



Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung

im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung



Methodenstudie zum Monitoring von Potenzialflächen für Brachen, Baulücken und Nachverdichtung

BBSR-
Online-Publikation
20/2026

von

Dr. Benjamin Bischke
Carolin Packbier
Dr. Patrick Helber



Methodenstudie zum Monitoring von Potenzialflächen für Brachen, Baulücken und Nachverdichtung

Das Projekt des Forschungsprogramms „Experimenteller Wohnungs- und Städtebau (ExWoSt)“ wurde vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) durchgeführt.

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Wissenschaftliche Begleitung

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat RS 6 „Stadt-, Umwelt- und Raumbearbeitung“
Dr. Fabian Dosch
Nadine Blätgen
nadine.blaetgen@bbr.bund.de

Begleitung im Bundesministerium

Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB)
Referat S I 4 „Bodenpolitik, Bodenrecht, Besonderes Städtebaurecht“
Anja Schneider

Auftragnehmer

Vision Impulse GmbH, Kaiserslautern
Carolin Packbier, Dr. Benjamin Bischke, Dr. Patrick Helber
info@vision-impulse.com

Redaktion

Vision Impulse GmbH, Kaiserslautern
Dr. Benjamin Bischke

Stand

März 2026

Gestaltung

Vision Impulse GmbH, Kaiserslautern
Dr. Benjamin Bischke

Bildnachweis

Titelbild: James Sullivan



Dieses Werk ist lizenziert unter der Creative-Commons-Lizenz Namensnennung-Share Alike 4.0 International (CC BY-SA 4.0). Diese Lizenz erlaubt unter Voraussetzung der Namensnennung des Urhebers und der Weitergabe unter gleichen Bedingungen die Bearbeitung, Vervielfältigung und Verbreitung des Materials in jedem Format oder Medium für beliebige Zwecke, auch kommerziell. Nähere Informationen zu dieser Lizenz finden sich unter: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>. Die Bedingungen der Creative-Commons-Lizenz gelten nur für Originalmaterial. Die Wiederverwendung von Material aus anderen Quellen erfordert ggf. weitere Nutzungsgenehmigungen durch den jeweiligen Rechteinhaber.

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitiervorschlag

Bischke, B.; Packbier, C.; Helber, P., 2026: Methodenstudie zum Monitoring von Potenzialflächen: Für Brachen, Baulücken und Nachverdichtung in der Regionalstatistik und mit Methoden der Fernerkundung / KI. Herausgeber: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR). BBSR-Online-Publikation 20/2026. Bonn. <https://doi.org/10.58007/ahee-g102>

Inhalt

Kurzfassung	5
1 Einleitung	9
1.1 Zunehmende Bedeutung von Innenentwicklungspotenzialen	9
1.2 Herausforderungen bei der Erfassung von Innenentwicklungspotenzialen	9
1.3 Definition von Begrifflichkeiten	10
2 Aktueller Status bei der Erfassung von Innenentwicklungspotenzialen	12
2.1 Marktsondierung	12
2.2 Leitfragengestützte Interviews mit Experten	15
3 Datengrundlagen zur Erfassung von Innenentwicklungspotenzialen	20
3.1 Geobasisdaten und Geofachdaten	20
3.2 Fernerkundungsdaten	21
3.3 Referenzdaten / Ground-Truth-Daten	22
4 Bestehende Verfahren zur Extraktion von Innenentwicklungspotenzialen	25
4.1 Manuelle Erfassung von Innenentwicklungspotenzialen	25
4.2 Verfahren zur Vorauswahl geeigneter Flächen	26
4.3 Verfahren basierend auf Geodaten	30
4.4 Verfahren basierend auf Fernerkundungsdaten	35
5 Verfahren zur Erkennung von Innenentwicklungspotenzialen mit Künstlicher Intelligenz	38
5.1 Vielfältiger Einsatz an Verfahren aus der Künstlichen Intelligenz	38
5.2 Nutzung Künstlicher Neuronaler Netze zur Luftbildklassifikation	39
5.3 KI-gestützte Verarbeitung zur Extraktion von Innenentwicklungspotenzialen	40
6 Bewertung des KI-Verfahrens zur Extraktion von Innenentwicklungspotenzialen	44
6.1 Fallstudiengebiete zur Evaluation der Methode	44
6.2 Quantitative Evaluation des Verfahrens	49
6.3 Qualitative Ergebnisse des Verfahrens	63
6.4 Bewertung der Methode durch Fachexperten	67
7 Handlungsempfehlungen	69
7.1 Skalierung für ein bundesweites Flächenmonitoring	69
7.2 Konzeptionalisierung für die Unterstützung von Kommunen	71
8 Fazit und Ausblick	77
8.1 Zusammenfassung der Ergebnisse	77
8.2 Ausblick	80
Literaturverzeichnis	82
Anhang	86

Kurzfassung

Problemstellung

Der Wohnraumbedarf in Deutschland erfährt eine immer stärkere Zunahme, die insbesondere durch den demografischen Wandel verursacht wird (vgl. Blum et al. 2022). Insbesondere im Süden Deutschlands und im Umfeld größerer Städte ist eine Zunahme zu erkennen, wohingegen die Nachfrage in den neuen Bundesländern überwiegend abnimmt. Der Wohnungsbau auf neuen Siedlungsflächen, also im Außenbereich, ist allerdings mit Nachteilen verbunden, unter anderem mit negativen Auswirkungen auf die Biodiversität, die Klimaregulation und auch auf den Wert als Erholungs- und Freizeitfläche. Diese Effekte widersprechen den Ansätzen einer nachhaltigen Stadtentwicklung, die sich durch eine effiziente Flächennutzung auszeichnet. Stattdessen stellt die Innenentwicklung den Inbegriff nachhaltiger Entwicklung dar: Die Nutzung von Innenentwicklungspotenzialen reduziert die Flächenneuanspruchnahme, beseitigt Funktionsverluste innerhalb bestehender Siedlungen und dient der Revitalisierung von Innenstadtbereichen sowie Ortskernen. Der Vorrang der Innenentwicklung vor der Außenentwicklung wird durch die Zielsetzung der Bundesregierung, die Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsflächen bis 2030 auf unter 30 ha pro Tag zu reduzieren, auch politisch unterstützt (vgl. Bundesregierung 2021). Laut Hochrechnungen aus der Baulandumfrage des BBSR aus dem Jahr 2020 sind insgesamt 84.000 ha, also rund 4 % der Siedlungsfläche mit Funktion Wohnen, Industrie und Gewerbe in Deutschland Flächenpotenziale. Darauf können je nach verwendetem Modell zwischen 1,4 Mio. und 3,5 Mio. Wohneinheiten errichtet werden. Im Vergleich dazu beträgt der für den Zeitraum von 2021 bis 2025 ermittelte Wohnungsbedarf 1,54 Mio. Wohneinheiten (jährlich 308.000 Wohneinheiten). Ein großer Teil dieses Bedarfs könnte also durch die vorhandenen Potenziale gedeckt werden (vgl. Blum et al. 2022). Zur genaueren Abschätzung dieser Werte und zur effizienten Mobilisierung der vorhandenen Potenziale müssen diese Flächen im Einzelnen bekannt sein. Sowohl in der Auswertung der Baulandumfrage (vgl. Blum et al. 2022) als auch in den durchgeführten Interviews zeigt sich, dass derzeit keine bundesweit einheitliche systematische Erhebung der vorhandenen Innenentwicklungspotenziale erfolgt. Stattdessen findet innerhalb einzelner Kommunen die Erfassung geeigneter Flächen statt, bisher allerdings nicht flächendeckend. Primär werden aufwendige manuelle und umfragegestützte Methoden genutzt, die nicht standardisiert sind. Dies erschwert die großräumige Erhebung der erfassten Potenziale. Eine Automatisierung der Potenzialerschließung würde sowohl für die Kommunen den Arbeitsaufwand verringern, sodass eine stärkere kommunale Erfassung gefördert wird, als auch eine Grundlage für eine bundesweite automatisierte Abschätzung der Flächenpotenziale darstellen.

Überblick zum Vorgehen in der Methodenstudie

In dieser Methodenstudie wurde zunächst im Rahmen einer Literaturrecherche der aktuelle Status bei der Erfassung von Innenentwicklungspotenzialen untersucht. In diesem Rahmen fanden auch Interviews mit Fachleuten verschiedener Expertengruppen statt, um das Bild zu vervollständigen. Nach der Bewertung bisheriger Verfahren sowie der Untersuchung bestehender Herausforderungen wurde eine neue Methodik entwickelt, die auf Grundlage von Fernerkundungsdaten und unter Einsatz von Künstlicher Intelligenz eine automatisierte Auswahl möglicher Potenzialflächen trifft. Zur Bewertung der entwickelten Methode wurde sie für sechs repräsentative Fallstudiengebiete angewendet. Für diese erfolgten zahlreiche quantitative und qualitative Auswertungen. Außerdem wurden die Ergebnisse in einem Expertenworkshop vorgestellt und diskutiert, um eine Bewertung bezüglich der praktischen Umsetzbarkeit zu erhalten.

Ergebnisse der Literaturrecherche

Für die Identifikation von Baulücken und Nachverdichtungspotenzialen wurden bereits verschiedene Ansätze entwickelt, die auf einer GIS-Analyse verschiedener Geodaten beruhen und jeweils einem sehr ähnlichen Ablauf folgen, der in Abbildung 6 schematisch dargestellt wird (vgl. Ehrhardt et al. 2023; Hecht/Meinel 2014; Heßler et al. 2021): Zunächst wird eine Vorauswahl der Flächen im Innenbereich getroffen, die für eine Be-

bauung geeignet sind. Dazu werden Landnutzungskartierungen genutzt, üblicherweise die im Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS) erfasste „Tatsächliche Nutzung“ oder das Digitale Basis-Landschaftsmodell (Basis-DLM) aus dem Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystem (ATKIS). Anhand dieser Kartierungen werden die Flächen ausgewählt, die innerhalb potenziell bebaubarer Klassen liegen. Die ausgewählten Klassen unterscheiden sich in den verschiedenen Verfahren leicht voneinander. Die verbleibenden Flächen werden dann mit Informationen zur bestehenden Bebauung verschnitten. Das Vorgehen der Verfahren für diesen Schritt lässt sich in zwei Optionen aufteilen: Entweder werden Baufreiflächen bestimmt, indem die Gebäude sowie Abstandsflächen von den vorausgewählten Flächen abgezogen werden, oder es wird je Teilfläche, beispielsweise je Flurstück, die Bebauungsdichte bestimmt. Aus den Ergebnissen dieses Schrittes werden dann jene Flächen ausgewählt, deren Form und Größe für eine Bebauung geeignet ist, beziehungsweise deren Bebauungsdichte niedriger ist als in der Umgebung oder als zulässig. Teilweise fügen die Verfahren weitere Filterungsschritte hinzu, wie eine Betrachtung benachbarter Flächen. Zuletzt können die so erfassten Flächenpotenziale in unterschiedliche Klassen des Bebauungsgrads, der Flächengröße, der Erschließungstiefe oder der Entwicklungseignung kategorisiert werden.

Die Identifikation von Brachflächen auf Grundlage von Geobasisdaten ist nur sehr schwer möglich, da sie durch fehlende Informationen über den Zustand der Bebauung und über die Nutzungsaktivität oftmals nicht von aktiv genutzten Flächen unterschieden werden können. Daher wurden in bisherigen Forschungsarbeiten erste visuelle und automatisierte bildbasierte Methoden zur Detektion von Brachflächen entwickelt, bei denen Merkmale wie der Zustand der Bebauung und der Vegetation Rückschlüsse über die Aktivität oder Nichtnutzung der Fläche erlauben (vgl. Banzhaf/Netzband 2004; Dürrbeck/Lippl-Seifert 2022; Mao et al. 2022). Charakteristische Merkmale, welche eine Brachfläche kennzeichnen und für die Erfassung aus Luftbildern extrahiert werden, sind beispielsweise Ruderalvegetation, Fundamentreste oder Überwucherung und Schäden an Wegen und Gebäuden. Zur automatisierten Bildauswertung wurden in der Vergangenheit klassische Klassifikations- und Segmentierungsalgorithmen angewendet. In neueren Ansätzen werden auch erste Methoden der Künstlichen Intelligenz eingesetzt.

Ablauf der entwickelten Verarbeitungsschritte mittels KI-Verfahren

Auf Grundlage der Erkenntnisse der Recherche wurde ein neues Verfahren zur Klassifikation von Innenentwicklungspotenzialen aus Luftbildern entwickelt. Zunächst erfolgt eine Auswahl der potenziell geeigneten Flächen anhand von Landnutzungskartierungen aus ALKIS und ATKIS. Die ermittelten Flächen werden mit hochauflösenden Luftbildern geografisch verschnitten. Nach der Verarbeitung der Luftbilddaten wird für diese mittels tiefer Neuronaler Netzwerke - einer State-of-the-art-Methode aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz - eine Klassifikation hinsichtlich der unterschiedlichen Potenzialtypen durchgeführt. Für die Klassifikation von Brachflächen und die Klassifikation von Baulücken kommen unterschiedliche Klassifikationsmodelle zum Einsatz. Die Klassifikationsergebnisse der KI-Modelle werden im Anschluss im Zuge von unterschiedlichen Nachverarbeitungsschritten (beispielsweise durch die Auswahl verschiedener Grenzwerte oder der Aggregation benachbarter Flächen) weiter aufbereitet, sodass das Ergebnis der Verarbeitungsschritte zielführend von dem Nutzer eingesetzt werden kann.

Untersuchung der Ergebnisse der entwickelten Methode

Zur Bewertung der entwickelten Methode wurden sechs repräsentative Fallstudiengebiete in Deutschland ausgewählt. Die Auswertung der Ergebnisse für die Fallstudiengebiete zeigt die Fähigkeit der Methode zur Generalisierung auf neue, bei der Methodenentwicklung nicht berücksichtigte Regionen.

Im ersten Schritt des Verfahrens, der Vorfilterung, können für beide Aufgaben bereits circa 90 % der betrachteten Gebiete ausgeschlossen werden. Weitere 89 % (für Brachen) beziehungsweise 80 % (für Baulücken / Nachverdichtungspotenziale (NVP)) der verbleibenden Flächen werden durch die Klassifikation ausgeschlossen. Die als IEPs klassifizierten Flächen enthalten einen großen Anteil der annotierten Potenzialflächen (86 %

der Brachen und 81 % der Baulücken und Nachverdichtungspotenziale). Zusätzlich sind aber auch viele weitere Flächen enthalten, die nicht als IEPs annotiert sind, was zu einer geringen Präzision führt. Um die Präzision zu erhöhen, können verschiedene Schwellenwerte oder weitere Filterungsschritte angewendet werden, sodass die Anzahl der falschen Klassifikationsergebnisse reduziert wird. Dabei werden aber auch korrekt identifizierte Potenziale entfernt, sodass der Recall verringert wird.

Neben der allgemeinen Auswertung der Anwendbarkeit wurden verschiedene Detailanalysen durchgeführt. Zunächst wurde die Größe der Potenzialflächen untersucht, sowohl bezüglich der annotierten Potenziale als auch bezüglich der aus der Klassifikation hervorgehenden Flächen. Dabei wurde festgestellt, dass kleine annotierte Flächen häufiger in der Klassifikation fehlen, wohingegen alle großen Potenziale korrekt identifiziert wurden. Gleichzeitig gibt es auch in den Klassifikationsergebnissen False Positives mit kleiner Fläche. Mit zunehmender Größe der vorgeschlagenen Flächen aus der Klassifikation nimmt der Anteil der falschen Vorschläge ab, doch es lässt sich kein Grenzwert bestimmen, ab dem alle vorgeschlagenen Flächen korrekt sind, sodass immer eine manuelle Überprüfung erforderlich ist.

Eine weitere Detailanalyse untersuchte die Abhängigkeit der Erkennungsrate auf die Landnutzungsclassen. Dabei zeigt sich vor allem für die Brachflächen, dass die Potenziale in den häufiger im Datensatz vorkommenden Landnutzungsclassen besser von aktiv genutzten Flächen unterschieden werden können als in den kleineren Classen.

Zuletzt wurde auch der Einfluss der Auflösung der Eingabebilder untersucht. Dazu wurden aus den verwendeten DOPs mit einer Auflösung von 20 cm Bilder mit geringeren Auflösungen bis zu 2 m erzeugt und jeweils neue Modelle trainiert. Die Verwendung dieser Bilder hat nur einen geringen Einfluss auf die Klassifikation von Brachflächen. Bei den Baulücken und Nachverdichtungspotenzialen stellt eine höhere Auflösung einen Mehrwert dar und die Verwendung der Bilder mit verringerter Auflösung führt zu einer leichten Verschlechterung der Genauigkeit.

Im Anschluss an die internen Auswertungen wurden auch Vergleiche zu bestehenden Verfahren durchgeführt. Diese sind nur indikativ zu verstehen, da durch die unterschiedlichen Vorgehensweisen bezüglich der Datenverteilung, Vorauswahl von Flächen, dem Ungleichgewicht der Classen im Datensatz, der Auflösung von Bildfenstern beziehungsweise der Zuordnung zu Flurstücken die Vergleichbarkeit stark eingeschränkt ist. Auf dem Datensatz, der für das Training und die Evaluation der KI-Modelle verwendet wurde, konnte unter Ausweitung der räumlichen Varianz eine vergleichbare Erkennungsrate erzielt werden. Als Vergleichsverfahren für die Klassifikation von Baulücken und NVPs wurde ein GIS-basierter Ansatz betrachtet, der Flurstücke mit geringem Bebauungsgrad als Baulücke oder NVP identifiziert. Für den Vergleich wurden die Ergebnisse der Klassifikation der Bildausschnitte auf Ebene der Flurstücke aggregiert. Die Bildklassifikation des aktuellen Verfahrens kann die sehr hohe Anzahl überschüssiger Vorschläge aus dem GIS-basierten Ansatz stark reduzieren. Dabei wird aber auch der Recall verringert. Neben den Ergebnissen der Bildklassifikation hat dabei aber auch das Vorgehen bei der Übertragung der Ergebnisse auf die Flurstücke einen Einfluss, sodass dieser Vergleich nur bedingt aussagekräftig ist.

Zur weiteren Beurteilung der quantitativen Evaluationsergebnisse wurden in einer qualitativen Auswertung die falschen Klassifizierungsergebnisse auf Systematiken untersucht. Als Grund für Potenzialflächen, die in der Klassifikation fehlen, konnten uneindeutige Eingangsbilder identifiziert werden. Oft ist bei diesen für die fehlenden Potenziale auch visuell nicht klar erkennbar, dass es sich um eine Potenzialfläche handelt. Die Betrachtung der Bildausschnitte der überzähligen Vorschläge zeigt unterschiedliche Gruppen, von denen einige tatsächlich für weitere Betrachtungen als Potenziale relevant sind. Dies betrifft beispielsweise Grünanlagen oder unbebaute Teilflächen von Industrieanlagen. Für andere Gruppen sollten in zukünftigen Entwicklungen Möglichkeiten untersucht und eingesetzt werden, um diese zu entfernen, beispielsweise für Baustellen, die mittels ihres zeitlichen Verlaufs von Brachflächen unterschieden werden könnten.

Handlungsempfehlungen und Expertendiskussion

Die Ergebnisse der Auswertungen dienen als Grundlage für Überlegungen zur Umsetzbarkeit der Methode für eine bundesweite Abschätzung der vorhandenen Potenziale sowie zur Unterstützung von Kommunen bei der lokalen Erfassung von Potenzialflächen. In diesem Zuge wurde ein Expertenworkshop veranstaltet, indem das Verfahren sowie dessen praktischer Einsatz diskutiert wurde. Insgesamt wurde der vorgestellte Ansatz dabei als hilfreich und zielführend bewertet.

Für eine bundesweite Bestimmung der vorhandenen Potenziale bedeutet die hohe Anzahl der überschüssigen Vorschläge aus der automatisierten Erfassung, dass nur eine grobe Abschätzung anhand von Hochrechnungsfaktoren möglich ist. Es handelt sich nur um eine Vorauswahl von möglicherweise geeigneten Flächen, die weiter überprüft werden muss. Wenn in einem Teil der Kommunen eine Überprüfung der vorgeschlagenen Potenziale erfolgt ist, können Hochrechnungsfaktoren zwischen den klassifizierten und bestätigten Potenzialen bestimmt werden, um auch für die verbleibenden Kommunen eine Abschätzung der tatsächlich vorhandenen Potenziale zu treffen.

Für die Kommunen bietet eine automatisierte Vorerfassung einen Mehrwert, auch wenn weiterhin eine manuelle Prüfung erforderlich ist, da diese im Vergleich zum bisherigen Vorgehen nur noch für stark eingeschränkte Flächen durchgeführt werden muss. Um die Vorerfassung für die Kommunen möglichst zugänglich zu gestalten, wäre zukünftig ein Webtool geeignet, in dem die Kommunen die Vorschläge einfach bearbeiten können. Bei Systemadministration und -pflege durch eine übergeordnete Stelle werden die technologischen Anforderungen und der Aufwand in den Kommunen möglichst stark reduziert. Damit den Kommunen kein doppelter Aufwand entsteht, sollte ein neues Tool mit bestehenden Systemen kompatibel sein, wie sie beispielsweise in Rheinland-Pfalz, Hessen und Schleswig-Holstein bereits eingesetzt werden.

Fazit

Die bisher sehr aufwändige manuelle Identifikation von Innenentwicklungspotenzialen kann durch den Einsatz von Fernerkundungsdaten und Methoden der Künstlichen Intelligenz unterstützt werden. Gleichzeitig zeigt die vorliegende Methodenstudie, dass eine alleinige Nutzung von Fernerkundungsdaten nicht ausreichend für eine vollständig automatisierte Erkennung von Potenzialflächen ist. Die Integration weiterer, bisher auf Bundesebene unvollständig vorliegender, Datenquellen, wie digitalisierte Bebauungspläne und Flächennutzungspläne, ist als besonders zielführend einzuschätzen. Bei der Betrachtung zahlreicher Kommunen in dieser Studie wurden darüber hinaus starke Unterschiede bei der Erfassung der Potenzialflächen, abhängig von dem jeweiligen Siedlungsdruck, festgestellt. Die Etablierung und Fortführung eines bundesweit konsistenten Katasters für Potenzialflächen erfordern in diesem Zusammenhang die Einführung eines einheitlichen Erfassungsstandards.

1 Einleitung

1.1 Zunehmende Bedeutung von Innenentwicklungspotenzialen

Der Wohnraumbedarf in Deutschland erfährt eine immer stärkere Zunahme, die insbesondere durch den demografischen Wandel verursacht wird. Die abnehmende Haushaltsgröße und die Individualisierung der Lebensstile führen zu einem Anstieg der Haushaltszahlen. Diese Faktoren werden durch das steigende Alter der Bevölkerung verschärft. Gleichzeitig trägt das allgemeine Wohlstandswachstum zu der Nachfrage nach mehr Wohnraum bei. Zusätzlich steigt der Bedarf nach Wohnraum auch durch Zuwanderung. Daher hat die Bundesregierung den Bau von 400.000 neuen Wohnungen pro Jahr als Ziel gesetzt. 100.000 davon sollen Sozialwohnungen sein (vgl. BBSR 2022; Bundesregierung 2022). Im Jahr 2023 wurde die Wichtigkeit des Wohnungsbaus, vor allem in Form von bezahlbarem Wohnraum, durch Bundeskanzler Olaf Scholz erneut hervorgehoben. Dazu solle – neben der Mobilisierung von Bestandspotenzialen – auch die Entwicklung neuer Stadtgebiete wieder stärker in Betracht gezogen werden.

Der Wohnungsbau auf neuen Siedlungsflächen, also dem Außenbereich, ist allerdings mit Nachteilen verbunden: Das Wachstum der Siedlungs- und Verkehrsflächen führt zu einer zusätzlichen Versiegelung des Bodens und dem Verlust von fruchtbarem Ackerland. Die Infrastrukturnetze müssen ausgedehnt werden und die Pendlerbeziehungen sowie der Individualverkehr nehmen zu. Dadurch entsteht eine Zunahme an Emissionen. Die entstehende Fragmentierung der Landschaft hat außerdem negative Auswirkungen auf die Biodiversität, die Klimaregulation und auch auf den Wert als Erholungs- und Freizeitfläche.

Diese Effekte widersprechen den Ansätzen einer nachhaltigen Stadtentwicklung, die sich durch eine effiziente Flächennutzung auszeichnet. Stattdessen stellt die Innenentwicklung den Inbegriff nachhaltiger Entwicklung dar: Die Nutzung von Innenentwicklungspotenzialen (IEPs) reduziert die Flächenneuanspruchnahme, beseitigt Funktionsverluste innerhalb bestehender Siedlungen und dient der Revitalisierung von Innenstadtbereichen und Ortskernen. Zusätzlich verbessert die Mitnutzung der bestehenden Infrastruktur deren wirtschaftliche Tragfähigkeit.

Aus den genannten Gründen wird der Vorrang der Innenentwicklung vor der Außenentwicklung politisch vorgegeben. Der bereits 2004 formulierte Orientierungswert „Innenentwicklung zu Außenentwicklung wie 3:1“ (vgl. BBR 2004) wird ergänzt durch das Ziel, die Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsflächen bis 2030 auf unter 30 ha pro Tag zu reduzieren (vgl. Bundesregierung 2021). Für die Umsetzung dieses Ziels bestimmt die Bodenschutzklausel des § 1a BauGB, dass vor einer Inanspruchnahme neuer Flächen für die bauliche Nutzung ermittelt werden muss, ob alternativ Möglichkeiten der Innenentwicklung genutzt werden können. Für diese Bauflächen-bedarfsermittlung ist also von Seiten der Kommunen die Kenntnis der vorhandenen IEPs nötig.

1.2 Herausforderungen bei der Erfassung von Innenentwicklungspotenzialen

In einigen Kommunen findet bereits eine systematische Erfassung der geeigneten Flächen statt. Primär werden dazu manuelle Methoden genutzt, die zum Beispiel eine visuelle Auswertung von Luftbildern und lokales Fachwissen sowie Ortsbegehungen umfassen. Die manuelle Auswertung von Luftbildern ist zeitlich aufwändig und benötigt darüber hinaus lokales Fachwissen. Neben dem hohen Aufwand hat dieses Vorgehen den Nachteil, dass die Erfassung der unterschiedlichen Kommunen nicht einheitlich und standardisiert ist, sondern stark von der durchführenden Stelle / Person abhängt. Die Unterschiede erschweren die großräumige Sammlung der erfassten Potenziale, die aktuell primär umfragegestützt stattfindet. Zur Vereinfachung der Erfassung schlägt das Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR) vor, teilautomatisierte Ansätze zu nutzen, in denen im ersten Schritt eine automatisierte Vorerfassung erfolgt, die in Bezug auf Bedienung und Pflege

möglichst einfach ist. Im zweiten Schritt können dann auf Grundlage von lokalem Wissen die Informationen korrigiert und ergänzt werden (vgl. BBSR 2016).

Die Möglichkeiten zur Automatisierung der IEP-Erfassung wurden in dieser Methodenstudie umfassend untersucht, vor allem unter Berücksichtigung von Fernerkundungsdaten. Erste Ansätze zur Automatisierung existieren bereits und beruhen entweder auf einer Analyse von Geobasisdaten in einem Geoinformationssystem (GIS) oder auf der Klassifikation von Luftbildern.

1.3 Definition von Begrifflichkeiten

Im Folgenden werden zunächst die Begrifflichkeiten im Zusammenhang mit IEPs definiert. In der Literatur werden verschiedene Kategorisierungen von Potenzialtypen vorgenommen. Zum Teil überschneiden sich die verwendeten Begriffe, werden jedoch unterschiedlich definiert. Die bestehenden Definitionen aus der Literatur werden im Folgenden vorgestellt. Anschließend werden die für dieses Vorhaben verwendeten Definitionen präzisiert.

Innenbereich

Für die Identifikation von IEPs ist zunächst eine Definition des Innenbereichs im Gegensatz zum Außenbereich nötig. Als Innenentwicklung werden im Städtebaurecht zum einen Vorhaben im Geltungsbereich eines qualifizierten Bebauungsplans (B-Plan) und zum anderen innerhalb im Zusammenhang bebauter Ortsteile nach § 34 BauGB bezeichnet. Die Kriterien der Ortsteileigenschaft und des Bebauungszusammenhangs hängen jeweils von den örtlichen Gegebenheiten ab. Übliche Merkmale lassen sich aus der Rechtsprechung ableiten: Ortsteile müssen zumeist mindestens 10 bis 12 Gebäude beinhalten, die dem ständigen oder regelmäßigen Aufenthalt von Menschen dienen (vgl. Harig et al. 2014). Der Bebauungszusammenhang umfasst an den Rändern in der Regel nur die tatsächliche Bebauung, nicht aber möglicherweise anschließende Gartenflächen auf dem gleichen Flurstück (vgl. Hinteregger 2019). Die tatsächliche Bestimmung ist dennoch einzelfallabhängig und nicht über genaue Definitionen zu beschreiben.

Potenzialtypen in der Literatur

Die Definitionen der Potenzialtypen für dieses Vorhaben orientieren sich an den in der Baulandumfrage 2020 verwendeten Begrifflichkeiten (vgl. BBSR 2022). Demnach erfolgt eine Unterscheidung in die drei Gruppen (1) Brachflächen, (2) Baulücken und (3) NVPs, für die Abbildung 1 jeweils ein Beispiel zeigt.

Abbildung 1
Beispiele der drei definierten Potenzialtypen Brachfläche, Baulücke und Nachverdichtungspotenzial



Quelle: Vision Impulse; Hintergrund: DOP © Geobasis-DE / BKG (2024) (geändert)

Ebenso wie in der bisherigen Literatur (Kapitel 1.2.2), werden Flächen, die aktuell ungenutzt sind, aber vormals dem Gewerbe, dem Wohnen oder der Infrastruktur gedient haben, als Brachflächen erfasst. Sie beinhalten oft mehrere Landbedeckungsarten, zum Beispiel einerseits Vegetation wie Stauden, Büsche und Wiesen und andererseits die vorherige Bebauung oder Reste davon sowie versiegelte Flächen. Daraus lassen sich für die Erfassung Merkmale bestimmen, die insbesondere anhand von Luftbildern erkannt werden können.

Unbebaute Flächen, die aber eigentlich für eine Bebauung nutzbar wären, werden als Baulücken oder NVPs erfasst. Die Unterscheidung erfolgt dabei über den Abstand von den Erschließungsanlagen. Dies stimmt in vielen Fällen besser mit dem intuitiven Verständnis der Begriffe überein als eine flurstücksweise Betrachtung. Nicht berücksichtigt werden in dieser Definition der NVPs Möglichkeiten zum Umbau oder zur Erhöhung der Geschoszahl, da diese nicht anhand der freien Flächen erkennbar sind, sondern insbesondere von der Höhe und Ausnutzung der bestehenden Bebauung abhängen. Diese stellen aber insgesamt den kleinsten Anteil der IEPs dar und werden weiter eingeschränkt durch das oftmals fehlende Interesse der Grundstückseigentümer.

2 Aktueller Status bei der Erfassung von Innenentwicklungspotenzialen

2.1 Marktsondierung

Die Marktsondierung zum Thema IEP teilt sich in zwei Fragestellungen auf. Zum einen stellen IEPs eine wichtige Komponente für den Bodenmarkt dar. Daher werden in Kapitel 2.1.1 die Ergebnisse der Baulandumfrage zusammengefasst, die die bundesweit verfügbaren IEPs quantifiziert und mit dem Neubaubedarf vergleicht. Zum anderen wird der Markt für die Erfassung der IEPs untersucht. Aktuell erfassen viele Kommunen ihre Potenzialflächen mit aufwändigen manuellen Verfahren selbst. Zur Unterstützung dienen teilweise Plattformen der Bundesländer oder Regionalverbände (Kapitel 2.2). Es gibt aber auch kommerzielle Geodienstleister, die zunehmend automatisierte Verfahren zur Identifikation von Potenzialflächen anbieten (Kapitel 2.3).

2.1.1 Bedeutung von Innenentwicklungspotenzialen für den Wohnungsmarkt

Die letzte Baulandumfrage des BBSR aus dem Jahr 2020 befasst sich mit der Ermittlung der bundesweit verfügbaren Potenzialflächen. Zur Ermittlung wurde ein Fragebogen an eine repräsentative Stichprobenauswahl deutscher Kommunen versendet, in dem unter anderem die vorhandenen Potenziale abgefragt wurden.

Aus den Ergebnissen der Umfrage erfolgte eine Hochrechnung der Potenzialflächen für ganz Deutschland. Diese beläuft sich auf 84.000 ha oder rund 4 % der Siedlungsfläche Wohnen, Industrie und Gewerbe (WIG). Bei der regionalen Verteilung der Flächenpotenziale fällt auf, dass in den neuen Bundesländern der Anteil mit 5,5 % deutlich über dem Anteil in den alten Bundesländern liegt. Außerdem konnte ein Zusammenhang mit der demografischen Dynamik der Gemeinden festgestellt werden. Sowohl in wachsenden als auch in schrumpfenden Gemeinden gibt es mehr IEPs als in Gemeinden mit gleichbleibender Einwohnerzahl. Seit der vorherigen Baulandumfrage im Jahr 2012 haben die Flächenpotenziale insgesamt um rund 36.000 ha abgenommen, diese Flächen wurden also zwischenzeitlich mobilisiert (vgl. BBSR 2022: 48 ff.). Für die zukünftige Entwicklung ist in einem Großteil der Gemeinden weiterhin keine Entstehung weiterer IEPs absehbar, in größeren Gemeinden allerdings eher als in kleineren. Hauptgründe für die Entstehung neuer Flächenpotenziale sind Verlagerung und Aufgabe von Gewerbe- oder landwirtschaftlichen Flächen (vgl. BBSR 2022: 53 f.).

Von den erfassten Potenzialen der Kommunen wurden knapp 30 % aus vorliegenden Daten bestimmt, der Rest erfolgte über Schätzungen, beispielsweise aufgrund anderer Definitionen und Kategorisierungen, aus denen der in der Baulandumfrage abgefragte Anteil abgeschätzt wurde. Da die geschätzten Angaben im Verhältnis zur WIG durchgängig kleiner waren als bei der Angabe vorliegender Daten, wird der ermittelte Wert als Untergrenze angesehen. Mit der Annahme, dass in Kommunen mit geschätzter Angabe die tatsächlichen Potenziale denen der Kommunen mit vorliegenden Daten entsprechen, kann eine ungefähre Obergrenze von 106.000 ha abgeschätzt werden (vgl. BBSR 2022: 56).

Ausgehend von der Untergrenze wurden mit verschiedenen Modellen die darauf errichtbaren Wohneinheiten (WE) berechnet. Dabei wurden unterschiedliche Bebauungsdichten angenommen. Die ermittelten Werte umfassen je nach Modell eine Spanne zwischen 1.407.000 und 3.500.000 WE (vgl. BBSR 2022: 77). Die Kommunen bewerteten dabei aber nur circa 30 % der IEPs als direkt oder kurzfristig mobilisierbar. In Großstädten werden oft schnelle Mobilisierungsmöglichkeiten gesehen, in Mittelstädten hingegen seltener (vgl. BBSR 2022: 66 f.). Der größte Teil der Flächenpotenziale liegt im Eigentum von Privatpersonen, für die Gesamt-Baulandpotenziale (IEPs zuzüglich baureifer Baulandreserven) sind es 77 % (vgl. BBSR 2022: 64). Dies stellt das größte Hemmnis der Mobilisierung dar, da oft die Bereitschaft zur Mobilisierung fehlt. Daneben sind auch die Kosten der Mobilisierung und Widersprüche des Natur- und Artenschutzes häufig genannte Problematiken (vgl. BBSR 2022: 69 f.).

Im Vergleich zu den realisierbaren Wohneinheiten auf den Flächenpotenzialen wurden mittels des IW-Wohnungsbedarfsmodells Bedarfe von jährlich 308.000 WE für den Zeitraum von 2021 bis 2025 bestimmt, insgesamt also 1,54 Mio. WE. Die IEPs bieten im Vergleich dazu also ausreichende Flächen, sind allerdings nicht schnell genug mobilisierbar. Bei zusätzlicher Berücksichtigung der baureifen Baulandreserven ergeben sich insgesamt 878.600 bis 2.233.500 kurzfristig mobilisierbare Wohneinheiten. Je nach Bebauungsdichte können die Neubaubedarfe also durch die kurzfristig nutzbaren Gesamt-Baulandpotenziale gedeckt werden (vgl. BBSR 2022: 77 f.).

Für den Wohnungsmarkt, insbesondere in Bezug auf Neubauten, sind die IEPs also sehr relevant. Insbesondere Planungsbüros und Projektentwickler können durch Fokussierung auf die Innenentwicklung neuen Wohnraum schaffen. Auch für sie ist daher die Erfassung von IEPs wichtig, um geeignete Flächen für neue Vorhaben zu identifizieren.

2.1.2 Regionale und überregionale Angebote zur Erfassung von Potenzialflächen

Die Identifikation von IEPs erfolgt in Deutschland überwiegend in Selbstarbeit der einzelnen Kommunen. Dabei werden in den verschiedenen Kommunen jeweils unterschiedliche Baulandkategorien erfasst. Am häufigsten erfolgt die Erfassung von Baulücken. Diese wird in über 50 % der Kommunen flächendeckend durchgeführt und hat im Vergleich zu der Umfrage von 2012 um ca. 20 % zugenommen. Auch baureife Baulandreserven sowie Potenziale aus Flächennutzungsplan (FNP) und B-Plan werden in über 50 % der Kommunen flächendeckend oder für Teilgebiete erfasst, wobei die ersten beiden zwar zu den Gesamt-Baulandpotenzialen zählen, aber häufig nicht im Innenbereich liegen. Brachflächen hingegen werden nur in gut 30 % der Kommunen teilweise oder flächendeckend erfasst, bei NVPs sind es 17 % (vgl. BBSR 2022: 85 f.).

Die Identifikation der Potenziale erfolgt innerhalb der Kommunen jeweils manuell und beruht auf unterschiedlichen Informationsgrundlagen. Mit 64 % an erster Stelle steht die Nutzung von FNPs und B-Plänen, gefolgt von Schätzungen und Nutzung von Erfahrungswissen mit rund 50 %. Insbesondere in den neuen Bundesländern und in kleineren Kommunen ist der Anteil der Erfassung mittels Schätzung und Erfahrungswissen sowie durch Begehungen besonders hoch. GIS-Anwendungen, die ebenfalls in rund 50 % der Kommunen genutzt werden, haben bei der Erfassung zwei Aufgaben. Sie werden zum einen zur Identifikation genutzt, indem verschiedene Kartenlayer überlagert werden, sodass visuell die Potenzialflächen erkennbar sind. Zum anderen werden darin die identifizierten Potenzialflächen eingetragen und können dann ebenfalls dargestellt und verwaltungsintern geteilt werden (vgl. BBSR 2022: 90 f.). Ob die GIS-Anwendungen auch für eine automatisierte Vorauswahl verwendet wurden, wurde nicht abgefragt. In den Befragungen einzelner Kommunen wird die Automatisierung nur im Hinblick auf die Fortschreibung mittels Bautätigkeitsstatistik sowie auf die Einbindung und Berechnung zusätzlicher Informationen zur Bewertung der Flächen thematisiert. Daraus lässt sich schließen, dass die Erhebung der Flächen bisher im Allgemeinen nicht automatisiert erfolgt (vgl. BBSR 2022: 199 ff.).

Dennoch sind die Erfassungsaktivitäten in den Kommunen seit 2012 gestiegen. Die Angaben in 30 % der Kommunen basieren auf vorliegenden Daten, 2012 waren es nur 20 %. Die übrigen Angaben wurden durch die Kommunen abgeschätzt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass auch Kommunen mit systematischer Erfassung ihrer Flächenpotenziale eine Abschätzung durchführen mussten, wenn sie nach anderen Definitionen erfassen und daraus den Anteil der abgefragten Potenzialtypen bestimmen mussten (vgl. BBSR 2022: 55).

Für die Erfassung der identifizierten Flächenpotenziale stehen derzeit unterschiedliche Datenbanken oder Tools für die Kommunen in folgenden Bundesländern bereit: Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Niedersachsen, Rheinland-Pfalz, Sachsen, Schleswig-Holstein und Thüringen sowie die Stadtstaaten Berlin, Bremen und Hamburg.

Darin können die Kommunen selbständig die von ihnen erfassten Potenziale eintragen. Teilweise erfolgt darüber auch eine Vorerfassung, die dann innerhalb der Kommunen überprüft und korrigiert werden kann. Inse-

samt werden diese Angebote von 32 % der Kommunen in diesen Bundesländern genutzt. Einen erheblichen Anteil daran bilden die Kommunen in Rheinland-Pfalz, die zu 74 % den dort verfügbaren Raum+Monitor nutzen. Die übrigen Tools werden nur von zwischen 6 % (Baden-Württemberg) und 33 % (Thüringen) der Kommunen genutzt (vgl. BBSR 2022: 89).

Der Raum+Monitor in Rheinland-Pfalz folgt der Raum+Methode, die in Deutschland flächendeckend für Rheinland-Pfalz sowie weitere Regionalverbände und auch in Luxemburg und Teilen der Schweiz umgesetzt wurde (vgl. Elgendy 2014; Feltgen et al. 2023; BBSR 2022: 33 f.). Das Vorgehen besteht aus einer teilautomatisierten Vorherhebung, on-screen Luftbildauswertung und anschließenden Erhebungsgesprächen mit den einzelnen Kommunen. Der genauere Ablauf wird in Kapitel 4.3 beschrieben. Der große Erfolg des Raum+Monitors in Rheinland-Pfalz im Vergleich zu den Tools der anderen Länder liegt unter anderem daran, dass die darin erfassten Daten als Planungsgrundlage bei Flächenausweisungen dienen. Nur, wenn die IEPs den Neubaubedarf nicht decken, dürfen neue Bauflächen ausgewiesen werden. Nach der Ersterfassung im Jahr 2010 durch ein vom Land beauftragtes Planungsbüro führt ein Großteil der Kommunen die Pflege der Datenbank fort, damit bei der Bedarfsermittlung nicht von zu großen Potenzialflächen ausgegangen wird. Die Systemadministration und -pflege für den Raum+Monitor wird durch das Land gewährleistet (vgl. BBSR 2022: 128 f.). Im Gegensatz dazu wurden die Datenbanken der anderen Länder teilweise nach der ersten Entwicklung nicht weiter softwaretechnisch aktualisiert, sodass Schnittstellen nicht mehr funktionieren und auch die Kriterien und Merkmale für die Erfassung in den Kommunen nicht als zielführend angesehen werden. Daher werden in vielen erfassenden Kommunen eigene Systeme bevorzugt, die speziell auf die jeweiligen Anforderungen, Definitionen und Kategorisierungen ausgelegt sind (siehe Kapitel 6).

Aufgrund der geringen Nutzung sind die Datenbanken und Tools der Länder aktuell nicht für eine einheitliche Auswertung der Flächenpotenziale geeignet. Ein Ansatz wie in Rheinland-Pfalz, in dem eine Ersterfassung erfolgt, die dann regelmäßig durch die Kommunen aktualisiert wird, scheint jedoch zielführend und kann durch eine stärkere Automatisierung der Ersterfassung weiter erleichtert werden. Aktuelle Entwicklungen in Schleswig-Holstein und Hessen zeigen, dass der Bedarf neuer Tools auch bei den Landesverwaltungen bekannt ist. In beiden Ländern wurde den Kommunen in diesem Jahr ein neu entwickeltes System zur Potenzialerfassung bereitgestellt. In Hessen erfolgt bereits eine Vorauswahl potenzieller Flächen mittels der Daten des Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystems. Da beide Systeme erst seit kurzem im Einsatz sind, ist bisher keine Aussage möglich, inwieweit die Nutzung von Seiten der Kommunen im Vergleich zu den Informationen der Umfrage von 2020 (vgl. BBSR 2022) zunimmt.

Auch vergleichbare regionale Tools, beispielsweise aus der Metropolregion Rhein-Neckar, aus dem Siedlungsflächenmonitoring (SFM) der einzelnen Planungsregionen in NRW, oder aus dem Regionalverband FrankfurtRheinMain führen in den entsprechenden Gebieten zu einer einheitlichen Erfassung und, bei Knüpfung von Flächenneuausweisungen oder Förderungen an die erhobenen Flächen, auch zu einer stärkeren Mitwirkung der Kommunen.

2.1.3 Kommerzielle Angebote zur Erfassung von Potenzialflächen

Neben der eigenständigen Identifikation von Potenzialflächen durch die Länder, Regionalverbände und Kommunen können diese auch Geo-Dienstleister beauftragen. Der klassische Ansatz der Dienstleister ist eine visuelle Luftbildauswertung, teilweise unterstützt durch eine vorherige Einschränkung mittels GIS-Analysen. Zu den darüber bestimmten Flächenpotenziale können dann manuell weitere Daten überprüft werden, beispielsweise zur Entfernung von Flächen mit Entwicklungshemmnissen wie Altlasten, Hochwasser- oder Naturschutz. Abschließend erfolgt eine Validierung vor Ort in Abstimmungsgesprächen und Besichtigungen. Für die Auftraggeber erleichtert externe Durchführung die Erfassung stark, da nur im letzten Schritt eine Mitarbeit erforderlich ist. Neben der allgemeinen Erfassung von Flächenpotenzialen gibt es auch Anbieter, die sich speziell auf die Erfassung von Brachflächen fokussieren. Brachflächen werden in vielen der bestehenden Baulandkataster der Kommunen nicht erfasst, obwohl sie einen großen Anteil an den Potenzialflächen darstellen.

Neben diesen Anbietern werden auch erste durch Künstliche Intelligenz (KI) gestützte Erfassungsplattformen angeboten. Diese richten sich in erster Linie an Immobilienmakler, Projektentwickler oder Bestandshalter, die das Bebauungspotenzial ihrer eigenen Flächen bestimmen oder geeignete Grundstücke finden möchten. Im Gegensatz zu den vorher beschriebenen Anbietern werden also nicht nur Flächen identifiziert, die unter den in Kapitel 1.2 beschriebenen Merkmalen als IEP gelten, sondern für jedes angefragte Grundstück kann eine Analyse durchgeführt werden, wie eine optimale Ausnutzung aussehen könnte. Somit sind diese Tools nicht nur auf die städtebaulich relevanten Potenziale eingeschränkt, sondern auch eine kleinteiligere und detailliertere Analyse ist möglich. Das genaue Vorgehen der KI-gestützten Analysen wird von den Anbietern nicht öffentlich beschrieben und kann daher in der Methodenstudie nicht weiter berücksichtigt werden.

2.2. Leitfragengestützte Interviews mit Experten

Neben der Literaturrecherche tragen die leitfragengestützten Interviews mit Schlüsselpersonen aus Planung, Forschung und Wirtschaft dazu bei, die aktuelle Situation der Erfassung von Flächenpotenzialen zu ermitteln. Die Leitfragen für die unterschiedlichen Expertengruppen sind in Anhang A3 aufgelistet. Im Folgenden werden die Hauptaussagen aus den Interviews der jeweiligen Gruppe zusammengefasst.

2.2.1 Ergebnisse der Interviews mit der Expertengruppe „Planung“

In der Expertengruppe „Planung“ wurden jeweils die verantwortlichen Stellen für die Erfassung von Flächenpotenzialen kontaktiert. Zumeist sind dies die Ämter oder Abteilungen für Stadtentwicklung und Stadtplanung. Die interviewten Stellen waren deutschlandweit verteilt.

Sie sind die Zielgruppe der später folgenden Methodenentwicklung, sodass die von ihnen genannten Anforderungen im Verlauf des Projekts besonders wichtig sind. Außerdem konnte hier auch die Wichtigkeit einer Automatisierung und die Mitwirkungsbereitschaft aus Sicht der Städte und Kommunen abgefragt werden. Daher stellt die Expertengruppe „Planung“ den größten Anteil der Interviews dar.

Einige Kommunen führen ein spezielles Informationssystem für Wohnbauflächen, in dem die Potenziale ab einer gewissen Anzahl an Wohneinheiten erfasst werden. Kleinteiligere Potenziale können innerhalb der einzelnen Bezirke zusätzlich erfasst werden. Im Gegensatz zu vielen Potenzialflächen-Katastern verzichten einige Kommunen auf eine systematische flächendeckende Identifizierung von Potenzialflächen. Stattdessen werden im Informationssystem die Flächen eingetragen, die im Rahmen von konkreten städtebaulichen Planungen, Nachverdichtungsstudien oder Bauanträgen aufgetan werden.

Bei anderen Kommunen erfolgt eine strenge Unterscheidung zwischen Baulückenkataster und Innenentwicklungsatlas, wobei die Baulücken zum Teil aus den Potenzialflächen abgeleitet wurden. Die Flächen im Innenentwicklungsatlas stellen zunächst nur potenzielle Innenentwicklungsflächen dar, an denen aber noch viele Unsicherheiten hängen. Diese wurden initial einmalig erfasst und werden nun nach und nach abgearbeitet, um sie einer Nutzung zuzuführen. Entsprechende Experten überprüfen diese Daten daraufhin, ob eine sofortige Bebauung möglich wäre. Dies beinhaltet die Sichtung der B-Pläne, Beteiligung anderer Fachämter und Prüfung der Erschließung. Zusätzlich zur Überprüfung der Flächen aus dem Innenentwicklungsatlas wird das Baulückenkataster auch über die Sichtung neu aufgestellter B-Pläne und nach Baulandumlegung ergänzt. Über entsprechende Ämter werden andererseits bei der Stellung von Bauanträgen die entsprechenden Flächen entfernt.

Aufgrund großer Flächeninanspruchnahmen nach der Wiedervereinigung, die stadtplanerisch schnell als Problem gesehen wurden, sowie nur lückenhaft wiederaufgebauten innerstädtischen Kriegsschäden wurde in einigen Kommunen bereits vor circa 25 Jahren die systematische Erfassung von IEPs begonnen. Dabei wurden zunächst überwiegend Brachflächen erfasst. Außerdem wurde auch ein separates Wohnbauflächen-

potenzialkataster entwickelt. Aufgrund der großen Überschneidungen wurden diese mittlerweile zu einem gemeinsamen Flächenpotenzialkataster zusammengefügt. Die darin erfassten Flächen werden regelmäßig manuell aktualisiert, beispielsweise bei einer Fortschreibung der Bauleitplanung, aber auch mittels erneuter Luftbildauswertungen und insbesondere für die Beurteilung bebauter Brachflächen auch durch Vor-Ort-Besichtigungen.

Einige Kommunen können auf landesweites Systeme zur Vorerfassung zurückgreifen. So erfolgt bei diesen Kommunen eine Ersterfassung der Flächenpotenziale im Rahmen einer landesweiten Einführung entsprechender Lösungen, beispielsweise dem Raum+Monitors (siehe Kapitel 2.2). Diese Vorerfassung wird anschließend überprüft und nachbearbeitet, da viele Flächen enthalten sind, die tatsächlich nicht für eine Bebauung geeignet sind. In städtischen GIS wird diese Datenbasis auf Grundlage der Bauanträge fortgeführt. Zusätzlich werden auch die NVPs gesamtstädtisch analysiert und bewertet.

Auch weitere Kommunen setzen zwei unterschiedliche Erfassungsebenen ein. Zum einen werden Flächen mit Baurecht erfasst, die noch nicht genutzt werden. Zum anderen werden durch die Kommune sowohl große für den Wohnungsbau geeignete Flächen ab einer Mindestgröße erfasst und veröffentlicht als auch eine verwaltungsinterne Baulückenkartierung mit Flächen ab einer Mindestgröße durchgeführt. In der Baulückenkartierung werden sowohl Flächen mit als auch ohne Planungsrecht erfasst. Auch subjektive Bewertungen spielen hier oftmals eine große Rolle. Beispielsweise werden Grundstücke mit bestehender nicht-wohnlicher Nutzung, die voraussichtlich längerfristig besteht, nicht in die Kartierung aufgenommen. Es sind also nur Flächen enthalten, bei denen eine Bebauung wahrscheinlich erscheint.

Bereits geplante Potenzialflächen werden oftmals direkt von Kommunen erfasst. Dabei erfolgte eine einmalige Ersterfassung, die über eine Verknüpfung mit bewilligten Bauanträgen fortwährend automatisch aktualisiert wird. Im städtischen GIS-System werden sowohl vollständig unbebaute Flächen erfasst als auch Flurstücksteile, auf denen eine zusätzliche Bebauung möglich wäre. In beiden Fällen wird jeweils nur der bebaubare Flurstücksteil ausgewählt, sodass die Bebauungsgrenze aus der umliegenden Bebauung eingehalten wird. Brachflächen oder NVPs, die zunächst einer Planung bedürfen, werden oftmals nicht erfasst.

Insgesamt herrscht bei den interviewten Personen Einverständnis, dass die Innenentwicklung nicht nur wegen der rechtlichen Regelungen Vorrang vor der Außenentwicklung haben sollte, sondern auch aus der Überzeugung, dass dies einer nachhaltigen Entwicklung entspricht. Vor allem die Verringerung des Ressourcenverbrauchs, des Mobilitätsaufwands im Vergleich zur Außenentwicklung sind dabei relevante Aspekte. Es wird aber auch darauf hingewiesen, dass nicht jede Nachverdichtung gut ist, da die Wohnqualität bei zu starker Verdichtung eingeschränkt wird und auch die Baukultur erhalten bleiben soll. Dies ist besonders wichtig bei kleineren Städten mit geringem Siedlungsdruck, wohingegen in großen Städten mit starkem Bevölkerungswachstum alle verfügbaren Flächen genutzt werden müssen. Bei gleichbleibender oder abnehmender Bevölkerung ist die Nachverdichtung besonders wichtig, um Leerstände innerhalb der bestehenden Bebauung zu vermeiden. Je nach Stadtbild werden unterschiedliche Potenzialtypen als besonders vielversprechend angesehen. Insbesondere über die Wichtigkeit von Aufstockungen gibt es unterschiedliche Meinungen. Einerseits werden sie als vielversprechend hervorgehoben, da ohne zusätzliche Flächeninanspruchnahme viele zusätzliche WE geschaffen werden können. Andererseits wird die Realisierbarkeit durch Anforderungen an die Statik, durch die Kosten und durch die Eigentümerinteressen stark eingeschränkt. Insgesamt werden die Eigentümerinteressen als großes Hemmnis bei der Innenentwicklung gesehen. Insbesondere, wenn es um die Schaffung bezahlbaren Wohnraums geht, ist dies auf Privateigentum nur selten möglich. Bei der Erfassung von Potenzialflächen ist daher aus Sicht der Planung auch die Angabe der Eigentumsituation ein relevanter Bestandteil. Auf dieser Grundlage erfolgt in manchen Städten bereits eine gezielte Eigentümeransprache, um gezielt dort Maßnahmen treffen zu können, wo Interesse an einer Baurechtsschaffung besteht. Teilweise wird aber auch angemerkt, dass die Eigentümer es üblicherweise wissen, wenn sie eine Baulücke besitzen und kein Interesse an einer Bebauung haben, sodass Eigentümeransprachen dort nicht zielführend sind. Bei Potenzialflächen, für die noch kein Baurecht besteht, werden auch Bodenmarkteffekte als Nachteil der Eigentümeransprache genannt.

Bei Anzeichen einer zukünftigen Baurechtschaffung können Bodenspekulationen provoziert werden, die zu einer starken Steigerung des Bodenwerts führen. Vor einer Eigentümeransprache oder Veröffentlichung von Potenzialflächen sollte also eine Instrumentierung zur Sicherung des Bodenpreises überlegt werden, damit der Wohnraum bezahlbar bleibt.

Die Erfassung von Potenzialflächen erfolgt überall manuell. Der Aufwand der Ersterfassung wird überall als sehr zeitintensiv beurteilt, hier wird dringend eine Erleichterung benötigt. Der Aufwand der Fortschreibung hingegen wird in verschiedenen Städten unterschiedlich bewertet. Ein sehr hoher Aufwand besteht vor allem in den Städten, in denen für die Fortschreibung keine automatische Überprüfung der Bauanträge möglich ist, um in die Nutzung überführte Potenziale zu entfernen, oder keine Anpassung bei der Aufstellung neuer Bauleitpläne erfolgt. Außerdem ist für Abrisse und Rückbauten nicht überall ein Bauantrag nötig, sodass dadurch entstehende Potenziale nicht immer in die Fortschreibung eingehen. Bei anderen Städten, in denen bereits ein gutes städtisches GIS existiert und für die Fortschreibung benötigte Daten automatisch von anderen Fachämtern übernommen werden können, wird nur die subjektive Überprüfung der tatsächlichen Mobilisierbarkeit als zeitintensiv benannt.

Potenzial für eine automatisierte Erfassung von Potenzialflächen wird bei einem eher großräumigen Maßstab und der rein rechnerischen Bestimmung der Potenziale gesehen, wohingegen kleinräumig eine individuelle Überprüfung der örtlichen Gegebenheiten durch verschiedene Fachämter als unabdingbar beurteilt wird. Dies entspricht auch den in Kapitel 4 vorgestellten Ansätzen, in denen eine automatisierte Vorerfassung erfolgt, die dann durch lokale Bearbeitende validiert wird. Über die bisherigen Ansätze hinausgehend wird Potenzial in der Verwendung von Luftbildern zur Bestimmung der Wertigkeit von Grünflächen gesehen, über die möglicherweise naturschutzrechtlich relevante Flächen als Potenziale ausgeschlossen werden können.

Als potenzielle Schwierigkeiten bei der automatisierten Erfassung wird an erster Stelle die fehlende Verfügbarkeit digitalisierter maschinenlesbarer Bauleitpläne genannt. In Zukunft ist hier durch die aktuelle Einführung des Standards XPlanung ein Fortschritt zu erwarten. Allerdings werden damit noch einige Schwierigkeiten gesehen, da nicht alle Festsetzungen der tatsächlichen B-Pläne darin eingetragen werden können und vor allem für die Nachdigitalisierung bestehender Pläne viel Fachkenntnis nötig ist. In Bezug auf bestehende B-Pläne wird aber auch darauf hingewiesen, dass durch das Baulandmobilisierungsgesetz die Möglichkeiten zur Befreiung davon erweitert wurden. Somit können Flächen auch intensiver genutzt werden als im B-Plan festgelegt und Potenziale über den B-Plan hinaus existieren. In einigen Kommunen wurden teilautomatisiert vorerfasste Potenzialflächen aus entsprechenden landesweiten Systemen überprüft. Dabei wurden weitere häufige Schwierigkeiten identifiziert, die in der Vorerfassung zu Fehlern führten. Dies betrifft einerseits Flächen, für die bereits Bauanträge bestehen. Andererseits werden auch Flächen, die im B-Plan als Grünfläche, z. B. als Spielplatz, fixiert sind oder Stellplätze, die für ein Bauvorhaben vorgeschrieben sind, als Potenzial erfasst. Bei einigen der vorerfassten Potenzialflächen schließen außerdem steile Böschungen eine Mobilisierung aus.

Insgesamt wird eine automatisierte Vorauswahl als vielversprechend angesehen, insbesondere wenn die benannten Schwierigkeiten weiter eingeschränkt werden können, sodass die Flächen für die manuelle Überprüfung möglichst stark eingegrenzt sind. Auch das Interesse der Städte an den Ergebnissen der Methodenstudie ist groß, um zu sehen, wie ähnlich die automatisiert erfassten Flächen zu den eigenen Daten sind. Der Bedarf nach einer Automatisierung in der eigenen Erfassung ist je nach Beurteilung des Aufwands der bisherigen Methodik unterschiedlich. Insbesondere bei bereits vorliegender genauer Ersterfassung ist der Bedarf einer erneuten Erfassung mittels automatisierter Ergebnisse eher gering. Für Kommunen mit fehlender, unvollständiger oder nicht fortgeführter IEP-Erfassung wird die tatsächliche Umsetzung einer automatisierten Methode aus Sicht der interviewten Personen aber als sehr hilfreich eingeschätzt. Für eine tatsächliche Umsetzung einer automatisierten Vorerfassung müssten die entsprechenden Verfahren für die Kommunen einfach umsetzbar sein, ohne große Personalkapazitäten für software- und datentechnische Fragestellungen zu beanspruchen.

2.2.2 Ergebnisse der Interviews der Expertengruppe „Wissenschaft“

Im Bereich der Wissenschaft wurden Interviews mit Experten verschiedene Fachbereiche durchgeführt. Die Schwerpunkte der gestellten Leitfragen jeweils entsprechend angepasst wurden.

Auch aus Sicht der Wissenschaft stellt die Nachverdichtung und die Erfassung entsprechender Potenziale eine wichtige Aufgabe dar. Dennoch muss auch beachtet werden, dass bei einer zu starken Verdichtung die Aufenthaltsqualität und somit der Stadt- und Immobilienwert leiden, insbesondere langfristig. Außerdem muss auch eine zu starke Versiegelung im Stadtgebiet vermieden werden, um ausreichend Flächen für die Entwässerung zu erhalten. Bei der Potenzialerschließung sollte also auch berücksichtigt werden, dass genug Freiflächen bestehen bleiben. Auch die Erfassung von Flächen, die entsiegelt werden können, sollte ergänzend durchgeführt werden.

Als idealer Ansatz für die Kommunen wird ein kombiniertes Verfahren gesehen, bei dem durch ein externes Planungsbüro, beauftragt durch eine übergeordnete Landesbehörde oder einen Kommunalverband, eine automatisierte Vorerfassung erfolgt, und den Kommunen bereitgestellt wird. Für die weitere Filterung der Vorerfassung bietet die KI-Auswertung von Luftbildern das Potenzial, eine ähnliche Genauigkeit wie Experten ohne weitere Ortskenntnisse zu erzielen, aber mit einer deutlich verbesserten Skalierbarkeit der Fläche. Die Kommunen können dann, ohne selbst für die Systemadministration und Pflege der Software verantwortlich zu sein, die Daten überprüfen und validieren. Dieses Angebot kann, wie es in Rheinland-Pfalz bereits über den Raum+Monitor umgesetzt ist, als Grundlage für die Bedarfsermittlung im Rahmen neuer Baulandausweisungen dienen. Dadurch haben die Kommunen selbst ein Interesse daran, die Daten zu pflegen. In der Vorerfassung sind immer zu viele Flächen enthalten, die die Kommunen sonst an einer Baulandausweisung hindern würden. Die bisherigen Selbstauskünfte der Kommunen sind fehlerbehaftet und unterschätzen oft die Potenziale, teils strategisch und teils, weil die Kommunen nicht alle Flächen im Blick haben. Durch die Vorerfassung wird die Aufmerksamkeit auch auf diese Flächen gelenkt, sodass eine vollständigere Erfassung möglich ist.

Ein ähnliches Angebot ist nicht nur für die Kommunen relevant, sondern auch für Projektentwickler, die nach geeigneten Flächen suchen. Da diese nicht über die nötige Ortskenntnis zur Validierung am Bildschirm haben, wird vorgeschlagen, zusätzlich zu den vorermittelten Flächen auch eine automatische Routenplanung zur effizienten Vor-Ort-Besichtigung durchzuführen. Außerdem können verschiedene Auswahlkriterien angeboten werden, über die abgewägt werden kann, ob möglichst viele tatsächliche Potenziale in der Auswahl enthalten sein sollen, auch wenn dann viele fälschlich erfasste Flächen dabei sind, oder ob die angezeigten Potenziale sehr sicher sein sollen, dafür aber auch einige fehlen dürfen. Somit hat der Nutzer die Kontrolle über die Menge der angezeigten Potenziale.

Für eine Abschätzung der Potenzialflächen auf Bundesebene stellt weiterhin die Validierung ein Problem dar. Näherungsweise können Faktoren der Abweichung zwischen Vorerfassung und validierten Daten für repräsentative Kommunen bestimmt werden, die eine Validierung durchgeführt haben. Darüber kann dann eine Hochrechnung erfolgen. Ein Vergleich automatisierter Ergebnisse mit den bisher bestehenden Potenzialdatenbanken zur Bestimmung von Hochrechnungsfaktoren ist aufgrund der beschriebenen Unterschätzung innerhalb der Kommunen nicht ausreichend.

2.2.3 Ergebnisse der Interviews der Expertengruppe „Wirtschaft“

Als Experten aus der Wirtschaft wurden Anbieter von Potenzialerschließungssystemen für Kommunen oder sonstige Anwender interviewt.

In diesem Zusammenhang wurden mehrere Schwierigkeiten aktueller Systeme identifiziert. Als Datengrundlage werden FNSs benötigt, die nicht einheitlich und auch nur selten digitalisiert vorliegen. Somit ist die Datenaufbereitung ein sehr aufwendiger Schritt. Die ALKIS-TN entspricht aber nicht den Genauigkeitsanforderungen

und wurde daher als Datengrundlage verworfen. Dies betrifft einerseits Außenreserven, für die bereits ein FNP besteht, die aber laut aktueller Nutzung beispielsweise noch landwirtschaftlich genutzt werden. Andererseits werden auch IEPs ausgeschlossen, wenn die Nutzung nicht dem Wohnen zuordbar ist. Eine weitere Schwierigkeit ist die Datenaktualität, sowohl für die Geobasisdaten als auch für die Luftbilder. Dadurch können aktuelle Entwicklungen immer nur mit zeitlichem Verzug erfasst werden. Es ist also wichtig, die Ergebnisse im Gespräch mit den Kommunen zu validieren. Dabei wird der Aufwand für die Kommunen möglichst gering gehalten. Die Auftraggeber sind üblicherweise Regionen oder Ministerien, für die Kommunen ist die Erfassung also kostenlos und sie müssen lediglich je nach Kommunengröße ein Erhebungsgespräch einplanen. Dabei ist es wichtig, eine möglichst genaue Vorauswahl zu treffen, um die Glaubwürdigkeit in den Kommunen zu erhalten. Je größer der Anteil der falsch erfassten Potenziale ist, desto stärker werden die übrigen Flächen hinterfragt. Bei einigen Lösungen, die für die Vorerfassung nur auf einer GIS-Analyse basieren und keine Luftbilder betrachten, wird oftmals der hohe Anteil an ungeeigneten Flächen kritisiert. Gleichzeitig ist für eine flächendeckende Verbesserung der Qualität ist jedoch eine manuelle, visuelle Luftbildauswertung zu aufwendig. Hier werden Potenziale in einer KI-basierten Luftbildauswertung gesehen, um Flächen mit Bautätigkeit oder anderen Eigenschaften, die sie als Potenzialflächen ausschließen, automatisiert aus der Vorerfassung zu entfernen.

Im Vergleich mit bestehenden Datenbanken gibt es bei den Ergebnissen der eingesetzten Methoden oft große Unterschiede, wenn die Definitionen der Potenziale sich unterscheiden. Beispielsweise unterscheidet sich der Zeitpunkt, ab dem eine Baulücke nicht mehr als Potenzial angesehen wird, zwischen dem Zeitpunkt eines Verkaufs, dem Zeitpunkt eines Verkaufs mit Bauverpflichtung, dem Zeitpunkt der Stellung eines Bauantrags oder dem Zeitpunkt des Baubeginns.

Insgesamt ist die automatisierte Vorerfassung insbesondere für die Kommunen ein Gewinn, die bisher keine eigene Erhebung durchführen oder einmalig erfasste Daten nicht fortführen. In Kommunen und insbesondere großen Städten, die bereits gute eigene Datengrundlagen und effiziente Ansätze zur Fortführung haben, ist das Interesse eher geringer.

3 Datengrundlagen zur Erfassung von Innenentwicklungspotenzialen

Für die Erfassung von IEPs werden in der Literatur unterschiedliche Datenquellen genutzt. Dazu zählen einerseits amtliche und nicht-amtliche Geobasis- und Geofachdaten (Kapitel 3.1) und andererseits Fernerkundungsdaten (Kapitel 3.2). Eine Übersicht befindet sich in Tabelle 24 (Anhang A1). Nicht direkt für die Anwendung, jedoch zur Methodenentwicklung und Bestimmung der Güte werden zusätzliche Referenzdaten benötigt (Kapitel 3.3).

Für die Auswahl der Daten, die in diesem Projekt verwendet werden, ist vor allem die Datenverfügbarkeit relevant, sodass die entwickelte Methodik für eine bundesweit einheitliche Erhebung genutzt werden kann. Die Anwendung der ausgewählten Datensätze wird in Kapitel 5 beschrieben.

3.1 Geobasisdaten und Geofachdaten

Es werden verschiedene Produkte genutzt, die das betrachtete Gebiet in verschiedene Klassen der Landnutzung aufteilen. Diese können bei der Identifikation von Potenzialflächen genutzt werden, um bereits bebaute Gebiete zu bestimmen, die als Bebauungszusammenhang (siehe Kapitel 1.2.1) auch für eine weitere Bebauung geeignet sein könnten. Die Daten unterscheiden sich vor allem in ihrer räumlichen und thematischen Auflösung voneinander.

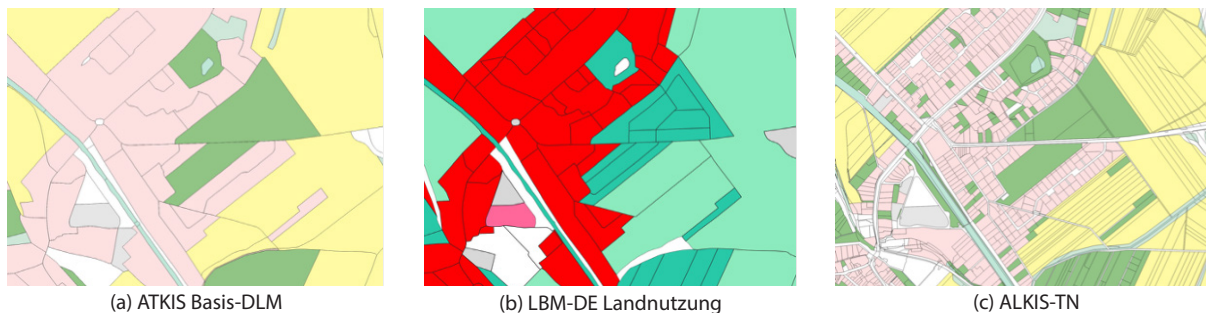
Globale und paneuropäische Lösungen werden in Form des Global Human Settlement Layer (GHSL), CORINE Land Cover (CLC) und Urban Atlas (UA) bereitgestellt. Diese haben den Vorteil, dass sie nicht nur innerhalb Deutschlands vorliegen und somit auch für eine vergleichbare Erfassung in verschiedenen Ländern genutzt werden können. Sie haben allerdings eine geringe räumliche Auflösung oder liegen nur für stark besiedelte Gebiete vor (vgl. Eichhorn/Siedentop 2022; Xu/Ehlers 2022).

Für die Bestimmung der bisher bebauten Gebiete innerhalb von Deutschland können alternativ die Daten der amtlichen Vermessung genutzt werden, sowohl aus dem Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystem als auch aus ALKIS. Teil des ATKIS ist das Digitale Basis-Landschaftsmodell (Basis-DLM), das die Landschaft und topographische Objekte beschreibt (siehe Abbildung 2(a)). Im Basis-DLM wird unter anderem die „Ortslage“ abgegrenzt, die häufig als Annäherung an den Innenbereich zugrunde gelegt wird (vgl. Ehrhardt et al. 2023; Hecht/Meinel 2014; Heßler et al. 2021; Hintzen/Petersen 2016). Aus den Landnutzungsdaten des ATKIS und den Informationen über die Landbedeckung aus Satellitendaten wird das Digitale Landbedeckungsmodell (LBM-DE) abgeleitet (siehe Abbildung 2(b)), welches die Fläche in die CLC-Klassen aufteilt, dabei aber mit einer Mindestkartiereinheit (MKE) von einem Hektar deutlich höher aufgelöst ist als die CLC-Kartierung. Somit ist eine feinere Bestimmung der bebauten Gebiete möglich, wobei der Maßstab weiterhin nicht alle kleinteiligen Flächennutzungen abbildet (vgl. Dürrbeck/Lippl-Seifert 2022). Eine räumlich genauere Abgrenzung stellt die im ALKIS erfasste Tatsächliche Nutzung (ALKIS-TN) dar (siehe Abbildung 2(c)). Darin werden 26 verschiedene Nutzungsarten unterschieden. Die Daten werden bundesweit einheitlich erfasst, aber nicht in allen Bundesländern bereitgestellt (vgl. Ehrhardt et al. 2023; Heßler et al. 2021; Hintzen/Petersen 2016).

Eine ähnliche räumliche Auflösung und höhere thematische Auflösung ist durch die Landnutzungsinformationen aus Open Street Map (OSM Landuse) gegeben, die durch die Nutzer erfasst werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Vollständigkeit und Richtigkeit nicht garantiert ist (vgl. Xu/Ehlers 2022). Einige Regionen führen außerdem regelmäßig eine Flächennutzungskartierung (FNK) durch. Auch diese kann für die Bestimmung der bebauten Gebiete genutzt werden.

Abbildung 2

Ausschnitte verschiedener Landnutzungskartierungen, eingefärbt nach den jeweiligen Signaturenkatalogen bzw. Dokumentationen



Quelle: (a) & (b) © Geobasis-DE / BKG, (c) © Geobasis-DE / LVermGeo ST (2024)

Je nach räumlicher und thematischer Auflösung ist die FNK aber eher für die kleinteilige Bewertung der bestehenden baulichen Nutzung geeignet (vgl. Regionalverband Ruhr 2021). Hierzu können außerdem die amtlichen Hausumringe (HU-DE) oder 3D-Gebäudemodelle (LoD2-DE) genutzt werden (vgl. Elend/Köninger/Müller 2013; Feltgen et al. 2023; Hecht/Meinel 2014). Alternativ zu den amtlichen Daten können auch hier die internationalen nutzergenerierten Daten aus OSM (OSM-Buildings) genutzt werden. Bei einer flurstücksweisen Betrachtung helfen außerdem die aus dem ALKIS entnommenen Flurstücksinformationen (FS-DE), die seit März 2023 erstmalig bundesweit durch das BKG zur Verfügung gestellt werden.

Zusätzliche Informationen zur Nutzung können über weitere externe Datensätze, beispielsweise Handelsregister, Gewerbeatlas, Einwohnerinformationen oder Daten von Energie- oder Wasserversorgern gewonnen werden. Insbesondere für die bestehende Bebauung kann darüber geprüft werden, ob eine aktive Nutzung vorliegt oder ob es sich möglicherweise um einen Leerstand handelt (vgl. Dürrbeck/Lippl-Seifert 2022; Kleinwächter 2014). Zur Zuordnung der teilweise adressbezogenen Daten zum entsprechenden Gebäudepolygon können die Georeferenzierten Adressdaten (GA) zu Hilfe genommen werden.

Neben der tatsächlich bestehenden Nutzung ist für die Bestimmung von Potenzialflächen auch die Kenntnis der planerisch beabsichtigten Nutzung relevant. Diese wird in der Bauleitplanung festgelegt. In Deutschland erfolgt diese durch FNP und B-Pläne. Der FNP beschreibt die beabsichtigte Bodennutzung für das gesamte Gemeindegebiet. B-Pläne werden daraus jeweils für einzelne Teile des Gemeindegebiets entwickelt und enthalten rechtsverbindliche Festsetzungen darüber, welche bauliche Nutzung nach Art und Maß zulässig ist. Seit Februar 2023 muss bundesweit der Datenstandard XPlanung genutzt werden. Darin sind bei der Erstellung neuer Bauleitpläne digitale Formate verpflichtend, die einen einfacheren Austausch der Daten fördern sollen. Auch für bestehende Pläne wird eine digitale Nacherfassung empfohlen. Für die Digitalisierung sind unterschiedliche Ausprägungen möglich: Von einem Plan als pdf-Datei mit georeferenziertem Geltungsbereich über die vektorielle Darstellung einzelner Objekte bis hin zu einem vollvektoriellen Format sind die Vorgaben bisher offengehalten (vgl. Horenczuk 2021). Für eine digitale Weiterverarbeitung, beispielsweise im Rahmen einer IEP-Erfassung, sind vollvektorielle Pläne nötig. Diese liegen bisher nur selten vor, werden aber in der Zukunft immer häufiger werden. Bei der Berücksichtigung von Bauleitplänen, insbesondere alter Planbestände, ist aber auch zu beachten, dass möglicherweise Potenziale über die planerischen Festsetzungen hinaus möglich sind. Durch das Baulandmobilisierungsgesetz kann unter bestimmten Voraussetzungen im Einzelfall von den Festsetzungen des Bebauungsplans befreit werden, wenn die festgelegte Nutzung aus heutiger Sicht nicht mehr den städtebaulichen Zielen entspricht.

3.2 Fernerkundungsdaten

Neben diesen Geodaten können für die Erfassung von IEPs auch Fernerkundungsdaten genutzt werden. Vor allem bei der Identifikation von Brachflächen helfen Bilddaten, sowohl in Form einer visuellen Überprüfung als

auch bei einer digitalen Analyse (vgl. Berief/Pankratz 2012; Dürrbeck/Lippl-Seifert 2022). Es können Luftbilddaten wie Digitale Orthofotos (DOPs) eingesetzt werden, die in Deutschland durch die Vermessungsverwaltungen der Länder in Auflösungen zwischen 10 und 80 cm erzeugt werden und durch das BKG für die Auflösungen 20 cm und 40 cm zentralisiert gesammelt werden. Aufgrund der hohen Auflösung können die Bilder für eine feine Untersuchung selbst kleinerer Strukturen genutzt werden. Beispielsweise kann bei potenziellen Brachflächen der Zustand der Bebauung anhand von Schäden an der Bebauung oder an Wegen beurteilt werden (vgl. Berief/Pankratz 2012). Außerdem kann darüber auch für sonstige potenzielle Baulücken oder NVPs überprüft werden, ob eine andere Nutzung vorliegt, die aus den Geodaten nicht hervorgeht, beispielsweise als Spielplatz, oder ob aktuell bereits Bauarbeiten stattfinden (vgl. Elgendy 2014). Bei der Nutzung der DOPs ist zu beachten, dass diese in Befliegungszyklen zwischen zwei und fünf Jahren aufgenommen werden. Auch zwischen dem Zeitpunkt der Bildaufnahme und Aufnahme in den Datensatz des BKG vergeht weitere Zeit. Daher liegen die DOPs über das Bundesgebiet verteilt zu unterschiedlichen Zeitpunkten vor und spiegeln nicht immer den aktuellen Stand wider. Auch die multispektralen Satellitenbilder des BKG in hoher oder sehr hoher Auflösung (HR: High Resolution; VHR: Very High Resolution) sind durch fehlende systematische Wiederholung im Vergleich zu den DOPs nicht besser geeignet. Über eine hohe zeitliche Auflösung verfügen hingegen Satellitenbilder wie die der Sentinel-2-Mission. Je nach Region, wird ungefähr alle fünf Tage darin das gleiche Gebiet überflogen und je nach Spektralband mit Bodenaufösungen zwischen 10 m und 60 m aufgenommen. Während diese Auflösung nicht für kleinräumige Auswertungen ausreicht, können für großräumige Flächen wie Brachen die zeitlichen Informationen wichtige zusätzliche Informationen liefern.

Abbildung 3 zeigt ein Beispiel, in dem der Einsatz von Sentinel-2-Bildern bei der Bewertung einer möglichen Brachfläche hilft. Die Fläche, die von Versiegelung und Schotterflächen bedeckt ist, erscheint im aktuellen DOP wie eine Brachfläche. Bei Hinzunahme der Sentinel-2-Bilder wird deutlich, dass in den letzten Monaten starke Veränderungen stattgefunden haben. Dies deutet auf stattfindende Bauarbeiten hin, die bei einer Recherche der betrachteten Fläche bestätigt werden.

Neben klassischen Bilddaten wird außerdem auch die Nutzung von Thermalbildern vorgeschlagen. Da ungenutzte Bebauung in der Regel unbeheizt ist, unterscheidet sich deren Temperatur im Winter deutlich von genutzter und daher beheizter Bebauung. Auch bei den Thermalbildern ist allerdings die Auflösung mit 30 m sehr gering und daher nur für großflächige Brachen geeignet (vgl. Xu/Ehlers 2022). Eine weitere Möglichkeit zum Einsatz von Fernerkundungsdaten stellen Lidar-Aufnahmen dar. Aus den 3D-Punktwolken kann insbesondere die bestehende Bebauung modelliert werden. Je nach Aufnahmezeitpunkt der Daten können damit im Vergleich zu den amtlichen Gebäudedaten (HU-DE und LoD2-DE) aktuellere Entwicklungen berücksichtigt werden, da es bei Neubauten oder Abrissen einige Zeit dauert, bis diese in den zentralisierten Datensätzen erscheinen.

3.3 Referenzdaten / Ground-Truth-Daten

Für die Entwicklung und Validierung von automatisierten Verfahren werden Referenzdaten mit einer bestehenden Erfassung von Flächenpotenzialen benötigt. Diese werden im Folgenden als Ground-Truth-Daten (GT-Daten) bezeichnet. In den Kapiteln 2.2 und 2.3 wurden bereits die Angebote zur Erfassung von Potenzialflächen vorgestellt. Die erfassten Baulücken der Kommunen werden teilweise in Form von öffentlichen Baulandkatalogen nach § 200 BauGB veröffentlicht. Diese Datensätze sind nicht vollständig, da die Eigentümer der Veröffentlichung ihres Flurstücks widersprechen können. Außerdem werden je nach Kommune unterschiedliche Definitionen und Kategorisierungen von Potenzialtypen verwendet. Oft werden die Baulücken und NVPs nach der Definition aus Kapitel 1.2 nicht voneinander unterschieden. Auch die Abgrenzungen der einzelnen Flächen unterscheiden sich: Teilweise wird nur die bebaubare Fläche markiert, in anderen Kommunen werden die Potenziale flurstücksbezogen bestimmt. Zusätzliche Flächen wie Brachen werden zum Teil in verwaltungsinternen Datensätzen der Kommunen erfasst. Im Rahmen des Projekts werden diese von einigen Kommunen bereitgestellt.

Abbildung 3
Beispiel einer im DOP erkennbaren Baustelle



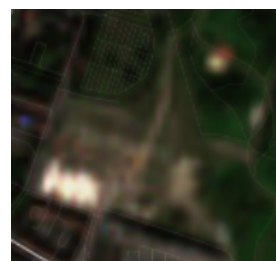
(a) DOP vom 19.07.2022. Die rot markierte Fläche ist in OSM als Brachfläche erfasst. Tatsächlich haben dort bereits Bauarbeiten begonnen, die aus dem Luftbild jedoch nicht erkenntlich sind.



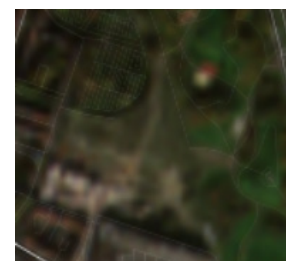
(b) Sentinel-2-Bild vom
18.04.2018



(c) Sentinel-2-Bild vom
01.06.2023



(d) Sentinel-2-Bild vom
24.09.2023



(e) Sentinel-2-Bild vom
08.11.2023

Quelle: (a) Bilddaten © Geobasis NRW, OSM, (b)-(e) Bilddaten © Sentinel Hub

Auch über die Bereitstellung der in den Tools der Länder und Regionen erfassten Potenzialflächen können nur die einzelnen Kommunen entscheiden, eine flächendeckende Bereitstellung direkt durch die Betreiber ist nicht möglich. Diese konnten aber in einigen Regionen die nutzenden Kommunen kontaktieren, von denen ein Teil zur Bereitstellung ihrer Daten zugestimmt hat.

Die bisher genannten GT-Daten enthalten überwiegend Baulücken und NVPs, wohingegen Brachflächen seltener darin erfasst werden. Für diese können zusätzliche Datenquellen genutzt werden. Einerseits können OSM-Nutzer Brachflächen (Brownfields) erfassen. Damit liegt ein deutschlandweiter Datensatz vor, der allerdings nicht auf Vollständigkeit und Richtigkeit geprüft ist. Auch Daten benachbarter Länder können aus OSM hinzugezogen werden, um die Anzahl der Brachflächen im Datensatz weiter zu erhöhen. In bestehenden Verfahren wurden außerdem kommerzielle Brachflächenkataster berücksichtigt, um für ein Teilgebiet Deutschlands eine flächendeckende qualitätsgeprüfte Datengrundlage zu verwenden (vgl. Dürrbeck/Lippl-Seifert 2022).

Im Rahmen dieser Studie wurden aus 26 Kommunen über 9.000 annotierte IEPs als Referenzdaten gesammelt. Diese sind über neun Bundesländer verteilt und enthalten überwiegend Baulücken und NVPs. Für die Erfassung von Brachflächen wurden daher zusätzlich die Annotationen aus OSM extrahiert, die über 7.000 durch Nutzer eingetragene Brachflächen enthalten.

Die Daten aus den kommunalen Potenzialflächenkatastern sowie eine Teilmenge der Flächen aus OSM wurde manuell auf Richtigkeit geprüft, insbesondere dahingehend, ob die Annotationen aktuell sind oder ob einzelne Flächen mittlerweile bereits genutzt werden. Außerdem wurden die Flächen unterschiedlich kategorisiert, beispielsweise bezüglich der Priorität, der Größe oder der Mobilisierungswahrscheinlichkeit. Stattdessen wurden die Flächen in zwei einheitliche Gruppen aufgeteilt: Brachflächen auf der einen Seite und Baulücken und NVPs auf der anderen.

4 Bestehende Verfahren zur Extraktion von Innenentwicklungspotenzialen

Zur Erfassung von Potenzialflächen werden unterschiedliche Verfahren angewendet. In der praktischen Umsetzung sind die manuellen Verfahren am häufigsten. Das Vorgehen dieses Ansatzes wird in Kapitel 4.1 beschrieben. In der aktuellen Forschung werden teilautomatisierte Verfahren entwickelt, die die Erfassung erleichtern, indem nur noch die automatisch identifizierten Flächen überprüft werden müssen. Diese Verfahren bestehen oft im ersten Schritt aus einer Vorauswahl der zu betrachtenden Flächen (siehe Kapitel 4.2). Im zweiten Schritt werden diese weiter untersucht, wobei entweder eine GIS-basierte Analyse von Geobasisdaten durchgeführt wird (siehe Kapitel 4.3) oder eine Auswertung von Fernerkundungsdaten erfolgt (siehe Kapitel 4.4). Die Möglichkeiten, wie KI zur Durchführung und Verbesserung der automatisierten IEP-Erfassung genutzt werden kann, werden in Kapitel 4.5 erklärt. Abbildung 4 zeigt eine Übersicht der Verfahren, aufgeteilt nach den verschiedenen Arten des Vorgehens.

4.1 Manuelle Erfassung von Innenentwicklungspotenzialen

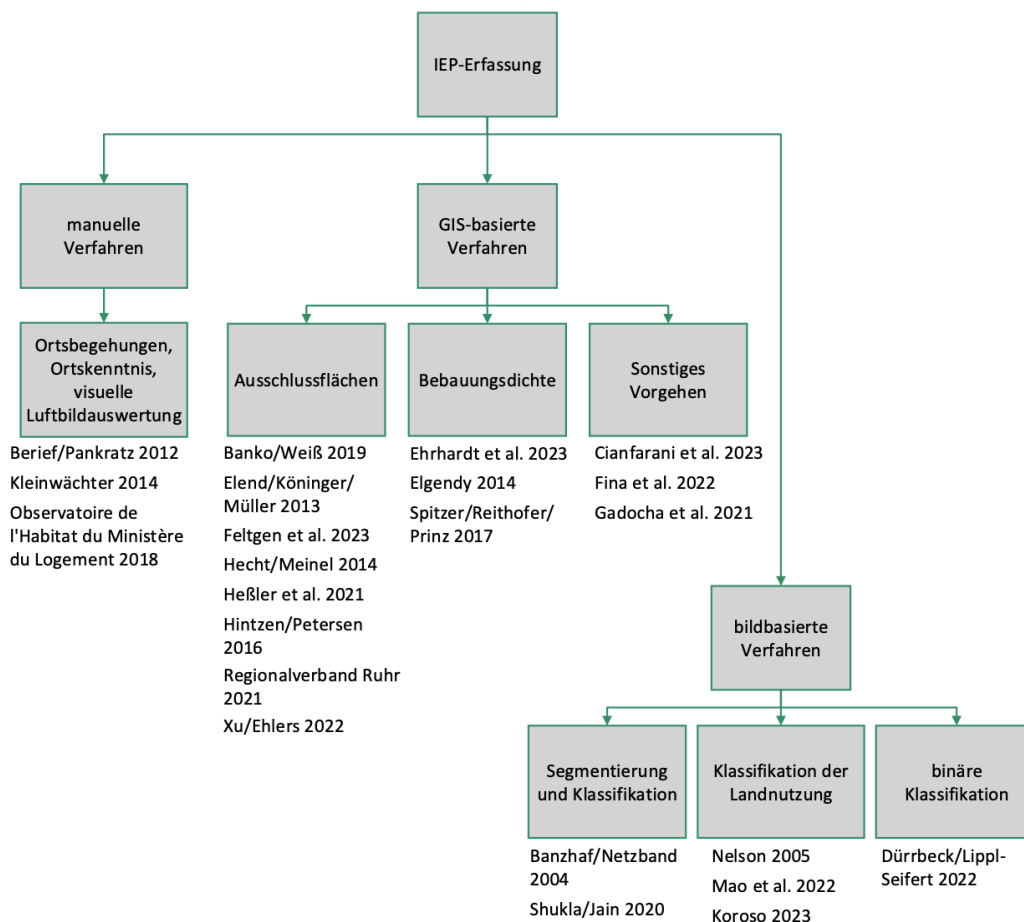
Aus den Ergebnissen der Baulandumfrage 2020 lässt sich ableiten, dass die manuelle Identifikation von Potenzialflächen bei weitem am häufigsten ist. Zwar nutzen bundesweit bereits 50 % der Kommunen GIS-Anwendungen, dies betrifft in den meisten Fällen aber nur die Sammlung der Daten in einer entsprechenden Datenbank. Für die manuelle Identifikation können verschiedene Datenquellen genutzt werden. Um die für eine Bebauung vorgesehenen Flächen sowie die beabsichtigte Dichte zu bestimmen, werden Daten aus FNPs und B-Plänen verwendet. Zur Überprüfung der tatsächlichen Ausnutzung dieser Flächen werden Ortsbegehungen durchgeführt, Luftbilder betrachtet oder weitere Geobasisdaten betrachtet (vgl. BBSR 2022).

Eine Beschreibung des möglichen Vorgehens für die Identifikation von Brachflächen anhand von Luftbildern findet sich in Berief/Pankratz (2012): Der betrachtete Bildausschnitt wird in die Flächen unterschiedlicher Nutzungen aufgeteilt. Die Nutzungsarten sind dabei angelehnt an den ALKIS-Schlüssel, Brachflächen werden jedoch als eigene Klasse erfasst. Die Identifikation der Brachflächen erfolgt anhand der visuellen Interpretation von Bildmerkmalen, die typisch für Brachflächen sind. Diese beinhalten unter anderem Ruderalvegetation, Schäden am Gebäude und leere Betriebsparkplätze. Neben dem aktuellen Luftbild werden auch vorherige Zeitpunkte mit einigen Jahren Abstand betrachtet, um die zeitlichen Veränderungen der Nutzung zu bewerten. Teilweise ist anhand der Merkmale allerdings keine genaue Unterscheidung zwischen brachliegender und genutzter Bebauung erkennbar, da einerseits auch intensiv genutzte Bebauung Schäden aufweisen kann und andererseits ungenutzte Bebauung erst nach längerer Zeit des Brachliegens diese Merkmale zeigt.

Ein ähnliches Vorgehen für die Identifikation von Baulücken ist für das Monitoring in Luxemburg beschrieben. Neben Luftbildern werden hier Plans d'Aménagement Général (PAG, entsprechen dem deutschen FNP) und Plans d'Aménagement Particulier (PAP, entsprechen dem deutschen B-Plan) genutzt, um zunächst die Parzellen auszuwählen, für die eine Bebauung vorgesehen ist. Die Luftbilder werden dann mit den Parzellengrenzen aus dem Kataster (Parcellaire Cadastral Numérisé, PCN) überlagert und für jede Parzelle wird visuell bestimmt, ob sie bebaut ist. Schwierigkeiten dieser Methodik liegen vor allem in der Aktualität der PAGs, die teilweise bis 1970 zurückreichen und auch nicht alle nach aktuellen Standards vorliegen (vgl. Observatoire de l'Habitat du Ministère du Logement 2018).

Neben diesen systematischen Untersuchungen spielt auch das lokale Wissen der Bearbeitenden eine große Rolle, die oft die Bebaubarkeit und mögliche Hemmnisse der einzelnen Flächen direkt beurteilen können, ins-

Abbildung 4
Aufteilung der untersuchten Verfahren je nach Vorgehen in unterschiedliche Gruppen



Quelle: Vision Impulse

besondere bei Brachflächen oder Flächen, die aktuell anders genutzt werden als durch den FNP vorgesehen (vgl. BBSR 2022; Ergebnis der Interviews aus Kapitel 6).

Die Durchführung der manuellen Identifikation von IEPs ist somit sehr personal- und zeitintensiv und führt zu hohen Kosten. Außerdem wird die Erfassung lokal innerhalb der Kommunen durchgeführt, sodass keine standardisierten Datensätze entstehen. Datensätze unterschiedlicher Kommunen unterscheiden sich beispielsweise in den erfassten Flächentypen, den genauen Definitionen und Abgrenzungen der Flächentypen oder berücksichtigten Mindest-Erfassungsgrößen.

4.2 Verfahren zur Vorauswahl geeigneter Flächen

Um den Erfassungsaufwand zu verringern und eine standardisierte Erfassung auch über größere Gebiete zu ermöglichen, wurden bereits einige teilautomatisierte Ansätze entwickelt. Diese dienen der Auswahl möglicher Potenzialflächen und müssen im letzten Schritt durch eine Person mit lokalem Fachwissen überprüft werden. Dies liegt zum einen daran, dass qualitative Kriterien, wie beispielsweise bodenpolitische Vorgaben oder das Vorhandensein von Altlasten, nicht flächendeckend maschinenlesbar dem Erfassungsverfahren zugeführt werden können. Zum anderen schränkt die Datenaktualität und -qualität die automatisierte Erfassung ein, da womöglich bereits eine Veränderung stattgefunden hat oder fehlende Einträge zu einer falschen Erkennung führen.

Für die teilautomatisierte Identifikation von IEPs erfolgt in vielen Ansätzen als erstes eine Vorauswahl der zu untersuchenden Gebiete. Diese setzt sich aus zwei Schritten zusammen. Zunächst erfolgt eine Abgrenzung zwischen Innen- und Außenbereich, sodass die IEPs von den Außenreserven unterschieden werden können. Innerhalb der ausgewählten Flächen werden dann die bebaubaren Flächen ausgewählt.

Wie bereits in Kapitel 1.2.1 beschrieben, ist für die Abgrenzung zwischen Innen- und Außenbereich zunächst anzumerken, dass diese in städtebaulichen Entscheidungen nicht nur nach qualitativen Kriterien bestimmt und festgelegt ist. Stattdessen wird für mögliche Vorhaben in Form von Einzelfallentscheidungen geprüft, ob diese in den Innenbereich fallen oder nicht. Somit ist eine automatisierte Abgrenzung allein nicht in der Lage, städtebaulich bindende Innenbereichsabgrenzungen widerzuspiegeln, sondern immer nur eine möglichst gute Annäherung daran. In Anlehnung an Harig et al. (2014) werden diese angenäherten Flächen im Folgenden als Innenflächen bezeichnet, um sie vom rechtlich definierten Innenbereich nach § 34 BauGB (siehe Kapitel 1.2.1) zu unterscheiden.

Die genaue Methodik für die Vorauswahl wird jeweils innerhalb der spezifischen Verfahren für die Potenzialflächenerfassung beschrieben. Je nach verwendeten Datenquellen werden die beiden Schritte einzeln durchgeführt oder können zusammengefasst werden. Eine Übersicht der teilautomatisierten Potenzialerfassungs-Verfahren und der jeweils verwendeten Datenquellen für die beiden Schritte der Vorauswahl befindet sich in Tabelle 1.

Häufig werden die Innenflächen über die ATKIS-Objektart „Ortslage“ ausgewählt (vgl. Ehrhardt et al. 2023; Hecht/Meinel 2014; Heßler et al. 2021; Hintzen/Petersen 2014). Diese ist aber weniger streng abgegrenzt als der Innenbereich nach § 34 BauGB und beinhaltet auch Bebauung, die nicht dem ständigen Aufenthalt von Menschen dient, beispielsweise landwirtschaftliche Gebäude. Außerdem endet die Ortslage jeweils mit den Flurstücksgrenzen der äußeren Flurstücke anstatt direkt hinter der Bebauung (vgl. Hinteregger 2019). Diese Auswahl umfasst also eine größere Fläche als die tatsächlichen Innenbereiche und kann somit zu einer Überschätzung der vorhandenen IEPs führen. Ein Beispiel der Abgrenzung mittels der ATKIS-Ortslagen, bei dem dies erkennbar ist, befindet sich in Abbildung 5.

Neben den Ansätzen aus den Verfahren der IEP-Erfassung gibt es auch spezialisierte Ansätze, die sich nur mit der Abgrenzung des Innenbereichs befassen.

Eichhorn/Siedentop (2022) nutzen die Daten des GHSL zu den vier verfügbaren Zeitpunkten, um damit die aus dem Zensus ableitbaren Neubautätigkeiten in den Zeitspannen zwischen je zwei Zeitpunkten in Innen- und Außenentwicklung sowie die jeweiligen Randlagen zu klassifizieren. Für jede 100m-Gitterzelle der Daten zu Wohngebäuden und Wohnungen aus dem Zensus wird dazu geprüft, ob der Mittelpunkt zu Beginn der Zeitspanne bereits in einer laut GHSL bebauten Fläche liegt. Ist dies der Fall, so werden die entsprechenden Neubautätigkeiten als Innenentwicklung klassifiziert, ansonsten als Außenentwicklung. Zusätzlich wird in beiden Fällen geprüft, ob die Zelle vollständig im bebauten Bereich liegt oder ob die Kante der bebauten Fläche geschnitten oder berührt wird, was zu einer Abgrenzung der jeweiligen Randbereiche der beiden Klassen führt. Die Unterscheidung abhängig von der bestehenden Bebauung dient der Annäherung an die planungsrechtlichen Regelungen für Bauvorhaben, für die die im Zusammenhang bebauten Ortsteile relevant sind. Die 30-m-Auflösung der GHSL-Daten ist dabei ausreichend für eine Klassifikation des gröber aufgelösten Zensus (Eichhorn/Siedentop 2022). Für eine geometrisch scharfe Abgrenzung, wie sie für die IEP-Erfassung benötigt ist, haben diese Daten hingegen einen zu geringen Detailgrad.

Im Gegensatz dazu nutzen Harig et al. (2014) die HU-DE, um daraus eine genaue Bestimmung der Bebauungsgrenze durchzuführen. Darüber kann die übliche Rechtsprechung bezüglich der Ortsteileigenschaften sowie des Bebauungszusammenhangs (siehe Kapitel 1.2.1) angenähert werden. Dazu werden zunächst alle Gebäude ausgewählt, die laut ATKIS Basis-DLM dem ständigen oder regelmäßigen Aufenthalt von Menschen dienen.

Tabelle 1
Übersicht der untersuchten Verfahren zur Vorauswahl von Flächen

Verfahren	Auswahl des Innenbereichs	Auswahl der bebaubaren Flächen
Ehrhardt et al. 2023	ATKIS Basis-DLM: „Ortslage“	ALKIS-TN: „Wohnbaufläche“, „Fläche gemischter Nutzung“
Hecht/Meinel 2014	ATKIS Basis-DLM: „Ortslage“	Basis-DLM: „Wohnbaufläche“, „Fläche gemischter Nutzung“, „Fläche besonderer funktionaler Prägung“, „Industrie- und Gewerbefläche“
Heßler et al. 2021	ATKIS Basis-DLM: „Ortslage“	ALKIS-TN: „Wohnbaufläche“, „Fläche besonderer funktionaler Prägung“ mit der Funktion „Soziales“, „Industrie und Gewerbe“ mit der Funktion „Beherbergung“
Hintzen/Petersen 2016	ATKIS Basis-DLM: „Ortslage“	ALKIS-TN (Hauptnutzung je Flurstück): „Wohnbaufläche“, „Fläche gemischter Nutzung“, „Industrie- und Gewerbefläche“, „Sport-, Freizeit- und Erholungsfläche“
Dürrbeck/Lippl-Seifert 2022	-	LBM-DE: Landnutzungsclassen „N120-Produktion“ für die Landbedeckungsklassen „B110-Bebauung“ sowie „B121 -Anlagen“
Banko/Weiß 2019	-	Flächenwidmung (für Österreich; ähnlich FNP): „Bauland“
Elend/Köninger/Müller 2013	RegFNP: „Wohn-/Mischnutzung“, Luftbilder: Bebauungsgrenzen (visuell)	RegFNP: „Wohn- und Mischnutzung“
Egendy 2014	-	FNP: „Wohnbaufläche“, „Fläche gemischter Nutzung“, „Industrie- und Gewerbefläche“
Regionalverband Ruhr 2021	-	FNP: Für Wohnbebauung: „Wohnbaufläche“, „gemischte Baufläche“, „Kern- und Dorfgebiet“, „Urbanes Gebiet“, „Sondergebiet mit wohnbaulicher Bestimmung“ Für Gewerbebebauung zusätzlich: „Gewerbefläche“, „gewerbliche Baufläche“, „Industriegebiet“, „Sondergebiet mit gewerblicher Bestimmung“
Feltgen et al. 2023, Observatoire de l'Habitat du Ministère du Logement 2018	-	PAG (FNP): „surfaces artificialisées“ (urbanisierte Gebiete), PAP (B-Plan): „nouveau quartier“ (für Urbanisierung vorgesehene Gebiete)
Spitzer/Reithofer/Prinz 2017	-	B-Plan: Wohnbebauung: Grundstücke und deren GFZ, Gewerbebebauung: Grundstücke und deren BMZ
Xu/Ehlers 2022	-	CLC: „Durchgängig städtische Prägung“, „Nicht durchgängig städtische Prägung“, „Straßen- und Eisenbahnnetze und funktionell zugeordnete Flächen“

Quelle: Vision Impulse

Für diese Gebäude wird dann nach weiterer geringer Vorverarbeitung mittels eines ArcGIS-Werkzeuges die Abgrenzung der Bebauung erzeugt und kann nach einer Nachbearbeitung als Innenfläche genutzt werden (vgl. Harig et al. 2014: 116 f.).

Im Gegensatz zur häufig verwendeten ATKIS-Ortslage erzielt dieser Ansatz deutlich höhere Übereinstimmungen mit gutachterlich erzeugten Referenzabgrenzungen (vgl. Harig et al. 2014: 118). Der Ansatz wurde weiterentwickelt, um die Auswahl der berücksichtigten Häuser zu verfeinern und eine individuellere Abgrenzung vorzunehmen als durch das bestehende ArcGIS-Werkzeug. Dabei werden zusätzlich Straßendaten verwendet, um die Gebäudeumringe in verschiedene Straßenblöcke aufzuteilen. Für die Auswahl der berücksichtigten Gebäude wird zunächst weiterhin die ATKIS-Nutzung verwendet. Für die ausgewählten Gebäude wird dann die Bebauungsdichte je Wohnblock bestimmt, um Gebäude in Blocken mit sehr geringer Dichte auszuschließen. Für die übrigen Gebäude wird ein Puffer bestimmt, innerhalb dessen dann auch die Gebäude hinzugefügt werden, die zuvor aufgrund ihrer Nutzung laut ATKIS ausgeschlossen wurden. Anhand dieser Auswahl wird dann erneut je Straßenblock die Bebauungsdichte berechnet. Bei sehr hoher Dichte wird der Straßenblock als vollständig im Innenbereich bewertet. Für die übrigen Straßenblöcke wird jeweils ein Rechteck mit möglichst geringer Kantenlänge um die Bebauung bestimmt und anstatt des gesamten Straßenblocks werden diese Rechtecke zur Innenfläche hinzugefügt. Wie im vorherigen Ansatz erfolgt eine Nachbearbeitung, bevor die Fläche als Annäherung an den Innenbereich genutzt werden kann (vgl. Harig et al. 2021).

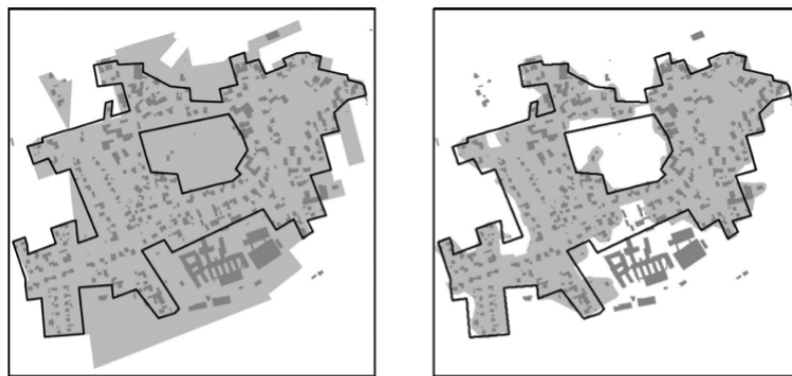
Auch die Bestimmung der bebaubaren Flächen erfolgt in den teilautomatisierten Ansätzen der Potenzialfassung über die Auswahl der entsprechenden Klassen aus verschiedenen Datenquellen. Die verwendeten Datenquellen umfassen Informationen über die bestehende Nutzung, über die die baulich geprägten Flächen ausgewählt werden können. Dies betrifft das ATKIS Basis-DLM bzw. LBM-DE, ALKIS-TN und CLC (vgl. Dürrbeck/Lippl-Seifert 2022; Ehrhardt et al. 2023; Hecht/Meinel 2014; Heßler et al. 2021; Hintzen/Petersen 2016; Xu/Ehlers 2022). Abhängig von den beabsichtigten Erfassungstypen werden verschiedene Nutzungs- oder Bedeckungsklassen ausgewählt. Ehrhardt et al. (2023), Heßler et al. (2021) und Xu/Ehlers (2022) wählen nur die Flächen für Wohn- und Mischnutzung aus. Hecht/Meinel (2014) und Hintzen/Petersen (2016) hingegen selektieren auch Flächen für Industrie und Gewerbe. Dürrbeck/Lippl-Seifert (2022) fokussieren sich im Gegensatz zu den anderen Verfahren nur auf die Gewerbeflächen des LBM-DE mit der Kombination der Landnutzungs-klassen „Produktion“ mit den beiden Landbedeckungsklassen „Bebauung“ und „Anlagen“.

Alternativ werden Bauleitpläne wie FNPs (vgl. Banko/Weiß 2019; Elend/Königer/Müller 2013; Elgendy 2014; Regionalverband Ruhr 2021) oder B-Pläne (vgl. Feltgen et al. 2023; Observatoire de l’Habitat du Logement 2018; Spitzer/Reithofer/Prinz 2017) verwendet, die die beabsichtigte Nutzung anzeigen. In diesen Fällen wird auf eine separate Abgrenzung des Innenbereichs verzichtet, da die darin für eine Bebauung vorgesehenen Flächen oftmals zum Innenbereich gezählt werden. Dennoch ist zu beachten, dass FNPs zwar Nutzungen oder geplante Nutzungen darstellen, jedoch keine tatsächliche rechtliche Abgrenzung wiedergeben und auch kein unmittelbares Baurecht vermitteln (z. B. möglich bei „Außenbereich im Innenbereich“ oder Randflächen). Einfache B-Pläne nach § 30 Abs. 3 können ebenfalls nach § 35 zu beurteilen sein.

Im Gegensatz zu den Daten über die bestehende Nutzung hat die Verwendung von Bauleitplänen den Vorteil, dass die räumliche und thematische Auflösung deutlich schärfer ist und somit eine genauere flächenscharfe Abgrenzung der Potenzialflächen möglich ist. Außerdem können auch solche größeren Flächen erfasst werden, die aktuell noch nicht für bauliche Zwecke genutzt werden und daher bei der Auswahl der Klassen der bestehenden Nutzung herausgefiltert werden, die baurechtlich aber für eine Bebauung vorgesehen sind. Die größte Schwierigkeit bei der Verwendung der Bauleitpläne für eine automatisierte Vorauswahl der bebaubaren Flächen liegt in der geringen Verfügbarkeit digitalisierter und maschinenlesbarer Pläne (siehe Kapitel 3.1).

Die Abgrenzung des Innenbereichs findet im Rahmen der Erfassung von Potenzialflächen oft nur oberflächlich statt. Für eine genauere Unterscheidung zwischen Innen- und Außenpotenzialen wurden aber auch spezialisierte Verfahren entwickelt. Auch bei der Bestimmung der bebaubaren Flächen werden oft Datenquellen mit geringer Auflösung verwendet. Somit ist bei der Identifikation von Flächenpotenzialen oft die Qualität der Vorauswahl einer der einschränkenden Faktoren und es findet eine Überschätzung der Potenziale statt. Aufgrund der Datenverfügbarkeit ist allerdings eine Verbesserung der Vorauswahl schwer zu realisieren. Als Alternative

Abbildung 5
Vergleich verschiedener Methoden zur Vorauswahl des Innenbereichs und der bebaubaren Flächen



Quelle: Harig et al. 2014

ist aber eine nachgelagerte Überprüfung am Ende der Potenzialerschaffung möglich, um die übererfassten Flächen zu reduzieren.

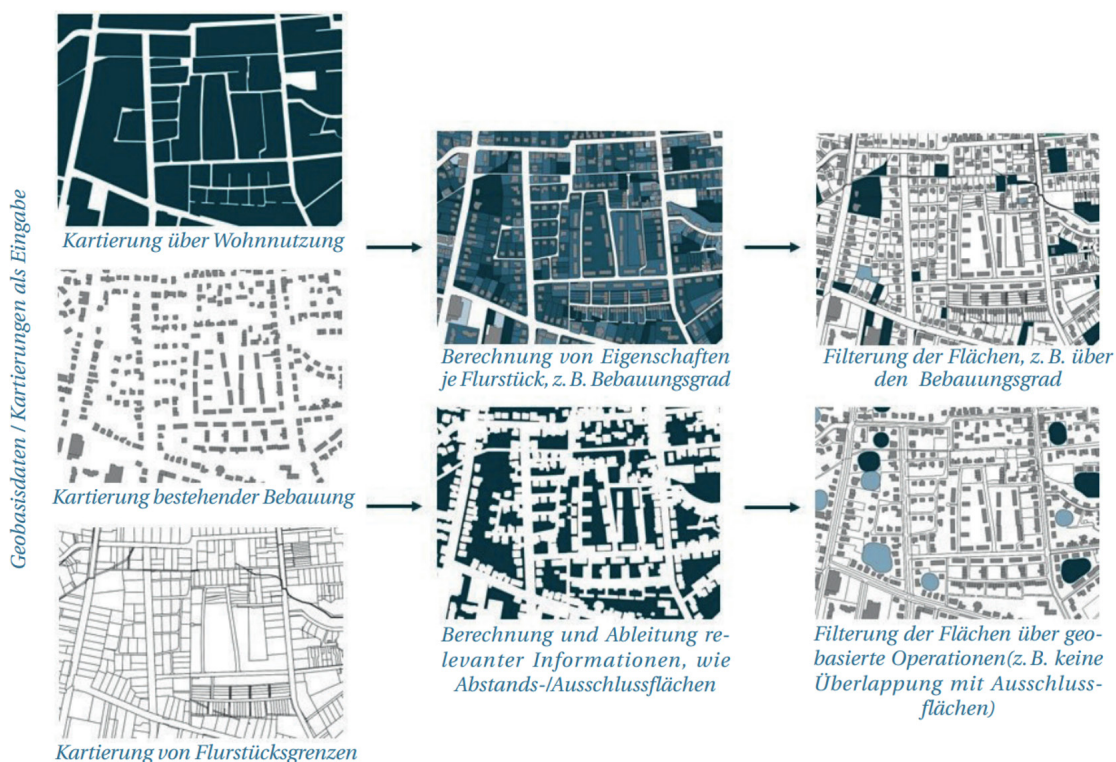
4.3 Verfahren basierend auf Geodaten

Innerhalb dieser vorausgewählten Gebiete nutzen viele Ansätze zusätzliche Geodaten, um über eine GIS-basierte Auswertung Baulücken und NVPs zu identifizieren. Teilweise werden auch unbebaute Brachflächen berücksichtigt. Die Erfassung von bebauten Brachen ist hingegen nicht möglich, da sie durch fehlende Informationen über den Zustand der Bebauung und über die Nutzungsaktivität nicht von aktiv genutzten Flächen unterschieden werden können. Vorschläge für die GIS-basierte Identifikation von bebauten Brachflächen oder auch leerstehenden Wohngebäuden umfassen die Überprüfung von zusätzlichen Datenquellen wie einem regionalen Gewerbeatlas (vgl. Regionalverband Ruhr 2021), Einträge im Handelsregister (vgl. Dürrbeck/Lipp-Seifert 2022), Einwohnermeldedaten, sowie Daten von Energie-, Gas-, Wasser- und Stromversorgern oder aus der Abfallwirtschaft (vgl. Kleinwächter 2014). Diese Daten zeichnen sich allerdings durch eine sehr kleinteilige Datenbeschaffung aus, da sie zum einen als personenbezogene Informationen aufgrund von Datenschutzvorschriften nur innerhalb der Kommunen genutzt werden können oder zum anderen als interne Daten der Versorger nicht der öffentlichen Hand zur Verfügung stehen.

Für die GIS-basierte Identifikation von Baulücken und NVPs wurden 15 Ansätze untersucht. Während sich der genaue Ablauf der Verfahren leicht voneinander unterscheidet, beispielsweise in der verwendeten Datengrundlage oder den genauen Parametern, lässt sich für die meisten Verfahren das allgemeine Vorgehen jeweils in die folgenden Schritte unterteilen, die im Folgenden näher beschrieben werden und in Abbildung 6 schematisch dargestellt sind: Zunächst erfolgt die Vorauswahl, wie in Kapitel 4.2 beschrieben (Schritt 1). Anschließend werden innerhalb der vorausgewählten Flächen mögliche Potenziale bestimmt (Schritt 2). Hierzu können zwei unterschiedliche Vorgehen genutzt werden, entweder die Bestimmung von Ausschlussflächen (Option 1) oder von Überbauungsgraden (Option 2). Es folgt eine weitere Filterung (Schritt 3) und die Kategorisierung der erfassten Potenzialflächen nach unterschiedlichen Kriterien (Schritt 4). Im Anschluss an die automatisierte Vorerfassung erfolgt zum Teil eine manuelle Validierung anhand von Luftbildern oder in Zusammenarbeit mit den Kommunen (Schritt 5).

Zwei Quellen beinhalten keine genaue Beschreibung des Vorgehens (vgl. Fina et al. 2022) oder nur für die Fortschreibung (vgl. Elgendy 2014), sodass darin diese Schritte nicht direkt zugeordnet werden können. Die Fortschreibung erfolgt jedoch auf Basis der Raum+Methode. Das Vorgehen folgt den zuvor benannten Schrit-

Abbildung 6
Ablauf bisheriger GIS-basierter Verfahren zur Erfassung von Baulücken und NVP



Quelle: Vision Impulse; Datengrundlage © Geobasis-DE / BKG (2024)

ten und wird daher auch hier in der Beschreibung der Verfahren aufgenommen. Zwei weitere Quellen unterscheiden sich deutlich von diesem Vorgehen und werden im Anschluss gesondert beschrieben (vgl. Cianfarani et al. 2023; Gadocha et al. 2021).

Für die elf vergleichbaren Ansätze fasst Tabelle 2 die jeweiligen Besonderheiten der einzelnen Methoden zusammen. Für jeden Schritt des oben genannten Ablaufs werden die jeweils berücksichtigten Informationen spezifiziert. Die Spalte „Erfasste Potenzialtypen“ bezieht sich in der Tabelle auf die Definition der Potenzialtypen aus Kapitel 1.2.3. Die Informationen zur vorgenommenen Unterscheidung der Potenzialtypen in Schritt 4 hingegen beziehen sich auf die in der jeweiligen Literaturquelle verwendeten Definitionen.

Der erste Schritt der Verfahren aus Tabelle 2 ist die Vorauswahl der bebaubaren Flächen und des Innenbereichs, die bereits in Kapitel 4.2 beschrieben wurde. Innerhalb dieser Flächen wird dann die tatsächliche bestehende Bebauung überprüft. In Deutschland werden dazu die HU-DE oder die LoD2-DE verwendet. Vergleichbare Daten finden auch in den Ansätzen aus Österreich, Luxemburg und der Schweiz Anwendung.

Tabelle 2
Übersicht der GIS-basierter Verfahren

Verfahren	Potenzialtyp	Bearbeitungsschritte
Banko/Weiß 2019	Baulücken, große NVP (>5.000 m ²)	<p>Spezifikation: Ausschlussflächen: Verkehrsflächen aus Digitaler Katastralmappe, Grundstücke mit min. 50 m² Überbauung</p> <p>Filterung: Splitterpolygone unter 5 m² werden mit benachbartem Grundstück verschmolzen</p> <p>Unterscheidung: Bebauung über 50 m² vorhanden oder nicht</p>

Verfahren	Potenzialtyp	Bearbeitungsschritte
Ehrhardt et al. 2023	Baulücken	Spezifikation: Bebauungsgrad: unter 3 % (aus Bebauung über 40 m ²) je Teilflurstück Filterung: Fläche min. 150 m ² , Radius des eingeschlossenen Kreises über 5 m, Corrected Circularity Index CCI2 (CCI2) max. 0,6, Entfernung unter 5 m von ALKIS-Verkehrsflächen Unterscheidung: keine
Elend/Köninger/Müller 2013	Baulücken, NVP	Spezifikation: Ausschlussflächen: Verkehrs- und Gewässergeometrien (ALKIS), Gebäudedaten; über Luftbilder Friedhöfe, Spiel- und Parkplätze, Neubauten Filterung: Fläche min. 250 m ² (für Ensemble benachbarter Teilstücke); Unterscheidung: Bebauungsgrad: Unter 3 %: Baulücke; 3 % - 15 %: NVP
Elgendy 2014	Baulücken, NVP, Brachen, Außenre-serven	Spezifikation: Bebauungsgrad: Verschneidung von Flurstücksgrenzen und HU-DE Filterung: „Kleine“ Flächen werden entfernt Unterscheidung: Visuell aus Luftbild
Feltgen et al. 2023	Baulücken, NVP, Brachen, Außenre-serven	Spezifikation: Ausschlussflächen: Gebäudedaten (Verkehr und Gewässer schon durch Vorauswahl über B-Plan entfernt) Filterung: „Kleine“ Flächen ohne Zugangsmöglichkeit werden entfernt Unterscheidung: Fläche: 200 m ² - 2.000 m ² direkt bebaubare Fläche: Baulücke; Über 2.000 m ² : Baulücke
Hecht/Meinel 2014	Baulücken, NVP, unbebaute Brach-flächen	Spezifikation: Ausschlussflächen: HU-DE, Abstände aus Musterbauordnung, ATKIS-Verkehrsnetz Filterung: Morphologische Filterung Unterscheidung: Erschließungstiefe: Bis zu 20 m: Baulücke; Über 20 m: NVP
Heßler et al. 2021	Baulücken, NVP	Spezifikation: Ausschlussflächen: Abstandsflächen (für bestehende Gebäude und zusätzlich für potenzielle neue Bebauung) Filterung: Fläche min. 300 m ² , Shape Index max. 4, Glättung der Flächen über morphologische Operationen Unterscheidung: Klassifizierung der Entwicklungseignung über Punkteschlüssel für Größe, Form, Anzahl betroffener Flurstücke
Hintzen/Petersen 2016	Baulücken, NVP	Spezifikation: Ausschlussflächen: Gebäude und Abstandsflächen (über Höhe aus LoD2), Ausschluss-flächen aus ALKIS: Verkehrsflächen, Landwirtschaft, Wald, Plätze, Friedhöfe, Gewässer) Filterung: Breite und Länge über 16 m, Fläche über 256 m ² Unterscheidung: Unbebautes oder bebautes Flurstück
Regionalverband Ruhr 2021	Große NVP, Brachen, sonstige unbebaute Flächen	Spezifikation: Ausschlussflächen: baulich genutzte Flächen laut FNK Filterung: - Unterscheidung: Fläche: Unter 2.000 m ² : Baulücke, ab 2.000 m ² Wohnreserve
Spitzer/Reithofer/Prinz 2017	Baulücken, NVP	Spezifikation: Bebauungsgrad: Vergleich der bestehenden und zulässigen GFZ und BGF Filterung: BGF min. 100 m ² BGF, Abschlag von 20 % für Abstandsflächen und Erschließungsanlagen Unterscheidung: Keine
Xu/Ehlers 2022	Baulücken, Brachen, sonstige unbebaute Flächen	Spezifikation: Ausschlussflächen: Auswahl der natürlichen / Grünflächen aus UA; daraus Parks, Friedhöfe o. ä. aus OSM Filterung: Fläche min. 0,25 ha (durch Datengrundlage gegeben) Unterscheidung: Keine Unterscheidung (bzw. anderes Vorgehen für andere Flächentypen)

Quelle: Vision Impulse

Für eine erste Bestimmung möglicher Potenzialflächen werden diese auf zwei unterschiedliche Arten genutzt. Die erste und häufigere der beiden Optionen ist das Entfernen von Ausschlussflächen aus der Vorauswahl.

Die Ausschlussflächen beinhalten die bebauten Flächen laut Gebäude-Datensatz, die Verkehrs- und Gewässerdaten (sofern diese nicht bereits durch die Vorauswahl entfernt wurden) sowie teilweise die zu berücksichtigenden Abstandsflächen für die bestehende und die potenzielle neue Bebauung. Zur Bestimmung der Abstandsflächen werden entweder die Mindestabstände aus der Musterbauordnung verwendet (vgl. Hecht/Meinel 2014), die Abstände mittels der Gebäudehöhe und den Faktoren aus der Musterbauordnung berechnet (vgl. Hintzen/Petersen 2016) oder die durchschnittlichen Abstandsflächen innerhalb eines Wohnblocks verwendet (vgl. Heßler et al. 2021). Die verbleibenden Flächen nach Abzug der Ausschlussflächen stellen dann eine erste Auswahl der bebaubaren Freiflächen dar.

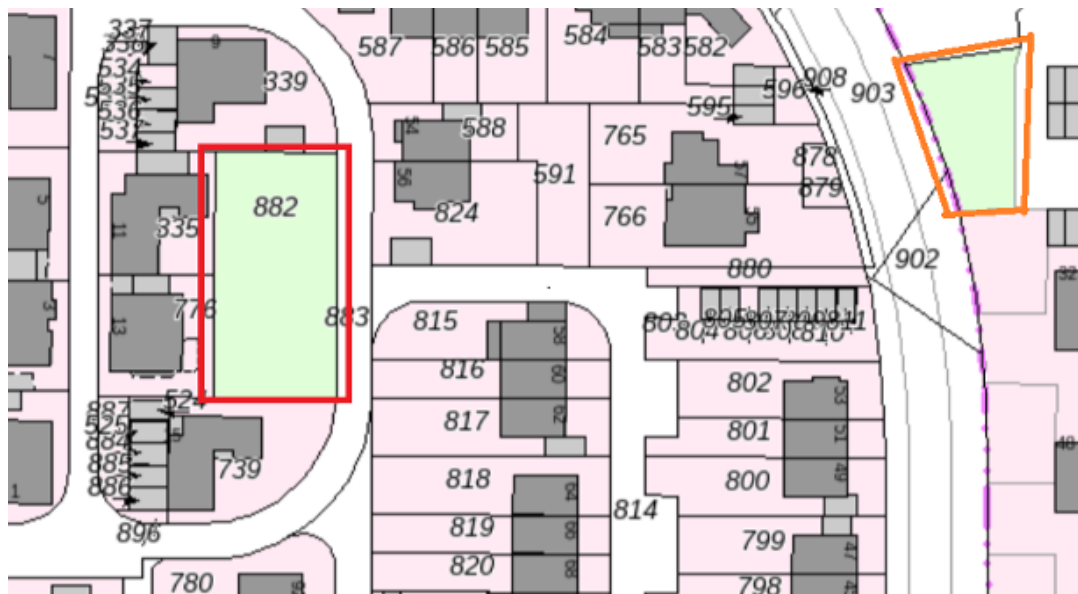
Die zweite Option für diesen Aufgabenschritt, die nur in drei der elf Verfahren verwendet wird, nutzt den Bebauungsgrad der Flächen, um darüber die unbebauten oder wenig bebauten Flurstücke oder Flurstücksteile aus der Vorauswahl zu finden. Ehrhardt et al. (2023) teilen die Flurstücke zunächst in Teilstücke auf, wenn verschiedene ALKIS-Nutzungen darauf stattfinden. Aus den HU-DE werden nur die Gebäude mit einer Grundfläche über 40 m² ausgewählt. Je Teilflurstück wird dann der Bebauungsgrad bestimmt und es werden diejenigen mit einem Wert unter 3 % als unbebaut ausgewählt. Mit dieser Auswahl werden dann die weiteren Schritte durchgeführt. Auch Spitzer/Reithofer/Prinz (2017) bestimmen den Überbauungsgrad, nutzen dafür aber alle kartierten Gebäude und führen die Berechnung auf Grundstücksebene durch. Der ermittelte Wert wird dann mit der jeweiligen im B-Plan festgelegten Geschossflächenzahl (GFZ) verglichen. Bei nicht ausgeschöpfter GFZ wird die mögliche zusätzliche bebaubare Brutto-Grundfläche (BGF) bestimmt und als vorläufiges Potenzial ausgewählt.

Nach der vorläufigen Bestimmung der potenziell bebaubaren Freiflächen werden diese weiter gefiltert. Je nach Verfahren werden unterschiedliche Mindestgrößen und Formparameter berücksichtigt, um ungeeignete Flächen zu entfernen. Zum einen betrifft dies „Splitterpolygone“, die durch die Verschneidung der Vorauswahl mit den Ausschlussflächen entstehen können. Zum anderen werden auch tatsächliche Freiflächen ausgeschlossen, die aber aufgrund ihres Zuschnitts dennoch für eine Bebauung nicht geeignet sind, beispielsweise weil sie sehr schmal sind. Für die einzelnen Verfahren sind die jeweils durchgeführten Filterungen in der Spalte „Bearbeitungsschritte - Filterung“ der Tabelle 2 beschrieben. Die Filterung kann zum einen über eine direkte Überprüfung für jede Fläche erfolgen, ob die festgelegten Grenzwerte für Größe und Formparameter eingehalten werden (vgl. Banko/Weiß 2019; Ehrhardt et al. 2023; Elend/Königer/Müller 2013; Feltgen et al. 2023; Heßler et al. 2021; Spitzer/Reithofer/Prinz 2017). Zum anderen verwenden Verfahren morphologische Operationen, bei denen Kleinstflächen über eine zweifache Pufferung, zunächst mit negativer und dann mit positiver Distanz, entfernt werden (vgl. Hecht/Meinel 2014; Heßler et al. 2021; Hintzen/Petersen 2016).

Die so erfassten Flächenpotenziale werden anschließend nach unterschiedlichen Definitionen kategorisiert. Zum Einsatz kommen Unterscheidungen je nach Bebauungsgrad (vgl. Elend/Königer/Müller 2013; Hintzen/Petersen 2016), Flächengröße (vgl. Feltgen et al. 2023; Regionalverband Ruhr 2021), Erschließungstiefe (vgl. Hecht/Meinel 2014) oder Entwicklungseignung (vgl. Heßler et al. 2021). Die Verfahren, die für die praktische Umsetzung in Kommunen genutzt werden, werden im letzten Schritt manuell validiert. Dies kann in Form einer Überprüfung und Bestätigung der Flächen durch lokale Verantwortliche mit Ortskenntnis über die Flächen erfolgen. Für eine weitere Verringerung des Aufwands der Kommunen kann auch zuvor bereits eine Überprüfung der Luftbilder durchgeführt werden. Dabei gibt es hauptsächlich zwei Arten an Potenzialen, die bereits herausgefiltert werden können. Zum einen sind dies Flächen, die in einem Baugebiet liegen, aber nicht für eine Bebauung vorgesehen sind, beispielsweise Spielplätze (siehe Abbildung 7) oder Regenrückhaltebecken. Zum anderen ist in der GIS-Analyse nicht erkennbar, wenn sich eine Fläche bereits im Bau befindet und somit kein Potenzial mehr darstellt.

Neben diesen Verfahren, die alle einem ähnlichen Vorgehen folgen, werden als nächstes die davon abweichenden Methoden beschrieben. Das Verfahren von Xu/Ehlers (2022) ist in mehrere Bestandteile zur Erfassung unterschiedlicher Potenzialtypen aufgeteilt. Die Identifikation von innerstädtischen ungenutzten natürlichen Lagen und Grünflächen folgt dem oben beschriebenen Vorgehen. Zusätzlich wird auch die Identifizierung von

Abbildung 7
Uneindeutige und fehlerhafte Erfassung von Baulücken in GIS-basierten Verfahren am Beispiel eines Spielplatzes



(a) ALKIS: Die beiden markierten Flächen (rot und orange) sind in ALKIS als Sport-, Freizeit- und Erholungsfläche vermerkt. Über die Geobasis-/ Fachdaten ist kein Unterschied zwischen den beiden Flächen erkennbar.



(b) DOP: Auf der rot markierten Fläche aus (a) sind im Luftbild Spielplatzgeräte erkennbar



(c) DOP: Auf der orange markierten Fläche aus (a) befindet sich Vegetation. Es findet keine aktive Nutzung statt, sodass die Fläche als Potenzial in Frage kommt

Quelle: (a) Hintergrundkarte © Geobasis NRW, (b) & (c) Bilddaten © Geobasis NRW

Brachflächen beschrieben. Dazu werden zum einen vorhandene Informationen aus kommunalen Aufzeichnungen, UA und Wikidata gesammelt. Zum anderen wird die Möglichkeit vorgestellt, über öffentliche Social Media Posts mit Geotagging eine Karte der Aktivität zu erstellen. Bei ungenutzten Flächen wird eine deutlich geringere Aktivität vermutet als bei genutzten Flächen. Zuletzt wird auch die Nutzung von Fernerkundungsdaten untersucht. Dazu werden Thermaldaten verwendet. Im Winter können auf den Bilddaten Temperaturunterschiede zwischen aktiv genutzten und daher beheizten Gebäuden und ungenutzten kälteren Gebäuden festgestellt werden, sofern die betroffene Fläche groß genug ist, um in der Auflösung der Daten von 30 m einen Einfluss zu haben.

Gadocha et al. (2021) führen in Österreich eine Bestimmung des NVP für jede Parzelle durch. Ähnlich wie bei Spitzer/Reithofer/Prinz (2017) werden mittels der Gebäudedaten die tatsächlich bestehenden Gebäude-

parameter bestimmt. Dazu zählen die Giebelhöhe, das Gebäudevolumen, die Anzahl der Vollgeschosse und die Bruttogeschossfläche (entspricht der deutschen Brutto-Grundfläche, BGF). Zur Beurteilung der Ausnutzung werden aufgrund der mangelnden Verfügbarkeit keine digitalen B-Pläne genutzt. Stattdessen wird für jeden der Gebäudeparameter aus den jeweils acht nächstliegenden bebauten Parzellen der zweithöchste Wert als ortsübliche Dichte bestimmt. Dann werden Simulationen möglicher Bebauungen durchgeführt, um eine möglichst hohe BGF zu erhalten, bei der alle übrigen Parameter ebenfalls eingehalten werden. Dies entspricht der optimalen Ausnutzung der Parzelle. Die Differenz der optimalen BGF zur tatsächlichen BGF entspricht dem NVP.

Ein weiteres abweichendes Verfahren stellen Cianfarani et al. (2023) vor. Aufgrund des Untersuchungsgebiets in Oklahoma City, USA, gestaltet sich die Datengrundlage deutlich anders als in Deutschland und seinen Nachbarländern, die bisher betrachtet wurden. Im ersten Schritt werden die räumlichen Informationen über die Parzellengrenzen mit Informationen über die Anzahl der Gebäude je besteueter Parzelle verschnitten, um darüber Flurstücke ohne Bebauung zu detektieren. Außerdem werden Parzellen ausgewählt, bei denen der Marktpreis dem Bodenpreis entspricht. Die so ausgewählten Parzellen werden visuell in Google Maps und Google Street View überprüft und wenn nötig aus der Auswahl entfernt. Dies betrifft überwiegend Flurstücke, die seit der letzten Aktualisierung der Datenquellen bebaut wurden. Im nächsten Schritt wird eine weitere Filterung der Flächen vorgenommen, um nur die entwickelbaren Flächen zu extrahieren. Dafür stehen vielfältige Datensätze von Seiten der Stadt zur Verfügung, über die Parks, Grünflächen, Uferbereiche, Wälder, Verkehrsflächen, Gewässer und landwirtschaftliche Flächen ausgeschlossen werden können.

Insgesamt ist die Qualität der Ergebnisse der GIS-basierten Ansätze hauptsächlich von der Genauigkeit und Aktualität der verwendeten Datenquellen abhängig. Aufgrund der vielfältigen Einflüsse, die darüber entscheiden, ob eine Fläche tatsächlich bebaubar ist oder nicht, liefern alle Verfahren nur eine Vorauswahl möglicher Flächenpotenziale, die manuell überprüft werden muss. Wenn die Methodik zur Identifikation der Potenzialflächen eines Gebiets praktisch angewandt werden soll, um konkrete Flächen zu benennen, ist dieser letzte Schritt unerlässlich. Für eine theoretische Auswertung der Gesamt-Flächenpotenziale kann hingegen auch rechnerisch auf Grundlage von Kommunen mit validierten Potenzialflächen je nach Siedlungsstruktur oder Demografie ein Faktor zwischen automatisch ermitteltem und tatsächlichem Potenzial bestimmt werden. Dieser kann dann näherungsweise für die vergleichbaren Kommunen angewendet werden, um das automatisch ermittelte Potenzial um die dafür zu vermutende Fehlerquote anzupassen.

4.4 Verfahren basierend auf Fernerkundungsdaten

Eine Alternative zur GIS-basierten Identifikation von Flächenpotenzialen ist die Analyse von Fernerkundungsdaten. Hauptsächlich werden dabei Satelliten- und Luftbilder verwendet. Der Fokus dieser Verfahren liegt im Gegensatz zu den GIS-basierten Verfahren auf Brachflächen. Ohne Hinzunahme von Geobasisdaten sind kleinere Potenzialflächen wie Baulücken und NVPs in Luftbildern nicht klar von der Umgebung abzugrenzen, insbesondere bei Bilddaten mit geringer Auflösung. Bei größeren Brachflächen hingegen können die Bilddaten genutzt werden, um über Merkmale wie zum Beispiel den Zustand der Bebauung und der Vegetation Rückschlüsse über die Aktivität oder Nichtnutzung der Fläche zu ziehen.

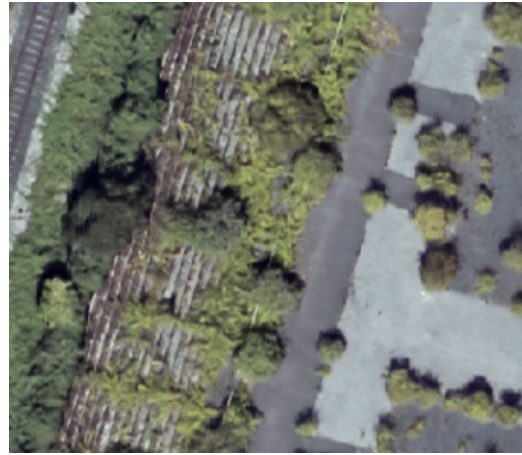
Erste automatisierte bildbasierte Methoden zur Detektion von Brachflächen wurden bereits vor knapp 20 Jahren von Banzhaf/Netzband (2004) und Nelson (2005) entwickelt. Sie verfolgen dabei leicht unterschiedliche Ansätze, die beide auf der Segmentierung der Bildpixel basieren.

Nelson (2005) klassifiziert die Landnutzung je Pixel, wobei die Brachflächen einer eigenen Klasse zugeordnet werden sollen. Er testet dazu zwei Möglichkeiten: einen unüberwachten Ansatz, bei dem die Pixel nach ihren Spektralwerten in 10 verschiedene Gruppen aufgeteilt werden, und einen überwachten Ansatz. Bei diesem werden 14 Klassen definiert und für einen Trainingsdatensatz annotiert. Aus diesem werden mit einem Ma-

Abbildung 8
Brachflächen mit unterschiedlichen Eigenschaften



(a) Ehemaliges Stadion. Die versiegelten Flächen sind erhalten geblieben und zum Teil durch Ruderalvegetation überwuchert, insbesondere die Sitzränge (linke Seite, oberhalb der Mitte), die Ränder der Laufbahn und die Spielfelder (siehe (b))



(b) Vergrößerter Ausschnitt vom linken Rand der Brachfläche aus Abbildung 8 (a)



(c) Ehemaliger belgischer Armeestützpunkt. Enthält ungenutzte Parkplätze, verfallene Gebäude und ungepflegte Vegetation (siehe (d))



(d) Vergrößerter Ausschnitt aus der Mitte der Brachfläche aus Abbildung 8 (c)

Quelle: Bilddaten © Geobasis NRW (2023), Potenzialflächen ©OSM (2023)

ximum-Likelihood-Ansatz die Eigenschaften der verschiedenen Klassen gelernt, sodass für die übrigen Pixel bestimmt werden kann, wie wahrscheinlich die Zugehörigkeit zu jeder der Klassen ist.

Banzhaf/Netzband (2004) bestimmen die Brachflächen hingegen nicht als eigene Klasse. Stattdessen wird das Bild zunächst in verschiedene Bildregionen segmentiert. Je Bildregion wird eine Landnutzungskategorie bestimmt, die jeweils Informationen über den Zustand oder die Aktivität der Fläche beinhaltet. Beispielsweise werden Parkplätze in drei Klassen aufgeteilt, je nachdem, ob sich viele, wenige oder keine Autos darauf befinden. Im Anschluss an die Klassifizierung werden jeweils benachbarte Bildregionen daraufhin untersucht, ob verschiedene Merkmale von Brachflächen enthalten sind. Dies folgt der Annahme, dass brachliegende Flächen verschiedenen Mustern folgen und mehrere Objekte enthalten. Die Beispiele in Abbildung 8 zeigen beispielsweise überwucherte Versiegelung, ungenutzte Parkplätze, verfallene Gebäude und ungepflegte Vegetation in räumlichem Zusammenhang.

Die Validierung beider Verfahren zeigte häufige Verwechslungen mit anderen Landnutzungsklassen beziehungsweise mit aktiv genutzten Flächen. Benannte Gründe dafür sind zum einen Ähnlichkeiten mit anderen Klassen, die auch visuell schwer zu unterscheiden sind, und zum anderen Schattenflächen (vgl. Nelson 2005; Banzhaf/Netzband 2004).

Ähnliche Ansätze mit neueren Daten und Klassifikationsansätze wurden von Shukla/Jain (2020), Mao et al. (2022) und Koroso (2023) getestet. Shukla/Jain (2020) gehen dabei ähnlich wie Banzhaf/Netzband (2004) vor und extrahieren zunächst mittels einer objektbasierten Segmentierung verschiedene urbane Features. Die Klassifikation von Brachflächen erfolgt dann über Regeln für diese Features. Für eine weitere Filterung der Flächen werden Digitale Höhen- und Oberflächenmodelle verwendet. Zur schärferen Abgrenzung wird außerdem der Excess Vegetation Index bestimmt. Mao et al. (2022) und Koroso (2023) hingegen verfolgen den Ansatz von Nelson (2005) und klassifizieren Potenzialflächen als eigene Landnutzungsklasse. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass Koroso (2023) die Fläche in nur vier Klassen aufteilt: bebaute Fläche, Vegetation, freie Fläche und Wasser. Vegetation und freie Flächen innerhalb von größeren bebauten Flächen werden dann vollständig als Potenzialflächen erfasst, da dies den Umständen in der Testregion in Äthiopien entspreche.

Ein Verfahren, das speziell für Gewerbebrachen in Deutschland entwickelt wurde, stammt von Dürrbeck/Lippi-Seifert (2022). Dabei wird eine GIS-basierte Vorauswahl mit der Auswertung von Luftbildern kombiniert. In der Vorauswahl werden nur die Gewerbeflächen ausgewählt (siehe Tabelle 1). Die DOPs werden in einheitliche Ausschnitte mit einer Bodenfläche von jeweils 200 m x 200 m aufgeteilt und so maskiert, dass darin nur die vorausgewählten Flächen verbleiben. Für beide ausgewählten Landbedeckungstypen wird dann jeweils ein eigenes Neuronales Netzwerk trainiert, welches zwischen Brachflächen und aktiv genutzten Gewerbeflächen unterscheidet. Für das Training wurden in OSM annotierte Brachflächen und ein Brachflächen-Datensatz für NRW von einem kommerziellen Anbieter verwendet. Für die Gegenklasse der aktiv genutzten Gewerbeflächen wurden Trainingsdaten erzeugt, indem zufällige Flächen aus der jeweiligen Landbedeckungskategorie ausgewählt wurden, deren aktive Nutzung durch Einträge im Handelsregister oder der Datenbank von Gelbe Seiten bestätigt ist. Nach dem Training können die Neuronalen Netzwerke genutzt werden, um die übrigen Flächen, die nicht am Training beteiligt waren, zu klassifizieren. Aktuelle Weiterentwicklungen im Rahmen des durch den Deutschen Brownfield Verband beauftragten Projekts ARGOS (Aufklärung von reaktivierbaren Gewerbeflächen mittels optisch-basierter Systeme) betreffen vor allem die Ausweitung der Bilddatenquellen auf hochauflösende Satellitenbilder sowie eine Verbesserung der Lerndaten (Ergebnis der Interviews aus Kapitel 6).

Darüber hinaus gibt es kommerzielle Anbieter, die eine Potenzialerfassung mittels KI durchführen. Da es sich um unternehmenseigene Verfahren handelt, liegen dazu keine genauen Erklärungen vor. Als Datengrundlage werden oftmals Geodaten wie ALKIS-Daten, Informationen zur Altersstruktur und Einwohnerdichte aus dem Zensus und Lidar-Daten verwendet. Die Daten fließen in ein KI-Modell, das für eine Fläche eine Abschätzung des Potenzials vornimmt.

5 Verfahren zur Erkennung von Innenentwicklungspotenzialen mit Künstlicher Intelligenz

5.1 Vielfältiger Einsatz an Verfahren aus der Künstlichen Intelligenz

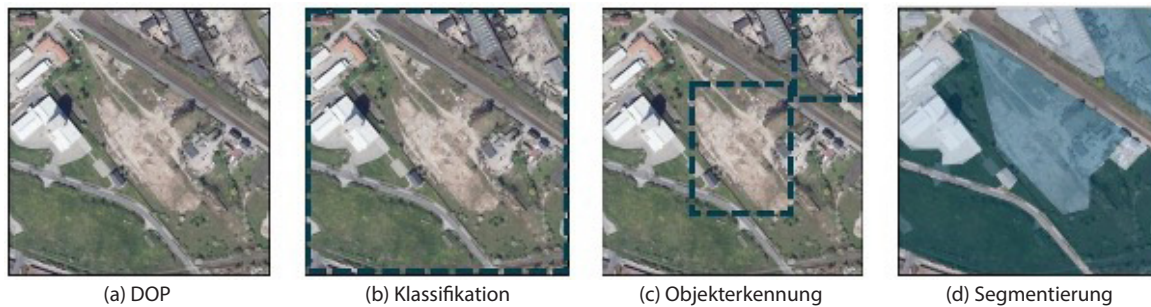
In dem Vorhaben wurde auf den neuesten Entwicklungen aus dem Bereich der KI und der Auswertung von Fernerkundungsdaten aufgebaut. In den bisherigen Ansätzen zur Automatisierung der IEP-Erfassung werden kaum KI-Verfahren eingesetzt, um Fernerkundungsdaten auszuwerten (Kapitel 4.4). Außerdem existieren bereits Möglichkeiten, um zukünftig mittels automatisierter Bildauswertungen die Ergebnisse der bisherigen GIS-basierten Verfahren (Kapitel 4.3) zu verfeinern.

Für die Aufgaben der Klassifikation und Segmentierung von Bildern aus Fernerkundungsdaten wurde in den letzten Jahren gezeigt, dass Neuronale Netzwerke besonders gut geeignet sind und einen Vorteil im Vergleich zu klassischen Verfahren besitzen (vgl. Ma et al. 2019). Eine spezielle Klasse von Neuronalen Netzwerken, die insbesondere für die Auswertung von Bilddaten eingesetzt wird, sind Convolutional Neural Networks (CNNs). Diese Netzwerkarchitektur wurde in dem Ansatz von Dürrbeck/Lippl-Seifert (2022) zur Unterscheidung von aktiven Gewerbeflächen und Brachflächen verwendet. Neben der Klassifikation unterschiedlicher Landnutzungsklassen, wie in den Verfahren von Koroso (2023), Nelson (2005), und Mao et al. (2022), können diese Neuronalen Netze auch zur Bildsegmentierung (vgl. Banzhaf/Netzband 2004; Shukla/Jain 2020) und Objekterkennung eingesetzt werden (siehe Abbildung 9). Je nach der verwendeten Datenquelle können auch andere Netzwerkarchitekturen eingesetzt werden. Zur Auswertung von multitemporalen Informationen, beispielsweise von Satellitenbildern zu verschiedenen Zeitpunkten, werden häufig Netzwerk-Architekturen aus der Sprachverarbeitung eingesetzt, wie Transformer- (vgl. Vaswani et al. 2017) oder Long-Short-Term-Memory-(LSTM)-Modelle (vgl. Hochreiter/Schmidhuber 1997).

Der bisherige Einsatz dieser Methoden beschränkt sich auf die Identifikation von Brachflächen. Bei der Erkennung von Baulücken und NVPs ist die Automatisierung zumeist auf eine GIS-Analyse beschränkt, die dann zum Beispiel anhand visueller Überprüfungen von Luftbildern verfeinert werden (vgl. Elgendy 2014). Hauptsächlich werden dabei Flächen ausgeschlossen, auf denen aktuell gebaut wird, die aber laut der GIS-Analyse noch unbebaut sind, und Flächen, deren Nutzung in den Geobasisdaten nicht genau genug aufgelöst ist. Beispielsweise werden sowohl begrünte Baulücken als auch Spielplätze in ALKIS als Grünflächen dargestellt und sind erst in Bauleitplänen oder Luftbildern voneinander unterscheidbar. Diese Überprüfung kann ebenfalls mit Hilfe von Neuronalen Netzwerken automatisiert werden.

Falls die benötigten Daten für eine GIS-Analyse, insbesondere die Hausumringe, nicht vorliegen oder in ihrer Qualität und Aktualität schlechter sind als die verfügbaren Bilddaten, ist auch eine rein bildbasierte Lösung mittels KI möglich. Es kann zum Beispiel eine Segmentierung von Bebauungen durchgeführt werden, bei der das Bild in unterschiedliche Bereiche aufgeteilt wird. Ähnlich zu der Bestimmung von Ausschlussflächen in den GIS-basierten Verfahren (Kapitel 4.3), können die unbebauten von den bereits bebauten Flächen abgegrenzt werden (siehe Abbildung 9 (d)). Auf Grundlage dieser Ergebnisse kann dann eine weitere Filterung vorgenommen werden, bei der beispielsweise Abstandsflächen um die bebauten Flächen herum erzeugt werden und aufgrund von Form und Größe ungeeignete Flächen entfernt werden. Eine klassische Gruppe von Neuronalen Netzen, die zur Bildsegmentierung eingesetzt werden können, sind Fully Convolutional Neural Networks (FCNs) (vgl. Long et al. 2015), darunter häufig eingesetzte Netzwerk-Architekturen wie U-Net (vgl. Ronneberger et al. 2015), DeepLab (vgl. Chen et al. 2018), PSPNet (vgl. Zhao et al. 2017), Linknet (vgl. Chaurasia/Culurciello 2017), MAnet (vgl. Fan et al. 2020).

Abbildung 9
Überblick verschiedener Modellierungsansätze zur Problemstellung der Identifikation von Potenzialflächen



Quelle: Vision Impulse; Hintergrund: DOP © Geobasis-DE / BKG (2024) (geändert)

Eine andere Möglichkeit zur rein bildbasierten Identifikation von Baulücken stellt die Objekterkennung dar. Um die in Abbildung 9 (c) blau markierten Flächen zu identifizieren, können Netzwerke wie Faster-RCNN oder Mask-RCNN (vgl. Li et al., 2020; Ren et al., 2015; He et al., 2017) genutzt werden. Wenn ausreichend Beispieldaten verfügbar sind, in denen Baulücken annotiert wurden, können die Eigenschaften von Baulücken von dem Netzwerk erkannt werden, zum Beispiel die Nähe zu Erschließungsanlagen oder die Lage im Verhältnis zur bestehenden Bebauung. In neuen Bildern können dann die Ausschnitte bestimmt werden, die ebenfalls diese Merkmale aufweisen.

Je nach Problemstellung werden unterschiedliche Arten von Referenzdaten für das Training benötigt. Zur Objekterkennung werden innerhalb eines Bildes sog. „Bounding-Boxes“ benötigt, bei der Segmentierung eine pixelweise Bildmaske. Die Erstellung eines Datensatzes für das Modell-Training mit Annotation dieser Zielgrößen ist in der Praxis oftmals sehr aufwändig, insbesondere bei letzterer Problemmodellierung. Es bleibt somit für den konkreten Anwendungsfall individuell zu bewerten, welche Modellierung als zielführend einzuordnen ist.

5.2 Nutzung Künstlicher Neuronaler Netze zur Luftbildklassifikation

In der vorliegenden Methodenstudie wurde ein KI-Verfahren zur Klassifikation von Bildern in die beiden vorgegebenen Klassen „IEP“ vs. „Kein IEP“ erstellt. Für diese Aufgabe wurden mehrere KI-Modelle in Form von „überwachtem Lernen“ trainiert. Beim „überwachten Lernen“ werden während der Modellentwicklung Beispieldaten genutzt, für die sowohl die Input-Daten (also z. B. die Bilddaten) als auch die Output-Daten (je nach Aufgabe z. B. die tatsächliche Landnutzungsart oder die Nutzungsaktivität) bekannt sind. Diese werden als Lerndaten bezeichnet. Das Modell wird mit diesen Daten trainiert, um anschließend auf neuen Eingabedaten entsprechende Output-Daten zu erzeugen (z. B. eine Klassifikation oder Segmentierung). Für das Training der Modelle ist eine ausreichende Anzahl an Lerndaten nötig und auch innerhalb der Klassenverteilung sollte eine ausreichende Varianz in den Daten vorhanden sein.

Für die Aufgaben der IEP-Erfassung müssen also die verfügbaren GT-Daten (siehe Kapitel 3) für das Training effizient genutzt werden. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die verschiedenen Datenquellen keinen einheitlichen Erfassungskriterien folgen und auch die Bezugszeitpunkte im Vergleich zu den übrigen Datenquellen unterschiedlich sind (siehe Kapitel 6).

Für die Entwicklung der Klassifikationsmodelle wurde ein neuer Luftbilddatensatz erstellt. Es wurden Bildausschnitte aus den Luftbildern für deutsche Kommunen mit verfügbaren GT-Annotationen extrahiert. Anschließend wurde jedem Bildausschnitt ein GT-Wert zugewiesen: Ein Bild der Größe 40 m x 40 m wurde als Brachfläche (positive Klasse) betrachtet, wenn mindestens 70 % davon von einer Fläche bedeckt sind, die in der GT als Brachfläche vermerkt ist. Die restlichen Fenster wurden der negativen Klasse „keine Brachfläche“ zugeordnet.

Tabelle 3
Überblick über die Hyperparameter des eingesetzten Klassifikationsmodells

Parameter	Wert
Lernrate	10^{-5} (mit learning rate decay)
Epochen	40
Loss-Funktion	Cross Entropy Loss
Batch-Größe	256
Klassen-Gewichtung	Für Brachflächen: Gesamtgröße des Trainingsdatensatzes geteilt durch die Größe der jeweiligen Klasse
Bilddaten	Nur RGB-Bänder

Quelle: Vision Impulse

Analog dazu werden kleinere Fenster von 20 m x 20 m erzeugt und den in den GT-Daten enthaltenen Baulücken und NVPs zugeordnet. Die in dieser Studie erstellten Datensätze enthalten eine sehr große Anzahl von Beispielen in der negativen Klasse im Vergleich zur positiven Klasse. Um das starke Ungleichgewicht zu verringern, wurde nur eine Teilmenge der verfügbaren Beispiele aus der negativen Klasse ausgewählt, sodass diese doppelt so groß ist wie die positive Klasse. Schließlich wurden die beiden Datensätze in jeweils drei separate Teilmengen für das Training, die Validierung und das Testen der Klassifizierungsmodelle aufgeteilt.

Für das Training wurden außerdem die Klassen gewichtet, um ihre unterschiedliche Größe zu berücksichtigen. Auch hierzu wurden verschiedene Möglichkeiten getestet. Für den Klassifikator der Brachen ist die beste Gewichtungsoption ein Klassengewicht abhängig von der Anzahl der Beispiele in der jeweiligen Klasse.

Für jede der beiden Klassen c wird das Gewicht $w_c = n_{\text{total}} / n_c$ berechnet, wobei n_c die Anzahl der Beispiele in der Klasse c ist und n_{total} die Gesamtgröße des Trainingsdatensatzes. Alternativ kann auch ein Wert manuell gewählt werden. Für die Klassengewichtung in dem Training des Klassifikationsmodells für Baulücken und NVPs hat sich in internen Evaluationen ein fixer Faktor von 2 zu 1 (negativer zu positiver Klasse) als am erfolgversprechendsten herausgestellt.

Mit dem ausgewählten Trainingsdatensatz wurden mehrere Modelle aus dem Bereich des Deep Learning trainiert. Auf der Grundlage des separaten Validierungsdatensatzes wurde die Güte der verschiedenen Modelle (ResNet, DenseNet, SwinTransformer) und Trainingseinstellungen (Anzahl der Epochen, Lernrate, Loss-Funktion) bestimmt und verglichen (siehe Kapitel 6.2.2). Dabei erreichte ein Modell mit ResNet50-Architektur und den in Tabelle 3 zusammengefassten Einstellungen die höchsten Erkennungsraten.

Die beiden ausgewählten Modelle (einerseits für Brachflächen und andererseits für Baulücken und NVPs) können direkt auf neue Gebiete angewandt werden.

5.3 KI-gestützte Verarbeitung zur Extraktion von Innenentwicklungspotenzialen

Auf der Grundlage der Erkenntnisse aus den vorherigen Kapiteln wurde ein neues Verfahren entwickelt. Der Ansatz besteht aus vier Schritten, die im Folgenden näher beschrieben werden.

Die Teilschritte in der Verarbeitungspipeline:

1. Zunächst erfolgt eine Auswahl potenziell geeigneter Gebiete anhand von amtlichen Fachdaten wie den Landnutzungskartierungen aus ALKIS und ATKIS. Dadurch werden die zu klassifizierenden Flächen eingegrenzt.

Tabelle 4
Auswahl der erlaubten Landnutzungen für Brachen in der Vorauswahl mittels ALKIS und ATKIS

Landnutzungs-kategorie	Unterklasse zur Funktion
Wohnbaufläche (41001)	Alle
Industrie- und Gewerbefläche (41002)	Alle außer Lagerfläche (1740), Versorgungsanlage (25**), Entsorgung (26**)
Fläche gemischter Nutzung (41006)	Alle außer Fischereiwirtschaftsfläche (3000), Landwirtschaftliche Betriebsfläche (6800), Forstwirtschaftliche Betriebsfläche (7600), Gebäude- und Freifläche für Land- und Forstwirtschaft (2700),
Fläche besonderer funktionaler Prägung (41007)	Nur Öffentliche Zwecke (1100), Regierung und Verwaltung (1110), Soziales (1160) oder nicht angegeben
Sport-, Freizeit- und Erholungsfläche (41008)	Nur Garten (4460), Wochenend- und Ferienhausfläche (4310)

Quelle: Vision Impulse

Tabelle 5
Auswahl der erlaubten Landnutzungen für Baulücken und NVPs in der Vorauswahl mittels ALKIS und ATKIS

Landnutzungs-kategorie	Unterklasse zur Funktion
Wohnbaufläche (41001)	Alle
Industrie- und Gewerbefläche (41002)	Alle außer Parkplätze (1200), Lagerfläche (1740), Versorgungsanlage (25**), Entsorgung (26**)
Fläche gemischter Nutzung (41006)	Alle außer Fischereiwirtschaftsfläche (3000), Landwirtschaftliche Betriebsfläche (6800), Forstwirtschaftliche Betriebsfläche (7600), Gebäude- und Freifläche für Land- und Forstwirtschaft (2700), Wohnen und Betrieb (2730)
Fläche besonderer funktionaler Prägung (41007)	Alle außer Sicherheit und Ordnung (1170), Kultur (1130), Historische Anlagen (13**)

Quelle: Vision Impulse

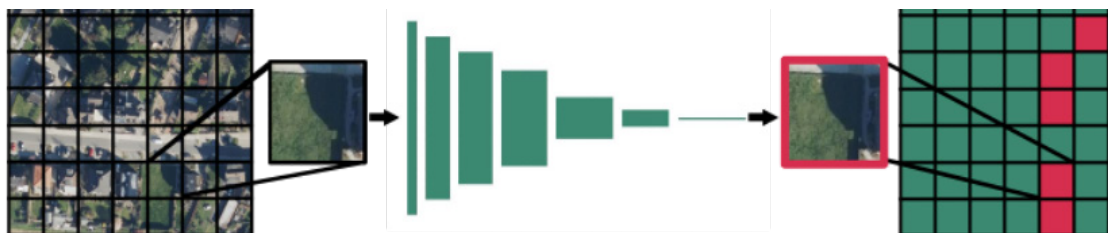
2. Anschließend werden die DOPs innerhalb der vorselektierten Flächen in Teilflächen mit einer Größe von 40 m x 40 m für Brachflächen bzw. 20 m x 20 m für Baulücken und NVPs eingeteilt.
3. Jeder so erstellte Bildausschnitt aus dem vorherigen Schritt wird mit einem KI-Modell klassifiziert. Für jede der beiden Aufgabenstellungen wurde jeweils ein bzw. mehrere Deep-Learning-Modell entwickelt (siehe Kapitel 5.2).
4. Mit dem Ergebnis der Bildklassifikation entsteht eine Rasterkarte der positiv und negativ klassifizierten Fenster. Schließlich kann diese Modellausgabe nachbearbeitet werden, z. B. durch Anpassung der Schwellenwerte für die Klassenwahrscheinlichkeit des Modells oder durch Aggregation der Rasterkarten zu Polygonen auf der Grundlage der Vorhersagewerte oder zu bestimmten Teilbereichen wie Flurstücken.

5.3.1 Filterung von geeigneten Flächen

Der erste Schritt bei vielen Methoden zur Identifizierung von IEPs besteht darin, die geeigneten Flächen auf Grundlage bestehender Landnutzungskartierungen einzuschränken. Bei diesem Schritt können großflächige Geometrien eines Gebiets ausgeschlossen werden, die kein Potenzial für eine künftige Entwicklungsnutzung haben, wie Gewässer, Wälder oder landwirtschaftliche Flächen. Auf diese Weise müssen diese Gebiete nicht vom Klassifikator herausgefiltert werden. Gleichzeitig kann sich dieser auf die Datenverteilung der relevanten Landnutzungsklassen spezialisieren. In dieser Methodenstudie wurde die Filterung von Landnutzungsklassen auf Grundlage von Informationen aus ALKIS und ATKIS durchgeführt.

Für eine erste Auswahl der Flächen mit einer geeigneten Landnutzung wurden die in früheren Methoden verwendeten Landnutzungs- und Landbedeckungsklassen untersucht. In dem Zuge wurde analysiert, welche Landnutzungsklassen und Funktionen in den GT-Daten vorkommen. Bei der Entwicklung des Ansatzes wurden einige weitere Klassen entfernt, bei denen die Unterscheidung zwischen genutzten und ungenutzten Flächen

Abbildung 10
Überblick über den Klassifikationsansatz mit einem Neuronales Netzwerk



Quelle: Vision Impulse; Hintergrund: DOP © Geobasis-DE / BKG (2024) (geändert)

aus dem Luftbild nicht eindeutig ist. Die für die Identifizierung von Brachflächen ausgewählten Klassen für die Vorfilterung der Bildausschnitte sind in Tabelle 4 dargestellt.

Darüber hinaus wurden Waldkartierungen für die Vorfilterung von Gebieten verwendet, die potenziell als Brachflächen geeignet sind. Die Baumbedeckung ist ein Merkmal, das in beiden Klassen, Brachflächen oder nicht, vorkommen kann und oftmals zu unklaren Bewertungen durch das Modell führt, sofern diese im Bild sichtbar ist. Flächen mit Baumbewuchs wurden daher von den Flächen ausgeschlossen, die für eine weitere Betrachtung als Brachflächen in Frage kommen.

Die Klassen, die als potenziell geeignet für Baulücken und Nachverdichtungsgebiete ausgewählt wurden, sind in Tabelle 5 aufgeführt. Für diese Art von IEP ist es von besonderer Bedeutung, die Suche auf die Gebiete innerhalb der städtebaulichen Innenbereiche zu beschränken, in denen das Wachstum konzentriert werden sollte, um eine Ausdehnung der Städte zu vermeiden. Die Innenbereiche wurden anhand der im ATKIS Basis-DLM ausgewiesenen Ortslagen angenähert.

Zusätzlich wurde eine weitere Filterung der Verkehrsflächen vorgenommen. In Regionen, in denen Daten zur Flächennutzung nur aus dem ATKIS Basis-DLM vorliegen, werden die Verkehrsflächen nur als Linien dargestellt, sodass die tatsächlichen Verkehrsflächen im angrenzenden Polygon enthalten sind. Dies gilt auch für einige kleinere Wege in ALKIS. Um die Verkehrsflächen aus den Flächen für die Klassifikation zu entfernen, wurde ein zusätzlicher kombinierter Verkehrs-Layer erstellt. Er kombiniert die Verkehrsflächen aus ALKIS (falls vorhanden) mit den Linien aus ATKIS, die um die angegebene Breite gepuffert wurden oder, falls keine Breite zugewiesen wurde, um eine Standardbreite von 3 m. Die Flächen aus diesem Layer werden aus den vorgewählten Flächen entfernt.

5.3.2 Vorverarbeitung von Luftbildern

Die Eingabedaten für das KI-Klassifizierungsmodell sind Bildausschnitte. Die Erstellung von regelmäßigen Bildausschnitten ist durch die technische Limitierung, die durch das Laden von sehr großen Bilddaten in den Arbeitsspeicher bzw. Speicher von Grafikkarten auftritt, begründet.

Die großflächigen Luftbilddaten werden, innerhalb der im ersten Schritt ermittelten Flächen, durch die Erstellung eines regelmäßigen Gitters in Bildausschnitte mit Teilflächen aufgeteilt. Für jede Rasterzelle wurde der entsprechende Bildausschnitt aus dem DOP extrahiert (siehe Abbildung 10). Eine Aufteilung in Fenster von 40 m x 40 m, entspricht 200 x 200 Pixeln in dem DOP, erwies sich in internen Evaluationen als geeignete Bildgröße für die Identifizierung von Brachflächen. Für Baulücken und NVP lieferte eine feinere Unterteilung in Fenster von 20 m x 20 m bzw. 100 x 100 Pixel in dieser Auswertung bessere Ergebnisse.

5.3.3 Bildklassifizierung mittels künstlicher Neuronaler Netze (KI)

Die aufbereiteten Bildausschnitte werden mit neuronalen Netzen in zwei Klassen (Flächenpotenzial vorhanden, kein Flächenpotenzial vorhanden) klassifiziert. Bei der Klassifizierung von IEPs wird zwischen zwei Aufgaben unterschieden: der Klassifizierung von Brachflächen einerseits und der Klassifizierung von Baulücken und NVP andererseits.

Hierzu wurde ein neuronales Netzwerk trainiert, das die einzelnen Bilder in einerseits Brachflächen (als positive Klasse) und andererseits aktiv genutzte Flächen (als negative Klasse) kategorisiert. Analog wurde ein Modell erstellt, das die Bilder in die beiden Klassen „Flächen mit Baulücken oder NVP (positive Klasse)“ versus „Flächen ohne Potenzial“ (negative Klasse) identifiziert. Für die beiden positiven Klassen (Klassifikation von Brachflächen, Klassifikation von Baulücken / NVP) wurden getrennte Klassifizierungsmodelle entwickelt. Die eigentliche Modellarchitektur des Neuronalen Netzwerks gründet dabei auf der gleichen Struktur. Für die Bestimmung der internen Gewichte der Neuronalen Netze während des KI-Trainings wurden unterschiedliche Datensätze und Hyperparameter verwendet (siehe Kapitel 5.2).

5.3.4 Nachverarbeitung des Klassifikationsergebnisses

Basierend auf der Klassifizierung der einzelnen Bilder wird eine Rasterkarte mit positiven und negativen Klassen für alle Bereiche innerhalb der vorausgewählten Flächen im Untersuchungsgebiet erstellt (Abbildung 10). Die Rasterkarten der Klassifizierungsergebnisse können zu zusammenhängenden Polygonen aggregiert werden. Zur Aggregation der Bildfenster gibt es unterschiedliche Ansätze. Es wurden zwei Verfahren implementiert.

- Als erste Möglichkeit wurde ein Ansatz umgesetzt, der alle benachbarten Flächen mit einem positiven Klassifikationsergebnis zu einem Polygon zusammenfasst. Durch das Vorgehen entstehen einzelne Polygone bzw. Teilflächen als vorgeschlagene IEPs. Das aggregierte Polygon wird stark durch die Größe der Bildfenster bestimmt.
- Als weitere Möglichkeit wurde ein Ansatz implementiert, um die Zuordnung der klassifizierten Flächen auf die darunterliegenden amtlichen Flurstücke vorzunehmen. In diesem Fall wird für jedes Flurstück aus FS-DE innerhalb des vorgewählten Gebietes geprüft, ob es zu einem vom Benutzer festgelegten minimalen Anteil durch positiv klassifizierte Fenster abgedeckt ist. Diese Flurstücke werden als IEP markiert, während die anderen Flurstücke der negativen Klasse zugeordnet werden.

6 Bewertung des KI-Verfahrens zur Extraktion von Innenentwicklungspotenzialen

6.1 Fallstudiengebiete zur Evaluation der Methode

Zur Bewertung der Güte des entwickelten Verfahrens wurden die Ergebnisse einerseits bezüglich der zum Validieren und Testen erzeugten Datensätze ausgewertet und andererseits auch anhand von sechs repräsentativen Fallstudien bewertet. Die Daten dieser Fallstudiengebiete wurden ausschließlich für die Evaluation verwendet und waren nicht Teil der Entwicklungs- und Testreihe in der Methodenentwicklung (siehe Kapitel 5.2). Durch die Aufteilung kann überprüft werden, wie gut die Methode auf ungesehene Daten generalisiert.

6.1.1 Auswahl der Fallstudiengebiete

Die sechs Kommunen wurden anhand mehrerer Kriterien ausgewählt. Eine Grundvoraussetzung ist die Verfügbarkeit von Ground-Truth-Daten, um eine Bewertung der Klassifizierungsergebnisse durch Vergleich der annotierten IEPs durchzuführen. Regionen, die diese Voraussetzung erfüllen, wurden nach drei Kriterien bewertet:

Das erste Kriterium ist, dass die Potenzialflächen-Datensätze öffentlich zugänglich sein oder durch die Kommunen für die Methodenstudie bereitgestellt werden müssen. Insbesondere bei den öffentlichen Baulandkatastern stehen diese oft in Form von Kartenviewern oder pdf-Karten bereit, können aber nicht als Geodaten heruntergeladen werden. In den entsprechenden Kommunen wurde also jeweils die Bereitstellung der Geodaten angefragt. Zur weiteren Datenbeschaffung wurden auch die Betreiber der Datenbanken der Länder kontaktiert. Diese können zwar nicht die Daten der einzelnen Kommunen bereitstellen, die Anfrage aber an die Nutzer-Kommunen weiterleiten oder kommunale Kontakte herstellen. Bei den Datensätzen ist es von Vorteil, wenn sie eine möglichst vollständige Erfassung der Potenzialflächen enthalten. Bei den öffentlichen Baulandkatastern nach § 200 BauGB ist die Vollständigkeit dadurch eingeschränkt, dass nur die Flächen der Eigentümer enthalten sind, die der Veröffentlichung nicht widersprochen haben.

Das zweite Kriterium betrifft die in den Datensätzen enthaltenen Potenzialtypen. Insgesamt müssen die Datensätze für Entwicklung und Validierung ausreichend Flächen für alle drei Potenzialtypen enthalten, die durch die Methode erfasst werden sollen. Dabei müssen nicht in jedem der Gebiete alle Potenzialtypen erfasst werden, aber insgesamt müssen jeweils ausreichend viele Flächen in beiden Schritten vorhanden sein. Besonders berücksichtigt werden muss dies, da die öffentlichen Baulandkataster zumeist keine Brachflächen enthalten. Auch NVPs werden nicht immer erfasst, teilweise sind sie aber aufgrund anderer Definitionen ebenfalls als Baulücken eingetragen. Insgesamt muss also beachtet werden, dass nicht nur Kommunen ausgewählt werden, die ausschließlich Baulücken (nach der Definition aus Kapitel 1.2.3) erfassen.

Um eine Aussage über die deutschlandweite Anwendbarkeit der Methode zu treffen, wurde eine repräsentative Auswahl der Kommunen getroffen. Im Zuge der Baulandumfrage wurden vom BBSR (2022) bereits Fallstudien bezüglich der bestehenden Flächenpotenziale und deren Erfassung durchgeführt. Zur Auswahl wurden dabei drei Merkmale verwendet, die auch in diesem Projekt genutzt werden:

- regionale Abdeckung: versch. Bundesländer; alte und neue Bundesländer; Stadtstaaten und Flächenländer
- siedlungsstrukturelle Kreistypen: kreisfreie Großstadt, städtischer Kreis, ländlicher Kreis mit Verdichtungstendenzen, dünn besiedelter, ländlicher Kreis
- demografische Disposition: wachsend, gleichbleibend, schrumpfend

Tabelle 6
Auswahl und Bewertung der Fallstudiengebiete nach Potenzialtyp

Region	Baulücke	NVP	Brachfläche
Soest (Nordrhein-Westfalen)	zutreffend	zutreffend	zutreffend
Gelsenkirchen (Nordrhein-Westfalen)	zutreffend	nicht zutreffend	zutreffend
Haldensleben (Sachsen-Anhalt)	zutreffend	nicht zutreffend	nicht zutreffend
Spremberg (Brandenburg)	zutreffend	nicht zutreffend	nicht zutreffend
Ilmtal-Weinstraße (Thüringen)	zutreffend	teilweise zutreffend	teilweise zutreffend
Ostfildern (Baden-Württemberg)	zutreffend	teilweise zutreffend	teilweise zutreffend

Quelle: Vision Impulse

Tabelle 7
Auswahl und Bewertung der Fallstudiengebiete nach demografischer Disposition

Region	Schrumpfend	Gleichbleibend	Wachsend
Soest (Nordrhein-Westfalen)	nicht zutreffend	nicht zutreffend	zutreffend
Gelsenkirchen (Nordrhein-Westfalen)	nicht zutreffend	zutreffend	nicht zutreffend
Haldensleben (Sachsen-Anhalt)	nicht zutreffend	zutreffend	nicht zutreffend
Spremberg (Brandenburg)	zutreffend	nicht zutreffend	nicht zutreffend
Ilmtal-Weinstraße (Thüringen)	zutreffend	nicht zutreffend	nicht zutreffend
Ostfildern (Baden-Württemberg)	nicht zutreffend	nicht zutreffend	zutreffend

Quelle: Vision Impulse

Tabelle 8
Auswahl und Bewertung der Fallstudiengebiete nach siedlungsstrukturellen Kreistypen

Region	Kreisfreie Großstadt	Städtischer Kreis	Ländlicher Kreis (Verdichtungstendenz)	Dünn besiedelter ländlicher Kreis
Soest (Nordrhein-Westfalen)	nicht zutreffend	zutreffend	nicht zutreffend	nicht zutreffend
Gelsenkirchen (Nordrhein-Westfalen)	zutreffend	nicht zutreffend	nicht zutreffend	nicht zutreffend
Haldensleben (Sachsen-Anhalt)	nicht zutreffend	nicht zutreffend	nicht zutreffend	zutreffend
Spremberg (Brandenburg)	nicht zutreffend	nicht zutreffend	zutreffend	nicht zutreffend
Ilmtal-Weinstraße (Thüringen)	nicht zutreffend	zutreffend	nicht zutreffend	nicht zutreffend
Ostfildern (Baden-Württemberg)	nicht zutreffend	zutreffend	nicht zutreffend	nicht zutreffend

Quelle: Vision Impulse

Abbildung 11
Teilgebiete verschiedener Fallstudienregionen mit unterschiedlichen Eigenschaften



(a) Soest, städtischer Kreis, historische Altstadt



(b) Gelsenkirchen, Großstadt, durch Industrie und Bergbau geprägt



(c) Haldensleben, dünn besiedelter ländlicher Kreis

Quelle: Bilddaten DOP © Geobasis-DE / BKG (2024)

Abbildung 12
Teilgebiete verschiedener Fallstudienregionen mit unterschiedlichen Eigenschaften



(a) Spremberg, ländlicher Kreis mit Verdichtungstendenz, durch Bergbau geprägt



(b) Ilmtal-Weinstraße, städtischer Kreis, schrumpfend



(c) Ostfildern, städtischer Kreis, wachsend

Quelle: Bilddaten DOP © Geobasis-DE / BKG (2024)

Für eine repräsentative Auswahl sollten die Fallstudien möglichst unterschiedliche Optionen erfüllen. Ein zusätzliches Kriterium, das für das Vorhaben relevant ist, ist die städtebauliche Prägung der Kommune. Es sollten zum Beispiel auch (ehemalige) Industriestandorte sowie historische / denkmalgeschützte Standorte berücksichtigt werden.

Die Bestimmung der siedlungsstrukturellen Kreistypen erfolgte mittels der entsprechenden Kartierung des BBSR. Auch die Einordnung der demografischen Dynamik entstammt einer Untersuchung der laufenden Raubeobachtung des BBSR, die mittels einer interaktiven Karte abgefragt werden kann. Die Auswahl der Regionen, die als Fallstudien verwendet werden, erfolgt so, dass möglichst vielfältige Kombinationen der unterschiedlichen Kriterien enthalten sind. Alle übrigen Regionen können in der Methodenentwicklung genutzt werden.

Die ausgewählten Gebiete sind Gelsenkirchen, Spremberg, Haldensleben, Ostfildern, Soest und Ilmtal-Weinstraße. Die Auswertung der oben beschriebenen Kriterien für diese Gebiete sind in den Tabellen 6–8 dargestellt und die unterschiedlichen Eigenschaften können in Abbildung 11 und Abbildung 12 erkannt werden.

Die Kommunen haben jeweils unterschiedliche Eigenschaften bezüglich der benannten Kriterien und können somit eine repräsentative Auswertung ermöglichen. Zusätzlich weisen einige der Gebiete weitere Besonderheiten auf, die ebenfalls bei der Auswertung berücksichtigt werden sollten.

Die Stadt Gelsenkirchen unterscheidet sich von den übrigen Gebieten insbesondere durch die Prägung als ehemaliger Standort der Kohle- und Stahlindustrie (vgl. Berief/Pankratz 2012). Die Städte Soest und Ostfildern weisen zwar in der Tabelle die gleichen Eigenschaften auf, unterscheiden sich aber stark in ihrer Entstehungsgeschichte. Soest als Handelszentrum und Großstadt des Mittelalters weist auch heute noch ein großes kulturelles Erbe auf und hat eine denkmalgeschützte Altstadt. Ostfildern hingegen entstand erst 1976 durch den Zusammenschluss mehrerer Dörfer, die historisch durch Landwirtschaft und Kleinhandwerk geprägt waren, in Bezug auf Handel und Industrie jedoch den umliegenden Städten Esslingen und Stuttgart unterlegen waren.

Der Landkreis Cham besteht aus 39 Gemeinden, die jeweils unterschiedliche Eigenschaften haben. Für die Validierung können daraus also einzelne Gemeinden ausgewählt werden, während der Rest für die Methodenentwicklung genutzt werden kann. Eine Besonderheit des Landkreises ist die Lage an der tschechischen Grenze.

6.1.2 Anwendung des Verfahrens in den Fallstudiengebieten

Bei der Anwendung der Klassifikationsmodelle für neue Gebiete, wie hier für die Fallstudiengebiete, werden die einzelnen zusammenhängenden positiv klassifizierten Flächen als mögliche Potenzialflächen vorgeschlagen. Für Teilgebiete der Fallstudiengebiete zeigt die Abbildung 13 die resultierende Karte für die Klassifikation von Brachflächen.

Die vorgeschlagenen Brachen betreffen insgesamt nur einen kleinen Teilbereich des Gebiets und betreffen vor allem die unbebauten Teilbereiche. Dabei werden die annotierten Brachen identifiziert sowie weitere zusätzliche Flächen vorgeschlagen. Die Baulücken und Nachverdichtungspotenziale sind stärker über das Gebiet verteilt. Auch hier werden neben den überwiegend korrekt identifizierten Potenzialen aus der GT einige zusätzliche Flächen als IEPs klassifiziert. Im dargestellten Beispiel betrifft dies vor allem Freiflächen entlang des Randes des Innenbereichs. Auch eine größere Baustelle wird fälschlicherweise als Baulücke oder NVP klassifiziert.

Abbildung 13
Klassifikationsergebnisse von Brachflächen überlagert mit einem Luftbild



Quelle: Vision Impulse; Hintergrund: DOP © Geobasis-DE / BKG (2024) (geändert)

6.2 Quantitative Evaluation des Verfahrens

Zunächst werden die Ergebnisse verschiedener Modelle und Modelleinstellungen vorgestellt, die zu der finalen Auswahl der Klassifikationsmodelle führten. Für die in Kapitel 6.1 vorgestellten Fallstudiengebiete wurden diese Modelle dann angewendet, wie in Kapitel 5.3 beschrieben. Die Qualität der Ergebnisse dieser automatisierten Identifikation von IEPs wird im Folgenden vorgestellt. Dabei wird zunächst der Einfluss des ersten Schrittes der Methode, der Filterung von Landnutzungsklassen, untersucht. Anschließend werden die Klassifikationsergebnisse ausgewertet und verschiedene Detailanalysen durchgeführt.

6.2.1 Verwendete Evaluationsmetriken

Zur Bewertung der binären Klassifizierungsmethoden werden verschiedene Metriken verwendet, die sich jeweils aus der Konfusionsmatrix ableiten lassen. Diese enthält die Anzahl der True Positives (TP), False Negatives (FN), True Negatives (TN) und False Positives (FP) in den Klassifikationsergebnissen. Der Prozentsatz der annotierten Beispiele der Positivklasse, in diesem Fall der IEPs, die vom Modell korrekt identifiziert wurden, ist der Recall. Im Gegensatz dazu beschreibt die Präzision den Anteil der positiven Klassifikationsergebnisse, der auch als positiv annotiert ist. Eine Aussage über die Gesamtgenauigkeit liefert die Accuracy, der Anteil der korrekt klassifizierten Beispiele beider Klassen an der Gesamtgröße des Datensatzes. Diese Metrik hängt stark von der Ungleichverteilung der Klassen ab, sodass die größere Klasse den Wert stärker beeinflusst als die kleinere Klasse. Dadurch führt bereits ein kleiner Anteil falsch identifizierter Flächen aus der größeren Klasse zu einer Abnahme der Accuracy, wohingegen auch bei sehr geringer Trefferquote in der kleineren Klasse noch eine hohe Accuracy erzielt werden kann. Daher wird die Accuracy in dieser Methodenstudie nicht zur Bewertung der entwickelten Methoden verwendet, sondern nur für den Vergleich mit bestehenden Methoden, wenn dazu sonst keine anderen Metriken vorliegen.

Das Ziel der Klassifikation ist die Kombination aus einem hohen Recall und einer hohen Präzision. Statt der Accuracy wird daher der F1-Score verwendet, der diese beiden Metriken je Klasse kombiniert und über alle

Abbildung 14
Beispiel für die Auswertung der klassifizierten Bildfenster mit den Referenz-Polygonen aus dem Datensatz



Quelle: Vision Impulse

Klassen zum F1-Macro-Score gemittelt werden kann. Somit ist er besonders für Datensätze mit einem starken Ungleichgewicht der Klassen geeignet.

6.2.2 Evaluation von Bildausschnitten und Polygonen

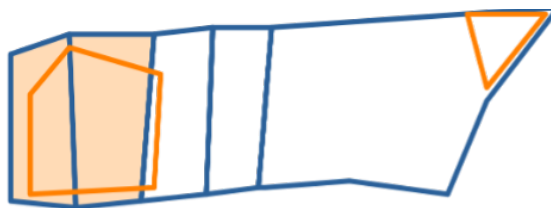
Für die Auswertung auf Fensterebene wird für jeden Bildausschnitt die zugeordnete GT mit dem Klassifikationsergebnis verglichen, wodurch sich direkt die Anzahl der TP, FP, FN und TN ergibt.

Bei der Auswertung der aggregierten Polygone hingegen betreffen die Klassifikationsergebnisse und die Annotationen keine zuvor definierten übereinstimmende Teilflächen. Stattdessen ist eine Bestimmung der Überlappung nötig (siehe Abbildung 14). Wenn Anteile eines GT-Polygons von mindestens einem der als Brache vorgeschlagenen Polygone überdeckt sind, wird dieses als korrekt identifizierte Brache (True Positive) gewertet. Tatsächliche Brachen, die keinerlei Überschneidung mit den vorgeschlagenen Polygonen haben, zählen hingegen als False Negatives. Um die festgelegte Mindestgröße von fünf Fenstern der vorgeschlagenen Polygone zu berücksichtigen, werden vor der Wertung als False Negatives auch die annotierten Brachen bezüglich ihrer Fläche gefiltert. Annotierte Brachflächen mit einer Fläche von weniger als 50 % der Mindestgröße der klassifizierten Polygone werden bei der Zählung der False Negatives nicht berücksichtigt. Sie betreffen weniger Bildfenster als mindestens nötig sind, um nicht ausgeschlossen zu werden. Daher kann nicht erwartet werden, dass diese kleinen Brachen gefunden werden. Die vorgeschlagenen Polygone aus der Klassifikation, die keine Überlappung mit den annotierten Brachflächen haben, sind False Positives. Die letzte Größe für die Auswertung sind die True Negatives. Diese betreffen weder die aggregierten Polygone aus der Klassifikation noch die Polygone aus der Ground Truth, sondern die gesamte verbleibende Fläche. Daher kann hier nicht die Anzahl an Polygonen gewertet werden, sondern der Anteil der entsprechenden Fenster mit negativer Klassifikation, die auch nicht von einer Brache bedeckt sind, im Verhältnis zur gesamten Anzahl der klassifizierten Fenster.

Die letzte Möglichkeit für die Auswertung der Klassifikationsergebnisse ist die Aggregation je Flurstück. Dabei werden zunächst alle Flurstücke ausgewählt, die zu mindestens 80 % innerhalb der vorausgewählten Fenster liegen. Kleine Flurstücke unter 100 m² werden aus dem Datensatz entfernt. Jedes der verbleibenden Flurstücke, von dem mindestens die Hälfte von positiv klassifizierten Fenstern bedeckt ist, wird dann als Baulücke oder NVP eingestuft.

Die Ground-Truth-Daten werden ebenfalls auf dieselben Flurstücke übertragen, indem die Überlappung zwischen den Flurstücken und den annotierten Polygonen berechnet wird. Wenn sich mindestens die Hälfte des Flurstücks mit einem annotierten IEP überschneidet, wird es der positiven Klasse zugeordnet (siehe Abbildung 16). Dies kann allerdings zu Ungenauigkeiten führen: Wenn nur eine Teilfläche eines großen Flurstücks ungenutzt ist, kann dieser Teil nicht eindeutig abgegrenzt werden. Je nach Größenanteil der ungenutzten Fläche wird das gesamte Flurstück entweder als Potenzialfläche betrachtet oder, wenn der aktiv genutzte Anteil überwiegt, der Negativklasse zugeordnet, wobei die annotierte Teilfläche vernachlässigt wird. Aus diesem Grund wurde die flurstücksweise Auswertung nur für den Vergleich mit GIS-basierten Ergebnissen durchgeführt,

Abbildung 15
Beispiel für die Übertragung der annotierten IEPs auf Flurstücksebene



Quelle: Vision Impulse

während die übrigen Ergebnisse für die einzelnen Bildausschnitte oder flurstücksunabhängigen aggregierten Polygone dargestellt werden.

Jedes Flurstück hat nach diesen Schritten genau eine zugeordnete Klasse aus der Klassifikation und eine aus der GT. Diese können also, ebenso wie bei der Auswertung auf Fensterebene, direkt miteinander verglichen werden, um FP, FN, TP und TN zu zählen.

6.2.3 Auswahl der Klassifikationsmodelle

Im Zuge der Methodenentwicklung wurden für die Klassifikationsmodelle verschiedene Netzwerkarchitekturen und Parameter getestet. Anhand der Testdaten werden die Ergebnisse der verschiedenen Konfigurationen miteinander verglichen, um das Modell auszuwählen, das für ungesehene Daten die besten Ergebnisse liefert. Im Folgenden werden die Ergebnisse für zwei der untersuchten Konfigurationen vorgestellt, einerseits für die verwendete Modellarchitektur und andererseits für die berücksichtigten Bildbänder, die in das Modell als Eingabe fließen. Weitere Hyperparameter bezüglich des Trainings der Modelle wurden ebenfalls getestet, beispielsweise die Lernrate, Anzahl der Epochen und Gewichtung der Klassen. Die Modellauswahl fand in Bezug auf die Klassifikation von Brachen statt. Zum Training eines Modells für Baulücken und NVPs wurde ein neues Modell mit den gleichen Einstellungen genutzt, wobei nur die verwendeten Datensätze ausgetauscht wurden. Im Zuge weiterer Entwicklungen wäre entsprechend ein weiteres Parametertuning für diese Aufgabenstellung vielversprechend, um die gewählten Einstellungen besser daran anzupassen.

Für die Bildauswertung stehen verschiedene vortrainierte Netzwerkarchitekturen zur Verfügung, die vom Nutzer für eigene spezifische Aufgabenstellungen nachtrainiert werden können. Die Ergebnisse verschiedener dieser Netzwerke werden in Tabelle 9 dargestellt. Abgesehen von der Modellarchitektur entsprechen die übrigen Parameter den in Tabelle 3 spezifizierten Einstellungen. Für die beiden geprüften ResNet-Architekturen

Tabelle 9
Vergleich der Evaluationsmetriken von Modellen zur Brachenklassifikation mit verschiedenen Netzwerkarchitekturen

Modell	F1-Macro	Recall C1	Precision C1	FN	TP	FP
ResNet50	0,9189	0,87	0,90	70	462	53
RestNet101	0,9170	0,87	0,89	71	461	55
Swin_v2_t	0,8757	0,75	0,79	131	401	104
DenseNet121	0,8931	0,78	0,83	117	415	84

Quelle: Vision Impulse

Tabelle 10
Vergleich zwischen trainierten Modellen mit und ohne Berücksichtigung des Infrarot-Bandes

Bilddaten	F1-Macro	Recall C1	Precision C1	FN	TP	FP
RGBI	0,9098	0,86	0,88	76	456	61
RGB	0,9189	0,87	0,90	70	462	53

Quelle: Vision Impulse

sind die Ergebnisse einander sehr ähnlich. Im Vergleich zu den beiden anderen Modellen wird damit eine höhere Anzahl an korrekt identifizierten Bildausschnitten der Positivklasse erreicht, wobei gleichzeitig auch die Anzahl der False Positives geringer ist. Somit weist das ResNet50 die beste Genauigkeit auf.

Für das ausgewählte Modell wurde die Auswahl der Bilddaten bewertet. In den DOPs stehen vier Bänder zur Verfügung: Rot, Grün, Blau und Nahinfrarot. Die Berücksichtigung des Infrarotbandes führte zu leicht geringeren Genauigkeiten (siehe Tabelle 10). Die Untersuchung der verschiedenen Bänder zeigt eine höhere Variabilität dieses Bandes zwischen den verschiedenen Regionen, was möglicherweise zu Schwierigkeiten bei der Anwendung desselben Modells und derselben Normalisierung für alle Regionen führt.

6.2.4 Einfluss der Auswahl geeigneter Flächen

Für die Vorfilterung anhand der Landnutzungsklassen wurden je nach Verfügbarkeit zwei unterschiedliche Datenquellen genutzt. Sofern verfügbar, wurde die im ALKIS erfasste tatsächliche Nutzung berücksichtigt. In sonstigen Gebieten diente das ATKIS Basis-DLM als Grundlage der Filterung.

Die Filterung geeigneter Landnutzungsklassen ermöglicht eine starke Reduktion der Flächen, für die das Klassifikationsmodell angewendet werden muss (siehe Tabelle 11 und 12). Dieser Schritt reduziert die Ungleichverteilung der Klassen und erleichtert dem Klassifikator die Spezialisierung auf die relevanten Merkmale. Viele der ausgeschlossenen Klassen enthalten Flächen, die bei Betrachtung im Luftbild den Potenzialflächen ähneln. Dies betrifft insbesondere landwirtschaftliche Flächen und Grünanlagen, die leicht mit der Vegetation von Baulücken oder Brachflächen verwechselt werden können, sofern nur ein einzelnes Bildfenster betrachtet wird. Falls diese Flächen nicht vorweg gefiltert, sondern während des Trainings des Klassifikationsmodells berück-

Tabelle 11
Einfluss der Vorfilterung für Brachflächen

Region	Gesamtfläche [ha]	Fläche nach der Filterung [ha]	Entfernter Anteil [%]
Soest	8.475,06	1.325,60	84,36
Gelsenkirchen	10.617,01	3.968,48	62,62
Haldensleben	15.525,18	861,81	94,45
Spremberg	200.262,13	1.026,24	94,94
Ilmtal-Weinstraße	8.304,91	244,86	97,05
Ostfildern	2.383,56	599,20	74,86
Gesamt	65.567,85	802,19	87,76

Quelle: Vision Impulse

Tabelle 12
Einfluss der Vorfilterung für Baulücken und NVPs

Region	Gesamtfläche [ha]	Fläche nach der Filterung [ha]	Entfernter Anteil [%]
Soest	8.475,06	926,76	89,06
Gelsenkirchen	10.617,01	3.411,24	67,87
Haldensleben	15.525,18	388,28	97,50
Spremberg	200.262,13	1.026,48	94,93
Ilmtal-Weinstraße	8.304,91	242,04	97,09
Ostfildern	2.383,56	617,00	74,11
Gesamt	65.567,85	6.611,80	89,92

Quelle: Vision Impulse

Tabelle 13
Vergleich der Filterung mittels ATKIS Basis-DLM und ALKIS-TN für Brachflächen

Region	Fläche nach Filte- rung [ha] ALKIS-TN	Fläche nach Filte- rung [ha] ATKIS Basis-DLM	Differenz Absolut	In ATKIS Basis-DLM hinzugefügt	In ATKIS Basis-DLM entfernt
Soest	1.333,68	2.024,49	690,82	764,28	73,46
Gelsenkirchen	4.593,41	6.111,98	1.518,57	1.941,60	423,03
Spremberg	2.084,59	2.244,91	160,33	1.023,30	862,97
Ilmtal-Weinstraße	1.209,11	1.404,90	195,79	592,64	396,84
Ostfildern	240,65	447,06	206,41	228,92	22,51
Gesamt	13.090,56	17.148,89	4.058,32	6.196,49	2.138,17

Quelle: Vision Impulse

Tabelle 14:
Vergleich der Filterung mittels ATKIS Basis-DLM und ALKIS-TN für Baulücken / NVPs

Region	Fläche nach Filte- rung [ha] ALKIS-TN	Fläche nach Filte- rung [ha] ATKIS Basis-DLM	Differenz Absolut	In ATKIS Basis-DLM hinzugefügt	In ATKIS Basis-DLM entfernt
Soest	1.123,84	1.466,48	342,64	354,23	11,59
Gelsenkirchen	3.839,62	4.690,98	851,35	1.039,51	188,15
Spremberg	1.184,58	1.416,51	231,93	441,42	209,49
Ilmtal-Weinstraße	515,36	774,22	258,85	305,70	46,84
Ostfildern	251,68	369,86	118,18	151,19	33,01
Gesamt	9.706,28	12.323,80	2.617,52	3.164,91	547,39

Quelle: Vision Impulse

sichtigt werden, so würden Bilder von Flächen mit ähnlichen visuellen Eigenschaften sowohl in die positive als auch negative Klasse aufgenommen werden, was als Folge das Modelltraining erschwert und zu einem insgesamt schlechteren Modell führt.

Die Vorfilterung entfernt allerdings auch die IEPs, die tatsächlich innerhalb dieser Klassen liegen. Wie zuvor beschrieben wurde bei der Auswahl der Klassen zunächst berücksichtigt, dass möglichst wenige Potenziale darin liegen. In einem weiteren Schritt wurden aber auch zwei Klassen ausgeschlossen, deren Flächen anhand der Bilddaten nicht eindeutig der positiven oder negativen Klasse zugeordnet werden können. Dies sind zum einen Landwirtschaftsflächen und zum anderen Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen mit der Funktion „Grünanlage“. Diese Klassen betreffen aber je nach Gebiet einen großen Anteil der annotierten Potenziale. Insgesamt werden durch die Filterung 58 % der Potenziale ausgeschlossen. In den beiden Kommunen mit dem größten Anteil an diesem Verlust sind 80 % der fehlenden Potenziale auf diese beiden Klassen zurückzuführen. Da hier aber in der Klassifikation der Bildausschnitte keine klare Unterscheidung zwischen Flächen mit und ohne Potenzial möglich wäre, ist es dennoch nicht ratsam, diese Klassen vollständig in die Klassifikation aufzunehmen.

Bei den Fallstudiengebieten sind in fünf von sechs Fällen ALKIS-Daten verfügbar. Für diese Gebiete wurde der Einsatz der ALKIS-TN mit den Ergebnissen der Filterung des Basis-DLM verglichen. Dazu werden in den Tabellen 13 und 14 jeweils die nach der Filterung verbleibenden Flächen sowie deren Gesamtdifferenz dargestellt. Die Gesamtdifferenz wird außerdem aufgeteilt in die Anteile, die in der Filterung mittels ATKIS-Basis DLM hinzukommen, und diejenigen, die darin im Vergleich zur Kartierung in ALKIS zusätzlich entfernt werden.

Abbildung 16
Unterschiede zwischen ALKIS-TN und ATKIS Basis-DLM und deren Einfluss auf das Klassifikationsergebnis



Quelle: ALKIS-TN © Geobasis-DE / LVermGeo ST (2024), ATKIS Basis-DLM © Geobasis-DE / BKG (2024)

Bei der Filterung mit ATKIS müssen deutlich mehr Flächen betrachtet werden als mit ALKIS. Die hinzukommenden Flächen entstehen hauptsächlich durch zwei Gründe.

Zum einen fehlt im ATKIS Basis-DLM zu einigen Flächen die Angabe der Funktion. Da bei der Filterung in einem Teil der Klassen Flächen auf Grundlage der Funktion ausgeschlossen werden (siehe Tabelle 4 und 5, bei Angabe zur Funktion „Alle außer ...“), bleiben die entsprechenden Flächen ohne Angabe der Funktion in der Vorauswahl enthalten. Diese Funktionen wurden bewusst als ungeeignet ausgeschlossen, damit die entsprechenden Flächen nicht in die Klassifikation einfließen. Hier liefert also die Landnutzungskartierung aus ALKIS eine genauere Vorfilterung.

Der zweite Grund für Flächen, die bei der Filterung auf Grundlage der ALKIS-Daten ausgeschlossen werden, mittels des ATKIS Basis-DLM hingegen nicht, betrifft Sonderfälle, in denen ALKIS eine feinere Unterteilung der Flächen vornimmt. Beispielsweise werden in einigen Kommunen Wohnblöcke in bebaute und unbebaute Anteile aufgeteilt, wobei die unbebauten Anteile nicht als Wohnbaufläche, sondern als Grünanlage oder Landwirtschaftsfläche kartiert werden. In ATKIS werden diese Flächen durch die größere MKE nicht voneinander abgegrenzt, sondern der gesamte Block wird als Wohnbaufläche in die Vorauswahl aufgenommen. Da die unbebauten Flächen darin tatsächlich als Baulücke oder NVP geeignet sein können, wäre es sinnvoll, diese Flächen tatsächlich bei der Klassifikation zu berücksichtigen. Abbildung 16 zeigt einen Fall, in dem diese Problematik bei Verwendung der ALKIS-Daten auftritt.

Die Kartierung von Baulücken als Grünanlage ist aber nicht standardmäßig in allen Kommunen gleich, oft werden solche Freiflächen dennoch als Wohnbauflächen kartiert.

Neben den in ATKIS hinzukommenden Flächen werden andererseits einige kleinere Flächen durch das ATKIS Basis-DLM ausgeschlossen, die in der Filterung mittels ALKIS-TN enthalten wären. Auch hier ist die teils fehlende Angabe der Funktion ein Grund. Dabei sind die Klassen betroffen, in denen nur einzelne Funktionen zugelassen sind, nicht aber die Flächen ohne Angabe der Funktion (siehe Tabelle 4 und 5, bei Angabe zur Funktion „Nur ...“). Ebenso wie im gegenteiligen Fall ist auch hier die Filterung auf Grundlage der zusätzlichen Angabe in ALKIS genauer.

Es gibt aber auch bei den Flächen, die mittels ATKIS Basis-DLM zusätzlich ausgeschlossen werden, Sonderfälle, in denen diese Kartierung eine genauere Filterung ermöglicht. Dies betrifft Flächen, in denen sich die Angaben der Funktion in den beiden Datensätzen unterscheidet. So gibt es beispielsweise Fälle, in denen Schulen, die im Basis-DLM als „Flächen besonderer funktionaler Prägung“ mit der Funktion „Bildung und Wissenschaft“ kartiert sind, in ALKIS der Funktion „Öffentliche Zwecke“ zugeordnet sind. Während erstere Funktion in der Filterung aus der Auswahl entfernt wird, bleiben die Flächen mit der letztgenannten Funktion in der Vorauswahl enthal-

ten. Ebenso trifft dies auf Flächen mit der Funktion „Gesundheit/Kur“ laut ATKIS Basis-DLM zu, die zum Teil in ALKIS ebenfalls als „Öffentliche Zwecke“ aufgenommen wurden. In solchen Fällen enthält das ATKIS Basis-DLM spezifischere Informationen zu den Flächen und ermöglicht es, diese auszuschließen.

Insgesamt lässt sich schlussfolgern, dass beide Landnutzungskartierungen in unterschiedlichen Fällen besser geeignet sind. Die Vorauswahl mittels ALKIS-TN ist häufiger genauer als die mittels ATKIS Basis-DLM. Die höhere Genauigkeit von ATKIS bei bestimmten Flächen stellt eine Ausnahme dar. Sie resultiert meist aus Inkonsistenzen bei der kommunalen Differenzierung der ALKIS-Nutzungsmerkmale. Daher wurden in dieser Studie die ALKIS-TN verwendet, wenn diese verfügbar waren. Für die übrigen Kommunen diente das ATKIS Basis-DLM als Grundlage der Filterung. Um die Vorteile beider Datensätze zu berücksichtigen, wäre eine weitere Untersuchung nötig, inwiefern diese kombiniert werden können.

Vorstellbar wäre zum Beispiel eine Berücksichtigung aller Wohnbauflächen aus ATKIS, um die in Abbildung 16 dargestellte Problematik zu beheben, während die übrigen Flächen über eine Filterung der ALKIS-TN bestimmt werden.

6.2.5 Generalisierung der Klassifikationsmodelle

Für die vorausgewählten Flächen aus den Fallstudienregionen wurden die entwickelten Klassifikationsmodelle angewendet und die Ergebnisse hinsichtlich der Generalisierbarkeit für neue Gebiete evaluiert. Da es sich nur bei einem kleinen Teil der gefilterten Fläche in diesen neuen Gebieten tatsächlich um annotierte IEPs handelt, gibt es deutlich mehr Bildausschnitte in der negativen Klasse als in der positiven. Diese starke Ungleichverteilung beeinflusst auch die Evaluationsmetriken, da bereits ein kleiner Anteil falsch klassifizierter Fenster aus der Negativklasse eine hohe absolute Anzahl im Vergleich zur Gesamtanzahl der Fenster der Positivklasse bedeutet.

Für die Evaluierung wurden die positiv klassifizierten Bildfenster aggregiert, wie in Kapitel 5.3 beschrieben. Die Bewertung der Klassifikationsergebnisse erfolgt nach dem in Kapitel 6.2.2 erklärten Vorgehen und bezieht sich auf die Potenzialflächen, die innerhalb der vorgefilterten Flächen liegen, sodass die durch die Filterung ausgeschlossenen Potenziale nicht als Fehler der Klassifikation bewertet werden.

Zunächst wird die Auswertung der Klassifikation von Brachflächen vorgestellt, anschließend die für Baulücken und NVPs.

Für die quantitative Evaluation der Brachenklassifikation wurde hier eine Mindestgröße von fünf Fenstern gewählt. Dies entspricht einer Fläche von mindestens 8.000 m² (5 x 40 m x 40 m). Kleinere Polygone sind häufiger False Positives und können durch die Filterung mit diesem Grenzwert entfernt werden, ohne viele korrekt als Brache klassifizierte Flächen auszuschließen. In der praktischen Anwendung könnte dieser Grenzwert durch den Nutzer ausgewählt werden, um abzuwägen zwischen (a) einer hohen Anzahl detektierter Brachflächen (hoher Recall) bei insgesamt vielen vorgeschlagenen Polygonen oder (b) einer hohen Präzision mit einer geringen Anzahl vorgeschlagener Polygone, die zwar in vielen Fällen korrekt sind, aber nicht alle tatsächlich vorhandenen Brachen enthalten, insbesondere die mit kleiner Fläche.

In den verschiedenen Fallstudiengebieten können zwischen 78 % und 96 % der Gesamtfläche aus der Vorauswahl durch die Klassifikation als Brachflächen ausgeschlossen werden. Über alle Gebiete gemeinsam ausgewertet sind dies 89 %. Wie Tabelle 15 zeigt, beinhaltet die verbleibende als Brache klassifizierte Fläche 86 % der in den Ground-Truth-Daten annotierten Brachflächen. Insbesondere in den Regionen mit einer geringen Anzahl vorhandener Brachen ist die Anzahl der in der Klassifikation fehlenden Brachen gering. Gründe für fehlende Brachflächen werden in Kapitel 6.3.1 diskutiert. Die hohe Anzahl identifizierter Brachflächen geht aber auch mit einer hohen Anzahl an Flächen einher, die als Brachen klassifiziert wurden, aber keiner annotierten Brache zugeordnet werden können. Dies betrifft besonders die Gebiete, die durch Industrie und Bergbau ge-

Tabelle 15
Evaluation der Klassifikation von Brachflächen für die Fallstudiengebiete

Fallstudiengebiet	False Negatives	True Positives	False Positives
Soest	2	5	10
Gelsenkirchen	5	30	57
Haldensleben	0	7	20
Spremberg	0	7	32
Ilmtal-Weinstraße	0	2	3
Ostfildern	1	0	5
Gesamt	8	51	127

Quelle: Vision Impulse

Tabelle 16
Evaluation der Klassifikation von Baulücken und NVPs für die Fallstudiengebiete

Fallstudiengebiet	False Negatives	True Positives	False Positives
Gesamt	81	355	8.023
Gesamt (0,5)	202	234	4.443
Gesamt (0,6)	237	199	3.492
Gesamt (0,7)	301	135	2.186

Quelle: Vision Impulse

prägt sind, wie Gelsenkirchen und Spremberg. Auch zu diesen Flächen erfolgt in Kapitel 6.3.1 eine detaillierte Analyse, die zeigt, dass verschiedene Gruppen der False Positives unterschieden werden können, von denen einige tatsächlich als Potenzialflächen in Betracht kommen.

Für die Evaluation der Klassifikation von Baulücken und NVPs wird im Gegensatz zu den Brachflächen keine Mindestgröße festgelegt, da häufig nur einzelne Wohnflurstücke betroffen sind, die dann nicht mehr gefunden werden könnten.

Für die Aggregation positiv klassifizierter Fenster wurde außerdem in einer internen Evaluation ein anderer Grenzwert für die Klassenzuordnung im Softmax-Layer des Neuronalen Netzwerks ausgewählt. Anstelle der üblichen Zuordnung zu der Klasse mit der höheren Wahrscheinlichkeit (über 0,5) wurde der Grenzwert für die Zuordnung zur Positiv-Klasse auf 0,3 reduziert, um einen höheren Recall zu ermöglichen.

In einer zukünftigen Anwendung der entwickelten Verfahren könnten auch hier beide Grenzwerte - Mindestgröße und Grenzwert der Klassenwahrscheinlichkeit - durch die Nutzer ausgewählt werden, abhängig von der individuellen Abwägung zwischen Präzision und Recall. Die Ergebnisse für die hier spezifizierten Grenzwerte zeigt Tabelle 16. Außerdem sind drei weitere Zeilen mit höheren Grenzwerten für die Mindestwahrscheinlichkeit für die Zuordnung zur Positivklasse enthalten. Daran wird der mögliche Anstieg der Präzision deutlich, aber auch der damit einhergehende Verlust von True Positives.

Die Klassifikation von Baulücken und NVPs führt zu einer Reduktion der Flächen aus der Vorauswahl um durchschnittlich 80 %. Je nach Kommune schwankt dieser Wert zwischen 75 % und 90 %. Die Flächen, die als Potenzial klassifiziert wurden, enthalten 81 % der annotierten Baulücken und NVPs. Dabei treten starke Unterschiede zwischen den verschiedenen Fallstudiengebieten auf. Ein Grund dafür sind die unterschiedlichen Erfassungskriterien der Kommunen bei der Erstellung ihrer Potenzialflächenkataster. Zwar wurden die Ground-Truth-Daten während der Überprüfung bereits weitgehend harmonisiert (siehe Kapitel 3.3), doch einige Unterschiede bestehen weiterhin. Beispielsweise wurde die Erfassung von teilweise bebauten Flurstücken unterschiedlich streng gehandhabt. In manchen Kommunen werden sie häufig als Potenzialflächen aufgenommen, wohingegen andere dies nur dann tun, wenn sie die Mobilisierbarkeit hoch einschätzen. Diese Gruppe der IEPs wurde in der qualitativen Auswertung (siehe Kapitel 6.3.2) als häufiger Grund für fehlende Potenziale identifiziert.

Dies bedeutet also, dass die Regionen, in denen viele teilweise bebaute Flurstücke in den Ground-Truth-Daten enthalten sind, tendenziell einen niedrigeren Recall haben.

Diese Flächen beeinflussen auch die Qualität der Trainingsdaten. Ausgehend von den Annotationen werden alle Bildfenster innerhalb des Polygons der Positivklasse zugeordnet. Abhängig von den Konventionen der jeweiligen Gemeinde beinhalten diese Polygone die bereits bebauten Anteile oder nicht. Ist dies der Fall, so werden Bildausschnitte mit aktiv genutzter Bestandsbebauung in die Positivklasse aufgenommen, obwohl sie nicht Teil der tatsächlichen Freifläche für eine potenzielle neue Bebauung sind.

Neben den in der Klassifikation fehlenden Potenzialflächen ist auch die Betrachtung der Flächen wichtig, die über die annotierten Potenziale hinaus klassifiziert wurden. Wie bereits bei der Auswertung der Brachen zeigt sich auch für Baulücken und NVPs eine hohe Anzahl an False Positives. Dies relativiert sich aber bei der näheren qualitativen Auswertung (siehe Kapitel 6.3.2), die zeigt, dass viele der vorgeschlagenen Flächen in den individuellen klassifizierten Bildausschnitten ohne zusätzliche Information über die Umgebung wie Potenzialflächen aussehen. Einige davon sind tatsächlich als Potenzialflächen geeignet, entweder als Brachflächen oder als sonstige Potenziale mit geringerer Priorität.

6.2.6 Detailanalyse: Auswertung nach Größe

Die Polygone sowohl aus den annotierten Potenzialflächen als auch aus den aggregierten Klassifikationsergebnissen können sehr unterschiedliche Größen haben, sodass sich zwei Fragen stellen:

- Werden große Potenzialflächen sicherer gefunden als kleinere?
- Sind die großen vorgeschlagenen Polygone häufiger korrekt als die kleinen?

Die erste Fragestellung betrifft die Größe der annotierten Potenziale. Diese wurden daher in Größengruppen zwischen 0 m² und 10.000 m² aufgeteilt. Die Größe der Potenziale entspricht dabei der Fläche, die innerhalb der Vorfilterung liegt, die Anteile außerhalb davon werden nicht berücksichtigt. In jeder dieser Gruppen, die jeweils eine Spanne von 500 m² umfassen, wird gezählt, wie viele der enthaltenen annotierten Potenziale in der Klassifikation gefunden wurden und wie viele fehlen.

Für die Brachflächen sind die Ergebnisse dieser Auswertung in Abbildung 17 (links) dargestellt.

Die Abbildung zeigt deutlich, dass die unteren Größenklassen deutlich mehr False Negatives an Brachflächen enthalten. Bei den kleineren Flächen werden von dem Klassifikationsmodell also tendenziell kleinere Brachen nicht identifiziert. Mit zunehmender Größe sinkt die Anzahl der fehlenden Brachflächen und ab einer Fläche von mindestens 3.500 m² werden alle Brachen in der Klassifikation detektiert.

Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der gleichen Auswertung für Baulücken und NVPs (siehe Abbildung 18 (rechts)). Dabei ist im Vergleich zu den Brachen die Anzahl der annotierten Potenzialflächen mit geringer Fläche deutlich höher, aber auch hier konzentrieren sich die fehlenden Potenziale auf die unteren Größenklassen, wohingegen die Potenzialflächen ab 1.500 m² vollständig identifiziert werden konnten. Der Anteil der fehlenden Potenziale an den insgesamt in der jeweiligen Größenklasse vorhandenen Potenziale nimmt mit zunehmender Fläche ab. Während in der unteren Klasse (0–500 m²) mehr als ein Viertel der Potenzialflächen nicht als solche klassifiziert wurden, sind es in der nächsten Gruppe (500–1.000 m²) nur noch etwa ein Fünftel. In der letzten Gruppe mit False Negatives (1.000–1.500 m²) sind schließlich nur noch ca. 5 % der annotierten Potenziale betroffen.

Die zweite Fragestellung zur Auswertung bezüglich der Größe bezieht sich auf die Fläche der aggregierten Polygone aus der Klassifikation. Daraus ergibt sich, ob mit zunehmender Größe der klassifizierten Polygone die Sicherheit zunimmt und keine Überprüfung mehr nötig ist. Hier werden also jeweils die Polygone gruppiert,

sodass diese gleiche Anzahl an Fenstern aus der Klassifikation je Bildausschnitt enthalten. Für die so entstehenden Gruppen wurden jeweils die Anzahl der korrekt als Potenzialfläche klassifizierten Polygone und die der überzählig als Potenzialfläche klassifizierten Polygone gegenübergestellt.

Bei den Brachflächen lässt sich für die Polygone mit nur wenigen zusammenhängenden Fenstern eine deutlich geringere Präzision feststellen. Zur Erhöhung der Präzision könnten also die kleinen Polygone ausgeschlossen werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass auch 30 % der korrekten klassifizierten Brachflächen dadurch entfernt würden. Bei zunehmender Fensteranzahl gleichen sich die Anzahl der korrekten und falschen Klassifikationen aneinander an. Es lässt sich aber kein Grenzwert der Größe bestimmen, ab dem keine falschen Vorschläge mehr enthalten sind.

Ebenso nimmt bei den Baulücken und NVPs mit zunehmender Anzahl der in den aggregierten Polygonen enthaltenen Fenster die Anzahl der False Positives Ergebnisse stärker ab als die der korrekt klassifizierten Potenziale. Im Vergleich zu der Klassifikation von Brachflächen ist aber auch noch bei großen zusammenhängenden positiv klassifizierten Flächen der Anteil der False Positives Vorschläge höher, die in einer manuellen Überprüfung betrachtet werden müssten. Bezüglich der Wertung als falscher Vorschlag sei darauf hingewiesen, dass es sich um Flächen handelt, die bisher nicht als IEPs annotiert sind, wobei sich aber in der qualitativen Auswertung gezeigt hat, dass sich einige dieser Flächen dennoch als Potenzialfläche eignen könnten (siehe Kapitel 6.3.1).

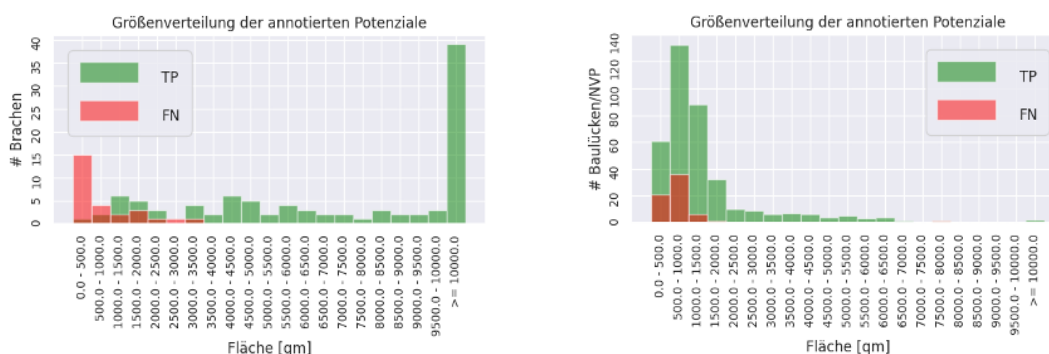
6.2.7 Detailanalyse: Auswertung nach Landnutzungsklasse

Neben der Abhängigkeit von der Größe der Potenzialflächen wurde eine weitere Detailanalyse durchgeführt, um das Ergebnis der Klassifikationsmodelle in Abhängigkeit auf die zugrunde liegende Landnutzungsklasse zu bewerten.

Dabei zeigt sich für die Brachflächen, dass der Anteil der korrekt identifizierten Potenziale mit der Anzahl der Polygone innerhalb der Klasse abnimmt (siehe Tabelle 18). Bei den Industrie- und Gewerbeflächen, der Klasse mit den meisten enthaltenen Polygonen bezüglich der tatsächlich enthaltenen annotierten Brachflächen sowie bezüglich der vorgeschlagenen Polygone aus der Klassifikation, wurde der höchste Recall erzielt, gefolgt von Industrie- und Gewerbeflächen und schließlich Flächen besonderer funktionaler Prägung. Die letzten beiden Klassen beinhalten schließlich nur noch eine beziehungsweise keine Brachflächen und könnten daher für die betrachteten Fallstudiengebiete vernachlässigt werden. Bei der Bestimmung der Klassen für die Vorfilterung mithilfe der Daten aus den übrigen Gebieten wurden aber auch hier Brachflächen festgestellt, sodass sie nicht allgemein ausgeschlossen werden. Im Gegenzug zum niedriger werdenden Anteil der True Positives nimmt der Anteil der False Positives Vorschläge in den kleineren Landnutzungsklassen zu, insgesamt ist die Klassifi-

Abbildung 17

Auswertung nach Größe der annotierten Brachflächen (links) und Baulücken und NVPs (rechts)



Quelle: Vision Impulse

Tabelle 17
Auswertung nach Größe der aggregierten Polygone für Brachflächen

Anzahl aggregierter Fenster	True Positives	False Positives
1–2	22	909
3–5	22	174
6–10	16	69
11–20	12	42
>20	37	32

Quelle: Vision Impulse

Tabelle 18
Auswertung nach Größe der aggregierten Polygone für Baulücken und Nachverdichtungspotenziale

Anzahl aggregierter Fenster	True Positives	False Positives
1–2	128	5.350
3–5	92	1.420
6–10	52	608
11–20	79	303
>20	39	170

Quelle: Vision Impulse

kation also für die häufiger vorkommenden Landnutzungsklassen besser. Einerseits kann dies daran liegen, dass die Eigenschaften von Brachen in diesen Klassen eindeutiger von aktiv genutzten Flächen unterschieden werden können. Andererseits sind bei größerer Fläche der Klasse auch mehr Beispiele daraus ins Training eingegangen, sodass dem Modell mehr Informationen über die Eigenschaften der Positiv- und Negativklasse in dieser Landnutzung zur Verfügung stehen. Das Training separater Modelle je Landnutzungsklasse könnte dem entgegenwirken, doch für die seltener vorkommenden Klassen stehen dann nur sehr wenige Trainingsdaten zur Verfügung.

Für die Baulücken und NVPs ist die Güte der Klassifikation weniger abhängig von der Landnutzung. Die Flächen gemischter Nutzung haben eine höhere Anzahl korrekt identifizierter Brachflächen und gleichzeitig eine deutlich geringere Anzahl an überzähligen Vorschlägen als die Industrie- und Gewerbeflächen. Der Anteil der fehlenden Brachen in Bezug auf die insgesamt betrachteten Polygone ist zwar durch die geringere Gesamtanzahl höher als bei den anderen Klassen, doch ein Vergleich des Recalls zeigt, dass von den vorhandenen Potenzialen der Flächen gemischter Nutzung ein höherer Anteil gefunden wurde als bei den Industrie- und Gewerbeflächen (Recall 80,56 % für Klasse 41006 und 78,26 % für Klasse 41002). Die Klassifikation von Baulücken und NVPs in den Industrie- und Gewerbeflächen hat insgesamt am schlechtesten funktioniert. Von den vorhandenen Potenzialflächen wurde der geringste Anteil gefunden, während gleichzeitig eine sehr hohe Anzahl an False Positives vorliegt.

6.2.8 Einfluss der Bildauflösung

In der vorliegenden Methodenstudie wurden DOPs mit einer Auflösung von 20 cm als Eingabedaten für die Klassifikation verwendet. Während diese Daten bundesweit über das BKG verfügbar gemacht werden können, sind die Daten je nach Bundesland nicht öffentlich frei abrufbar. Gleichzeitig besitzen sie eine eingeschränkte Aktualität. Änderungen nach Aufnahme des Luftbilds können nicht erfasst werden, sodass beispielsweise Flächen, die im DOP noch ungenutzt sind, als Potenzialfläche klassifiziert werden, auch wenn aktuell bereits eine Nutzung stattfindet. Alternativ zu den bundesweit gesammelten DOPs sind je nach Bundesland teils aktuellere Aufnahmen verfügbar, die allerdings nicht immer die gleiche Auflösung aufweisen. Auch andere alternative

Tabelle 19
Evaluation der Klassifikation von Brachflächen abhängig von der Landnutzung

Landnutzungsklasse	False Negatives [Anzahl / Prozent]	True Positives [Anzahl / Prozent]	False Positives [Anzahl / Prozent]
Industrie- und Gewerbefläche (41002)	7 / 3,63	69 / 35,75	117 / 60,62
Wohnbaufläche (41001)	1 / 5,88	5 / 29,41	11 / 64,71
Fläche besonderer funktionaler Prägung (41007)	1 / 4,76	2 / 9,52	18 / 85,71
Sport-, Freizeit- und Erholungsfläche (41008)	1 / 100	0 / 0	0 / 0
Fläche gemischter Nutzung (41006)	0 / -	0 / -	0 / -
Gesamt	10 / 3,85	76 / 29,23	174 / 66,92

Quelle: Vision Impulse

Tabelle 20
Evaluation der Klassifikation von Baulücken und NVPs abhängig von der Landnutzung

Landnutzungsklasse	False Negatives [Anzahl / Prozent]	True Positives [Anzahl / Prozent]	False Positives [Anzahl / Prozent]
Wohnbaufläche (41001)	42 / 0,95	199 / 4,49	4.188 / 94,56
Industrie- und Gewerbefläche (41002)	5 / 0,35	18 / 1,24	1.426 / 98,41
Fläche gemischter Nutzung (41006)	7 / 1,68	29 / 6,97	380 / 91,35
Fläche besonderer funktionaler Prägung (41007)	0 / 0,0	4 / 1,32	300 / 98,68
Gesamt	54 / 0,82	250 / 3,79	6.294 / 95,39

Quelle: Vision Impulse

Bilddaten mit unterschiedlichen Auflösungen könnten in Zukunft berücksichtigt werden. Daher wurde der Einfluss der Bildauflösung untersucht.

Hierzu wurde das Training der Klassifikationsnetzwerke mit gleichen Einstellungen wiederholt. Die einzige Änderung betrifft die Eingabebilder: Ausgehend von den ursprünglich verwendeten DOPs wurde ein Downsampling durchgeführt, um die Auflösung der Eingabebilder zu reduzieren.

Die Auswertung der für die unterschiedlichen Auflösungen trainierten Modelle in Bezug auf die Validierungs- und Testdatensätze zeigt für die Brachflächen, dass die Genauigkeit sich trotz abnehmender Auflösung nicht verschlechtert (siehe Tabelle 21).

Für Baulücken und NVPs (siehe Tabelle 22) ist eine leichte Abnahme der Genauigkeit bei abnehmender Bildauflösung zu erkennen. Hier haben also die kleinräumigeren Bildstrukturen einen größeren Einfluss als bei der Identifikation von Brachflächen. Dennoch ist auch hier der Einfluss gering und würde bei Verwendung von Bilddaten mit geringer Auflösung, aber höherer Aktualität vermutlich durch die positiven Effekte zeitlich aktuellerer Bilder ausgeglichen werden.

6.2.9 Vergleich mit verwandten Arbeiten

Der Vergleich der Ergebnisse der entwickelten Methode mit bereits existierenden Lösungen ist wichtig für eine Einschätzung des möglichen Effizienzgewinns bei der Identifizierung von Innenentwicklungspotenzialen. Aufgrund der methodischen Unterschiede ist ein direkter Vergleich nur bedingt aussagekräftig, erlaubt aber einen allgemeinen Eindruck über die Qualität der Methode. Unterschiede betreffen beispielsweise die Voraus-

Tabelle 21
Evaluation der Klassifikation von Brachen bei unterschiedlicher Bildauflösung

Auflösung	Datensatz	Accuracy	Recall C0	Recall C1	Precision C0	Precision C1	F1-Score (Macro)
DOP20	Val	0,9054	0,9520	0,8226	0,9051	0,9061	0,8951
	Test	0,9268	0,9477	0,8875	0,9408	0,8998	0,9189
DOP40	Val	0,9114	0,960	0,8143	0,9025	0,9308	0,9009
	Test	0,9258	0,9525	0,8754	0,9352	0,9071	0,9174
DOP100	Val	0,9144	0,9582	0,8363	0,9124	0,9184	0,9051
	Test	0,9258	0,9485	0,8839	0,9386	0,9008	0,9177
DOP200	Val	0,9124	0,9528	0,8404	0,9139	0,9092	0,9032
	Test	0,9207	0,9404	0,9042	0,9488	0,8894	0,9207

Quelle: Vision Impulse

Tabelle 22
Evaluation der Klassifikation von Baulücken und NVPs bei unterschiedlicher Bildauflösung

Auflösung	Datensatz	Accuracy	Recall C0	Recall C1	Precision C0	Precision C1	F1-Score (Macro)
DOP20	Val	0,8350	0,9089	0,6867	0,8534	0,7897	0,8075
	Test	0,8075	0,9013	0,6192	0,8261	0,7578	0,7718
DOP40	Val	0,8290	0,8980	0,6905	0,8535	0,7713	0,8019
	Test	0,8168	0,8994	0,6510	0,8379	0,7634	0,7852
DOP100	Val	0,8211	0,8975	0,6676	0,8443	0,7644	0,7914
	Test	0,8062	0,9001	0,6180	0,8254	0,7550	0,7704
DOP200	Val	0,8081	0,9122	0,5990	0,8204	0,7727	0,7694
	Test	0,8003	0,9159	0,5685	0,8098	0,7711	0,7470

Quelle: Vision Impulse

wahl der Klassen oder den Flächenbezug, also ob eine Klassifikation von Bildausschnitten oder Flurstücken durchgeführt wird.

Die Ergebnisse des Brachflächenklassifikators werden mit einer aktuellen Studie von Dürrbeck und Lippl-Seifert (2022) verglichen, in der sie für zwei Landnutzungs- und Landbedeckungsklassen aus dem Digitalen Landbedeckungsmodell für Deutschland (LBM-DE2018) Brachflächen auf regelmäßigen Bildausschnitten von 200 m x 200 m klassifizierten. Tabelle 23 zeigt den Vergleich der von ihnen erreichten Genauigkeiten für den Validierungs- und Testdatensatz und den in dieser Studie entwickelten Ansatz. Während in der vorherigen Studie die beiden Landnutzungs- und Landbedeckungsklassen separat klassifiziert und ausgewertet wurden, betrifft die Auswertung des in dieser Studie entwickelten Ansatzes alle Flächen innerhalb der vorausgewählten Klassen.

Die Genauigkeit (Accuracy) für den Validierungsdatensatz ist bei beiden Ansätzen ähnlich, wohingegen die Ergebnisse für den Testdatensatz bei Dürrbeck und Lippl-Seifert (2022) etwas schlechter sind. Die Unterschiede der Auswertung werden aber auch dadurch beeinflusst, dass in den Studien verschiedene Datensätze verwendet wurden, da Ground-Truth-Daten in unterschiedlichen Regionen vorlagen.

Zu beachten ist außerdem, dass die Genauigkeit stark vom Ungleichgewicht im Datensatz abhängt. Wenn eine Klasse viel häufiger vorkommt als die andere, würde selbst ein Modell, das nur diese Klasse vorhersagt, eine hohe Genauigkeit aufweisen. In dieser Studie wurde daher für die Trainings-, Validierungs- und Testdaten ein Resampling durchgeführt, sodass alle verfügbaren Beispiele aus der Positivklasse verwendet werden, aber nur ein Teil derjenigen aus der Negativklasse. Die Anzahl der Beispieldaten ohne Brachfläche (negativ) ist danach doppelt so hoch wie die der Positivklasse. Bei Dürrbeck/Lippl-Seifert (2022) wird für die Trainings-, Validierungs- und Testdatensätze keine Angabe zum Ungleichgewicht der Klassen gemacht, sodass unbekannt ist, ob

Tabelle 23

Vergleich der Evaluation (Accuracy) für Validierungs- und Testdaten zwischen dem entwickelten Klassifikationsmodells für Brachflächen mit dem Ansatz von Dürrbeck/Lippl-Seifert (2022)

Daten	Dürrbeck/Lippl-Seifert 2022 B110 / N120	Dürrbeck/Lippl-Seifert 2022 B121 / N120	Aktueller Ansatz (Auswertung je Bildausschnitt) Vorgefilterte Klassen
Validierungsdaten	~0,90	~0,88	0,87
Testdaten	~0,85	~0,8	0,94

Quelle: Vision Impulse

dort eine ähnliche Klassenverteilung vorliegt wie in der aktuellen Studie. Informationen über die Klassenverteilung sind nur für die Fallstudienregionen verfügbar, die etwa 13 % Brachflächen und 87 % der Negativklasse enthielten.

Bei den Fallstudienregionen in dieser Arbeit, die im Gegensatz zum Validierungs- und Testdatensatz keinem Resampling unterzogen wurden, sind nur 0,89 % der Fenster Teil der positiven Klasse. Dies bedeutet ein viel höheres Ungleichgewicht im Vergleich zu den Fallstudiengebieten in Dürrbeck und Lippl-Seifert (2022). Ursachen dafür sind die unterschiedliche Filterung der Klassen, die unterschiedliche Fenstergröße und möglicherweise andere Filterungsschritte in ihrem Ansatz. Die größere Fenstergröße führt aber zu einer weniger genauen Abgrenzung sowie zu einer größeren Mindestfläche der auffindbaren Brachen.

Aufgrund der Unterschiede sind die Bewertungsmetriken für die Fallstudienregionen nicht direkt miteinander vergleichbar und dienen nur als Indikatoren, ob eine ähnlich gute Klassifikation möglich ist. In der vorliegenden Studie sind die Klassifikationen je Bildausschnitt nicht das Endergebnis. Stattdessen wird hier, wie in Abschnitt 6.2.3 beschrieben, eine Aggregation zu Polygonen durchgeführt. Da dabei keine Bewertungsmetriken für die Negativklasse bestimmt werden können, wird zum Vergleich der Negativklasse die Auswertung der einzelnen Fenster betrachtet, für die Positivklasse hingegen die Metriken nach der Aggregation.

Die Metriken mit Bezug auf die Negativklasse fallen bei beiden Verfahren ähnlich aus. Die Präzision liegt in dieser Klasse bei 96 % (vgl. Dürrbeck/Lippl-Seifert 2022) beziehungsweise 99 % mit dem aktuellen Ansatz. Der in der vorherigen Arbeit erzielte Recall und F1-score ist mit 80 % und 87 % im Vergleich zu 85 % und 92 % ebenfalls ähnlich.

Im Vergleich der Ergebnisse für die positive Klasse weist der neue Ansatz eine geringere Präzision auf. Dies ist auf das höhere Ungleichgewicht zurückzuführen: Die gleiche False Positive Rate mit einem höheren Ungleichgewicht bedeutet eine höhere absolute Anzahl von False Positives. Bei gleicher Anzahl an True Positives würde dies also zu einer geringeren Präzision führen. Der Recall ist jedoch bei dem neuen Ansatz höher, was zeigt, dass er für die Erkennung von Brachflächen gleichermaßen geeignet ist. Für einen aussagekräftigeren Vergleich wäre die Anwendung beider Methoden für einen gemeinsamen Datensatz nötig.

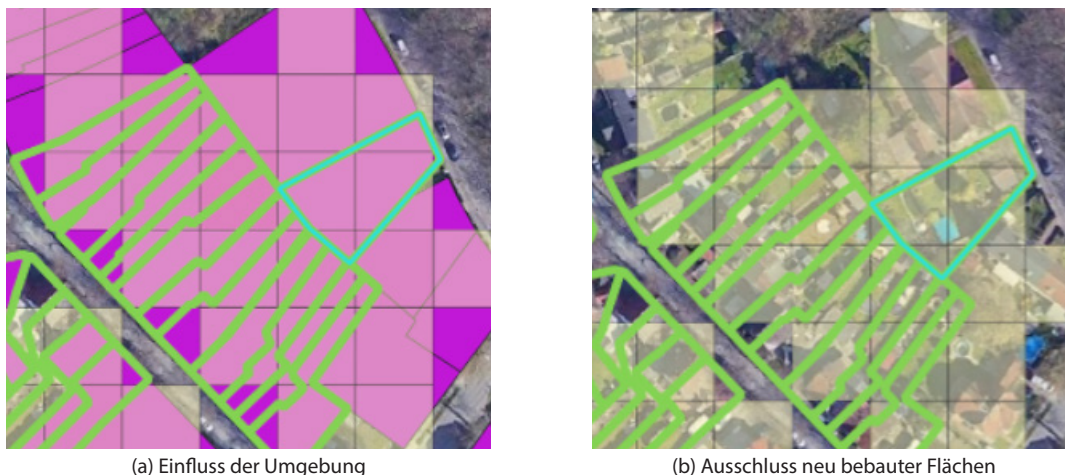
Die Identifizierung von Baulücken und Verdichtungspotenzialen wurde in der Vergangenheit durch GIS-basierte Ansätze automatisiert. Diese liefern in der Regel Ergebnisse pro Flurstück. Um die Ergebnisse dieser Ansätze mit den bildbasierten Klassifizierungen aus dieser Studie zu vergleichen, wurden sie zur Flurstücksebene aggregiert, wie in Kapitel 6.2.2 beschrieben.

Für den Vergleich wurde ein einfaches GIS-basiertes Verfahren zur Filterung der Flächen durchgeführt. Für jedes der Flurstücke aus dem vorherigen Schritt wurde mittels der HU-DE die Bebauungsdichte berechnet. Alle Flurstücke mit einem Bebauungsgrad unter 10 % wurden dann als Baulücke / Nachverdichtungspotenzial eingestuft.

Zwischen den beiden Ansätzen besteht ein großer Unterschied in Präzision und Recall. Während der Recall beim GIS-basierten Ansatz viel höher ist (83,6 %), entstehen dort auch deutlich mehr False Positives (16.154).

Abbildung 18

Beispiel für die Schwierigkeit der Zuordnung von zwischen Bildfenstern (Raster) und beliebigen Flurstück-Geometrien



Quelle: Vision Impulse; Hintergrund: DOP © Geobasis-DE / BKG (2024) (geändert), Flurstücksgrenzen © Geobasis-DE / BKG (2024)

Der bildbasierte Ansatz hingegen reduziert die Anzahl der positiv klassifizierten Flurstücke erheblich (4.652 False Positives), enthält aber nur 45,3 % der annotierten Flurstücke. Schwierigkeiten bei der Auswertung pro Flurstück sind die Zuordnung der Bildfenster zu den Flurstücken und Flurstücksabgrenzungen, die nicht tatsächlich zusammenhängenden Flächen entsprechen. Enthält ein Bildausschnitt mehrere Flurstücke, so wird sein Klassifizierungsergebnis von allen Flurstücken beeinflusst. Das bedeutet, dass das aggregierte Ergebnis für jedes Flurstück auch von seiner Umgebung beeinflusst wird und somit verfälscht werden kann. In Abbildung 18 (a) ist ein Beispiel dargestellt, in dem das als Baulücke annotierte Flurstück (grün umrandet) von mehreren Fenstern überlagert ist, die jedoch alle zu Teilen in benachbarten Flurstücken liegen. Somit beruht das negative Klassifizierungsergebnis der beiden Fenster vor allem auf diesen bebauten benachbarten Flurstücken, wohingegen die Eigenschaften der Baulücke nur einen geringen Anteil am Klassifizierungsergebnis haben. Gleichzeitig zeigt das Beispiel auch viele weitere Flurstücke, die GIS-basiert in den positiven Klassifizierungsergebnissen enthalten sind (grün umrandet) und korrekterweise durch die Bildklassifikation ausgeschlossen werden. Im Digitalen Orthofoto (Abbildung 18 (b)) für diese Flächen ist zu erkennen, dass die Flurstücke bebaut sind. Bei der Filterung des Bebauungsgrads liegt dieser entweder unter dem festgelegten Grenzwert oder es handelt sich um neue Bebauung, die in den HU-DE noch nicht enthalten ist.

Der quantitative Vergleich der beiden Verfahren zeigt also deutliche Unterschiede, wobei mittels der Bildklassifikation eine deutlich stärkere Einschränkung der Vorauswahl möglich ist als GIS-basiert. Der Recall ist zwar deutlich geringer, doch entsteht ein Teil der False Negatives auch durch die Aggregation zu Flurstücken, wohingegen bei der Auswertung bezüglich zusammenhängender Polygone (siehe Tabelle 18) ein ähnlicher Recall von 81 % erreicht wurde.

6.3 Qualitative Ergebnisse des Verfahrens

Die Klassifizierungsergebnisse aus Abschnitt 6.2 wurden qualitativ analysiert, um Gründe und Systematiken innerhalb der fehlenden und überzähligen Vorschläge zu ermitteln. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Analysen diskutiert und Beispiele für verschiedene Untergruppen aufgezeigt, die sich innerhalb der False Negatives und False-Positives identifizieren lassen, einerseits für Brachflächen und andererseits für Baulücken und NVPs.

6.3.1 Qualitative Evaluation bei der Erkennung von Brachflächen

Der Brachen-Klassifikator liefert eine große Anzahl von Polygonen außerhalb der Annotationen. Im Wesentlichen können diese Klassifikationsvorschläge in die folgenden fünf Gruppen mit unterschiedlichen Merkmalen kategorisiert werden:

- Landnutzung mit ähnlichen Merkmalen wie Brachflächen
- ungenutzte Teilflächen von Industriestandorten
- Grünflächen
- Baustellen
- leere Parkplätze

Während einige dieser Gruppen hauptsächlich aus Gebieten bestehen, die eindeutig keine IEPs sind, enthalten andere auch klassifizierte Polygone, die sich tatsächlich für die Innenentwicklung eignen. Die verschiedenen Gruppen werden im Folgenden, geordnet nach abnehmendem Vorkommen, beschrieben und diskutiert.

Die erste Gruppe sind Gebiete, die ähnliche Merkmale wie Brachflächen aufweisen. Dies ist häufig bei Flächen der Fall, die für die Entsorgung, die Lagerung, den Bergbau oder als Militärgelände genutzt werden. Die meisten Gebiete mit dieser Flächennutzung wurden bei der Vorfilterung entfernt, aber einige verbleiben aufgrund einer ungenauen Kartierung in der Vorauswahl, z. B. als allgemeine Industriegebiete. Die Vorhersagen in dieser Gruppe sind keine geeigneten Vorschläge für IEPs.

Die zweite Gruppe besteht aus ungenutzten Teilflächen von Industriestandorten. Dazu gehören Grünflächen um Gebäude oder Verkehrsflächen, aber auch untergenutzte Flurstücke und Flächen, die von den ansässigen Unternehmen als Reserve gehalten werden. Viele dieser Flächen könnten potenziell als IEP geeignet sein und können nur mit zusätzlichen Informationen über die örtlichen Gegebenheiten, zum Beispiel durch eine Begehung vor Ort oder ein Gespräch mit dem Eigentümer, eindeutig bestätigt oder abgelehnt werden.

Außerdem enthält die Klassifizierung Flächen, die im DOP als Grünanlagen erkennbar sind, wie Parks, landwirtschaftliche Flächen oder Gärten. Sie sind keine Brachflächen, könnten aber als NVPs in Betracht kommen. Diese Gruppe enthält auch Gebiete, bei denen sich die kartierte Landnutzungs-kategorie von der im DOP sichtbaren Landnutzung unterscheidet. So sind beispielsweise einige Gebiete als Industrie- oder Wohngebiet kartiert, werden aber offensichtlich landwirtschaftlich genutzt. Dies kann der Fall sein, wenn die Kartierung auf der Grundlage eines neuen FNP aktualisiert wurde, das noch nicht umgesetzt worden ist. Diese Flächen sind eigentlich für eine künftige Entwicklung vorgesehen und stellen somit IEPs dar (sofern sie nicht dem Außenbereich zuzuordnen sind), auch wenn sie keine Brachflächen sind.

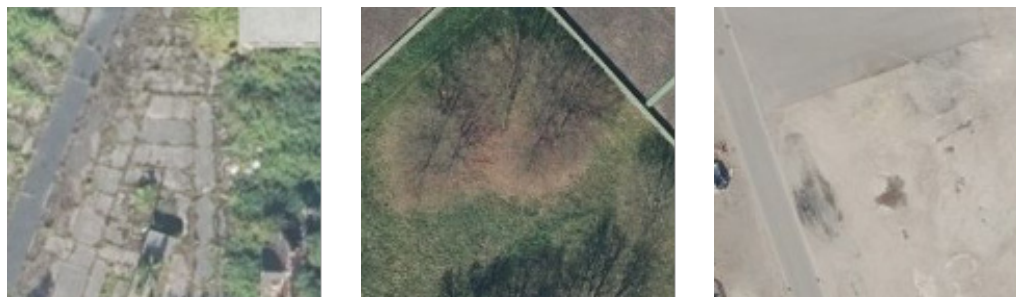
Ein weiteres häufiges Ergebnis sind Baustellen, die als Brachflächen eingestuft wurden, insbesondere in der Anfangsphase des Bauvorhabens, bevor neue Gebäude im DOP zu sehen sind. Die Merkmale, die beim Aushub der Baugrube zu sehen sind, ähneln bestimmten Arten von Brachflächen, die ausgedehnte Schotterflächen aufweisen. Diese Art von False Positives kann in Zukunft durch die Hinzunahme von multitemporalen Bilddaten ausgeschlossen werden, die die raschen Veränderungen im Zusammenhang mit einer Baustelle zeigen.

Als letzte Gruppe enthält die Vorauswahl einige Parkplätze, die nicht durch die Landnutzungs-klassen herausgefiltert werden konnten. Einige von ihnen werden als Brachflächen eingestuft, wenn sie im Eingabebild des Klassifikators ungenutzt, also komplett leer, sind. Auch hier reicht das Einzelbild nicht aus, um eine endgültige Entscheidung über diese Flächen zu treffen. Wenn ein Parkplatz ständig ungenutzt ist, sollte er als Brachflä-

Abbildung 19
Klassifikationsergebnisse, die von den Referenzdaten abweichen



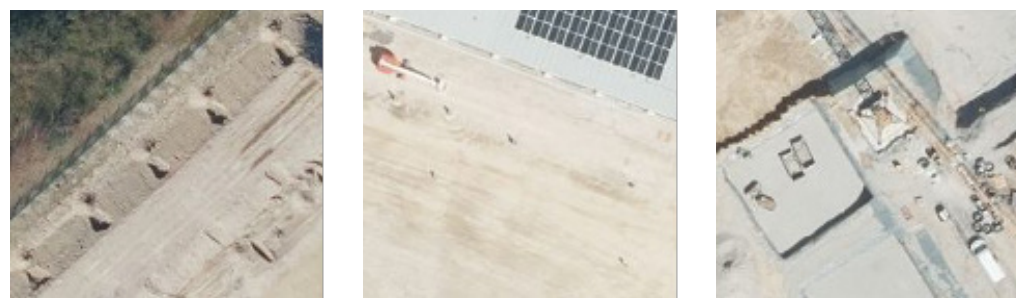
(a) Landnutzung mit ähnlichen Merkmalen wie Brachflächen



(b) Ungenutzte Teilflächen auf Industriestandorten



(c) Grünflächen, Freiflächen



(d) Baustellen



(e) Leere Parkplätze

Quelle: Bilddaten © Geobasis NRW (2023), Potenzialflächen © OSM (2023)

Abbildung 20
Unbebaute Flächen, die von dem Klassifikator als Baulücke ausgewiesen wurden



Quelle: Bilddaten © Geobasis-DE / BKG (2024)

che eingestuft werden. Wenn der Parkplatz jedoch an anderen Tagen genutzt wird und nur an dem Tag, an dem das Bild aufgenommen wurde, leer war (z. B., weil dieser zu einer Einrichtung gehört, die an diesem Tag geschlossen war, oder die Bildaufnahme am Wochenende erfolgte), sollte er von den vorgeschlagenen IEPs ausgeschlossen werden. Wie bei Baustellen kann die Verwendung von multitemporalen Bildern bei dieser Aufgabe in zukünftigen Entwicklungen hilfreich sein.

6.3.2 Qualitative Evaluation bei der Erkennung von Baulücken und NVPs

Die Klassifizierung von Baulücken und NVPs umfasst eine große Anzahl von Flächen, die nicht in den Annotationen der Ground Truth enthalten sind. Innerhalb dieser Flächen wurden drei Gruppen unterschieden.

Eine davon besteht aus großen unbebauten Flächen, von denen einige nicht als Baulücken oder NVPs, sondern als Brachflächen annotiert sind. Dies zeigt, dass sich die vom Klassifikator gelernten Merkmale mit denen der Brachflächenklassifizierung überschneiden. Andere unbebaute Flächen sind Grünflächen innerhalb der Ortslage. Diese sollen in der Regel für Erholungszwecke oder zur Verbesserung des Stadtklimas erhalten werden. In einigen Fällen könnten diese Freiflächen jedoch auch umgenutzt werden, abhängig von der Bedeutung der Grünfläche und dem Siedlungsdruck. Daher kann die Einbeziehung dieser Flächen nützliche Vorschläge für potenzielle Flächen für zukünftige Entwicklungen liefern.

Als zweite Gruppe ist eine große Anzahl kleinerer Polygone am Rande der Ortslage in den Klassifizierungsergebnisse enthalten. Diese zählen nicht als IEPs, da sie außerhalb des städtebaulichen Innenbereichs liegen, der direkt hinter der bestehenden Bebauung endet. Die Ortslage aus ATKIS, die in dieser Arbeit als Annäherung des Innenbereichs verwendet wurde, umfasst das gesamte Flurstück und reicht somit an den Rändern über die Innenbereiche hinaus (vgl. Harig et al. 2021). Ein zusätzlicher Filterungsschritt könnte hinzugefügt werden, um Vorhersagen zu entfernen, die direkt an der Grenze der Ortslage liegen.

Als letzte Gruppe lassen sich unbebaute Flächen im Zusammenhang mit Industrieanlagen zusammenfassen, die vom Klassifikator als Baulücken vorgeschlagen werden. Dazu gehören Grünflächen, die die Gebäude umgeben, aber auch unbebaute Teile des Grundstücks. Sie stellen keine klassischen Brachflächen dar, aber würden eine intensivere Nutzung ermöglichen und könnten als NVPs betrachtet werden. Wie bei den erkannten Brachflächen in dieser Gruppe ist eine endgültige Entscheidung anhand der verfügbaren Datensätze nicht möglich, sondern sollte auf der Grundlage zusätzlicher Informationen über die ansässigen Unternehmen getroffen werden.

Die Metrik Precision variiert bei der Klassifizierung von Baulücken und NVPs zwischen den unterschiedlichen Fallstudiengebieten. Bei den fehlenden Potenzialflächen in der Klassifizierung handelt es sich hauptsächlich um die kleinen Polygone aus der Ground Truth. Hierfür konnten drei Gründe identifiziert werden.

Abbildung 21
Von dem Klassifikator als Baulücke ausgewiesene Flächen auf Industrieflächen



Quelle: Bilddaten © Geobasis-DE / BKG (2024)

Aufgrund der Aufteilung in regelmäßige Bildausschnitte ist es möglich, dass jedes der Fenster, das für das annotierte Potenzial relevant ist, Teile der benachbarten Gebäude enthält und daher als bebauter Fenster klassifiziert werden.

Der zweite Grund sind NVPs mit bestehenden Gebäuden. Diese können im Allgemeinen identifiziert werden, allerdings nur, wenn die freien Flächen innerhalb dieses NVP groß genug sind und einen ausreichenden Teil eines Fensters abdecken. In einigen Regionen wurden auch kleine NVPs annotiert, die nicht genügend freie Flächen aufweisen, um zu einer positiven Klassifizierung für einen Bildausschnitt zu führen.

Die unterschiedlichen Konventionen für die Annotation dieser Flächen in den verschiedenen Fallstudiengebieten führen ebenfalls zu den Schwankungen der Metriken Precision und Recall. Während insbesondere in urbanen Gebieten NVPs und Baulücken sehr detailliert und umfassend annotiert werden, ist dies in ländlichen Regionen oftmals nicht gegeben.

6.4 Bewertung der Methode durch Fachexperten

Die entwickelte Methodik sowie die qualitativen und quantitativen Auswertungen wurden in einem Workshop Experten mit verschiedenen fachlichen Hintergründen vorgestellt und von diesen bewertet.

In der Videokonferenz von circa zweieinhalb Stunden wurden in mehreren Blöcken das Vorgehen und die Ergebnisse der Methodenstudie vorgestellt, jeweils gefolgt durch das Ausfüllen von Fragebögen durch die Experten. Im Anschluss daran wurde jeweils ein Teil der Fragen vertiefend diskutiert. In dem Workshop wurde eine externe Einschätzung der entwickelten Methode eingeholt, insbesondere hinsichtlich der Umsetzbarkeit in Kommunen sowie für eine bundesweite Abschätzung der vorhandenen IEPs. Somit stellen die Workshop-Ergebnisse auch eine wichtige Informationsquelle für die entwickelten Handlungsempfehlungen dar (siehe Kapitel 7).

Die entwickelte Methodik und deren Auswertung wurden dabei als hilfreich eingestuft, bezüglich des methodischen Vorgehens wurden keine Kritikpunkte genannt. Die durch ein automatisiertes Verfahren ermöglichte Vorfilterung würde den manuellen Erfassungsaufwand reduzieren, da die Flächen, die überprüft werden müssen, stark eingeschränkt werden. Zur weiteren Erleichterung der Ergebnisverwertung wurden verschiedene Datenquellen vorgeschlagen, die zusätzlich eingebunden werden können, beispielsweise über die Wirtschaftstätigkeit oder den Planungsstatus.

Insbesondere hervorgehoben wurde die Möglichkeit zur Detektion unbebauter zusammenhängender Teilflächen unabhängig von den Flurstücksgrenzen. Vor allem bei Industrie- und Gewerbeflächen ist dies relevant, da dort häufig Mindernutzungen vorliegen, ein Teil stillgelegt wurde oder Reserveflächen gehalten werden. Somit handelt es sich nicht bei dem gesamten Flurstück, sondern nur bei einer Teilfläche davon um ein Potenzial.

Aber auch auf Wohnbauflächen ist die flurstücksunabhängige Betrachtung von Interesse. Besonders in Städten mit wenigen verfügbaren Flächen muss auch auf freie Teilflächen bebauter Flurstücke zugegriffen werden. Unabhängig von den aktuellen Flurstücken wären dazu auch Bodenordnungsverfahren möglich, in denen freie Teilflächen mehrerer benachbarter Flurstücke zu einer geeigneten Fläche zusammengefasst werden. Derartige Potenziale werden in städtischen und verdichteten Bereichen derzeit bereits häufig in Potenzialflächenkataster aufgenommen, in ländlichen Gebieten hingegen selten.

7 Handlungsempfehlungen

Im Rahmen der Methodenstudie wurde eine bundesweite Umsetzbarkeit der automatisierten Identifikation von Innenentwicklungspotenzialen (IEPs) untersucht. Dabei wurden zwei Fragestellungen betrachtet. Auf der einen Seite wurde überprüft, inwieweit ein periodisches, flächendeckendes Monitoring in der Regionalstatistik und eine Unterstützung der zukünftigen Baulandumfragen ermöglicht wird. Auf der anderen Seite wurde außerdem ein Vorschlag zur Implementation der Methodik für die Potenzialermittlung innerhalb der Kommunen entwickelt.

Als Grundlage für die Handlungsempfehlungen dienen die qualitativen und quantitativen Auswertungen der Methodenstudie. Außerdem wurden in einem Expertenworkshop die Möglichkeiten und Anforderungen diskutiert, insbesondere für die Umsetzung in Kommunen, aber auch Schlussfolgerungen für die bundesweite Skalierung sind daraus möglich.

Der Expertenworkshop setzte sich aus drei verschiedenen Expertengruppen zusammen: Experten aus Stadtverwaltung/-planung; Anbieter bestehender Datenbanken; Experten aus der Forschung und Entwicklung bestehender Verfahren zur Ermittlung von IEPs. Neben der Vorstellung der Projektergebnisse wurden die wichtigsten Fragestellungen bezüglich der Umsetzung in bundesweitem und kommunalem Kontext in Form von Fragebögen und Diskussionen adressiert. Die Ergebnisse des Expertenworkshops fließen in die folgenden Handlungsempfehlungen ein.

7.1 Skalierung für ein bundesweites Flächenmonitoring

Die bundesweite Abschätzung der vorhandenen Potenzialflächen beruht derzeit auf Hochrechnungen aus der regelmäßig durchgeführten Baulandumfrage. Dabei werden die vorhandenen Flächenpotenziale der Kategorien Brachfläche, Baulücke und Nachverdichtungspotenzial mittels Fragebögen in einer repräsentativen Stichprobe von Kommunen aus ganz Deutschland abgefragt. Die entstehende Abschätzung hängt stark von der Genauigkeit der Angaben ab, die teils nicht auf einer systematischen Erhebung beruhen, sondern lediglich geschätzt sind. Auch in den Kommunen mit systematischer Erfassung der Potenzialflächen ist zum Teil eine Abschätzung der jeweiligen Anteile für die drei abgefragten Kategorien nötig, wenn diese nicht nach den gleichen Kriterien erfasst wurden.

Mit der entwickelten Methode besteht die Möglichkeit, eine bundesweite automatisierte Vorerfassung durchzuführen. Dazu müssen einerseits die technischen Aspekte der Umsetzung betrachtet werden und andererseits die Genauigkeit einer möglichen Abschätzung.

7.1.1 Möglichkeiten der Skalierung für ein bundesweites Flächenmonitoring bei der Erfassung von Innenentwicklungspotenzialen

Um eine bundesweite Anwendbarkeit der Methode zu ermöglichen, wurde bei der Methodenentwicklung darauf geachtet, dass die verwendeten Daten bundesweite zugänglich sind. Eine Ausnahme bilden die Kartierungen der Tatsächlichen Nutzung aus ALKIS (ALKIS-TN), die in der Zuständigkeit der Bundesländer liegen. Sofern verfügbar, werden sie als genauere Landnutzungskartierungen alternativ zum ATKIS Basis-DLM verwendet. In acht Bundesländern sind sie über das entsprechende Geoportal öffentlich verfügbar, in den sonstigen Bundesländern nur verwaltungsintern. Je nachdem, auf welcher Ebene eine Erfassung durchgeführt wird, könnte auch in diesen Bundesländern eine Verwendung der ALKIS-Daten möglich sein.

Durch den einheitlichen Standard für ALKIS und ATKIS der „Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland“ (AdV) können in der Methode beide Datensätze aus-

tauschbar genutzt werden, indem jeweils die gleichen Klassen gefiltert werden. Derzeit werden für die Kommunen mit öffentlichen ALKIS-TN diese Daten genutzt, in den übrigen hingegen das vom BKG bereitgestellte ATKIS Basis-DLM. Auswertungen der Filterung mittels ALKIS und ATKIS haben gezeigt, dass die Verwendung der ALKIS-TN eine stärkere Einschränkung der zu klassifizierenden Flächen ermöglicht und somit für die Vorfilterung besser geeignet ist als das ATKIS Basis-DLM.

Die Verwendung der ALKIS-Daten der Länder bedeutet zunächst einen Mehraufwand, da die verschiedenen Datensätze einmalig aneinander angeglichen werden müssen. Je nach Bundesland unterscheidet sich das Datenformat und der Flächenbezug der Bereitstellung. In einigen Bundesländern sind die Daten direkt in Geodatenformaten verfügbar. Dabei werden entweder alle Flächen in einer Datei gesammelt dargestellt, wobei die Landnutzung und Funktion je Fläche als Attribut zugeordnet sind. Alternativ werden in einigen Ländern für jede Landnutzungs-kategorie eigene Dateien erstellt, die nur die entsprechenden Flächen enthalten. Andere Länder stellen xml-Dateien bereit, in denen je nach Darstellung unterschiedliche Verarbeitungsschritte nötig sind, um sie mit den Geodatenformaten kompatibel zu machen.

Auch der Flächenbezug der bereitgestellten Daten unterscheidet sich in den Bundesländern. Zum Teil werden die Daten für das gesamte Bundesland gesammelt. In anderen Fällen erfolgt eine Bereitstellung nach einzelnen Landkreisen oder Gemeinden. Um das aktuelle Verfahren bundesweit anzuwenden, ist mit weiteren Implementierungsaufwänden zu rechnen, sodass die ALKIS-Geodaten in ein standardisiertes Datenformat überführt und genutzt werden können.

Im Rahmen der Methodenentwicklung wurden die Daten bereits vereinheitlicht, indem je Verwaltungsgemeinschaft eine Datei erzeugt wurde, in der alle Flächen gesammelt vorliegen und darin die Landnutzung und Funktion als Attribute enthalten sind. Zusätzlich wurden dabei auch die Benennungen einzelner Klassen angeglichen, die sich in manchen Fällen je nach Bundesland voneinander unterscheiden. Beispielsweise bezeichnen die Namen „VerkehrsbegleitflaecheStrasse“ und „BegleitflaecheStrassenverkehr“ die gleiche Klasse, ebenso sind die Klassen „Obstplantage“, „Obstbaumplantage“ und „ObstUndNussplantage“ äquivalente Bezeichnungen. Im Zuge einer bundesweiten Umsetzung ist es bei der Integration von Daten weiterer Länder empfehlenswert, alle Klassen erneut manuell zu sichten, um eine entsprechende Klassenzuordnung vorzunehmen.

Zusammen mit den Geodaten stellen die Digitalen Orthofotos die wichtigsten Datengrundlagen für die entwickelte Methode dar. Eine deutschlandweite Analyse von hochauflösenden Luftbildern kann je nach eingesetzter Methode der Bildverarbeitung sehr ressourcenintensiv sein. Durch die Vorfilterung mittels der Landnutzungs-klassen ist eine starke Einschränkung der Flächen, die klassifiziert werden, möglich. Bei den Fallstudiengebieten reduziert sich die zu klassifizierende Fläche durch die Vorfilterung im Durchschnitt um knapp 90 %. Somit wird auch die Menge der benötigten DOPS eingeschränkt.

Eine weitere Reduktion des Verarbeitungsaufwands für die Klassifikation ist durch eine Weiterentwicklung der Vorfilterung mittels Geobasisdaten möglich. Beispielsweise indem eine Einschränkung auf Flächen mit geringem Bebauungsanteil stattfindet. Auch die Ergebnisse bisheriger GIS-basierter Vorerfassungen könnten als Ausgangslage für die bildbasierte Klassifikation genutzt werden.

7.1.2 Genauigkeit der identifizierten Innenentwicklungspotenziale

Wird die entwickelte Methode für eine bundesweite Abschätzung angewandt, so ist zu beachten, dass in dem Ergebnis nur die IEPs beinhaltet sind, die innerhalb der vorgefilterten Landnutzungs-klassen liegen. Potenziale außerhalb dieser Klassen werden nicht erfasst. Bei der Auswahl der Klassen für die Filterung wurde die Anzahl der vorhandenen Potenziale zugrunde gelegt, sodass die ausgeschlossenen Klassen insgesamt nur sehr wenige Potenziale enthalten. Auch in den Umfragen im Expertenworkshop wurden diese nicht als relevante Klassen bewertet. Gleichzeitig sind darin je nach Erfassung in den Landnutzungs-kartierungen dennoch einige

Potenziale enthalten, insbesondere Baulücken und NVPs, die als Landwirtschaftsflächen oder als Grünanlagen kartiert wurden. Diese Flächen fehlen entsprechen in der Abschätzung.

Insgesamt liefert das Verfahren eine deutlich größere Anzahl an Potenzialflächen als tatsächlich vorhanden. Dieser Überschuss kann einerseits reduziert werden, indem, wie bereits am Ende von Kapitel 7.1.1 beschrieben, eine stärkere GIS-basierte Vorfilterung durchgeführt wird. Außerdem können zukünftig die entwickelten Klassifikationsmodelle stetig verbessert werden, indem sie auf weiteren Daten erneut nachtrainiert werden. Dies ist insbesondere empfehlenswert, sofern zusätzliche Trainingsdaten zur Verfügung stehen oder eine weitere Verfeinerung des Trainingsdatensatzes auf Ebene der Bildfenster durchgeführt wird.

Ein Vorschlag des BBSR (2016) zum Umgang mit den Ergebnissen einer automatisierten Vorerfassung ist die Bestimmung eines Faktors zwischen dem berechneten und dem erfassten Potenzial bei Kommunen mit bestehendem Potenzialflächenkataster. Dabei sollen je nach Stadt- und Gemeindetyp jeweils eigene Faktoren bestimmt werden.

Die Auswertung des vorliegenden Verfahrens zeigt, dass weitere Faktoren als die im Stadt- und Gemeindetyp berücksichtigte Bevölkerungszahl und zentralörtliche Funktion beeinflussen, wie stark die Übererfassung ist. Es muss also genauer überprüft werden, wie die Kommunen gruppiert werden können, für die der gleiche Umrechnungsfaktor geeignet ist. Bei Baulücken und NVPs scheinen die Eigenschaften von Potenzialflächen vor allem von Siedlungsstruktur und Demographie abhängig zu sein. Nach diesen Kriterien wurden auch die Fallstudiengebiete dieser Studie ausgewählt, sodass eine möglichst vielfältige Kombination an Kriterien erreicht wurde. Da also jeweils nur eine oder zwei Kommunen mit gleichen Kriterien ausgewertet wurden, ist keine sichere Aussage möglich, ob deren Eigenschaften bezüglich Potenzialflächen für die übrigen Kommunen mit gleichen Kriterien repräsentativ sind. Für Brachflächen treten zusätzlich Unterschiede je nach städtebaulicher Prägung auf. Industriell geprägte Kommunen, insbesondere durch Bergbau / Tagebau, unterscheiden sich von denen mit hauptsächlich Wohnnutzung oder historischen Altstädten. Für eine Abschätzung mittels Umrechnungsfaktor zwischen berechnetem und realem Potenzial muss also weitergehend überprüft werden, ob die benannten Kriterien für die Gruppierung der Kommunen geeignet sind, beziehungsweise welche zusätzlichen Kriterien berücksichtigt werden müssen, damit ein möglichst zutreffender Faktor je Gruppe bestimmt werden kann.

Für die Berechnung der Umrechnungsfaktoren der einzelnen Gruppen ist jeweils ein Vergleich mit bereits erfassten Potenzialflächen nötig. Um die beabsichtigten Potenzialtypen abzudecken, ist ein einheitlicher Erfassungsstandard notwendig. Gegebenenfalls ist die Verwendung von bereits bestehenden kommunalen Potenzialflächenkatastern möglich, die auch für die Methodenentwicklung genutzt wurden. Darin erfolgt die Erfassung aber nach den Kriterien der jeweiligen Kommune und es besteht die Wahrscheinlichkeit einer strategischen Untererfassung von Potenzialflächen. Als Folge entspricht das erfasste Potenzial nicht dem real verfügbaren Potenzial und der darüber bestimmte Faktor ist ungenau. Stattdessen sind genauere Faktoren möglich, wenn die automatisiert vorerfassten Flächen den Kommunen bereitgestellt werden und die von den Kommunen überprüften und bestätigten Potenzialflächen als Grundlage für die Abschätzung genutzt werden.

7.2 Konzeptionalisierung für die Unterstützung von Kommunen

Kommunen erfassen ihre Potenzialflächen derzeit überwiegend mittels manueller Methoden, bei denen unterschiedliche Geobasisdaten und Luftbilder visuell ausgewertet werden. Dies bedeutet einen hohen zeitlichen und personellen Aufwand. Durch den Einsatz einer KI-basierten automatisierten Vorerfassung können die Kommunen unterstützt und der Aufwand der Identifikation von Potenzialflächen reduziert werden.

7.2.1 Bereitstellung in einem übergeordneten IT-System

Zur Förderung einheitlicher Erfassungskriterien und um den Aufwand innerhalb der Kommunen gering zu halten, ist es sinnvoll, die Vorerfassung und Systemadministration in einer übergeordneten Stelle durchzuführen und sicherzustellen, beispielsweise in Regionalverbänden, oder in der Landes- oder Bundesverwaltung.

Zur Bereitstellung der Ergebnisse bietet sich ein Web-Tool an, in dem die Kommunen die vorgeschlagenen Potenzialflächen bestätigen, bearbeiten oder ablehnen können. Dies stellt eine geringere Hemmschwelle dar als die Einführung und Betreuung einer zusätzlichen verwaltungsinternen Software. Auch der technische Aufwand zur Administration für die Kommunen wird geringgehalten, was die Mitwirkungsbereitschaft erhöht.

Die aus der automatisierten Erfassung hervorgehenden Flächen stellen Vorschläge dar, deren Eignung als Potenzialfläche von den Kommunen bewertet und überprüft werden muss. Bei der manuellen Überprüfung werden beispielsweise die planungsrechtlichen und politischen Gegebenheiten berücksichtigt. Um auch diesen Arbeitsschritt zu erleichtern, ist die Einbindung verschiedener weiterer Datenquellen sehr wünschenswert (siehe Kapitel 7.2.2), entweder in Form von Geodaten oder zur visuellen Darstellung als WMS-Layer.

Neben der reinen Darstellung der zusätzlichen Datenquellen und der Ergebnisse der Vorerfassung sollten nach Aussage der kommunalen Vertreter außerdem Möglichkeiten zur weiteren Filterung und Priorisierung der vorgeschlagenen Flächen angeboten werden. Somit können die für die Kommune relevantesten Flächen als erstes überprüft werden. Relevante Kriterien für die Priorisierung der Vorschläge wurden in einer Umfrage des Expertenworkshops ermittelt: Größe, Landnutzung, Baurecht, Zugang zu Verkehrsflächen und Konfidenz der vorgeschlagenen Fläche.

Die Kriterien der Größe und Konfidenz der vorgeschlagenen Fläche betreffen die Ergebnisse der Vorerfassung. Das Festlegen von Grenzwerten für die Konfidenz der Vorhersage erlaubt den Nutzern eine individuelle Abwägung zwischen einer hohen Trefferquote (Precision) und einer hohen Abdeckung der tatsächlichen Potenzialflächen. Werden zunächst nur die Flächen mit hoher Konfidenz betrachtet, so ist darin der Anteil der fehlerhaften Vorschläge geringer, es sind allerdings nicht alle vorhandenen Potenziale enthalten. Es wird also eine hohe Precision, aber ein niedriger Recall erreicht. Bei niedrigeren Grenzwerten nimmt die Trefferquote ab, es werden also mehr falsche Vorschläge gemacht und die Precision wird geringer. Parallel dazu steigt der Recall, es wird also ein höherer Anteil der tatsächlichen Potenzialflächen identifiziert. Der Wunsch nach einer individuellen Abwägung zwischen Precision und Recall geht aus den Umfrageergebnissen des Expertenworkshops deutlich hervor. Mit den aktuellen Modellen erfolgt bei Zunahme der einen Metrik jeweils eine starke Abnahme der anderen Metrik. Vor einer tatsächlichen Anwendung wäre es somit ratsam, dass die Modelle also mit zusätzlichen oder verfeinerten Trainingsdaten nachtrainiert werden, mit dem Ziel einer höheren Precision ohne Verringerung des Recalls.

Die verbleibenden Kriterien zur Priorisierung verwenden zusätzliche Informationen. Während die Landnutzung, und somit auch Informationen zum Zugang zu Verkehrsflächen, aus den für die Vorfilterung verwendeten und deutschlandweit verfügbaren Landnutzungskartierungen aus ALKIS beziehungsweise ATKIS hervorgehen, sind für die Berücksichtigung des Baurechts zusätzliche Daten nötig, die derzeit noch nicht für eine automatisierte Filterung oder Priorisierung genutzt werden können (siehe Kapitel 7.2.2).

Neben der Einbindung von zusätzlichen Datenquellen, die bei der Bewertung der Potenzialflächen helfen, sollten auch Schnittstellen zur Übertragung der erfassten Potenzialflächen zwischen dem Tool und anderen bereits bestehenden Potenzialflächenkatastern gewährleistet werden. Darüber können einerseits bereits erfasste Potenziale, entweder aus kommunalen Systemen oder aus anderen bestehenden überregionalen Tools, eingepflegt werden und andererseits die Ergebnisse der automatisierten Vorerfassung in die lokalen Systeme übernommen werden.

7.2.2 Integration und Betrachtung zusätzlicher Datenquellen

Während des Expertenworkshops wurden in Umfragen und Diskussionen verschiedene Datenquellen identifiziert, die für die genauere Validierung der Ergebnisse der Vorerfassung relevant sind.

Die wichtigste bisher unberücksichtigte Information ist der Planungsstatus. Die bisherige Filterung betrifft die aktuell vorhandene tatsächliche Nutzung der Fläche. Diese stimmt jedoch nicht immer mit der vorgesehenen Nutzung überein, die in der Bauleitplanung in Form von FNPs und B-Plänen festgelegt wird. Die Berücksichtigung solcher Pläne erlaubt einerseits die Hinzunahme von Flächen, die in einem Flächennutzungsplan neu als Wohnbaufläche ausgeschrieben werden. Wenn diese Flächen derzeit noch nicht als solche genutzt werden und daher in den Flächennutzungskartierungen noch mit ihrer bisherigen Nutzung, beispielsweise als Landwirtschaftsfläche enthalten sind, oder diese Kartierungen noch nicht aktualisiert wurden, werden diese Flächen bisher in der Vorfilterung ausgeschlossen, obwohl Potenzialflächen enthalten sein können. Andererseits können Flächen mit widersprüchlichen Festlegungen im B-Plan als Potenzialflächen ausgeschlossen werden. Dabei ist allerdings zu beachten, dass gegebenenfalls eine Änderung der Bauleitpläne erforderlich sein kann, insbesondere bei alten Plänen und in Städten mit großem Siedlungsdruck. Für die Bewertung der Mobilisierbarkeit sind diese aber dennoch relevant.

Trotz der Relevanz der Bauleitpläne für die Bewertung der vorgeschlagenen Potenzialflächen ist derzeit noch keine Aufnahme dieser Daten in ein standardisiertes automatisiertes Erfassungsverfahren möglich, da sie nur zu einem geringen Grad digitalisiert vorliegen. Nur in wenigen Fällen liegen Bauleitpläne maschinenlesbar vor, häufig werden nur die Geltungsbereiche vektorisiert und mit einer Bilddarstellung des Plans verknüpft. Dies bestätigte sich auch in einer Umfrage des Expertenworkshops, bei der nur eine von sieben Kommunen angab, über maschinenlesbare B-Pläne zu verfügen.

In Zukunft ist aber eine Zunahme der Digitalisierung der Bauleitpläne zu erwarten. Bereits 2017 wurde beschlossen, dass bei neu aufgestellten Bauleitplänen der Standard XPlanung angewendet werden muss. Dies wird gestärkt durch das im Juli 2023 verkündete „Gesetz zur Stärkung der Digitalisierung im Bauleitplanverfahren“. Bei höherer Verfügbarkeit maschinenlesbarer Bauleitpläne wird in Zukunft auch die Berücksichtigung dieser Daten für die automatisierte Identifikation von Potenzialflächen und deren Überprüfung möglich.

Weitere Datenquellen, die für die Bewertung der vorgeschlagenen Potenzialflächen hinzugezogen werden sollten, betreffen die möglichen Einschränkungen ihrer Nutzbarkeit. Beispiele sind Altlastenkataster und Biotopkartierungen, die überwiegend durch die Bundesländer oder Kommunen geführt werden. Auch die Informationen zu Überflutungsflächen aus dem bundesweiten Hochwasseratlas können helfen, gefährdete und daher für eine Bebauung ungeeignete Flächen auszuschließen.

Neben diesen ungeeigneten Flächen können auch diejenigen mit aktuellen Bauvorhaben über zusätzliche Daten ausgeschlossen werden. Die Vorerfassung ist eingeschränkt durch die Aktualität der DOPs. Sollte seit der Aufnahme des Bildes eine bauliche Entwicklung stattgefunden haben, sodass eine ehemalige Potenzialfläche nun genutzt wird, so ist dies auf dem für die Klassifikation verwendeten Bild noch nicht erkennbar. Sofern digitale Informationen zu aktuellen Bauvorhaben vorliegen, können diese genutzt werden, um Flächen als Potenziale auszuschließen, die aktuell in Entwicklung sind. In der Umfrage während des Expertenworkshops gaben zwei von sieben Kommunen an, dass dies bei ihnen möglich sei, in einer weiteren Kommune ist die Verfügbarkeit solcher Daten unklar.

Für die Beurteilung von Brachflächen hilft außerdem die Berücksichtigung von Informationen über die Wirtschaftstätigkeit. Die Nutzung von Unternehmensdaten ist hilfreich, um festzustellen, ob auf einer Fläche ein Unternehmen angesiedelt ist und ob eine Mindernutzung vorliegt. Bei Mindernutzung von Industrie- oder Gewerbeflächen ist im einzelnen Luftbild noch kein eindeutiger Verfall erkennbar, wie es bei einer langfristigen Brache der Fall ist. Mindernutzung kann aber über fehlende Veränderungen im Luftbild erkannt werden. Bei

aktiv genutzten Flächen ist beispielsweise zu erwarten, dass sich die Position von Müllcontainern und die Belegung von Betriebsparkplätzen regelmäßig ändert. Trifft dies nicht zu, so deutet dies auf eine Mindernutzung oder vollständige Nutzungsaufgabe hin. Um die zeitlichen Veränderungen bei der Bewertung der vorgeschlagenen Potenzialflächen zu berücksichtigen, können zusätzliche Satellitenbilder in das angebotene Tool eingebunden werden. Andererseits stellt deren Verwendung auch einen Ansatz für die Weiterentwicklung des Klassifikationsansatzes dar. Bei der Auswahl der Bilddatenquelle muss sowohl die zeitliche als auch die räumliche Auflösung betrachtet werden. Die derzeit verwendeten DOPs haben eine hohe räumliche Auflösung von 20 cm. Im Gegenzug werden sie bundesweit aber nur in einem Turnus von drei bis fünf Jahren aktualisiert. Dahingegen stehen öffentlich zugängliche Satellitenbilddaten, wie die der Sentinel-2-Mission, mit deutlich höherer Aktualisierungsrate von bis zu wenigen Tagen bereit, haben allerdings nur eine räumliche Auflösung von bis zu 10 m. Alternative kommerzielle Anbieter bieten kostenpflichtig Satellitenbilder mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung an. Neben den Kosten für die Datenbeschaffung ist dabei auch zu beachten, dass große Datenmengen gespeichert werden müssen. Allgemein stellen bei der Verwendung von Satellitenbildern Wolken ein Problem dar. Um dem entgegenzuwirken, ist es ratsam, die Bilderinformationen über mehrere Zeitpunkte hinweg auszuwerten. Die erhöhte zeitliche Abdeckung ist hilfreich für eine Bewertung von Potenzialflächen, bedeutet aber zusätzlichen technischen Aufwand für die Datenaufbereitung.

7.2.3 Festlegung des Detailgrades und der Darstellung

Die Klassifikationsergebnisse auf Fensterebene können auf unterschiedliche Art aggregiert werden. Einerseits können flurstücksunabhängige zusammenhängende Flächen, die als Potenzialfläche klassifiziert wurden, als Polygone zusammengefasst werden. Andererseits ist eine Übertragung auf Flurstücksebene möglich. Beide Möglichkeiten kommen für eine Bereitstellung als vorgeschlagene Potenzialflächen in Frage. Für eine Einschätzung der gewünschten Darstellung in den Kommunen wurden im Expertenworkshop die bisherigen und die bevorzugten Konventionen diesbezüglich abgefragt. Während die Erfassung in kommunalen Datenbanken bisher überwiegend flurstücksbezogen erfolgt, wird in der Mehrzahl eine Vorerfassung von Polygonen unabhängig von den Flurstücksgrenzen als sinnvoll angesehen. Diese können einerseits die ungenutzten Teilflächen eines Flurstücks beinhalten und andererseits zusammenhängende flurstücksübergreifende Freiflächen. In dieser Frage unterscheiden sich die Ansprüche der unterschiedlichen Kommunen je nach Siedlungsdruck. In Städten mit wenigen verfügbaren Flächen muss auch auf die freien Teilflächen bereits bebauter Flurstücke zugegriffen werden. Unabhängig von den aktuellen Flurstücken wären dazu auch Bodenordnungsverfahren möglich, in denen die verfügbaren Freiflächen zusammengefasst werden können. In ländlichen Gebieten mit größerem Flächenangebot hingegen ist derzeit eine rein flurstücksbezogene Erfassung üblich. Bei Bereitstellung flurstücksunabhängiger Polygone sollte daher zur Bearbeitung die Möglichkeit bestehen, die bestätigten Polygone nicht nur manuell zu korrigieren und einzuzeichnen, sondern auch den Flurstücksgrenzen zu folgen. Insbesondere für die Erfassung von klassischen Baulücken, die nach aktuellem Planungsrecht sofort bebaubar sind, ist nach wie vor eine flurstücksspezifische Darstellung relevant.

Neben den NVPs ist eine Aufteilung in Teilflächen insbesondere bei Industrie- und Gewerbeflächen interessant, da dort häufig Mindernutzungen vorliegen, nur ein Teil der Fläche stillgelegt wurde oder Teile des Flurstücks als Reserveflächen gehalten werden. Insbesondere bei großen Flurstücken ist es dann wichtig, nur die betreffenden Teilflächen als Brache zu identifizieren. Die Beurteilung, ob es sich bei solchen Flächen tatsächlich um Potenziale handelt, ist allerdings nur im Gespräch mit dem Eigentümer möglich, der Auskunft über die tatsächliche Nutzungsaktivität der Fläche geben kann.

Insgesamt ist also die Darstellung von flurstücksunabhängigen Teilflächen als vorgeschlagenes Potenzial sinnvoll, es sollte aber auch eine einfache Übertragung auf die Flurstücke ermöglicht werden, sodass diese für die genauere Abgrenzung der Potenziale genutzt werden können.

7.2.4 Effizienzgewinn und Mitwirkungsbereitschaft

Die automatisierte Vorerfassung von Potenzialflächen kann den Aufwand für die manuelle Überprüfung stark einschränken. Bei der Filterung mittels Landnutzungskarten werden bereits ca. 90 % der Gesamtfläche ausgeschlossen. Ausgeschlossene Landnutzungsklassen, in denen möglicherweise doch Potenzialflächen liegen können, müssen derzeit weiterhin manuell überprüft werden. Dies betrifft insbesondere Baulücken, die als Landwirtschaftsflächen oder Grünanlagen in den Landnutzungskartierungen enthalten sind. Für alle verbleibenden Flächen nach der Vorfilterung sind bei der bisherigen manuellen Erfassung genauere Betrachtungen anhand von weiteren Geobasisdaten wie Hausumringen und Flurstücksgrenzen sowie Luftbildern nötig. Durch die automatisierte Vorerfassung können diese Schritte auf die als Potenzialfläche klassifizierten Flächen eingeschränkt werden, die für die Identifikation von Brachflächen nur ca. 10 % der vorausgewählten Flächen bedecken und für Baulücken und NVPs 20 %. Durch die Einschränkung der zu betrachtenden Flächen für die Validierung kann der Aufwand für die Kommunen also deutlich reduziert werden. Methodische Weiterentwicklungen wie eine stärkere GIS-basierte Filterung und eine Verbesserung der Klassifikationsmodelle können den Aufwand in Zukunft noch weiter einschränken.

In den vorgeschlagenen Flächen sind bei hohem Recall weiterhin viele Vorschläge enthalten, die nicht als Potenzialflächen in Betracht kommen. Um dennoch die Mitwirkungsbereitschaft der Kommunen zu erlangen, muss der Zweck der Vorerfassung deutlich kommuniziert werden. Bei bisherigen überregionalen Tools berichten die Vertreter von einer sehr hohen Erwartungshaltung der Kommunen. Im Workshop wurde berichtet, dass diese schon bei einem geringen Anteil an falschen Vorschlägen das System anzweifeln und dieses nicht mehr als zielführend wahrnehmen. Dies bestätigt sich auch in der Umfrage des Expertenworkshops, in der die Hälfte der Teilnehmer angab, dass die vorgestellte Vorerfassung nicht oder nur teilweise hilfreich sei, da weiterhin viele falsche Vorschläge enthalten seien. Es muss also klar mitgeteilt werden, dass es sich lediglich um eine Vorauswahl handelt, die die manuell zu bewertenden Flächen einschränkt, aber nicht um ein fertiggestelltes Register der tatsächlichen Potenzialflächen.

Bei bisherigen überregionalen Tools wurden zwei Faktoren identifiziert, die die Mitwirkungsbereitschaft der Kommunen beeinflussen. Einerseits die Menge der noch verfügbaren Flächen und andererseits der lokale Erfassungsstand dieser Flächen.

In urbanen verdichteten Bereichen mit hohem Siedlungsdruck ist das Eigeninteresse der Kommunen an einer Identifikation der Potenzialflächen höher, sodass eine intensivere Mitarbeit bei der Bearbeitung und Aktualisierung der vorgeschlagenen Potenziale erfolgt. In ländlichen Gebieten hingegen, in denen ein ausreichendes Flächenangebot verfügbar ist, wird der Erfassung der Potenzialflächen eine geringere Bedeutung beigemessen, was die Mitwirkungsbereitschaft einschränkt. Auch der Detailgrad der Erfassung ist vom Siedlungsdruck abhängig. Während bei geringer Flächenverfügbarkeit auch die kleinen Teilflächen mit schwierigerer Umsetzung relevant sind, werden solche Vorschläge von Kommunen in ländlichen Gebieten eher als fehlerhaft angesehen. Um den Ansprüchen der verschiedenen Kommunen zu genügen, wären also differenzierte Lösungen je nach Raumkategorie zweckmäßig.

Der zweite Faktor ist der Erfassungsstand innerhalb der Kommunen. Wenn noch kein Potenzialflächenkataster besteht, ist die Bereitschaft zur Umsetzung eines neuen übergeordneten Tools höher. Teilweise wird die erneute automatisierte Erfassung auch bei bestehendem Potenzialflächenkataster als hilfreich angesehen, um zusätzliche Flächen zu identifizieren und die Fortführung zu erleichtern. Andere Kommunen sehen hier jedoch keinen Mehrwert, sondern halten fehlende Flächen für unwahrscheinlich. Auch der Aufwand der Fortführung wird unterschiedlich eingeschätzt, da in einigen Kommunen eine automatisierte Übertragung von Informationen über Bauanträgen möglich ist, mittels derer ehemalige Potenzialflächen entfernt werden können. In anderen Kommunen hingegen erfolgt die Fortführung ebenfalls manuell. Bei Überlegungen zur Einführung eines neuen überregionalen Tools muss außerdem bedacht werden, dass in einigen Ländern oder Regionalverbänden vergleichbare IT-Systeme bestehen, in denen die Kommunen bereits vorgeschlagene Potenzialflächen aus

GIS-Analysen überprüft haben. Dies betrifft die Tools der Bundesländer Schleswig-Holstein, Rheinland-Pfalz und Hessen. Weitere Beispiele sind die Bezirksregierungen in NRW, in deren Verantwortung die Durchführung eines Siedlungsflächenmonitorings liegt, sowie Regionalverbände wie der Verband Region Rhein-Neckar (VRRN) und der Regionalverband FrankfurtRheinMain. In den beiden letztgenannten Verbänden bestehen seit der Einführung des hessischen Potenzialflächenkatasters Anfang 2023 sogar bereits je zwei parallele Tools. Die Kompatibilität mit den bestehenden Tools sollte sichergestellt werden, sodass die Flächen, die bereits von den Kommunen überprüft und abgelehnt wurden, nicht erneut vorgeschlagen werden und kein doppelter Aufwand entsteht.

Neben der reinen Mitwirkungsbereitschaft der Kommunen sollte auch sichergestellt werden, dass die Ergebnisse der Überprüfung der Kommunen auch in das Tool zurückgespielt werden. In der Vergangenheit haben Vertreter überregionaler Datenbanken die Erfahrung gemacht, dass einige Kommunen die vorgeschlagenen Flächen exportieren und in ihren eigenen lokalen GIS-Systemen bearbeiten. Anschließend erfolgte keine Rückmeldung über die Einschätzung der Vorschläge oder die Daten wurden so verändert, dass sie im überregionalen Tool nicht mehr verwendbar waren. Somit stellen die Informationen zwar einen Mehrwert für die Kommunen dar, sind aber nicht für eine großräumige Auswertung und Abschätzung der Potenziale verfügbar. Um sicherzustellen, dass die durch die Kommunen bearbeiteten Daten auch in dem bereitgestellten Tool einfließen, können einerseits die Möglichkeiten zur direkten Bearbeitung im Webtool möglichst vollständig gestaltet werden, sodass kein Bedarf besteht, die Daten zur Bearbeitung ins lokale System zu übertragen. Andererseits können klare Bearbeitungsrichtlinien und Schnittstellen zum Import dabei helfen, die Kompatibilität von in lokalen Systemen bearbeiteten Daten und deren Rücklaufquote zu erhöhen. Dies ist aus mehreren Gründen wichtig. Einerseits kann nur so eine möglichst genaue Bestimmung der tatsächlich erfassten Potenziale auf überregionaler Ebene durchgeführt werden. Auch für die Abschätzung von Hochrechnungsfaktoren, wie in Kapitel 7.1.2 beschrieben, ist es wichtig, von möglichst vielen Kommunen eine Rückmeldung zu den akzeptierten Potenzialen zu erhalten. Zuletzt können die korrigierten Flächen auch als Grundlage zum Nachtrainieren der Modelle dienen, um zukünftige Klassifikationen zu verbessern.

8 Fazit und Ausblick

8.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die durchgeführte Literaturrecherche, Interviews und ein Workshop mit Experten aus Kommunen, Forschung und Industrie bestätigen die Wichtigkeit der Innenentwicklung für die nachhaltige Deckung des Wohnraumbedarfs. Die systematische Erfassung der IEPs hilft Kommunen, alle vorhandenen Potenziale aufzudecken und einer Nutzung zuzuführen. In Kommunen ohne systematische Erfassung werden die Potenziale üblicherweise unterschätzt, da sie nicht alle Flächen im Blick haben. Insbesondere in Kommunen mit geringem Siedlungsdruck steht jedoch dem Nutzen einer systematischen IEP-Erfassung ein oftmals hoher personeller und zeitlicher Aufwand entgegen. Aus den Ergebnissen der Baulandumfrage 2020 und den durchgeführten Interviews ergibt sich, dass die systematische Erfassung innerhalb der Kommunen aktuell üblicherweise mittels manueller Auswertungen von Bauleitplänen und Luftbildern, Ortsbegehungen und lokalem Wissen sowie in Zusammenarbeit verschiedener Fachämter erfolgt. Auch die eigene Umsetzung einer teilautomatisierten Methode durch die Kommunen selbst bietet bisher im Vergleich zum benötigten Know-How nicht genug Mehrwert.

Ein bereits in einzelnen Ländern und Regionalverbänden eingesetzter Ansatz, der auch für eine bundesweite Lösung als vielversprechend angesehen wird, ist die Durchführung einer automatisierten Vorerfassung durch eine übergeordnete Stelle, deren Ergebnisse dann den Kommunen zur Verfügung gestellt werden können. Mittels ebenfalls bereitgestellter Bearbeitungs-Tools können die Kommunen die vorerfassten Flächen überprüfen und bei Bedarf falsche Potenziale entfernen oder zusätzliche Flächen hinzufügen. Für eine möglichst hohe Mitwirkungsbereitschaft der Kommunen sollte die Vorauswahl möglichst nah an den tatsächlichen Potenzialen liegen, um den Aufwand für die Kommunen möglichst gering zu halten. Hier liegen aktuell noch Probleme bei der Vorerfassung für große Gebiete. Zum einen ist die Aktualität zentral gesammelter Datensätze stärker eingeschränkt und zum anderen sind visuelle Luftbildauswertungen, wie sie im Rahmen der Vorerfassung für kleinere Gebiete durchgeführt werden, zu zeitintensiv. Eine Automatisierung der Luftbildauswertung könnte in Zukunft diesen Aufgabenschritt beschleunigen und somit auch für großräumige Vorerfassungen durchgeführt werden.

Aktuell beschränkt sich die Automatisierung bei der Erfassung von Baulücken und NVPs im Wesentlichen auf die GIS-Analyse von Geobasisdaten. Je nach Verfügbarkeit werden Informationen über potenziell bebaubare Gebiete aus ATKIS, ALKIS oder der Bauleitplanung entnommen. Über einen Vergleich mit der in den HU-DE erkennbaren bestehenden Bebauung können daraus potenzielle Baulücken und NVPs bestimmt werden. In den Ergebnissen dieser automatisierten Verfahren sind jedoch auch Flächen enthalten, die tatsächlich keine Potenziale darstellen. Hierbei handelt es sich beispielsweise um Nutzungen, die aufgrund bereits gestarteter Bauarbeiten oder sonstiger Hemmnisse aus den verwendeten Daten nicht erkennbar sind. Ein Teil dieser falsch vorerfassten Potenziale kann durch Hinzufügen weiterer automatisierter Filterungsschritte entfernt werden. Eine Vollautomatisierung wird auch zukünftig nur schwer möglich sein, da bei der Erfassung viele subjektive Faktoren von Seiten der Kommunen einfließen.

Während die Erfassung von Baulücken und NVPs gemeinsam erfolgen und in einem nachgelagerten Schritt deren Unterscheidung durchgeführt werden kann, so stellt die Identifikation von Brachflächen eine eigene Aufgabenstellung dar. Unbebaute Brachflächen können dennoch zum Teil gemeinsam mit Baulücken und NVPs erfasst werden. Insbesondere bei einer bestehenden Bebauung ist eine GIS-Analyse in diesem Kontext nicht ausreichend für eine genauere Einordnung. Der Zustand der Bebauung wird nicht systematisch erfasst, sodass keine Aussage über die Aktivität potenzieller Brachen möglich ist. In Luftbildern sind Brachen bei einer visuellen Auswertung oft anhand verschiedener Merkmale erkennbar, beispielsweise durch Schäden an der Bebauung, Schotterflächen und ungepflegte Vegetation. Für die Flächen, die für einen menschlichen Betrachter anhand von Luftbildern als Brachen erkennbar sind, besteht die Möglichkeit, diese auch mittels maschineller

ler Bildverarbeitung von aktiv genutzten Flächen zu unterscheiden. Insbesondere für Gewerbebrachen zeigen aktuelle Ansätze, dass ein großer Anteil der tatsächlichen Brachen über eine Klassifikation gefunden werden kann. Es gibt allerdings auch Brachen, deren Aussehen in Luftbildern nicht von aktiv genutzten Flächen zu unterscheiden ist, auch bei visueller Auswertung. Diese lassen sich nicht flächendeckend einheitlich erfassen, sondern sind nur über lokale Informationen oder weitere Datenquellen identifizierbar. Insgesamt weist das Erscheinungsbild von Brachflächen eine sehr große Varianz auf. Hinzu kommt, dass auch aktiv genutzte Flächen die gleichen Merkmale aufweisen können, die für Brachflächen typisch sind.

In dieser Arbeit wurden dazu aufbauend auf einer Vorstudie bildbasierte Klassifizierungsmethoden zur Identifizierung von IEPs entwickelt. Nach einer Vorauswahl von Flächen, die auf Grundlage ihrer kartierten Landnutzung für eine weitere Entwicklung geeignet sein könnten, werden DOPs in regelmäßige Bildausschnitte unterteilt, die als Input für ein Neuronales Netz dienen. Es wurden zahlreiche unterschiedliche KI-Modelle trainiert und evaluiert, die jeweils erfolversprechendsten Ansätze wurden einerseits für die Klassifizierung von Brachflächen und andererseits für die Klassifizierung von Baulücken und NVPs verwendet.

Die Auswertung über sechs repräsentative Fallstudiengebiete zeigt die Fähigkeit des Modells zur Generalisierung auf neue, für das Modell unbekannt Regionen in Deutschland. Für beide Aufgaben kann zunächst festgestellt werden, dass durch die Vorfilterung bereits große Teile des Gebiets (knapp 90 %, sowohl für Brachen als auch für Baulücken und NVPs) ausgeschlossen werden können. In den verbleibenden Flächen wird dann jeweils ein hoher Anteil der annotierten IEPs gefunden (86 % der Brachen und 81 % der Baulücken / NVP). Auch wenn von der vorausgewählten Fläche weitere 89 % (für Brachen) beziehungsweise 80 % (für Baulücken / NVP) ausgeschlossen werden können, enthalten die Ergebnisse auch viele zusätzliche Flächen. Um die Anzahl dieser vorgeschlagenen Potenziale zu reduzieren, können verschiedene Schwellenwerte oder Filterungsschritte angewendet werden, die zwar die Präzision erhöhen, aber auch den Recall verringern. Es ist also ein benutzerabhängiger Kompromiss zwischen diesen beiden Metriken erforderlich.

Hinsichtlich der Größe der Potenzialflächen lässt sich feststellen, dass in der Klassifikation fehlende IEPs besonders die kleineren annotierten Flächen betreffen. Alle großen Brachflächen ab 3.500 m² wurden vom Modell als solche identifiziert. Bei den Baulücken und NVPs liegt dieser Grenzwert bei 1.500 m². Im Gegenzug zeigt die Analyse der Größe der vorgeschlagenen Potenziale, dass hier kein eindeutiger Grenzwert für die Größe ermittelt werden kann. Zwar ist bei den Polygonen mit kleiner Fläche ein größerer Anteil an False Positives enthalten, doch sind auch von den großen zusammenhängenden Flächen aus der Klassifikation nicht alle korrekt. Unabhängig von der Größe der vorgeschlagenen Polygone ist also weiterhin eine manuelle Überprüfung erforderlich.

Abhängig von der Landnutzungsklasse weist das entwickelte Verfahren eine unterschiedliche Qualität auf. Für Brachflächen richtet sich dies vor allem nach der Größe der Klasse: Falls viele Polygone in einer Klasse liegen, können Brachen besser von den aktiv genutzten Flächen unterschieden werden. Somit ist die Klassifikation von Brachen in den Industrie- und Gewerbeflächen am genauesten. Für Baulücken und NVPs ist dieser Zusammenhang weniger eindeutig, hier liegt die Qualität bei den Flächen gemischter Nutzung trotz geringer Anzahl an Flächen an erster Stelle, wohingegen die große Klasse der Industrie- und Gewerbeflächen nur niedrigere Precision und Recall erzielt.

Neben der Abhängigkeit von Größe und Landnutzung wurde auch der Einfluss der Auflösung der Eingabebilder untersucht. Für die Identifikation von Brachen beeinflusst diese die Klassifikation nur sehr gering. Für Baulücken und NVPs hingegen ist eine leichte Abnahme der Genauigkeit mit abnehmender Bildauflösung zu erkennen.

Ein Vergleich zu bestehenden Verfahren unterliegt einigen Einschränkungen durch die unterschiedlichen Vorgehensweisen bezüglich der Vorauswahl von Flächen, dem Ungleichgewicht der Klassen im Datensatz, der Auflösung von Bildfenstern beziehungsweise der Zuordnung zu Flurstücken. Auf dem Datensatz für das

Modelltraining können vergleichbare Metriken festgestellt werden. Im Vergleich zu dem Klassifikationsansatz für Brachen aus Dürrbeck/Lippl-Seifert (2022) wird im neu entwickelten Verfahren ein höherer Recall erreicht, allerdings auch eine niedrigere Präzision. Es werden also insgesamt mehr Flächen vorgeschlagen. Die Interpretation dieser Ergebnisse sollte aufgrund der unterschiedlichen Datenverteilungen in den Fallstudiengebieten im Vergleich zur Vorstudie daher mit besonderer Vorsicht erfolgen. Für die Baulücken und NVPs wurde ein GIS-basierter Ansatz als Vergleich implementiert. Dabei wurden Flurstücke auf Grundlage des Bebauungsgrads klassifiziert. Dieses enthält eine sehr hohe Anzahl überschüssiger Vorschläge, die durch das neu entwickelte bildbasierte Verfahren stark reduziert werden können. Dabei sinkt aber auch der Recall. Dies wird allerdings nicht nur durch die Klassifikation selbst, sondern auch durch die Aggregation zur Flurstücksebene verursacht, sodass dieser Vergleich nur bedingt aussagekräftig ist.

Die Analyse der fehlerhaften Gruppen von Klassifizierungsergebnissen (fehlende IEPs / False Negatives und zusätzliche Vorschläge / False Positives) zeigt unterschiedliche Systematiken und Gründe für die falschen Klassifizierungsergebnisse. Bei den fehlenden IEPs, sowohl für Brachflächen als auch für Baulücken und NVPs, zeigt die visuelle Betrachtung der Eingangsbilder, dass vor allem solche IEPs fehlen, bei denen aus den Einzelbildern nicht eindeutig ersichtlich ist, dass es sich tatsächlich um ein IEP handelt. Dies betrifft z. B. Brachflächen mit gut erhaltenen Gebäuden und kleine Baulücken oder NVPs, bei denen jeder Bildausschnitt Teile der angrenzenden Bebauung enthält. Bei den überzähligen Polygonen aus den Vorhersagen können verschiedene Gruppen unterschieden werden. Einige von ihnen könnten nützliche Vorschläge für weitere Untersuchungen sein und sind nicht als falsch zu betrachten, wie z. B. unbebaute Teilflächen von Industriegebieten oder Grünflächen. Andere Gruppen, wie Baustellen oder Flächen, die für Entsorgung, Lagerung oder Bergbau genutzt werden, sollten in zukünftigen Entwicklungen entfernt werden, zum Beispiel auf der Grundlage von Bildzeitreihen oder zusätzlichen Landnutzungsinformationen.

In einem Expertenworkshop wurden die Ergebnisse der Methodenstudie vorgestellt und diskutiert. Dabei wurde die Methodik als sinnvoll eingestuft, insbesondere die Erkennung von Teilflächen im Vergleich zur flurstücksbezogenen Klassifikation wurde hervorgehoben. Hinsichtlich der praktischen Umsetzung werden zum Teil noch Einschränkungen aufgrund der hohen Anzahl überschüssiger Vorschläge gesehen.

Für die praktische Umsetzung der automatisierten Erfassung für eine bundesweite Bestimmung der vorhandenen Potenziale bedeutet die hohe Anzahl der überschüssigen Vorschläge, die durch eine manuelle Validierung entfernt werden müssen, dass nur eine grobe Abschätzung möglich ist. Sofern in einem Teil der Kommunen eine Überprüfung der vorgeschlagenen Potenziale erfolgt ist, können Hochrechnungsfaktoren zwischen den klassifizierten und bestätigten Potenzialen bestimmt werden, um auch für die verbleibenden Kommunen eine Abschätzung der tatsächlich vorhandenen Potenziale zu treffen.

Auch wenn weiterhin eine manuelle Prüfung erforderlich ist, bietet eine automatisierte Vorerfassung für die Kommunen einen Mehrwert bei der Potenzialerfassung, da die zu betrachtenden Flächen im Vergleich zum bisherigen Vorgehen stark eingeschränkt werden. Für die Umsetzung empfiehlt sich das Angebot eines Webtools, welches durch eine übergeordnete Stelle gepflegt wird und in dem die Kommunen die Vorschläge einfach bearbeiten können. Ähnliche Systeme werden bereits von verschiedenen Bundesländern eingesetzt, beispielsweise in Rheinland-Pfalz, Hessen und Schleswig-Holstein. Ein neues Tool sollte daher mit bestehenden Datenbanken kompatibel sein, sodass den Kommunen kein doppelter Aufwand entsteht. Zur Bearbeitung ist neben der Darstellung der klassifizierten Potenzialflächen die Integration zusätzlicher Datenquellen von Interesse für die Bewertung der Vorschläge, beispielsweise über die Bauleitplanung, Hemmnisse wie Altlasten, oder die Wirtschaftstätigkeit. Die Ergebnisse der Überprüfung sollten anschließend sowohl für die Bestimmung von Hochrechnungsfaktoren zur bundesweiten Abschätzung genutzt werden als auch für ein potentielles Nachtrainieren der entwickelten Klassifikationsnetzwerke.

8.2 Ausblick

Auf Grundlage der Auswertungen und Expertendiskussionen ergeben sich mehrere Vorschläge für zukünftige Weiterentwicklungen des Verfahrens. Diese betreffen die Vorfilterung, die Klassifikationsmodelle und das methodische Vorgehen.

Eine möglichst genaue Vorfilterung der zu klassifizierenden Flächen ermöglicht es, verschiedene der bisher fehlerhaften Gruppen zu entfernen und die Klassifikation auf die geeigneten Flächen einzuschränken. Zur Verbesserung dieses Schritts gibt es verschiedene Möglichkeiten. Bei der Untersuchung der Vorfilterung mittels der Daten aus ALKIS und aus dem ATKIS Basis-DLM wurde festgestellt, dass beide dieser Quellen in unterschiedlichen Fällen eine bessere Abgrenzung der potenziell geeigneten Flächen ermöglichen. Aktuell wird abhängig von der Verfügbarkeit der Daten in der jeweiligen Kommune nach Möglichkeit ALKIS-TN genutzt und in den übrigen Fällen das ATKIS Basis-DLM. Eine Kombination der beiden Datenquellen könnte eine genauere Filterung erlauben.

Gleichzeitig reicht auch die Kombination der beiden Datenquellen (Flächennutzungskartierungen aus ALKIS oder ATKIS) nicht immer aus, um die Flächen abzugrenzen, die für eine Bebauung geeignet sind. So ist es zum Beispiel nicht möglich, Flächen zu identifizieren, die für eine bauliche Nutzung vorgesehen sind, derzeit aber anders genutzt werden, z. B. für die Landwirtschaft. Die Flächen, die für eine bauliche Nutzung vorgesehen sind, werden in der Bauleitplanung festgelegt, entweder im FNP oder im B-Plan. Die Berücksichtigung dieser Pläne würde eine genauere Vorauswahl der zu klassifizierenden Flächen ermöglichen. Diese Pläne liegen jedoch in der Regel nicht in einem vollständig digitalisierten und maschinenlesbaren Format vor. Mit dem „Gesetz zur Stärkung der Digitalisierung im Bauleitplanverfahren“, das im Jahr 2023 verabschiedet wurde, ist die Verwendung des standardisierten Formats XPlanung für die Erstellung neuer Pläne verpflichtend. Für die Zukunft wird daher eine höher werdende Verfügbarkeit von maschinenlesbaren Bauleitplänen erwartet, die dann eine neue Option für die Vorfilterung darstellen. Es ist zu beachten, dass die B-Pläne zwar die derzeit zulässige Flächennutzung vorgeben, es aber in einigen Fällen möglich sein kann, den Plan so zu ändern, dass eine freie Fläche für eine Bebauung zur Verfügung steht. Ein Ausschluss aller Flächen ohne aktuelles Baurecht würde diese Flächen ausschließen. Sowohl FNPs als vorbereitende Bauleitpläne als auch Baurecht vermittelnde B-Pläne sollten daher nur für eine Kategorisierung der IEPs in Hinblick auf ihre tatsächliche Mobilisierbarkeit verwendet werden.

Um die Vorauswahl bereits stärker einzuschränken wäre es auch möglich, statt einer reinen Filterung der Landnutzungsklassen bereits ein komplexeres GIS-basiertes Verfahren vorzuschalten, in dem die Flächen beispielsweise nach Bebauungsgrad gefiltert werden. Im Gegenzug wäre auch das Aufnehmen der bisher ausgeschlossenen Landnutzungsklassen oder das Training separater Modelle je Landnutzungsklasse möglich, um durch die Filterung weniger tatsächliche Potenziale auszuschließen.

Für die Erfassung von Baulücken und NVPs wäre außerdem eine genauere Abgrenzung der Innenbereiche hilfreich. Die dazu verwendete „Ortslage“ aus dem ATKIS Basis-DLM weicht insbesondere an den Rändern davon ab, was zu einigen False Positives führt. Stattdessen könnten komplexere Methoden, beispielsweise wie von Harig et al. (2014), zur Abgrenzung der Innenbereiche genutzt werden. Allerdings wäre auch eine einfache Filterung der Vorschläge am Rand der Ortslage möglich, sodass der zusätzliche Aufwand einer genaueren Bestimmung der Innenbereiche gegen den tatsächlichen Gewinn an Genauigkeit abgewägt werden muss.

Neben der Vorfilterung können auch die Klassifikationsmodelle verbessert werden, vor allem durch eine Verfeinerung und Erweiterung der verwendeten Trainingsdaten.

Die Auswertung der Klassifikation von Baulücken und NVPs hat gezeigt, dass auf Ebene der Bildausschnitte teilweise eindeutig bebaute Flächen als IEP annotiert sind. Dies kommt daher, dass in einigen Kommunen die Annotationen genau den Flurstücksgrenzen folgen und auch bei teils bebauten Flurstücken das gesamte

Flurstück in die GT aufgenommen wird. Die Fenster, die in dem entsprechenden bebauten Flurstücksteil liegen, werden gemeinsam mit dem Rest des Flurstücks als Potenzialfläche annotiert. In anderen Kommunen hingegen werden die unbebauten Teilflächen genauer abgegrenzt. Ein konsistenter Datensatz könnte das Modell in Zukunft verbessern. Um also die Bildfenster mit bebauten Anteilen eines NVPs aus der Positivklasse zu entfernen, könnten die HU-DE geeignet sein. Bei der Erzeugung des Datensatzes für Brachflächen muss dabei aber überprüft werden, inwiefern dabei tatsächlich brachliegende Flächen ausgeschlossen werden, deren Bebauung in diesen Daten noch enthalten ist.

Zusätzlich kann eine Ausweitung des Trainingsdatensatzes um weitere Gebietsflächen potentiell zu einer besseren Qualität des Klassifikationsmodells beitragen, da die aufgrund der Ungleichverteilung betroffenen Flächen der positiven Klasse besser (Verteilung der Datenpunkte mit einer größeren Varianz) in den Daten repräsentiert werden können.

In Ergänzung zu diesen Verbesserungsmöglichkeiten der einzelnen Schritte des entwickelten Ansatzes sind verschiedene methodische Weiterentwicklungen möglich.

Einige der Gruppen von Falschklassifikationen sind durch starke zeitliche Veränderungen gekennzeichnet. Die Verwendung von Bildzeitreihen, beispielsweise aus Satellitenbildern, würde diese Veränderungen widerspiegeln und eine Möglichkeit bieten, die zeitliche Komponente bei der Klassifizierung zu berücksichtigen. Dazu ist eine ausreichende Menge an GT-Daten nötig, in denen beispielsweise Baustellen annotiert sind. Unabhängig von der zeitlichen Veränderung haben Satellitenbilder den Vorteil, dass sie in der Regel aktueller als die DOPs sind. Somit würde ihre Verwendung dazu führen, dass auch aktuellere Änderungen bei der Klassifizierung berücksichtigt werden können. Die Untersuchung der Bildauflösungen zeigte, dass es zwischen der Verwendung der DOPs mit einer Auflösung von 20 cm und Bildern mit einer Auflösung von 2 m nur zu geringen Unterschieden in der Klassifikation kommt. Somit können auch räumlich geringer aufgelöste, aber aktuellere Bilddaten im Kontext der Brachen-Klassifikation einen Mehrwert für den Ansatz darstellen.

Bei der vorgestellten Methode wird zunächst eine klassische GIS-Filterung der Geobasisdaten durchgeführt und anschließend eine Bildauswertung mittels KI. Alternativ dazu können auch die Geobasisdaten KI-basiert ausgewertet werden. Aus den unterschiedlichen Daten können je Flurstück verschiedene Merkmale abgeleitet werden, unter anderem der Bebauungsgrad oder Abstände zur umliegenden Bebauung und zu Verkehrsflächen. Diese Merkmale können genutzt werden, um ein KI-basiertes Klassifikationsmodell zu trainieren, welches zwischen Flächen mit und ohne Potenzial unterscheidet. Erste Versuche hierzu zeigten im Laufe dieser Methodenstudie starke Unterschiede je nach Region, könnten aber bei weiterer Entwicklung ebenfalls zielführend sein.

Literaturverzeichnis

Banko, G.; Weiß, M., 2019: Update gewidmetes, nicht bebautes Bauland - Auswertung von Baulandreserven 2014 und 2017 in Österreich - Technischer Bericht. Wien.

Banzhaf, E.; Netzband, M., 2004: Detecting urban brownfields by means of high resolution satellite imagery. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 25. Jg (B2): 460–466.

BBR – Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (Hrsg.), 2004: Kompass für den Weg zur Stadt der Zukunft - Indikatoren-gestützte Erfolgskontrolle nachhaltiger Stadtentwicklung - Eine Orientierungshilfe für die kommunale Praxis. Bonn.

BBSR – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hrsg.), 2013: Innenentwicklungspotenziale in Deutschland – Ergebnisse einer bundesweiten Umfrage und Möglichkeiten einer automatisierten Abschätzung. Bonn.

BBSR – Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung (Hrsg.), 2016: Studie zur Implementierung einer Innenentwicklungspotenzial-Flächenerhebung in die amtliche Statistik. BBSR-Online-Publikation 02/2016. Bonn.

BBSR – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hrsg.), 2022: Bauland- und Innenentwicklungspotenziale in deutschen Städten und Gemeinden. Bonn.

Berief, K; Pankratz, E., 2012: Erhebungen über das Brachflächenrecycling in Nordrhein-Westfalen. Projektbericht. Herne.

Bundesregierung Deutschland, 2021: Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie Weiterentwicklung 2021 - Kurzfassung. Berlin.

Bundesregierung, 2022: Bundesbaupolitik - Mehr bezahlbare und klimagerechte Wohnungen schaffen. Zugriff: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/wohnungsbau-bundesregierung-2006224> [abgerufen am 08.03.2026].

Chaurasia, A.; Culurciello, E., 2017: Linknet: Exploiting encoder representations for efficient semantic segmentation. *IEEE visual communications and image processing (VCIP)*.

Chen, L.-C.; Zhu, Y.; Papandreou, G.; Schroff, F.; Adam, H., 2018: Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation. *Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV)*: 801–818.

Cianfarani, F.; Abdelkarim, M.; Richards, D.; Kedarisetty, R. K., 2023: Assessing the Urban Vacant Land Potential for Infill Housing: A Case Study in Oklahoma City, USA. *Urban Science*, 7. Jg (4): 101.

Dürrbeck, K.; & Lippl-Seifert, S., 2022: Automatische Extraktion von Brachflächen aus Luftbildern mittels eines neuronalen Netzes. In: Meinel, G.; Krüger, T.; Behnisch, M.; Ehrhardt, D. (Hrsg.): *Flächennutzungsmonitoring XIV. Beiträge zu Flächenmanagement, Daten, Methoden und Analysen. IÖR-Schriften 80*. Berlin: 305–314. Zugriff: <https://doi.org/10.26084/14dfns-p031> [abgerufen am 08.03.2026].

- Ehrhardt, D.; Behnisch, M.; Jehling, M.; Michaeli, M., 2023: Mapping soft densification: a geospatial approach for identifying residential infill potentials. *Buildings and Cities*, 4. Jg.: 193–211. Zugriff: <https://doi.org/10.5334/bc.295> [abgerufen am 08.03.2026].
- Eichhorn, S.; Siedentop, S., 2022: Innenentwicklung in Deutschland - ein Klassifizierungsansatz. In: Meinel, G.; Krüger, T.; Behnisch, M.; Ehrhardt, D. (Hrsg.): *Flächennutzungsmonitoring XIV. Beiträge zu Flächenmanagement, Daten, Methoden und Analysen*. IÖR Schriften 80, Berlin: 139–148. Zugriff: <https://doi.org/10.26084/14dfns-p015> [abgerufen am 08.03.2026].
- Elend, A.; Königer, S.; Müller, B., 2013: Die Plattform Innenentwicklung Wohnen – Erfahrungen des Regionalverbandes FrankfurtRheinMain. In: Meinel, G.; Schumacher, U.; Behnisch, M. (Hrsg.): *Flächennutzungsmonitoring V: Methodik - Analyseergebnisse - Flächenmanagement*. IÖR-Schriften 61. Berlin: 35–42.
- Elgendy, H., 2014: *Gewerbeperspektive Ostwürttemberg - Ergebnisbericht des Projektes - Erhebung und Bewertung der Potenziale und Anforderungen an Gewerbeflächen für eine zukunftsfähige Entwicklung der Städte und Gemeinden*. Herausgeber: Regionalverband Ostwürttemberg. Schwäbisch Gmünd.
- Fan, T.; Wang, G.; Li, Y.; Wang, H., 2020: MA-Net: A Multi-Scale Attention Network for Liver and Tumor Segmentation. *IEEE Access*. 8. Jg.: 179656–179665. Zugriff: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3025372> [abgerufen am 08.03.2026].
- Feltgen, V.; Elgendy, H.; Skoczylas, H.; Zięba-Kulawik, K.; Kopf, X., 2023: *Raum+ Endbericht Siedlungsflächenreserven in Luxemburg 2020/2022*.
- Fina, S.; Weiß, A.; Müller-Herbers, S.; Lanig, S., 2022: Die KFMplus: Integriertes kommunales Flächen- und Ressourcenmanagement. In: Meinel, G.; Krüger, T.; Behnisch, M.; Ehrhardt, D. (Hrsg.): *Flächennutzungsmonitoring XIV: Beiträge zu Flächenmanagement, Daten, Methoden und Analysen*. IÖR-Schriften 80. Berlin: 101–108. Zugriff: <https://doi.org/10.26084/14dfns-p011> [abgerufen am 08.03.2026].
- Gadocha, S.; Spitzer, W.; Deng, Y.; Prinz, T., 2021: GIS-Bausteine für eine automatisierte Bewertung und Simulation der Siedlungsinnenentwicklung. In: Meinel, G.; Krüger, T.; Behnisch, M.; Ehrhardt, D. (Hrsg.): *Flächennutzungsmonitoring XIII. Flächenpolitik – Konzepte – Analysen – Tools*. IÖR Schriften 79. Berlin: 69–78. Zugriff: <https://doi.org/10.26084/13dfns-p007> [abgerufen am 08.03.2026].
- Harig, O.; Hecht, R.; Meinel, G., 2014: Automatisierte Abgrenzung von Innenbereichen auf Grundlage von Geobasisdaten. In: Meinel, G.; Schumacher, U.; Behnisch, M. (Hrsg.): *Flächennutzungsmonitoring VI. Innenentwicklung – Prognose – Datenschutz*. IÖR-Schriften 65. Berlin: 113–120.
- Harig, O.; Hecht, R.; Burghardt, D.; Meinel, G., 2021: Automatic Delineation of Urban Growth Boundaries Based on Topographic Data Using Germany as a Case Study. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10. Jg. (5): 353. Zugriff: <https://doi.org/10.3390/ijgi10050353> [abgerufen am 08.03.2026].
- He, K.; Zhang, X.; Ren, S.; Sun, J., 2015: Deep Residual Learning for Image Recognition. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*: 770–778. Zugriff: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1512.03385> [abgerufen am 08.03.2026].
- Hecht, R.; Meinel, G., 2014: Automatisierte Erfassung von Innenentwicklungspotenzialen auf Grundlage von Geobasisdaten – Möglichkeiten und Grenzen. In: *Flächennutzungsmonitoring VI. Innenentwicklung - Prognose – Datenschutz*. IÖR-Schriften 65. Berlin: 103–112.

Heßler, A.; Weiß, D.; Blinn, M.; Fischer, A.; & Kötter, T., 2021: GIS-Analysen von Flächenpotenzialen zur Innenentwicklung. In *Flächennutzungsmonitoring XIII: Flächenpolitik - Konzepte - Analysen - Tools*. Berlin: 89–100. Zugriff: <https://doi.org/10.26084/13dfns-p009> [abgerufen am 08.03.2026].

Hinteregger, D., 2020: Automatisierte Identifikation von Baulücken und Nachverdichtungspotenzialen im Wohnungsbau. In: Meinel, G.; Schumacher, U.; Behnisch, M.; Krüger, T. (Hrsg.): *Flächennutzungsmonitoring XII mit Beiträgen zum Monitoring von Ökosystemleistungen und SDGs*. IÖR-Schriften 78. Berlin: 129–135. Zugriff: <https://doi.org/10.26084/12dfns-p014> [abgerufen am 08.03.2026].

Hintzen, B.; Petersen, L., 2016: Entwurf eines Potenzialflächenkatasters mit IEP-Erhebungsmethodik in Sachsen-Anhalt. In: Meinel, G.; Förtsch, D.; Schwarz, S.; Krüger, T. (Hrsg.): *Flächennutzungsmonitoring VIII. Flächensparen – Ökosystemleistungen – Handlungsstrategien*. IÖR-Schriften 69. Berlin: 121–128.

Hochreiter, S.; Schmidhuber, J., 1997: Long short-term memory. *Neural computation*. 9. Jg. (8): 1735–1780.

Horenczuk, J., 2021: Xplanung: Bedeutung, Organisation, Mehrwerte, Hemmnisse und Herausforderungen. In: Meinel, G.; Krüger, T.; Behnisch, M.; Ehrhardt, D. (Hrsg.): *Flächennutzungsmonitoring XIII. Flächenpolitik – Konzepte – Analysen – Tools*. IÖR Schriften 79. Berlin: 313–325.

Kleinwächter, D., 2014: Baulücken- und Leerstandskataster – Dienstangebote für niedersächsische Kommunen. In: Meinel, G.; Schumacher, U.; Behnisch, M. (Hrsg.): *Flächennutzungsmonitoring VI. Innenentwicklung – Prognose – Datenschutz*. IÖR-Schriften 65. Berlin: 85–92.

Koroso, N. H., 2023: Urban land policy and urban land use efficiency: An analysis based on remote sensing and institutional credibility thesis. *Land Use Policy*, 132. Jg.: 106827.

Li, K.; Wan, G.; Cheng, G.; Meng, L.; Han, J., 2020: Object detection in optical remote sensing images: A survey and a new benchmark. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 159. Jg.: 296–307.

Long, J.; Shelhamer, E.; Darrell, T., 2015: Fully convolutional networks for semantic segmentation. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*: 3431–3440.

Ma, L.; Liu, Y.; Zhang, X.; Ye, Y.; Yin, G.; Johnson, B. A., 2019: Deep learning in remote sensing applications: A meta-analysis and review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 152. Jg.: 166–177.

Mao, L.; Zheng, Z.; Meng, X.; Zhou, Y.; Zhao, P.; Yang, Z.; Long, Y., 2022: Large-scale automatic identification of urban vacant land using semantic segmentation of high-resolution remote sensing images. *Landscape and Urban Planning*, 222. Jg.: 104384.

Nelson, D., 2005: Remote Sensing Classification of Brownfields in the Phoenix Metropolitan Area. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36. Jg. (8/W27).

Observatoire de l'Habitat du Ministère du Logement. Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg, 2018: Note méthodologique sur l'identification du potentiel foncier et des Baulücken résidentielles. Luxembourg.

Regionalverband Ruhr, 2021: SFM Ruhr 2020 - Siedlungsflächenmonitoring Ruhr - Erhebung der Siedlungsflächenreserven und Inanspruchnahme. Essen.

Ren, S.; He, K.; Girshick, R.; Sun, J., 2015: Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks. *Advances in neural information processing systems*, 28. Jg.

Ronneberger, O.; Fischer, P.; Brox, T., 2015: U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention–MICCAI 2015: 18th International Conference, Munich, Germany, October 5-9, 2015, Proceedings, Part III 18: 234–241.

Shukla, A.; Jain, K., 2020: Automatic extraction of urban land information from unmanned aerial vehicle (UAV) data. Earth Science Informatics, 13. Jg. (4): 1225–1236.

Spitzer, W.; Reithofer, J.; Prinz, T., 2017: Monitoring der Nachverdichtung in der Stadt Salzburg. AGIT Journal Angew. Geoinformatik, 3. Jg.: 383–389.

Vaswani, A.; Shazeer, N.; Parmar, N.; Uszkoreit, J., 2017: Attention is all you need. Advances in neural information processing systems, 30.Jg.

Xu, S.; Ehlers, M., 2022: Automatic detection of urban vacant land: An open-source approach for sustainable cities. Computers, environment and urban system 91: 101729.

Zhao, H.; Shi, J.; Qi, X.; Wang, X., Jia, J., 2017: Pyramid scene parsing network. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition.

Anhang

Tabelle 24
Flächennutzungsdaten zur Auswahl bebauter Gebiete und Einschränkung des Untersuchungsgebiets

Name	Spezifikation	Stärken	Schwächen
Global Human Settlement Layer (GHSL)	Unterscheidung zwischen bebauten und unbebauten Flächen, Bodenauflösung 10 m, Interpolation auf 5-Jahres-Intervalle	Internationale Vergleichbarkeit	geringe Auflösung, nicht immer Fehlerfrei (v.a. bei kleineren Siedlungen)
CORINE Land Cover (CLC)	Aufteilung in 44 Klassen der Landnutzung und Landbedeckung, Mindestkartiereinheit (MKE) 25 ha oder abgeleitet 5 ha, Aktualisierung alle 3 Jahre	Internationale Vergleichbarkeit	-
Urban Atlas (UA)	Landnutzung und Landbedeckung, MKE 0,25 ha in urbanen Gebieten, 1 ha im ländlichen Raum	Internationale Vergleichbarkeit	Nur für urbane Zonen (> 100.000 Einwohner) verfügbar
Digitales Basis-Landschaftsmodell des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems (ATKIS Basis-DLM)	Beschreibung der Landschaft und topographischer Objekte, Detailgrad entspricht Topographischer Karte 1:10.000 / 1:25.000 (für wichtige linienförmige Objekte höher)	Bundesweite Verfügbarkeit	Durch Maßstab nicht alle kleinteiligen Flächennutzungen abgebildet
Digitales Landbedeckungsmodell (LBM-DE)	Aufteilung in CLC-Klassen, MKE 1ha über Kombination von Satellitenbildern (Landbedeckung) und ATKIS (Landnutzung), Aktualisierung alle 3 Jahre	Höhere inhaltliche Auflösung als Basis-DLM	Durch Maßstab nicht alle kleinteiligen Flächennutzungen abgebildet
Tatsächliche Nutzung des Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS TN)	Aufteilung der tatsächlichen Nutzung in 26 Objektarten	Bundesweit einheitliche Erfassung	Zugriff nur in einzelnen Bundesländern möglich, TN kann von beabsichtigter Nutzung abweichen, TN ohne Flurstücksbezug
Landuse (Open Street Map) (OSM Landuse)	durch Nutzer erfasste Landnutzung	Flächendeckend verfügbar	Vollständigkeit und Richtigkeit nicht garantiert
Flächennutzungskartierung (FNK)	je nach Auflösung: Auswahl bebauter Gebiete zur Einschränkung des Untersuchungsgebiets oder Bewertung der baulichen Nutzung Kartierung der tatsächlichen Nutzung, regionale Daten, z. B. für Regionalverband Ruhr: 150 Nutzungsarten	Sehr hohe räumliche und thematische Auflösung	Nur in einzelnen Regionen verfügbar

Quelle: Vision Impulse

Tabelle 25
Daten über die bauliche Nutzung zur Aufteilung des betrachteten Gebiets in die einzelnen Flurstücke und zur Bewertung der baulichen Nutzung

Name	Spezifikation	Stärken	Schwächen
Flurstücksinformation Deutschland (FS-DE)	Georeferenzierte Polygone der Flurstücke nach ALKIS	Deutschlandweiter amtlicher Datensatz	-
Amtliche Hausumringe (HU-DE)	Georeferenzierte Umringspolygone von Gebäudegrundrissen aus amtlicher Vermessung	Deutschlandweiter amtlicher Datensatz	Neubau hat erst verzögert Eingang in die Daten, Zustand nicht erfasst
3D-Gebäudemodelle (LoD2-DE)	3D-Gebäudemodell mit standardisierten Dachformen, Höhengenaugigkeit 1 m	Gebäudehöhe enthalten	Neubau hat erst verzögert Eingang in die Daten, Zustand nicht erfasst
Buildings (Open Street Map) (OSM Buildings)	3D-Gebäudemodell	Bundesweite Verfügbarkeit	Vollständigkeit und Richtigkeit nicht garantiert

Quelle: Vision Impulse

Tabelle 26
Daten mit Angaben zur Nutzung zur Prüfung der Aktivität je Flurstück

Name	Spezifikation	Stärken	Schwächen
Handelsregister, Gewerbeatlas	Verzeichnis der angemeldeten Kaufleute und Unternehmen	Enthalten Zusatzinformationen, die allein aus Geobasisdaten und Luftbildern nicht erkennbar sind	Informationen nur für Gewerbebranchen nutzbar
Einwohnermeldedaten, Zensus	Verzeichnis der angemeldeten Einwohner	Enthalten Zusatzinformationen, die allein aus Geobasisdaten und Luftbildern nicht erkennbar sind	Keine flächenkonkreten Angaben aufgrund von Datenschutz, kleinteilige Datenbeschaffung von Einzelkommunen
Daten von Energie-, Gas-, Wasser- und Stromversorgern oder aus der Abfallwirtschaft (Versorgerdaten)	Nutzerverzeichnis	Enthalten Zusatzinformationen, die allein aus Geobasisdaten und Luftbildern nicht erkennbar sind	Keine flächenkonkreten Angaben aufgrund von Datenschutz, kleinteilige Datenbeschaffung von kommerziellen Anbietern
Georeferenzierte Adressdaten (GA)	Postalische Adressangaben und Verwaltungseinheiten mit Koordinatenangaben	Erforderlich für Zuordnung	Neubau hat erst verzögert Eingang in die Daten, Zustand nicht erfasst

Quelle: Vision Impulse

Tabelle 27
Daten über die beabsichtigte Nutzung zur Auswahl der für Bebauung vorgesehenen Flächen

Name	Spezifikation	Stärken	Schwächen
Flächennutzungsplan (FNP)	Beabsichtigte Bodennutzung für Gemeindegebiet	Flächenkonkrete Angaben zur beabsichtigten Nutzung	Meist nicht maschinenlesbar digitalisiert
Bebauungsplan (B-Plan)	Rechtsverbindliche Festsetzungen der zugelassenen Art und Maß der Nutzung für Teile des Gemeindegebiets	Flächenkonkrete Angaben zur beabsichtigten Nutzung	Meist nicht maschinenlesbar digitalisiert, durch Baulandmobilisierungsgesetz Befreiungen möglich und daher nicht immer relevant

Quelle: Vision Impulse

Tabelle 28
Fernerkundungsdaten zur Identifikation von Brachflächen, Überprüfung der identifizierten Baulücken und NVPs, sowie zur Bewertung der baulichen Nutzung

Name	Spezifikation	Stärken	Schwächen
Digitale Orthofotos (Auflösung in 20 cm)	RGB-NIR, Bodenauflösung 20 cm, Befliegungszyklen zwischen 2 und 5 Jahren	Zugriff in vielen Bundesländern direkt möglich, sonst über BKG	Unterschiedliche ortsabhängige Aktualität, bis zu fünf Jahre alte Bilder
Digitale Orthofotos (Auflösung in 10, 40, 80 cm)	RGB-NIR, Bodenauflösung 10 - 80 cm, Befliegungszyklen zwischen 2 und 5 Jahren	bei DOP10: hohe Auflösung	Geringe Verfügbarkeit
Very High Resolution Multispektralbilder	Multispektral, Bodenauflösung 30 cm - 3 m, keine systematische Wiederholung	-	Räumlich vereinzelte Daten, keine systematische Wiederholung
High Resolution Multispektralbilder	Multispektral, Bodenauflösung > 3 m, teilweise systematische Wiederholung	-	Nur teilweise flächendeckend, nur teilweise aktuell (da nur teilweise systematisch wiederholt)
Satellitenbilder, z.B. Sentinel-2	12 Spektralbänder, Bodenauflösung 10 m für RGB-NIR, 20 m oder 60 m für übrige Bänder, alle 5 Tage	Hohe Aktualität, Zeitreihenauswertung möglich	Geringe räumliche Auflösung
Thermalbilder	Bodenauflösung 30 m		Geringe Auflösung
Lidar	Punktwolke zur 3D-Repräsentation (Bebauung und Vegetation)	Hohe Aktualität möglich	Hoher Erfassungsaufwand

Quelle: Vision Impulse