.a. auf Grund des Aufnahmedatums und somit unterschiedlicher Stärke des Vegetationssignales, da dieses abhängig von der phänologischen Jahreszeit und Vegetationszustand des jeweiligen Jahres ist, sehr divers sein kann. Auch die räumliche Lage des zu untersuchenden Gebietes hat Einfluss. Die Klassifizierung von Dächern zur Klasse der Gründächer, anhand des Vegetationssignals, kann den oben genannten Umständen entsprechend angepasst werden und es ist somit möglich den Ansatz deutschlandweit durchzuführen. Jedoch Bedarf es hierfür einer genauen Betrachtung der einzelnen Regionen.

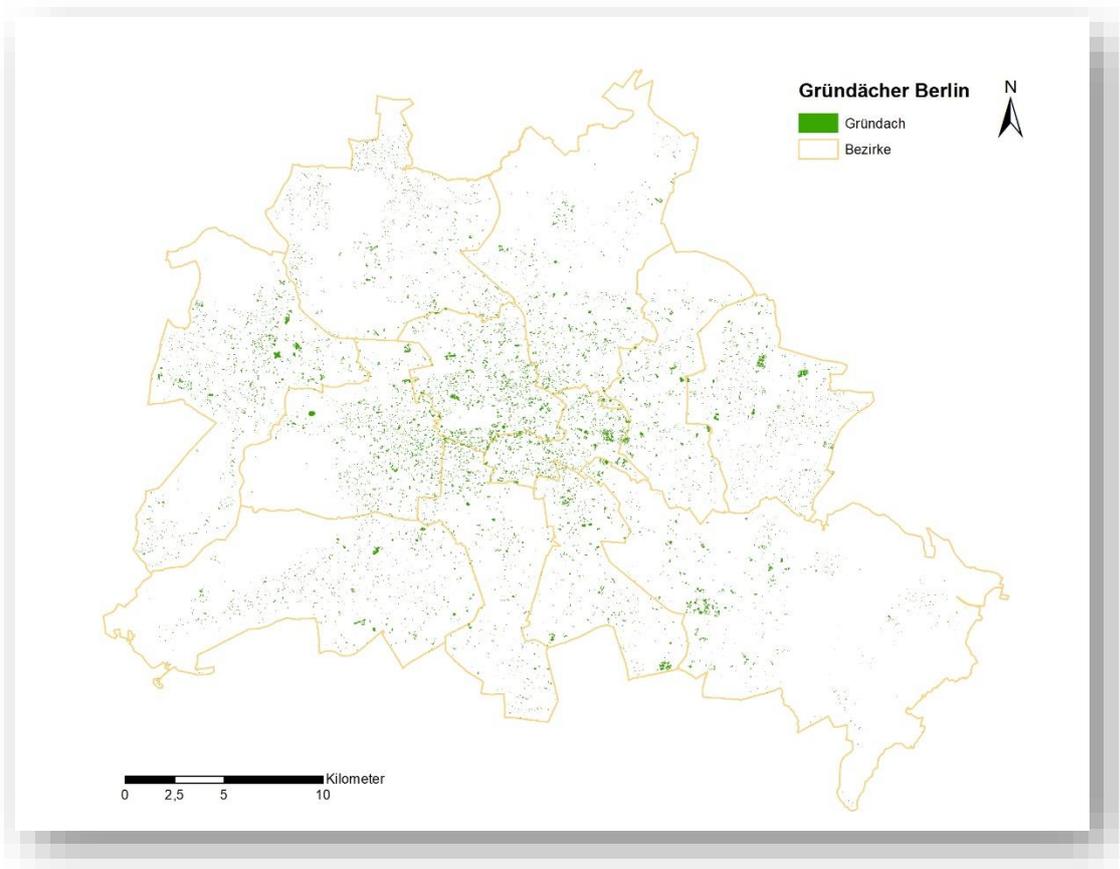


Abbildung 44: Gründächer Berlin. Quelle: DLR/BKG.

In Berlin wurden von 969.861 Dächern, 16.497 Dächer als Gründächer detektiert. Abbildung 44 zeigt die Verteilung der Gründächer in Berlin. Die begrünte Dachfläche macht eine Gesamtfläche von ca. 1,2 km² aus. Der Mittelwert des begrünten Dachanteiles je Dach beträgt ca. 72 m², wobei der Hauptteil der begrünten Dachflächen je Dach unter 50 m² liegt (Abbildung 45). Im Mittelwert sind bei Dächern mit Dachbegrünung ca. 35 Prozent des Daches begrünt. Ein Großteil der Dächer hat jedoch nur eine Dachbegrünung von 10 – 20 Prozent der jeweiligen Dachgesamtfläche (Abbildung 46).

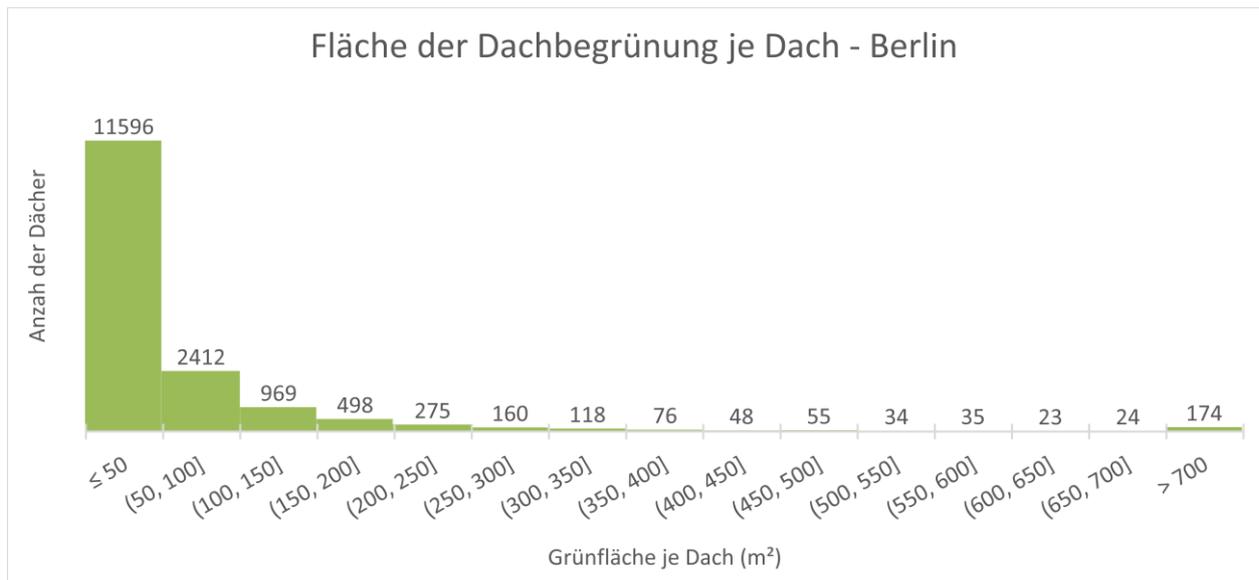


Abbildung 45: Fläche der Dachbegrünung in m² je Dach für die Stadt Berlin. Quelle: DLR.

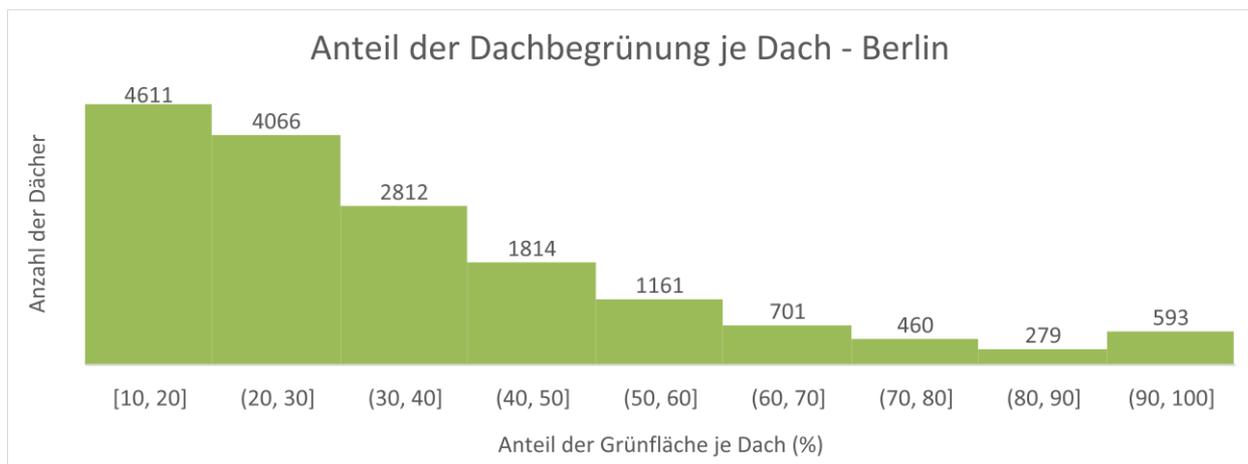


Abbildung 46: Anteil der Dachbegrünung in Prozent je Dach für die Stadt Berlin. Quelle: DLR.

Aufgrund von zu schwachen Vegetationssignalen einzelner Gründächer, sowie Baumkronen, welche über einem Dach liegen und auf den Luftbildern in den Grundumriss eines Daches fallen, kann es zu Fehlklassifikationen in beide Richtungen kommen. Mit Hilfe weiterer Parameter, wie

„Gebäudehöhe, ab der Bäume (Vegetation mit vergleichsweise sehr hohem Vegetationssignal) ignoriert werden“ oder eine minimales Vegetationssignal von Dächern, wurde versucht, die Zahl der Fehlklassifikationen möglichst gering zu halten. Fehlklassifikationen können im Nachgang auch noch manuell entfernt werden. Jedoch ist hierbei zu beachten, ob der erhöhte Aufwand tatsächlich einen signifikanten Mehrwert, abhängig von der jeweiligen Fragestellung der Analyse, bietet. Abbildung 47 zeigt die prozentuale Verteilung der Gründachfläche je Stadtbezirk in Berlin.

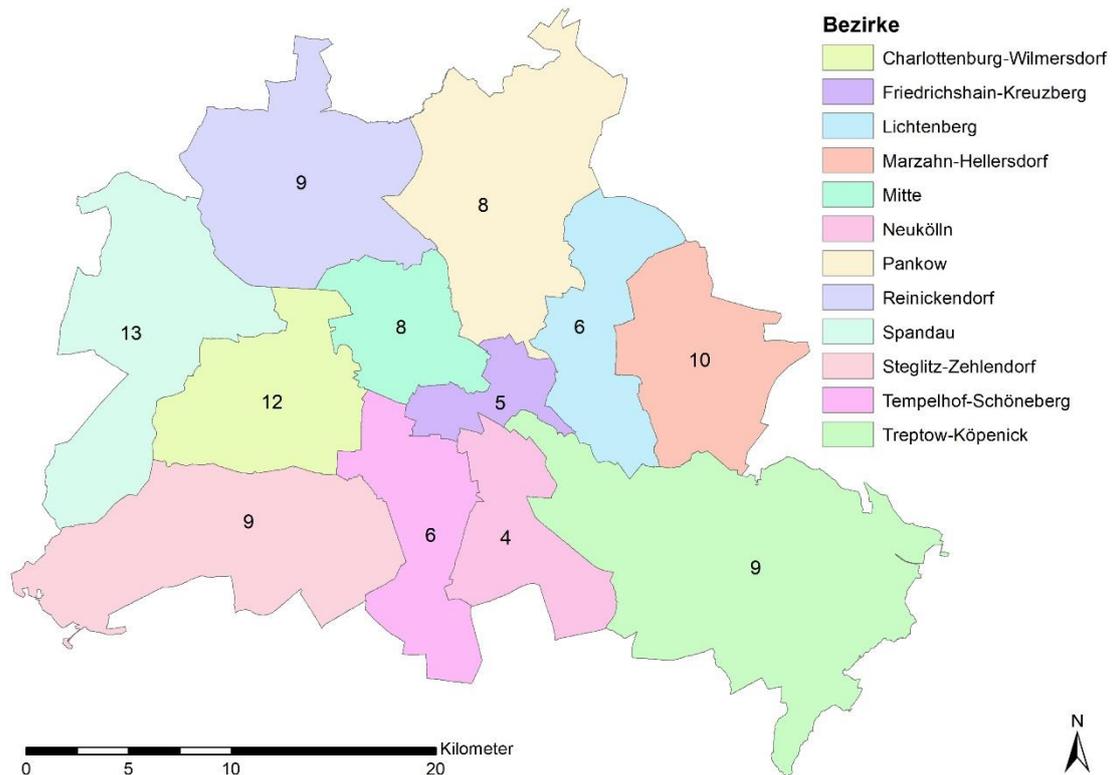


Abbildung 47: Prozentualer Anteil der 12 Bezirke der Stadt Berlin an der gesamten Gründachfläche Berlins.

Quelle: DLR/BKG.

4.2.5 Solaranlagen und weitere Dachaufbauten

Die Analyse der Häuser auf Solaranlagen erfolgte über zwei Methoden am Beispiel der Stadt Oldenburg.

Eine der beiden Methoden ist die automatisierte Erkennung der Solaranlagen mittels der spektralen Signatur (s. Kap. 3.3.1) des Materials der Solarmodule auf Basis von Hyperspektraldaten. Hierbei wurde nicht nur kartiert welches Haus eine Solaranlage besitzt, sondern auch die Lage und das Ausmaß der Solaranlage auf dem Dach bestimmt. Zu beachten ist, dass die Auflösung der verwendeten Daten 1,2 m beträgt und nur im Rahmen dieser Auflösung Lage und Ausmaß der Solaranlage bestimmt werden konnte. Außerdem stehen Hyperspektraldaten nicht

deutschlandweit zur Verfügung, da diese noch auf Befliegungen beruhen. Daraus folgt, dass für diese Methode bislang nur eine lokale Anwendung möglich ist. Abbildung 48 zeigt drei Beispiele für über die Hyperspektralmethode erkannten Solarpanels in der Stadt Oldenburg.

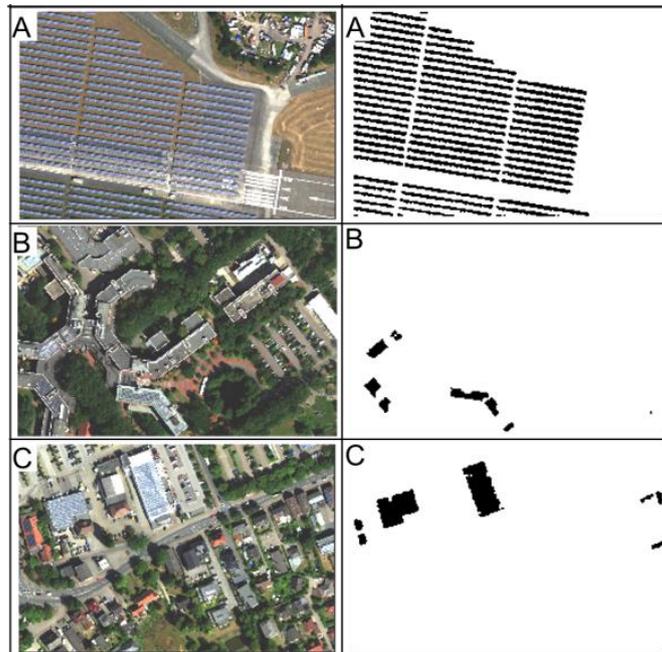


Abbildung 48: Automatisiert erkannte Solaranlagen mittels Hyperspektraldaten in drei Untersuchungsgebieten in der Stadt Oldenburg. Quelle: DLR.

Die zweite Methode basiert auf der Ermittlung der Häuser mit Solaranlagen mittels Künstlicher Intelligenz (KI). Die Solaranlagen werden dabei auf den, deutschlandweit zur Verfügung stehenden, DOP20 Luftbildern ermittelt. Neben den DOP20 Luftbildern dienen die Hausumringe (HU) als weitere Eingangsdaten. Die Luftbilder werden auf die Lage der HU zugeschnitten, sodass nur die Luftbildzuschnitte der Häuser und nicht die gesamten Luftbilder auf Solaranlagen analysiert werden. Hierbei ist es wichtig, dass die Luftbilder eine gute Orthokorrektur haben und die Dachfläche mit den HUs übereinstimmt. Da dies nicht immer gegeben ist, werden die HUs mit einem räumlichen Buffer erweitert. Im nächsten Schritt werden, vereinfacht gesagt, einem lernenden KI Algorithmus die Luftbildzuschnitte einzelner Häuser, mit einmal bereits bekannten Solaranlagen, sowie Luftbildzuschnitte von Häusern ohne Solaranlagen zum Modeltraining übergeben. Diese sogenannten Trainingsdaten werden aus den öffentlichen Registerdaten des Marktstammdatenregisters der Bundesnetzagentur abgeleitet, welches Adressen und teilweise auch Koordinaten zu Solaranlagen ab einer Leistung von 30 kW zur Verfügung stellt. Diese Koordinaten können wiederum mit den Luftbildzuschnitten kombiniert und gegebenenfalls korrigiert werden. Zusätzlich ist die manuelle Erfassung einer großen Zahl von Häusern ohne Solarinstallationen, sowie mit Solarinstallationen mit einer Leistung kleiner 30 kW, durch klassische Bildinterpretation der

Luftbilder notwendig. Mithilfe dieser Trainingsdaten kann das KI Modell selbstständig lernen, welche Merkmale in Struktur und Farbe Dachflächen mit Solaranlagen aufweisen und diese von Dachflächen ohne Solaranlagen unterscheiden. Das Ergebnis der Anwendung des KI Modells ist ein binärer Datensatz der für alle HUs das Vorhandensein von Solaranlagen ermittelt und als Attribut anfügt. Weiterhin ist es möglich für jeden HU die Unsicherheit des KI Modells über eine Wahrscheinlichkeit abzubilden. Eine genaue Lage auf dem Hausdach, sowie die Fläche der Solarpaneele, wird anhand dieser Klassifikationsmethode nicht ermittelt, sondern nur ob ein Haus über eine Solaranlage verfügt oder nicht. Generell ist es möglich auch einen KI Algorithmus zu trainieren, der die genaue Lage und das Ausmaß der Solarmodule erkennt. Hierbei werden aber detaillierte Trainingsdaten notwendig, welche nicht nur zeigen, dass ein Hausdach über Solar oder kein Solar verfügt, sondern es müssen einzelne Polygone der Solarmodule zur Verfügung gestellt werden. Dies erhöht deutlich den manuellen Aufwand zur Erstellung der Trainingsdaten.

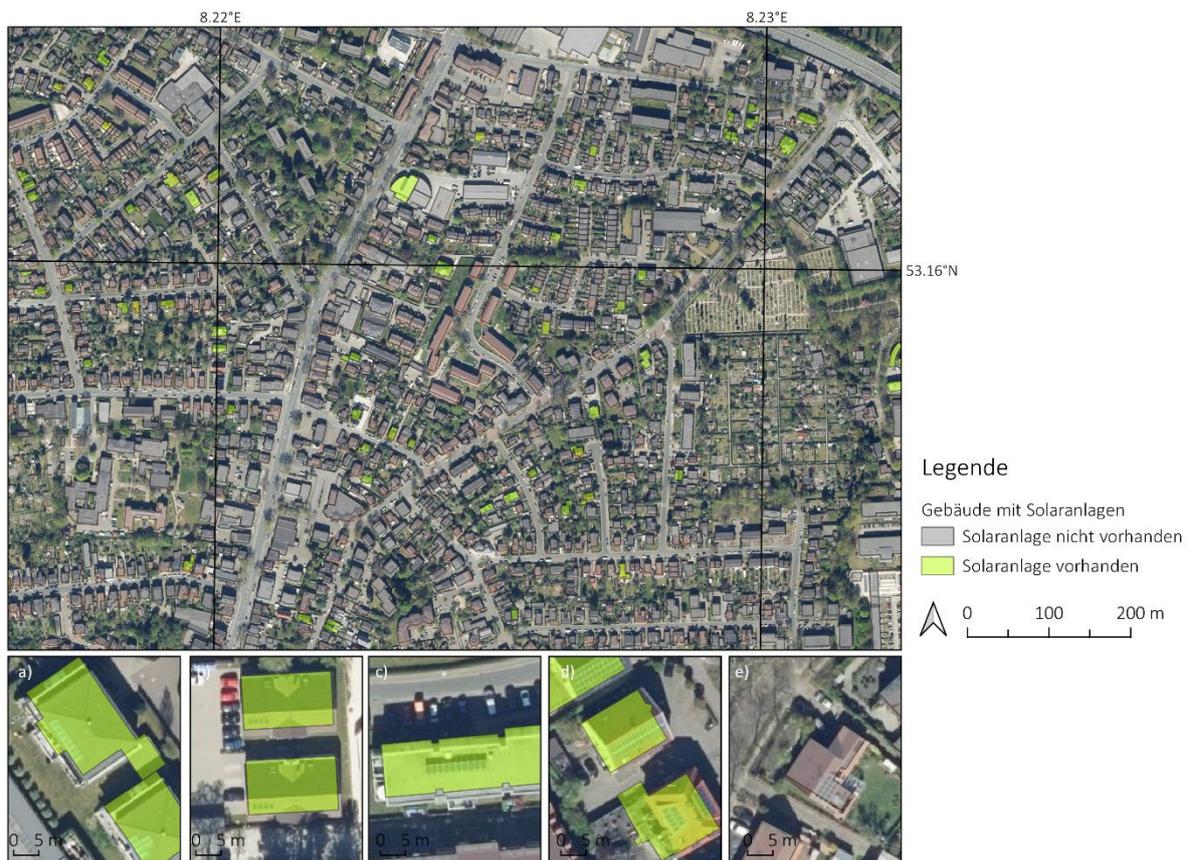


Abbildung 49: Ausschnitt der Stadt Oldenburg, grün markiert Häuser mit Solaranlagen, grau markiert Häuser ohne Solaranlagen, sowie Detailansichten zu Häusern für detektierte (a-d) und nicht detektierte (e) Solaranlagen auf Dächern der Stadt Oldenburg mittels KI. Quelle: DLR/BKG.

Da die DOP20 Luftbilder deutschlandweit zur Verfügung stehen, ist es möglich die KI Methode auf ganz Deutschland zu erweitern. Exemplarisch wurde diese, wie auch die Methode mit

Hyperspektraldaten, für die Stadt Oldenburg dargestellt. Abbildung 49 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt der Stadt Oldenburg mit Gebäuden mit Solaranlagen auf dem Dach, markiert in grün und Gebäude ohne Solaranlagen, markiert in grau, sowie fünf Detailansichten von Häusern mit Solaranlagen auf dem Dach. Alle der fünf Häuser verfügen über Solaranlagen, aber nur bei vier (a - d) der fünf Beispiele wurden die Häuser korrekt klassifiziert. Auch das Dach von Beispiel e weist eine Solaranlage auf, wurde jedoch nicht der Klasse mit Häusern mit Solaranlagen zugeordnet. Insgesamt wurden in Oldenburg 7458 Häuser mit Solarpanels detektiert. Sie machen 8 % der Hausumringe von Oldenburg aus.

Die deutschlandweite Zuverlässigkeit der Solaranlagenkartierung wird statistisch mittels unabhängiger Testdaten abgeschätzt. Die Gesamtgenauigkeit des bisher entwickelten Modelansatzes liegt bei etwa 94%, d.h. 94% aller Gebäude wurden korrekt klassifiziert als entweder mit oder ohne Solaranlagen. Da die zugrunde liegende Verteilung von Gebäuden mit Solaranlagen, regional unterschiedlich, stark ungleich verteilt ist (es gibt mehr Häuser ohne als mit Solaranlagen), eignen sich darüber hinaus die statistischen Maßzahlen der Benutzergenauigkeit (User's Accuracy / recall) und der Herstellergenauigkeit (Producer's Accuracy / precision) die klassenspezifisch sind und daher von der konkreten Klassenverteilung weitgehend unabhängig sind. Da sich die beiden Maßzahlen bei schlecht kalibrierten Modellen gegenläufig entwickeln, ist es anzustreben, dass beide Maßzahlen möglichst hoch sind, was über deren gewichtetes Mittel, den F1-Score quantifiziert wird. Die Benutzergenauigkeit des bisher kalibrierten Modells liegt aktuell bei 96%, die Herstellergenauigkeit bei 95%, sowie der F1-Score bei 96%. Über diese bereits sehr gut Modellgüte hinaus, sind durch weitergehende Aufbereitung der Trainingsdaten weitere Modellverbesserungen zu erwarten.

Der Aufwand für die Erstellung eines solchen KI Modells, insbesondere durch die Sichtung und Generierung von Trainingsdaten ist hoch. Ist das Modell jedoch einmal trainiert, sind mit vergleichsweise geringerem Aufwand Aktualisierungen der Karten möglich, z.B. wenn neue Luftbilder aufgenommen wurden. Somit eignet sich dieser KI Ansatz sehr gut für ein regelmäßiges deutschlandweites Monitoring der installierten Solaranlagen.

Weitere Dachaufbauten lassen sich, wie auch Solaranlagen, über KI erfassen. Jedoch ist hierbei zu beachten, dass es keine Eingangsdaten wie die Adressen und Koordinaten aus dem Marktstammdatenregister geben wird, sondern die Trainingsdaten ausschließlich manuell erfasst werden müssen. Je nach zu erkennender Struktur und deren Vorkommen kann dies sehr zeitintensiv sein. Sehr hochaufgelöste Fernerkundungsdaten mit einer Auflösung $\leq 1\text{m}$ sind hierfür die Voraussetzung, da Strukturen auf dem Dach meist von kleiner Größe sind.

4.2.6 Dachmaterialien

Bei der Detektion von Dachmaterialien wird auf eine spektrale Bibliothek mit insgesamt 5300 verschiedene Materialien zugegriffen. Ein Teil dieser Materialien entspricht den spektralen Eigenschaften von Dachmaterialien wie Dachziegel, Betondachstein, Kies, Aluminium, Kupfer, Zink, Polyvinylchlorid (PVC), Polyethylen, Kunstrasen, Tartan, Bitumen, Teer, Glas, begrüntes Dach usw. Die Ermittlung diverser Dachmaterialien ist nur anhand von Hyperspektraldaten möglich (s. Kap. 3.3.1). Aktuell erfolgt die Hyperspektralfernerkundung nur über Befliegungen spezifischer Gebiete mit Hyperspektralkameras. Für eine flächendeckende Kartierung von Deutschland kommen in Zukunft Satelliten wie EnMAP in Frage. Auf Grund dessen wurde die Methode nur auf einem Gebiet mit aktuell verfügbaren Hyperspektraldaten durchgeführt.

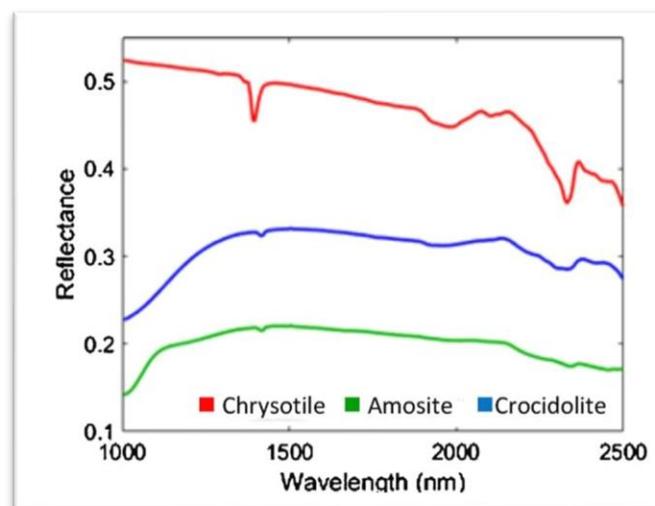


Abbildung 50: Spektrale Signatur von Asbest. Quelle: (Bonifazi et al., 2018).

Für einen Teil der Stadt Oldenburg wurden die Dachmaterialien basierend auf Hyperspektraldaten und der zur Verfügung stehenden und bereits validierten Spektralbibliothek ermittelt. Das dominierende Dachmaterial im Testgebiet sind Dachziegel (ca. 40%), gefolgt von Teer (ca. 17%), Betondachstein (ca. 12%), Bitumen (ca. 12 %) und Polyvinylchlorid (PVC, ca. 11%). Abbildung 51 zeigt die Verteilung der 15 detektierten Dachmaterialien sowie die Klassen Laub- und Nadelbäume auf Dächern im Untersuchungsgebiet. Die schwarze Fläche stellt die Fläche außerhalb der Hausumringe und somit außerhalb der angenommenen Dachfläche dar, welche im Vorfeld ausmaskiert wurde.

Es ist nur möglich, Dachmaterialien automatisiert zu erkennen, deren spektrale Signatur bereits in einer validierten spektralen Bibliothek vorhanden ist. Für Dächer mit Asbestanteil steht diese jedoch nicht zur Verfügung. Es gibt in der Literatur Hinweise, welche spezifischen spektralen Eigenschaften Asbest hat (s. Abbildung 50).

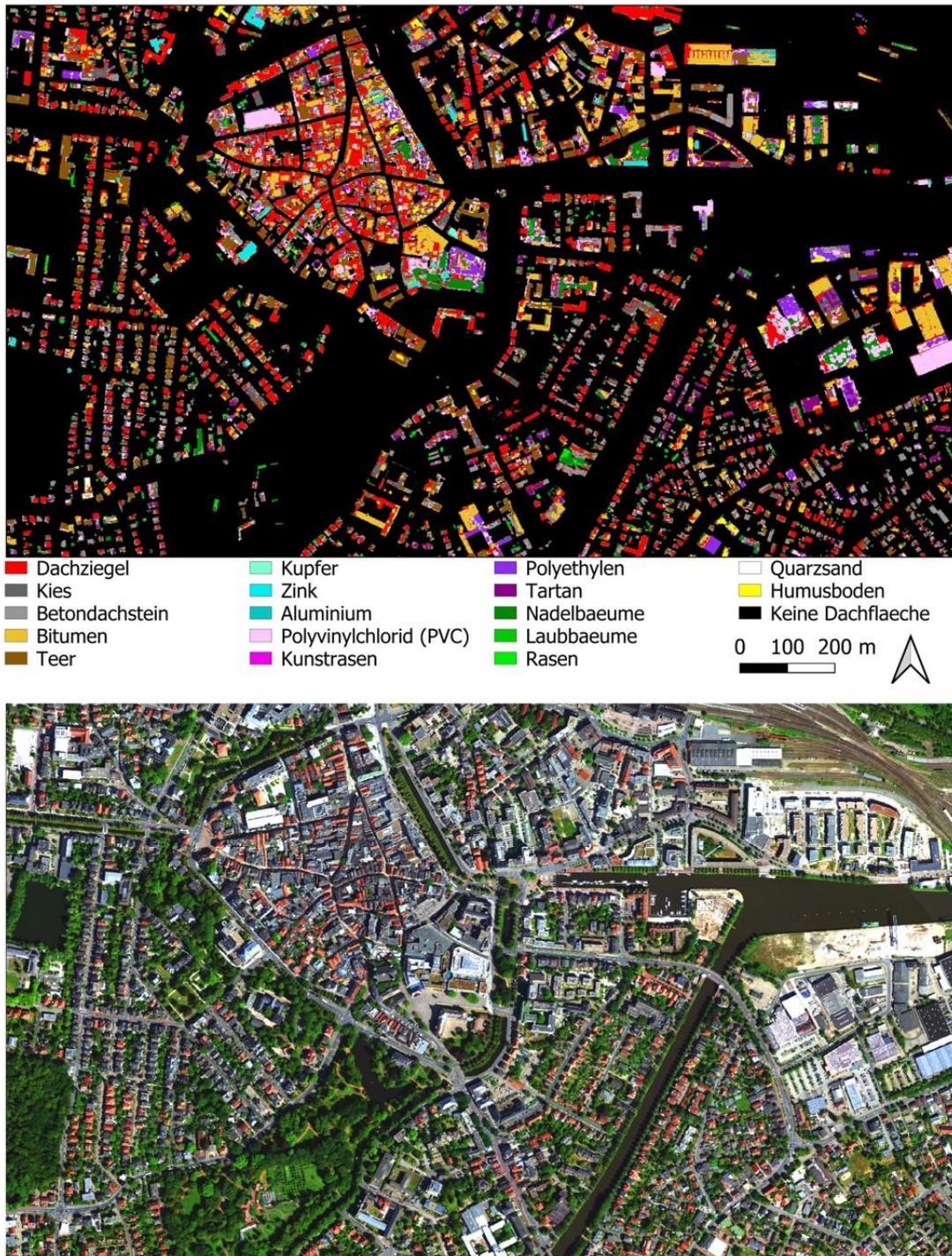


Abbildung 51: Dachmaterialien der Stadt Oldenburg berechnet auf Basis von HySpex Befliegungsdaten.

Quelle: DLR/BKG.

Dies macht es generell möglich, Asbest in Hyperspektraldaten zu erkennen, da es sich durch seine spektralen Eigenschaften von anderen Materialien abgrenzen lässt. Jedoch steht die spektrale Signatur in der Literatur nur für spezielle Formen des Asbests zur Verfügung. Weitere Formen des Asbestes weisen andere spektrale Signaturen auf und es fehlt hierdurch für die Analyse im Untersuchungsgebiet an Referenzdaten, um die genauen Auffälligkeiten der spektralen Signatur von

Asbest bestimmen zu können. Des Weiteren lässt sich Asbest in Fernerkundungsdaten nicht leicht identifizieren, da Asbest meist von anderen Materialien überdeckt oder mit diesen vermischt ist und nicht in Reinform verwendet wird.

Generell können oben genannte Probleme jedoch gelöst werden, indem Informationen zu einigen Dächern mit Asbest in dem Untersuchungsgebiet bestehen, um anhand dieser Beispiele die spektrale Signatur in den Hyperspektraldaten festlegen zu können und dadurch weitere Dächer mit Asbest automatisiert erkennen zu können. Im Rahmen des Projektes war dies noch nicht möglich, weshalb auf die Detektion von Asbest vorerst verzichtet wurde.

4.2.7 Versiegelungsgrad und Versiegelungseffizienz

Die Versiegelung wurde auf Basis von Sentinel-2 Daten aus dem Jahr 2019 deutschlandweit berechnet. Sie zeigt in einer prozentualen Skala, welche Pixel versiegelt, teilversiegelt oder unversiegelt sind. Um eine noch höhere Genauigkeit der Versiegelung zu erhalten, ist es möglich statt der Sentinel-2 Daten, welche 10 m Auflösung haben, die DOP20 Luftbilder mit 20 cm Auflösung als Datenbasis zu verwenden.

Abbildung 52 zeigt die durchschnittliche Versiegelung je 10 m Pixel im besiedelten Raum in Prozent, beispielhaft aufgeschlüsselt je Bundesland und für die Bezirke Berlins.

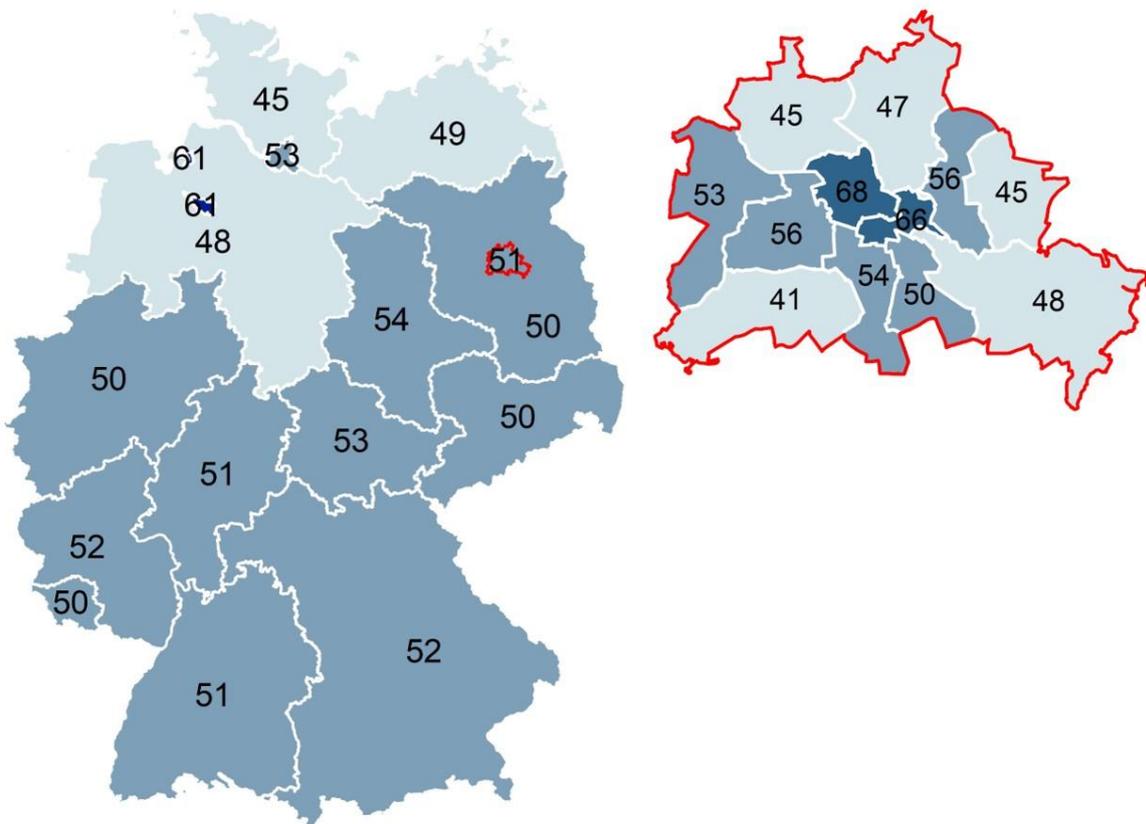


Abbildung 52: Durchschnittliche Versiegelung je 10m Pixel im besiedelten Raum je Bundesland (links) und je Bezirk der Stadt Berlin (rechts) in Prozent. Quelle: DLR/BKG.

Durch die Kombination der Versiegelung eines Pixels oder einer räumlichen Einheit wie Baublöcke, Bezirke, usw. mit dem Bauvolumen, kann die Versiegelungseffizienz berechnet werden (s. Kap. 3.2.1).

4.2.8 Bebauungsdichte

Bei der Berechnung der Bebauungsdichte werden Gebäudeumrisse mit einer räumlichen Bezugseinheit wie Baublöcke, Bezirke, Städte, usw. kombiniert (s. Kap. 3.2.2). Im Rahmen des Projektes wurde deutschlandweit die durchschnittliche Bebauungsdichte je Bundesland sowie je Bezirk der Stadt Berlin berechnet, indem die Gebäudefläche mit der administrativen Einheit der Bundesländer sowie den Bezirken der Stadt Berlin kombiniert wurde (Abbildung 53).

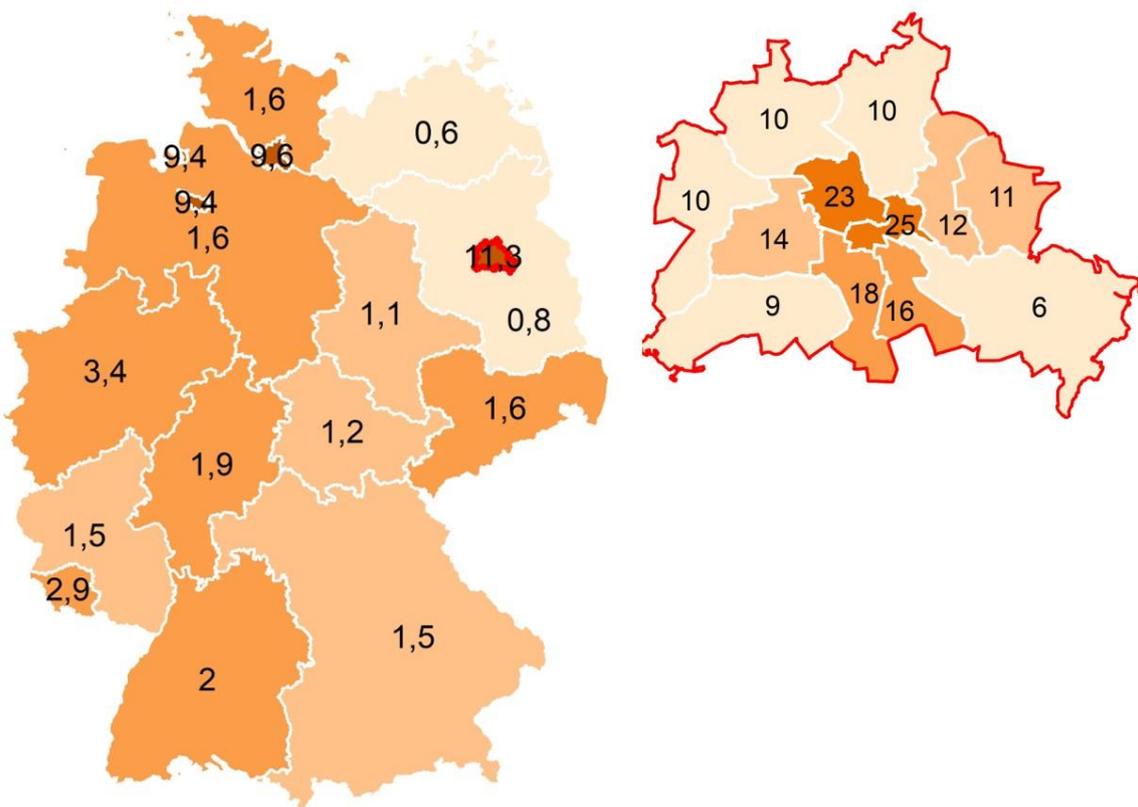


Abbildung 53: Durchschnittliche Bebauungsdichte der Bundesländer (links) und der Bezirke der Stadt Berlin (rechts) in Prozent. Quelle: DLR/BKG.

4.3 Fazit

Die Geobasisdaten des BKG in Kombination mit Satellitendaten der Copernicus Missionen bieten eine umfangreiche Datenbasis, um unterschiedlichste Analysen in Bezug auf Gebäudebestand und Siedlungscharakteristika in Deutschland durchzuführen. Abhängig von Datentyp und räumlicher sowie dimensionaler Auflösung unterscheiden sich die Dateigrößen der Eingangsdaten stark. Die deutschlandweiten Hausumringe, welche nur die zweidimensionalen Gebäudeformen wiedergeben, umfassen ein Datenvolumen von ca. 15 GB. Die LoD2 Gebäudedaten, welche Gebäude dreidimensional darstellen, weisen, wenn sie vom Format CityGML in Shapefiles umgewandelt wurden, bereits ein Datenvolumen von ca. 200 GB auf. Die deutschlandweiten DOP20 Luftbilder, nur als 3-Kanal-Echtfarben-Aufnahmen, benötigen ca. 1,5 TB Speicherplatz.

Zur Bereitstellung gebäudebezogener Informationen wird das Vektor-Datenmodell eines Shapefile (shp) vorgeschlagen, welches auf den Geometrien des Gebäudemodells LoD2 aufsetzt und durch weitere Attribute ergänzt wird. Dies bietet den Vorteil, dass die Datenmenge des Endproduktes auch durch Hinzufügen einer hohen Anzahl zusätzlicher Merkmale im Datenvolumen nur unwesentlich anwächst. So müssen etwa die besonders datenintensiven DOP20 Luftbilder und Sentinel-2 Satellitenaufnahmen nicht einzeln vorgehalten werden, sondern es werden lediglich die bedeutend kleineren Datenmengen aus den räumlichen Analysen dieser Aufnahmen (z.B. Existenz Gründach und/oder Solaranlage, Dachmaterial, etc.) als Information in der Attributtabelle ergänzt. Auch für die siedlungsbezogenen Informationen bietet sich das Datenmodell eines shp-Files an, jedoch wird hier auf die Geometrie des Digitalen Basis-Landschaftsmodell (Basis-DLM[®]) bzw. der zu Grunde liegenden gemeinsamen Datenmodelle für AFIS[®], ALKIS[®] und ATKIS[®] zurückgegriffen.

Grundsätzlich ist aber zu beachten, dass die vom BKG bzw. der amtlichen Vermessung bereitgestellten Geometrien auf Grund der Lizenz- und Nutzungsbedingungen der Länder, welche Besitzer der Geobasisdaten sind, nur für behördliche Nutzer bereitgestellt werden können. Eine Möglichkeit zur freien Verteilung besteht jedoch darin, die kritischen Geometrien räumlich zu aggregieren – etwa auf administrative Raumeinheiten von Baublöcken, Bezirken, Ländern, usw. Dieses Vorgehen ermöglicht, präzise Aussagen über räumliche Eigenschaften, Strukturen und Verteilungen zu treffen, ohne aber lizenzrechtlich geschützte Geometrien zu offenbaren.

5 Anhang

Tabelle 6: Unterteilung der Nicht-Wohngebäude in Berlin nach ihrer Gebäudenutzung

Unterklasse	Gebäudefunktion
Gewerbe und Dienstleistung	Bahnhofsgebäude
	Bahnwärterhaus
	Betriebsgebäude des Güterbahnhofs
	Betriebsgebäude für Flugverkehr
	Betriebsgebäude für Schienenverkehr
	Betriebsgebäude für Schiffsverkehr
	Betriebsgebäude für Straßenverkehr
	Betriebsgebäude zu Verkehrsanlagen (allgemein)
	Betriebsgebäude zur Schleuse
	Bootshaus
	Bürogebäude
	Campingplatzgebäude
	Einkaufszentrum
	Elektrizitätswerk
	Empfangsgebäude
	Fahrzeughalle
	Flughafengebäude
	Flugzeughalle
	Gaststätte, Restaurant
	Gebäude an unterirdischen Leitungen
	Gebäude für Beherbergung
	Gebäude für betriebliche Sozialeinrichtung
	Gebäude für Bewirtung
	Gebäude für Fernmeldewesen
	Gebäude für Gewerbe und Industrie
	Gebäude für Handel und Dienstleistungen
	Gebäude für Land- und Forstwirtschaft
	Gebäude für Vorratshaltung
	Gebäude für Wirtschaft oder Gewerbe
	Gebäude zum Busbahnhof
	Gebäude zum Parken
	Gebäude zum S-Bahnhof
	Gebäude zum U-Bahnhof
	Gebäude zur Elektrizitätsversorgung
	Gebäude zur Versorgung
	Gebäude zur Wasserversorgung
	Geschäftsgebäude
	Gewächshaus, verschiebbar
	Hotel, Motel, Pension
	Jugendherberge
	Kantine

Unterklasse	Gebäudefunktion	
	Kaufhaus	
	Kiosk	
	Kontrollturm	
	Kreditinstitut	
	Kühlhaus	
	Laden	
	Land- und forstwirtschaftliches Betriebsgebäude	
	Lokschuppen, Wagenhalle	
	Markthalle	
	Messehalle	
	Parkdeck	
	Parkhaus	
	Portalkran	
	Pumpstation	
	Rundfunk, Fernsehen	
	Scheune	
	Scheune und Stall	
	Schuppen	
	Sende-, Funkturm, Fernmeldeturm	
	Sonstiges (His.Bauwerk)	
	Sonstiges Gebäude für Gewerbe und Industrie	
	Stall	
	Stellwerk, Blockstelle	
	Straßenmeisterei	
	Toilette	
	Treibhaus	
	Versicherung	
	Wartehalle	
	Wasserbehälter	
	Wasserturm	
	Wasserwerk	
	Industrie	Fabrik
		Gaswerk
Gebäude der Kläranlage		
Gebäude zur Abfallbehandlung		
Gebäude zur Abwasserbeseitigung		
Gebäude zur Entsorgung		
Gebäude zur Müllverbrennung		
Heizwerk		
Lagerhalle, Lagerschuppen, Lagerhaus		
Laufkran, Brückenlaufkran		
Mast		
Müllbunker		
Pumpwerk (nicht für Wasserversorgung)		
Schornstein, Schlot, Esse		

Unterklasse	Gebäudefunktion
	Speditionsgebäude
	Speichergebäude
	Stall für Tiergroßhaltung
	Tankstelle
	Umformer
	Umspannwerk
	Werft (Halle)
	Werkstatt
	Windmühle
Freizeit und Erholung	Aquarium, Terrarium, Voliere
	Aussichtsturm
	Badegebäude
	Befestigung (Burgruine)
	Empfangsgebäude des botanischen Gartens
	Empfangsgebäude des Zoos
	Ferienhaus
	Festsaal
	Freizeit- und Vergnügungsstätte
	Freizeit-, Vereinsheim, Dorfgemeinschafts-, Bürgerhaus
	Gartenhaus
	Gebäude für Erholungszwecke
	Gebäude für kulturelle Zwecke
	Gebäude für soziale Zwecke
	Gebäude für Sportzwecke
	Gebäude im botanischen Garten
	Gebäude im Freibad
	Gebäude im Zoo
	Gebäude zum Sportplatz
	Gebäude zur Freizeitgestaltung
	Gedenkstätte, Denkmal, Denkstein, Standbild
	Gewächshaus (Botanik)
	Hallenbad
	Jugendfreizeitheim
	Kegel-, Bowlinghalle
	Kino
	Konzertgebäude
	Museum
	Pflanzenschauhaus
	Schloss
	Schullandheim
	Schutzhütte
Seniorenfreizeitstätte	
Spielkasino	
Sport-, Turnhalle	
Stadion	

Unterklasse	Gebäudefunktion
	Stall im Zoo
	Theater, Oper
	Tierschauhaus
	Veranstaltungsgebäude
	Wochenendhaus
	Zuschauertribüne
Regierungsgebäude	Botschaft, Konsulat
	Gebäude für öffentliche Zwecke
	Gericht
	Justizvollzugsanstalt
	Parlament
	Post
	Rathaus
	Verwaltungsgebäude
	Zollamt
Bildung und Forschung	Allgemeinbildende Schule
	Berufsbildende Schule
	Bibliothek, Bücherei
	Forschungsinstitut
	Gebäude für Bildung und Forschung
	Gebäude für Forschungszwecke
	Hochschulgebäude (Fachhochschule, Universität)
	Kinderkrippe, Kindergarten, Kindertagesstätte
Gesundheit	Badegebäude für medizinische Zwecke
	Gebäude für Gesundheitswesen
	Gebäude für Kurbetrieb
	Heilanstalt, Pflegeanstalt, Pflegestation
	Krankenhaus
Sicherheit	Feuerwehr
	Gebäude für Sicherheit und Ordnung
	Kaserne
	Polizei
	Schutzbunker
Sakrale Gebäude	Friedhofsgebäude
	Gebäude für religiöse Zwecke
	Gemeindehaus
	Gotteshaus
	Kapelle
	Kirche
	Krematorium
	Moschee
	Synagoge
	Trauerhalle

Quellenverzeichnis

- BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE. 2020a. *Über das BKG* [Online]. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. Available: [Über das BKG](#) [Accessed 13.10.2020].
- BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE 2016a. Digitales Basis-Landschaftsmodell (AAA-Modellierung) - Basis-DLM (AAA).
- BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE 2015a. Digitales Geländemodell Gitterweite 10 m - DGM10.
- BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE 2012. Digitales Geländemodell Gitterweite 25 m - DGM25.
- BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE 2015b. Digitales Geländemodell Gitterweite 50 m - DGM50.
- BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE 2020b. Digitale Topografische Karte 1 : 25 000 - DTK25.
- BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE 2014. Digitale Topographische Karte 1 : 50 000, Vorläufige Ausgabe - DTK-50V.
- BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE 2018a. Digitale Topographische Karte 1 : 100 000 - DTK100.
- LANDESAMT FÜR DIGITALISIERUNG, B. U. V. B. 2017. Datenformatbeschreibung Hauskoordinaten Deutschland (HK-DE) - Für die Datenabgabe aus dem Datenbestand der Zentralen Stelle Hauskoordinaten und Hausumringe (ZSHH).
- BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE 2018b. Hausumringe Deutschland - HU-DE.
- ARBEITSGEMEINSCHAFT DER VERMESSUNGSVERWALTUNGEN DER LÄNDER DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (ADV) 2015. AdV-CityGML-Profile für 3D-Gebäudemodelle.
- BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE. 2020c. *Digitale Orthophotos und Satellitenbilddaten* [Online]. Available: [BKG - Digitale Orthophotos](#) [Accessed 13.10.2020].
- BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE 2016b. Digitale Orthophotos - Wenn aus Bildern Informationen werden.
- BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE 2020d. Deutschlandmosaik aus Sentinel-2-Daten - Sentinel2-DE
- EUROPEAN COMMISSION. 2016. *Copernicus Market Report* [Online]. Available: [Copernicus Market Report November 2016](#) [Accessed 12.11.2020].
- COPERNICUS. 2020a. *Copernicus - Europe's eyes on Earth* [Online]. Available: [Copernicus](#) [Accessed 12.11.2020].
- COPERNICUS. 2020b. *Copernicus Land Monitoring Service* [Online]. Available: [Copernicus Land](#) [Accessed 16.10.2020].
- COPERNICUS. 2020c. *Local* [Online]. Available: [Copernicus Land - Local](#) [Accessed 16.10.2020].

- COPERNICUS. 2020d. *Urban Atlas* [Online]. Available: [Copernicus Land - Local - Urban-Atlas](#) [Accessed 16.10.2020].
- COPERNICUS. 2020e. *High Resolution Layer* [Online]. Available: [Copernicus Land - Pan-European - High-Resolution-Layers](#) [Accessed 16.10.2020].
- COPERNICUS. 2020f. *Imperviousness* [Online]. Available: [Copernicus Land - Pan-European - High-Resolution-Layers - Imperviousness](#) [Accessed 16.10.2020].
- COPERNICUS. 2020g. *European Settlement Map* [Online]. Available: [Copernicus Land - Pan-European - GHSL - European-Settlement-Map](#) [Accessed 16.10.2020].
- COPERNICUS. 2020h. *European Image Mosaics* [Online]. Available: [Copernicus Land - Imagery-in-situ - European-Image-Mosaics](#) [Accessed 16.10.2020].
- COPERNICUS. 2020i. *High Resolution Image Mosaics* [Online]. Available: [Copernicus Land - Imagery-in-situ - European-Image-Mosaics - High-Resolution](#) [Accessed 16.10.2020].
- COPERNICUS. 2020j. *Very High Resolution Image Mosaics* [Online]. Available: [Copernicus Land - Imagery-in-situ - European-Image-Mosaics - Very-High-Resolution](#) [Accessed 16.10.2020].
- COPERNICUS. 2020k. *LUCAS* [Online]. Available: [Copernicus Land - Imagery-in-situ - Lucas](#) [Accessed 16.10.2020].
- ARBEITSGEMEINSCHAFT DER VERMESSUNGSVERWALTUNGEN DER LÄNDER DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (ADV). 2020. *Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS®)* [Online]. Available: [Adv-Produkte - Liegenschaftskataster - ALKIS](#) [Accessed 14.12.2020].
- LANDESAMT FÜR DIGITALISIERUNG BREITBAND UND VERMESSUNG. 2020. *Tatsächliche Nutzung der Erdoberfläche* [Online]. Available: [LDBV Bayern - Kataster - Tatsächliche Nutzung](#) [Accessed 04.12.2020].
- MEßNER, F. 2019. *Berechnung stadtstruktureller Parameter anhand einer objektorientierten Landbedeckungsklassifizierung aus Luftbilddaten der Landeshauptstadt München*. Master Masterarbeit, Hochschule Anhalt.
- OPENSTREETMAP. 2020. *OpenStreetMap - Deutschland* [Online]. Available: [Openstreetmap FAQ - Was ist OSM](#) [Accessed 14.20.2020].
- HAKLAY, M. 2010. How good is volunteered geographical information? A comparative study of OpenStreetMap and ordnance survey datasets. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 37, 682-703.
- EUROPEAN SPACE AGENCY. 2020a. *Spatial and Spectral Resolutions* [Online]. Available: [ESA - Sentinel-2 Mission - Resolution and Swath](#) [Accessed 03.12.2020].
- USGS. 2020a. *Landsat 8* [Online]. Available: [USGS - Landsat-8](#) [Accessed 14.12.2020].
- EUROPEAN SPACE IMAGING. 2020. *WorldView-3* [Online]. Available: [EUSI - WorldView-3](#) [Accessed 03.12.2020].
- PLANET. 2020. *Imaging the Earth daily* [Online]. Available: [Planet - Imagery](#) [Accessed 14.12.2020].
- EUROPEAN SPACE AGENCY. 2020b. *Sentinel Overview* [Online]. Available: [ESA - Sentinel missions - Overview](#) [Accessed 13.10.2020].
- ESCH, T., ÜREYEN, S., ZEIDLER, J., METZ-MARCONCINI, A., HIRNER, A., ASAMER, H., TUM, M., BÖTTCHER, M., KUCHAR, S., SVATON, V. & MARCONCINI, M.

2018. Exploiting big earth data from space - first experiences with the timescan processing chain. 2, 36 - 55.
- ELLIOTT, J. R., WALTERS, R. & WRIGHT, T. J. 2016. The role of space-based observation in understanding and responding to active tectonics and earthquakes. *Nature Communications*, 7.
- NASA. 2020a. *Landsat 8 Bands* [Online]. Available: [NASA - Landsat-8 - Bands](#) [Accessed 09.12.2020].
- NASA. 2020b. *Landsat 7 ETM+ Bands* [Online]. Available: [NASA - Landsat-7 - Bands](#) [Accessed 09.12.2020].
- USGS. 2020b. *Landsat Satellite Missions* [Online]. Available: [USGS - Landsat-Satellite-Missions](#) [Accessed 08.12.2020].
- EUROPEAN SPACE AGENCY. 2020c. *Copernicus Open Access Hub* [Online]. Available: [scihub - Copernicus](#) [Accessed 08.12.2020].
- COPERNICUS. 2020l. *DIAS* [Online]. Available: [Copernicus - Datenzugriff - DIAS](#) [Accessed 11.11.2020].
- MARCONCINI, M., ESCH, T., BACHOFER, F. & METZ-MARCONCINI, A. 2020. Digital Earth in Europe.
- DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E.V. (DLR). 2020. *CODE-DE* [Online]. Available: [Code-DE](#) [Accessed 08.12.2020].
- EUROPEAN SPACE AGENCY. 2020d. *Thematic Exploitation Platforms overview* [Online]. Available: [ESA - eo4society - thematic-exploitation-platforms-overview](#) [Accessed 08.12.2020].
- NASA. 2020c. *Landsat Science* [Online]. Available: [NASA - Landsat](#) [Accessed 08.12.2020].
- AWS. 2020. *Registry of Open Data on AWS* [Online]. Available: [AWS - open data](#) [Accessed 10.12.2020].
- GOOGLE. 2020. *Google Earth Engine* [Online]. Available: [Google Earth Engine](#) [Accessed 09.12.2020].
- ALBERTZ, J. 2001. *Einführung in die Fernerkundung*, Darmstadt, Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- LEIBNIZ-INSTITUT FÜR ÖKOLOGISCHE RAUMENTWICKLUNG 2020. 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung - Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude.
- INSTITUT WOHNEN UND UMWELT. 2020. *Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude* [Online]. Available: [IWU - Forschungsdatenbank - Gebäudebestand](#) [Accessed 23.11.2020].
- ANSEL, W., ZEIDLER, J. & ESCH, T. 2015. Fernerkundliche Identifizierung von Vegetationsflächen auf Dächern zur Entwicklung des für die Bereiche des Stadtklimas, der Stadtentwässerung und des Artenschutzes aktivierbaren Flächenpotenzials in den Städten.
- BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE. 2020e. *3D-Gebäudemodelle LoD2 Deutschland (LoD2-DE)* [Online]. Available: [BKG - 3D-Gebäudemodelle LoD2 Deutschland](#) [Accessed 27.10.2020].

- GAGNON, P., MARGOLIS, R., MELIUS, J., PHILLIPS, C. & ELMORE, R. 2018. Estimating rooftop solar technical potential across the US using a combination of GIS-based methods, lidar data, and statistical modeling. *Environmental Research Letters*, 13, 9.
- MANSOURI KOUHESTANI, F., BYRNE, J., JOHNSON, D., SPENCER, L., HAZENDONK, P. & BROWN, B. 2019. Evaluating solar energy technical and economic potential on rooftops in an urban setting: the city of Lethbridge, Canada. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 10, 13-32.
- SÁNCHEZ-APARICIO, M., MARTÍN-JIMÉNEZ, J., DEL POZO, S., GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, E. & LAGÜELA, S. 2021. Ener3DMap-SolarWeb roofs: A geospatial web-based platform to compute photovoltaic potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135.
- ESCH, T., HIMMLER, V., SCHORCHT, G., THIEL, M., WEHRMANN, T., BACHOFER, F., CONRAD, C., SCHMIDT, M. & DECH, S. 2009. Large-area assessment of impervious surface based on integrated analysis of single-date Landsat-7 images and geospatial vector data. *Remote Sensing of Environment*, 113, 1678-1690.
- ÜREYEN, S. & THIEL, M. 2017. Satellitengestützte Erfassung der Bodenversiegelung in Bayern 2015. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU).
- HELDENS, W., BURMEISTER, C., KANANI-SÜHRING, F., MARONGA, B., PAVLIK, D., SÜHRING, M., ZEIDLER, J. & ESCH, T. 2020. Geospatial input data for the PALM model system 6.0: model requirements, data sources, and processing. *Geosci. Model Dev.*
- ABDELLATIF, M., PEEL, H., COHN, A. G. & FUENTES, R. 2020. Pavement crack detection from hyperspectral images using a novel asphalt crack index. *Remote Sensing*, 12.
- POLITIS, S. S., ZHANG, Z., KOUCHAKI, S. & CALDAS, C. H. 2020. Framework for network-level pavement condition assessment using remote sensing data mining. *Journal of Applied Remote Sensing*, 14.
- UMWELTATLAS BERLIN 2014. 06.10 Gebäude- und Vegetationshöhen (Ausgabe 2014). In: WOHNEN, S. F. S. U. (ed.).
- ARBEITSGEMEINSCHAFT DER VERMESSUNGSVERWALTUNGEN DER LÄNDER DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (ADV) 2018. ATKIS-Objektartenkatalog Basis-DLM.
- BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE 2020f. Digitales Basis-Landschaftsmodell - Basis-DLM.
- WANG, M. 2020. *Comparison of Surface Urban Heat Islands Using the World Settlement Footprint Imperviousness Layer*. Master Master Theses, JULIUS-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT WÜRZBURG.
- BAUER, C., KERN, K. & SULZER, W. 2020. Detecting hot spots on high resolution airborne thermal imagery - An automatic process to improve roof heat loss detection. *Mitteilungen der Österreichischen Geographischen Gesellschaft*, 161, 271-290.
- FRIMAN, O., FOLLO, P., AHLBERG, J. & SJOKVIST, S. 2014. Methods for large-scale monitoring of district heating systems using airborne thermography. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52, 5175-5182.

- SCHAEPMAN-STRUB, G., SCHAEPMAN, M. E., PAINTER, T. H., DANGEL, S. & MARTONCHIK, J. V. 2006. Reflectance quantities in optical remote sensing—definitions and case studies. *Remote Sensing of Environment*, 103, 27-42.
- ERBERTSEDER, T., TAUBENBÖCK, H. & MEYER-ARNEK, J. 2015. Dicke Luft—Stadtregionen als globale Zentren der Luftverschmutzung. *Globale Urbanisierung*. Springer.
- HOFF, R. M., CHRISTOPHER, S. A. J. J. O. T. A. & ASSOCIATION, W. M. 2009. Remote sensing of particulate pollution from space: have we reached the promised land? 59, 645-675.
- ROHDE, A. 2017. *Satellitengestützte Analyse der Feinstaubkonzentration über Deutschland*. Universität Augsburg.
- HANDSCHUH, J., BAIER, F., ERBERTSEDER, T. & SCHAAP, M. Deriving ground-level PM_{2.5} concentrations over Germany from satellite column AOD for implementation in a regional air quality model. *Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XXV*, 2020. International Society for Optics and Photonics, 1153104.
- DALEY, R. 1992. *Atmospheric Data Analysis*, Cambridge University Press.
- KHORSANDI, E., BAIER, F., ERBERTSEDER, T. & BITTNER, M. Air quality monitoring and simulation on urban scale over Munich. *Remote Sensing Technologies and Applications in Urban Environments III*, 2018. International Society for Optics and Photonics, 1079303.
- LEVIN, N., KYBA, C. C. M., ZHANG, Q., SÁNCHEZ DE MIGUEL, A., ROMÁN, M. O., LI, X., PORTNOV, B. A., MOLTHAN, A. L., JECHOW, A., MILLER, S. D., WANG, Z., SHRESTHA, R. M. & ELVIDGE, C. D. 2020. Remote sensing of night lights: A review and an outlook for the future. *Remote Sensing of Environment*, 237, 111443.
- ESCH, D. T., TAUBENBÖCK, D. H., GEIß, C., SCHILLINGS, D. C., NAST, M., METZ, A., HELDENS, D. W. & KEIL, M. 2011. Potenzialanalyse zum Aufbau von Wärmenetzen unter Auswertung siedlungsstruktureller Merkmale.
- HEROLD, M., ROBERTS, D. A., GARDNER, M. E. & DENNISON, P. E. 2004. Spectrometry for urban area remote sensing—Development and analysis of a spectral library from 350 to 2400 nm. *Remote Sensing of Environment*, 91, 304-319.
- HEIDEN, U., SEGL, K., ROESSNER, S. & KAUFMANN, H. 2007. Determination of robust spectral features for identification of urban surface materials in hyperspectral remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 111, 537-552.
- ROESSNER, S., SEGL, K., BOCHOW, M., HEIDEN, U., HELDENS, W. & KAUFMANN, H. 2011. Potential of hyperspectral remote sensing for analyzing the urban environment.
- HEIDEN, U., HELDENS, W., ROESSNER, S., SEGL, K., ESCH, T. & MÜLLER, A. 2012. Urban structure type characterization using hyperspectral remote sensing and height information. *Landscape and Urban Planning*, 105, 361–375.
- ROGGE, D. M., RIVARD, B., ZHANG, J., SANCHEZ, A., HARRIS, J. & FENG, J. 2007. Integration of spatial–spectral information for the improved extraction of endmembers. *Remote Sensing of Environment*, 110, 287-303.
- BASSANI, C., CAVALLI, R. M., CAVALCANTE, F., CUOMO, V., PALOMBO, A., PASCUCCHI, S. & PIGNATTI, S. 2007. Deterioration status of asbestos-cement roofing

- sheets assessed by analyzing hyperspectral data. *Remote Sensing of Environment*, 109, 361-378.
- BONIFAZI, G., CAPOBIANCO, G. & SERRANTI, S. 2018. Asbestos containing materials detection and classification by the use of hyperspectral imaging. *Journal of Hazardous Materials*, 344, 981-993.
- CZIRJAK, D. 2017. Detecting photovoltaic solar panels using hyperspectral imagery and estimating solar power production. *Journal of Applied Remote Sensing*, 11, 026007.
- GEOPORTAL BERLIN 2013. LOD2 texturiertes Gebäudemodell Berlin.
- MÖNKS, M. 2019. *Building facade segmentation of oblique aerial images using convolutional neural networks for urban climate modeling*. Master, Universität Greifswald.
- LIN, D., JARZABEK-RYCHARD, M., TONG, X. & MAAS, H.-G. 2019. Fusion of thermal imagery with point clouds for building façade thermal attribute mapping. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 151, 162-175.
- INSTITUT FÜR SOLARFORSCHUNG (DLR). 2020. *Gtom – Gebäudetomograph* [Online]. Available: [DLR - Institut für Solarforschung](#) [Accessed 23.11.2020].
- BEZIRKSREGIERUNG KÖLN 2014. Datenformatbeschreibung 3D-Gebäudemodell LoD1 Deutschland.
- HOCHSCHULE BOCHUM. 2021. *Baublock* [Online]. Available: [Smart Demography - Gebietsgliederung Baublock](#) [Accessed 26.06.2021].
- BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ. 2017. *Baunutzungsverordnung - BauNVO* [Online]. Available: [Gesetze im Internet - BauNVO](#) [Accessed 09.06.2021].
- BAYERISCHE VERMESSUNGSVERWALTUNG 2018. Kundeninformation LoD2 Gebäudemodelle.