

GIS-basierte multidimensionale Verfahren zur optimalen Baulandentwicklung im Städtebau - anhand des Beispiels des innerstädtischen Projekts Holsten-Areal in Hamburg

Naumann, Lion Lukas; Nadler, Michael

Veröffentlichungsversion / Published Version

Zeitschriftenartikel / journal article

Empfohlene Zitierung / Suggested Citation:

Naumann, L. L., & Nadler, M. (2022). GIS-basierte multidimensionale Verfahren zur optimalen Baulandentwicklung im Städtebau - anhand des Beispiels des innerstädtischen Projekts Holsten-Areal in Hamburg. *Raumforschung und Raumordnung / Spatial Research and Planning*, 80(2), 202-218. <https://doi.org/10.14512/rur.134>

Nutzungsbedingungen:

Dieser Text wird unter einer CC BY Lizenz (Namensnennung) zur Verfügung gestellt. Nähere Auskünfte zu den CC-Lizenzen finden Sie hier:

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

Terms of use:

This document is made available under a CC BY Licence (Attribution). For more information see:

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

GIS-basierte multidimensionale Verfahren zur optimalen Baulandentwicklung im Städtebau – anhand des Beispiels des innerstädtischen Projekts Holsten-Areal in Hamburg

Lion Lukas Naumann, Michael Nadler

Received: 5 July 2021 ■ Accepted: 20 December 2021 ■ Published online: 14 January 2022

Zusammenfassung

Der weltweite urbane Wachstumstrend ist auch in Deutschland sichtbar, der Druck auf den Immobilienmärkten treibt die Bautätigkeit an die Schwelle des zur Verfügung stehenden Baulandes. Zur Flächenbegrenzung sollen neue Projekte besonders durch Innenentwicklung entstehen, große Wohnraumpotenziale sind hier jedoch meist nur noch auf schwer zu entwickelnden Arealen zu finden. Die im Wechselspiel zwischen Grundstücks- und Immobilienmärkten in Verbindung mit der Multidimensionalität stadtplanerischer Probleme entstandenen Rahmenbedingungen lassen auf eine Notwendigkeit für Stadtplaner und Stadtforscher schließen, effektivere Analyse- und Bewertungsmethoden zu entwickeln. In diesem Beitrag wird daher ein GIS-gestütztes Verfahren zur Optimierung von Baufeldern beschrieben, mit dem potenzielle Baulandflächen im Zusammenhang bewertet und attributiv-räumlich optimiert werden. Hierfür wird eine Fuzzy-Methodik mit einem heuristischen Optimierungsalgorithmus, dem *Parameterized Region-Growing* kombiniert und am Beispiel des Holsten-Areals in Hamburg demonstriert. Dabei können

räumlich kompakte und zusammenhängende hoch bewertete Bauflächen für die Wohnungsbauentwicklung generiert werden, denen städtebauliche Kennwerte wie die Geschossflächenzahl und die realisierbare Bruttogeschossfläche zugewiesen werden. Im Vergleich mit bestehender Planung zeigen sich aufschlussreiche Ergebnisse, etwa in Hinblick auf eine effektivere Ausnutzung guter Mikrolagen, realistischer baulicher Dichtewerte und realisierbarer Flächenkennwerte.

Schlüsselwörter: Eignungsbewertung ■ Landnutzungsoptimierung ■ Fuzzy-Eignungsmodellierung ■ *Parameterized Region-Growing* ■ Entscheidungsunterstützung

GIS-based multidimensional processes for the optimal development of building land in urban planning – demonstrated with the example of the inner-city project Holsten-Areal in Hamburg

Abstract

The global urban growth trend is also evident in Germany and the pressure on the real estate markets is pushing construction activity to the threshold of available building land. To limit urban expansion, additional space is to be created primarily through brownfield development, but here large housing potentials are usually only to be found on sites that are difficult to develop. The framework conditions that have arisen here in the interplay between land and real estate markets in conjunction with the multidimensionality of urban planning problems suggest a need for urban planners and researchers to develop more effective methods. This paper therefore describes a GIS-based method for optimising building sites, which can be used to evaluate sites in context and optimise them attribute-spatially. It combines a fuzzy methodology with a heuristic optimisation algorithm, the *Parameterised Region-Growing*, and

✉ **Lion Lukas Naumann**, Fakultät Raumplanung, Lehrstuhl Immobilienentwicklung, Technische Universität Dortmund, August-Schmidt-Straße 6, 44227 Dortmund, Deutschland lukas.naumann@tu-dortmund.de

Prof. Dr. Michael Nadler, Fakultät Raumplanung, Lehrstuhl Immobilienentwicklung, Technische Universität Dortmund, August-Schmidt-Straße 6, 44227 Dortmund, Deutschland michael.nadler@tu-dortmund.de



© 2022 Naumann; licensee oekom verlag. This Open Access article is published under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

demonstrates it using the example of the Holsten site in Hamburg. It successfully generates spatially compact and coherent, highly valued residential building areas, to which urban development parameters are assigned. Comparisons with existing planning show instructive results, e.g., regarding more effective utilisation of good micro-locations, realistic building density values and realisable area parameters.

Keywords: Suitability assessment ■ Land-use optimization ■ Fuzzy suitability modelling ■ Parameterized region-growing ■ Decision support

1 Städtebauliche Projektentwicklung

Bevölkerungswachstum und Wanderungsgewinne haben auf die Wohnungsmärkte der Ballungsräume Deutschlands in den letzten Jahren großen Druck ausgeübt. Allein zwischen 2014 und 2019 wuchs die Einwohnerzahl der 66 kreisfreien Großstädte um eine Million Menschen (Destatis 2021: 12). Folglich beherrschen steigende Miet- und Kaufpreise die Diskussionen in der Stadtentwicklung, der Mangel an bebaubaren Restflächen bremst die Neubautätigkeit (Fina/Henger/Siedentop 2020: 33), was die Situation auf dem Wohnungsmarkt weiter verschärft. Die wenigen verbliebenen, städtebaulich relevanten Wohnraumpotenziale sind aber nicht selten deswegen noch nicht projektiert worden, weil sie komplexe Entwicklungsrisiken beinhalten.

Die Entwicklung dieser Areale gehört zum Aufgabenfeld der städtebaulichen Projektentwicklung, dessen Ziel die Neu- oder Umnutzung von Flächen auf der Basis städtebaulicher Nutzungskonzepte ist (Köster 2006: 4; Mrosek 2012: 63). Typische Projekte sind Quartiersentwicklungen, Stadtumbau- und/oder Stadterweiterungsmaßnahmen (Köster 2006: 8). Sie weisen gegenüber anderen Projektentwicklungen einige Besonderheiten auf: Neben dem Größenunterschied besitzen sie eine gesamtstädtische Relevanz, was die Auseinandersetzung mit städtebaulichen Fragestellungen wie die Anordnung von Baufeldern, Erschließung, Sichtbeziehungen, Dichte, Höhe, Nutzungsarten und Bauweisen notwendig macht. In Verbindung mit der meist notwendigen Planungsrechtschaffung durch die Bauleitplanung, zahlreichen Interessengruppen und Beteiligten (*stakeholder*), der Grundstücksaufbereitung und Erschließung sowie einer intensiven Auseinandersetzung mit Markt und Standort entstehen lange Entwicklungszeiten, die im Mittel etwa 14 Jahre betragen (Guhl 2018: 81). Nahräumliche Nutzungsmischung ist im Gegensatz zu einzelnen Immobilienprojekten ein wesentlicher Baustein, der begleitend mit der Schaffung städtischer Infrastrukturen und attraktiver öffentlicher Räume urbane Identität schaffen soll (Schütz/Feldmann 2008: 846–847; Mrosek 2012: 62).

Städtebauliche Projektentwicklungen stellen die *Stakeholder* aufgrund des langen Planungshorizonts, der komplexen Zusammenhänge und des Investitionsvolumens vor Herausforderungen, denen nur mit Erfahrung, Weitsicht und Kreativität begegnet werden kann (Schütz/Feldmann 2008: 845). Komplexe Entscheidungen basieren oft auf dem Erfahrungswissen von Stadtplanerinnen und Stadtplanern, das Ignorieren von Komplexität führt zur Dysfunktionalität von Stadträumen sowie unzufriedenen Bewohnerinnen und Bewohnern (Rezayan/Najian 2008). Um einen Teil dieser Entscheidungen zu bewältigen, sind Geoinformationssysteme (GIS) im Einsatz, welche die Aufnahme objektiver Parameter in die Stadtplanungsprozesse versprechen (Wilson 2020: 127). Die verwendeten Analysen sind in der Regel jedoch einfach gehalten und beschränken sich auf die Abfrage von Geometrien wie Längen- und Flächenmessungen. Hintergrund dieser Zurückhaltung könnte die Erwartung sein, dass die Anwendung komplexerer GIS-Analysen die etablierten städtebaulichen Entscheidungsfindungsprozesse verkomplizieren und das angeführte Erfahrungswissen der Experten konterkarieren (Rezayan/Najian 2008).

Doch insbesondere in der ersten Phase von städtebaulichen Projektentwicklungen ist der Analyseaufwand erheblich (Peiser/Hamilton 2012: 78). Sie startet mit der Bestandsaufnahme, die Restriktionen und Potenziale des Standortes erfassen und bewerten soll (Müller/Weber 2002: 58). Entwicklerinnen und Entwickler fassen dabei zunächst die tatsächlichen und rechtlichen Vorgaben sowie erste Nutzungsideen zu einem Entwicklungsszenario zusammen (Müller/Weber 2002: 58; Mrosek 2012: 62; Peiser/Hamilton 2012: 75; Dewberry 2019: 20). Aufgrund der häufig raschen Unumkehrbarkeit von Entscheidungen sollten alle Maßnahmen auf eine belastbare Informationsgrundlage gestellt werden. Auch deshalb ist die erste Phase ein wesentlicher Faktor beim Management städtebaulicher Projekte, da Planungsaspekte frühzeitig erfasst, potenzielle Konflikte unter den *Stakeholdern* vermindert und in Gesprächen mit der lokalen Planungsbehörde frühzeitig abgeklärt werden können (Wieland 2014: 251; Dickinson/Shahab 2021: 4). Bei Innenentwicklungsprojekten werden Risiken aber vielfach unterschätzt oder nicht erkannt (Wieland 2014: 89; Dickinson/Shahab 2021: 6). Ein (häufiger) Wechsel der privatwirtschaftlichen Projektentwickler (Stichwort: *Land Banking*) sollte vor dem Hintergrund einer zügigen Baulandentwicklung vermieden werden. Vorhabenträger und öffentliche Planungsbehörden haben ein gemeinsames Interesse an einer umfassenden Bestandsaufnahme des Plangebietes und seiner Umgebung, um ein Projekt schnellstmöglich in die Umsetzung zu bringen (Müller/Weber 2002: 58). Gerade hierbei können GIS-Analysen äußerst vorteilhaft für die Projektplanung sein. Vermehrte Nutzungsmöglichkeiten ergeben sich beispielsweise aus

öffentlich verfügbaren Geodaten, leistungsstärkeren Datenverarbeitungssystemen sowie räumlichen Analyse- und Simulationsverfahren. Entscheidungsmethoden auf Basis von GIS, so genannte *GIS-Multi-Criteria Decision Analysis* (GIS-MCDA), können dabei die städtebaulichen Entscheidungsfindungsprozesse unterstützen (eine Auflistung der Anwendungen in der Planung findet sich bei Malczewski/Rinner 2015: 67).

Im vorliegenden Beitrag soll aufgezeigt werden, wie eine multidimensionale Flächenprüfung bereits in frühen Phasen der Baulandentwicklung zur systematischen Entwurfsoptimierung eingesetzt werden kann. Er stellt die Arbeitsprozesse vor, die die GIS-MCDA-Methodik auf die Initiierungs- und Konzeptionierungsphase der städtebaulichen Projektentwicklung überträgt. Die Arbeitsprozesse unterstützen nicht nur die Analyse und Bewertung der Flächen, sondern schlagen attributiv-räumlich optimierte Baufelder-Konfigurationen vor und können so der Stadtplanung und der Projektentwicklung bei der Identifizierung flächenbezogener städtebaulicher Entwicklungspotenziale helfen. Das Konzept, das am Beispiel der Fläche des ehemaligen Holsten-Areals in Hamburg demonstriert wird, nutzt „Fuzzy-Logik“ zur Eignungsprüfung und das *Parameterized Region-Growing* (PRG) als Optimierungsmethode für die Lokalisierung von zusammenhängenden Flächen (Baufeldern) mit hoher Eignung für die Wohnbauentwicklung.

Im Folgenden (Kapitel 2) wird dazu zunächst ein Überblick über den Forschungsstand zur (Eignungs-)Bewertung und Optimierung von Landnutzungen gegeben, ehe in Kapitel 3 die für die Untersuchung notwendigen methodischen Grundlagen im Hinblick auf die Anwendung am Fallbeispiel eingeordnet werden. In Kapitel 4 wird das Ergebnis der Untersuchung vorgestellt, im Vergleich mit dem Planungsstand eingeordnet und bezüglich der weiteren Anwendungspotenziale erörtert. Im finalen Kapitel 5 werden schließlich die praktischen Implikationen der Modellanwendung diskutiert, kritisch reflektiert und ein Forschungsausblick vorgestellt.

2 Stand der internationalen Forschung zur räumlich optimierten (Bau)landnutzung

Für eine optimale (Bau)landnutzung ist zunächst eine Bewertung der Landeignung erforderlich. In der Stadtplanung gehört die Abwägung zwischen Alternativen zum Alltag von Entscheidungsprozessen, weshalb erste Entscheidungsfindungsmethoden bereits Ende des 19. Jahrhunderts eingesetzt wurden. Mit dem Aufkommen hochvernetzter und leistungsfähiger Computersysteme in den letzten Jahrzehnten (Künstliche Intelligenz) haben sich die Informationsver-

arbeitungsmöglichkeiten erheblich erweitert, weshalb diese verstärkt herangezogen werden. Sie fußen auf Methoden multikriterieller Entscheidungsanalysen. Dabei identifizieren, priorisieren und evaluieren Entscheidungsträger/-innen für jedes Problem die Attribute aller in Frage kommenden Alternativen. Aufgrund des Raumbezugs stadtplanerischer Aufgaben haben multikriterielle Entscheidungssysteme in einem GIS Vorteile bei der Identifizierung und Alternativenbewertung. Zwar wurden bereits seit den 1990er Jahren GIS-basierte multikriterielle Entscheidungssysteme für die Planung vorgeschlagen (Dueker/Delacy 1990; Abart-Herisz 1999), jedoch zeigen aktuelle Metaanalysen, dass sich erst in den letzten fünf Jahren GIS-basierte multikriterielle Entscheidungssysteme zur Prüfung und Bewertung der Landeignung („land-use suitability“) für immobilien- und städtebauliche Projekte zunehmender Beliebtheit erfreuen (z. B. Natividade-Jesus/Coutinho-Rodrigues/Hengeler Antunes 2007; Nadler/Spieß/Müller 2018; Juszczak/Reith 2020). Um hierbei auch unmittelbar die Subjektivität menschlicher Auffassungen und unsicherer Datenqualitäten zu erfassen, bieten sich unscharfe („fuzzy logik“) Verfahren multikriterieller Entscheidungssysteme an (Nguyen/Chou/Fang et al. 2017; Caprioli/Bottero 2020; Cardone/Di Martino 2021). Sie weisen Vorteile in der Genauigkeit der Entscheidungsfindung auf, da nicht nur die Unschärfe im Entscheidungsprozess gut simuliert werden kann, sondern auch die Regelsyntax verständlicher ist (Mantelas/Prastacos/Hatzichristos et al. 2012: 26; Ustaoglu/Aydinoglu 2019: 174; Ustaoglu/Aydinoglu 2020: 16). Die Eignungsmodelle multikriterieller Entscheidungssysteme berücksichtigen dabei die erforderlichen Attribute für den Standort wie beispielsweise Geländeneigung und Sichtbarkeit, jedoch nicht mögliche räumliche Restriktionen der Nutzungen (z. B. die Anzahl, Form und Größe der erforderlichen Grundstücke).¹ Da hierfür die Attribute immer im räumlichen Kontext ihrer Nachbarn gesehen werden müssen, stellt dies jedoch ein wesentlich komplexeres Berechnungsvorhaben dar. Um auch diese Herausforderung zu meistern, wurde bereits vor nahezu zehn Jahren im Kontext deutscher Sanierungsprojekte (*redevelopment*) von Morio, Schädler und Finkel (2013: 344) empfohlen, die Landeignungsprüfung mit einem heuristischen Optimierungsansatz zu versehen.

Arbeiten im Bereich der Landnutzungsoptimierung („land-use optimization“) befassen sich deshalb mit der

¹ So mag eine Region hochbewerteter Flächen mit einer kreisförmigen Geometrie ungeeigneter sein für die Parzellierung als Grundstücksfläche als eine moderat bewertete Region von rechteckigen Flächen, was jedoch nur im räumlichen Zusammenhang bewertet werden kann.

Tabelle 1 Auswahl aktueller Veröffentlichungen im Bereich der baulichen Landnutzungseignung und/ oder -optimierung

Quelle	Projektarten	Bewertung: Deterministisch/Fuzzy	Methodik Landeignungsprüfung	Optimierungsmethodik
Stewart/Janssen/van Herwijnen (2004)	Land Development	Deterministisch	Keine	Exakt (Goal Programming) und Heuristisch (Genetischer Algorithmus)
Chandramouli/Huang/Xue (2009)	Urban Development	Deterministisch	Keine	Heuristisch (Genetischer Algorithmus)
Cao/Huang/Wang et al. (2012)	Land Development	Deterministisch	Keine	Heuristisch (Genetischer Algorithmus)
Morio/Schädler/Finkel (2013)	Redevelopment	Deterministisch	Keine	Heuristisch (Genetischer Algorithmus)
Chaidee/Pakawangwong/Suppakitpaisarn et al. (2017)	Redevelopment	Deterministisch	Keine	Exakt (Voronoi Diagramm & Force-Directed Graph Drawing)
Nguyen/Chou/Fang et al. (2017)	Land Development	Fuzzy	Fuzzy AHP ^a	Keine
Nadler/Spieß/Müller (2018)	Urban Development	Deterministisch	AHP ^a + Compromise Programming	Keine
Ma/Zhou (2018)	Land Development	Fuzzy	Fuzzy AHP ^a	Optimierung (Linear Programming)
Ustaoglu/Aydinoglu (2019)	Urban Development	Fuzzy	Fuzzy AHP ^a	Keine
Suppakitpaisarn/Ariyarat/Chaidee (2021)	Redevelopment	Deterministisch	Keine	Exakt (Semidefinite Programming graph drawing)
Cardone/Di Martino (2021)	Urban Development	Fuzzy	Fuzzy AHP ^a	Keine

^aAHP = Analytischer Hierarchieprozess, eine Methode zur Organisation komplexer Präferenzentscheidungen

optimalen Aufteilung eines Raumes in eine größere Anzahl von Nutzungsbereichen unter Berücksichtigung von Sachzwängen in bestimmten räumlichen Kontexten (Cao/Huang 2019: 641). Jüngst werden hier auch verstärkt Optimierungen von Nutzungsoptionen mit städtebaulichem/stadtplanerischem Bezug zur Landnutzung durchgeführt, wie Tabelle 1 verdeutlicht.

So stellen beispielsweise Morio, Schädler und Finkel (2013) in ihrem Beitrag einen Ansatz zur Entscheidungsfindung für Redevelopment-Projekte vor, der die aus wirtschaftlichen und Nachhaltigkeitserwägungen optimale Mischung der Nutzungsoptionen Wohnen, Freizeit und Erholung kalkuliert. Hierfür bewerten sie mögliche Nutzungskonfigurationen im Hinblick auf die vorgegebenen Ziele, aus denen schließlich mittels eines genetischen Algorithmus optimale Konfigurationen für im Voraus parzellierte Baufelder gebildet werden. Die meisten Veröffentlichungen mit Optimierungsmethodik verzichten auf eine vorgeschaltete Eignungsprüfung. So wird von einem festen Ursprungsszenario ausgegangen, was jedoch dazu führt, dass der Optimierung nach räumlichen Kriterien gegenüber attributiver Eignung ein sehr großer Wert zugeschrieben wird. Dies spiegelt gegebenenfalls nicht die wahre Präferenz der Entscheidungsträger/-innen wider. Eine Ausnahme bildet die Veröffentlichung von Ma und Zhou (2018), die eine abgewandelte Optimierungsmethode des *Goal Programming* mit einer fuzzyfizierten Landeignungsprüfung kombinieren, um

die optimalen Landnutzungen unter Berücksichtigung ökonomischer und sozialer Zielsetzungen in Hangzhou (China) zu bestimmen. Die Anwendung von exakten Optimierungsmethoden setzt aber immer voraus, dass die Ursprungspeditionen der Erzeugungspunkte wie beispielsweise Parzellen, Grundstücke oder Baufelder mit ihrer Größe bereits bekannt sind, was die Planung in der Initiierungsphase von städtebaulichen Entwicklungen üblicherweise noch nicht abschließend festgelegt hat (Suppakitpaisarn/Ariyarat/Chaidee 2021: 999). Folglich wird eine begrenzte Anzahl von Alternativen bewertet. Diese Methoden eignen sich für eine städtebaulichen Bestandsaufnahme demnach nur begrenzt.

Die Komplexität von Optimierungslösungen mit unbegrenzten Alternativen, wie sie bei der Optimierung großer Flächen üblich ist, macht es jedoch schwierig, eindeutige Lösungen in einer angemessenen Zeit zu berechnen. Heuristische Lösungsansätze versuchen daher mittels eines iterativen Ansatzes, schrittweise generierte Lösungen zu verbessern (Malczewski/Rinner 2015: 145). Für die Landeignung entwarf erstmalig Eastman, Jin, Kye et al. (1995) ein Verfahren der Eignungsheuristik, das auf der Reklassifikation von geordneten Eignungs-Scores mit einer untergeordneten Konfliktlösung zwischen konkurrierenden Landnutzungen basiert, die jeder Parzelle zugeordnet sind. Das Verfahren ermittelt jedoch keine Optimierung nach räumlichen Kriterien wie Form oder Größe (Brookes 1997b: 378; Church/Gerrard/Gilpin et al. 2003: 815).

Dieses Problem nimmt sich die *Parameterized Region-Growing*-Methode vor, die von Brookes (1997a) vorgestellt und mehrfach weiterentwickelt wurde (Church/Gerrard/Gilpin et al. 2003; Vanegas/Cattrysse/van Orshoven 2008). Hierbei werden Zellen anhand nichträumlicher und räumlicher Merkmale iterativ zusammengeführt, bis der Standort auf die vorgegebene Größe angewachsen ist. Die Anwendung hat so gezeigt, dass erfolgreich realistische Regionen nach räumlichen Kriterien generiert werden können (Brookes 1997b: 378; Church/Gerrard/Gilpin et al. 2003). Dabei können bei kürzerer Berechnungszeit sogar ähnliche Lösungen generiert werden wie bei der Anwendung exakter Optimierungsmethoden (Vanegas/Cattrysse/van Orshoven 2008). Die *Parameterized Region-Growing*-Methode ist so bestens geeignet, um auch die Bewertung von Alternativen städtebaulicher Entwicklungen räumlich zu verorten und damit die Instrumente der nicht explizit räumlichen Analysemethoden zu sublimieren (Malczewski/Jankowski 2020: 1259). Dennoch zeigt die Analyse bisheriger Forschungsansätze, dass die Übertragung der Methode auf die genannten Themenfelder bisher nicht explizit erfolgt ist. Insbesondere in Kombination mit MCDA-Eignungsmodellen unter Anwendung der Fuzzy-Logik zur Simulation von Entscheidungsfindung unter Unsicherheit ergibt sich daher erstmals die Gelegenheit zur Untersuchung auf praktische Anwendungspotenziale in der Baulandentwicklung.

3 Methodik der geodatenbasierten (Bau)landnutzungsoptimierung

3.1 (Land-)Eignungsbewertung mittels Fuzzy-Logik-Methodik

Ausgangspunkt dieser Untersuchung ist die Analyse und Eignungsbewertung des Standortes, der an die Bestandsaufnahme bei der städtebaulichen Projektentwicklung angelehnt ist. Hierzu wird das Untersuchungsgebiet in Rasterzellen mit einer Auflösung von einem Meter unterteilt, was die maximale Genauigkeit unter Berücksichtigung der Datenqualität gewährleistet. Diese werden auf Basis von Bewertungskriterien mittels Fuzzy-Logik einer Beurteilung unterzogen. Fuzzy-Logik eignet sich insbesondere im Umgang mit Ungenauigkeiten, die bei der Definition der Klassen und der Messung des Phänomens auftreten. Sie kann Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträgern helfen, unter Berücksichtigung dieser Ungenauigkeiten Entscheidungen zu treffen. Das beschriebene Verfahren konzentriert sich auf die Modellierung der Ungenauigkeiten von Klassengrenzen. Es berücksichtigt dabei die Tatsache, dass die Zugehörigkeit eines Wertes zu einer Bewertungsklasse (z. B. geeignet –

ungeeignet) eine subjektive Entscheidung darstellt und daher Ungenauigkeiten aufweist.

Grundgedanke der Fuzzyifizierung ist die Transformation der ursprünglichen Messwerte in die Möglichkeit, dass sie zu einer definierten Menge gehören. Dabei geht man davon aus, dass der Wert $x \in X$ zu einem bestimmten Grad der Zugehörigkeit einer unscharfen Menge \tilde{A} , dem „fuzzy set“ angehört (Zhao/Zhang/Murayama 2011: 30), die durch eine reelle Zahl angegeben werden kann (gemeinhin im Wertebereich $[0, 1]$) (Nissen 2007: 5). Eine unscharfe Menge \tilde{A} wird dabei durch die folgende Zugehörigkeitsfunktion $\mu_{\tilde{A}}$ beschrieben:

$$\mu_{\tilde{A}} : X \rightarrow [0,1] \quad (1)$$

Mit abnehmenden Werten ist es immer weniger denkbar, dass der ursprüngliche Merkmalswert ein Element dieser Menge ist. Der Wert von 1 besagt also, dass die Zelle sicher in der Menge enthalten ist, der Wert von 0 schließt definitiv aus, dass dieser in der Menge enthalten ist. Die konventionelle (boolesche) Logik, die auf der Zugehörigkeit zu diskreten, trennscharfen Klassen basiert (wahr oder falsch), wird um eine überlagerte Menge der Teilwahrheit erweitert (Zhao/Zhang/Murayama 2011: 30; Malczewski/Rinner 2015: 197).

Zunächst muss grundlegend bestimmt werden, wie die Klassengrenzen im Modell definiert werden. So lässt sich zwischen dem expertenbasierten Modell („Semantic Import“-Ansatz, SI) und der natürlichen Klassifikation unterscheiden. Die Klassengrenzen im erstgenannten Ansatz basieren auf der Einschätzung durch Expertinnen und Experten, im zweiten Ansatz basieren diese auf der lokalen Übereinstimmung mit dem Datensatz (Zhao/Zhang/Murayama 2011: 31) und weist Analogien zur Clusteranalyse auf (Kaufman/Rousseeuw 2005: 164). Da in diesem Beitrag eine lokal begrenzte Analyse angestrebt wird, bei dem Cluster hoher Eignung Vorrang vor der Übereinstimmung von Messwerten mit a priori durch Expertinnen und Experten festgelegten Grenzwerten haben, wird die natürliche Klassifikation angewandt. Sie entspricht dem üblichen Vorgehen bei der Segmentierung von Mikro-Standortanalysen, wo Standorte mit ihrer unmittelbaren Umgebung verglichen werden (vgl. Isenhöfer/Väth/Hofmann 2008: 416). Zudem ist die Klassengrenze nicht durch den aktiven Eingriff der Bewerterinnen und Bewerter manipulierbar.

Fuzzyifizierung findet über eine Transformation der Daten mittels Zugehörigkeitsfunktionen statt. Diese ist so zu wählen, dass sie in der Form möglichst die Realität abbildet (Zhao/Zhang/Murayama 2011: 31). Gängige lineare Zugehörigkeitsfunktionen sind beispielsweise die Dreiecks- oder Trapezfunktion. Im vorliegenden Beitrag werden die nichtlinearen Zugehörigkeitsfunktionen „Fuzzy Small“

(kleinere Messwerte erhöhen die Zugehörigkeit) und „Fuzzy Large“ (größere Messwerte erhöhen die Zugehörigkeit) gewählt. Beide Zugehörigkeitsfunktionen haben für die Untersuchung aufgrund ihrer Transformationskurve den Vorteil, dass bei ungünstigen Messwerten unter dem arithmetischen Mittel die Zugehörigkeitsfunktion stärker abfällt als bei einer linearen Transformation.

Die Funktionen (2) (Fuzzy Small) und (3) (Fuzzy Large) transformieren die Messwerte x wie folgt:

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{f_2}\right)^{f_1}} \quad (2)$$

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{f_2}\right)^{-f_1}} \quad (3)$$

f_1 bestimmt die Steilheit der Kurve der Zugehörigkeitsfunktion und f_2 den Mittelpunkt mit dem Fuzzy-Wert 0,5. Ersteres wird auf 5 festgelegt, was einer genau mittigen Steigung entspricht, der Mittelpunkt wird auf das arithmetische Mittel des Wertebereichs der Messwerte definiert.

Nach der Transformation erfolgt eine Überlagerung der Attribute zu den Zielkategorien und zur Gesamteignung. Sie ist notwendig, um die Bewertung einzelner Attribute zu einem Gesamteignungsraster zu aggregieren. Dies geschieht durch die Vereinigung mittels Regeln gemäß Definition eines Regelwerks, der sogenannten Fuzzy-Überlagerung. Sie drückt die Beziehung der transformierten Attribute zueinander aus. Die Basisoperatoren bei der Überlagerung unscharfer Mengen sind Vereinigung und Durchschnitt. Ersteres gibt die größten Werte für die Zugehörigkeit an. Auf das Modell bezogen würde dies beispielsweise bedeuten, dass die Überlagerung einen hohen Eignungswert ausgibt, wenn mindestens ein Kriterium Teilmenge eines als hoch betrachteten Wertes ist, selbst wenn die anderen niedrig sind. Der Durchschnitt entspricht dem Minimalwert der vereinigten Werte. Die hieraus resultierende größere Streuung der Bewertung bietet sich für die Überlagerung zu den Zielkategorien in diese Analyse an, weil beim Vereinigungsverfahren sonst ein Großteil der Flächen hohe Eignungswerte erhalten würde (Chen/Hwang/Hwang 1992: 49-52). Neben den Basisoperatoren gibt es sogenannte mittelde/kompensatorische Operatoren, die einen Ausgleich unter den Mengen herstellen können. Operatoren wie Fuzzy-Gamma führen ein Kompensationsparameter (γ) im Wertebereich $[0, 1]$ ein, wobei $\gamma = 0$ keine Kompensation und $\gamma = 1$ eine vollständige Kompensation darstellt:

$$\mu(x) = (1 - \text{Produkt}(1 - \mu(x_1), \mu(x_2) \dots \mu(x_n)))^\gamma \cdot (\text{Produkt}(\mu(x_1), \mu(x_2) \dots \mu(x_n)))^{1-\gamma} \quad (4)$$

Fuzzy-Gamma ist das mit Gamma potenzierte Produkt

aus dem Fuzzy-Produkt (erste Zeile der Gleichung 4) und der als Fuzzy-Summe transformierten Werte (zweite Zeile der Gleichung 4), bildet also eine Kompromisslösung aus diesen beiden Transformationen. Wie sich empirisch gezeigt hat, eignen sich Kompensatoren besser zur Nachbildung des menschlichen Präferenzverhaltens (Nissen 2007: 12–13). So kann beispielsweise ein Standort auch für eine Wohnbebauung geeignet sein, wenn eine schlechte Anbindung mit dem Individualverkehr durch eine gute ÖPNV-Anbindung kompensiert wird. In diesem Modell wird daher der Gamma-Operator für die Kombination der Kategorien zum Gesamteignungsraster genutzt. Aufgrund der vielen Zielkategorien wird ein γ von 0,8 gewählt, was erhöhte kompensatorische Effekte zwischen den Gruppen erlaubt.

3.2 (Land-)Nutzungsoptimierung über den Parameterized-Region-Growing-Algorithmus

Das mittels Fuzzy-Überlagerung entstandene Gesamteignungsraster bildet im Untersuchungsraum mit einer Skala von 0 bis 1 die Möglichkeit ab, dass dieser sich gemäß den Bewertungskriterien für eine Wohnbebauung eignet. Es beachtet jedoch nicht die räumlichen Anforderungen bzw. Vorgaben an die Standorte möglicher Baufelder wie beispielsweise die gewünschte Größe oder Form. Es bedarf also eines weiteren Schrittes, um die räumlichen Anforderungen mit den Attributanforderungen zu kombinieren und hieraus ‚optimale‘ entwickelbare Baufelder („land subdivisions“) zur Wohnnutzung abzuleiten. Hierzu wird der *Parameterized Region-Growing-Algorithmus* von Brookes (1997b) verwendet. Mittels heuristischer Algorithmen wird iterativ in einem annehmbaren Zeitrahmen versucht, ein ‚optimales‘ Resultat im Hinblick auf ein vorgegebenes Gütemaß zu finden. Sie garantieren keine fehlerfreie Lösung, können in der Regel jedoch sinnvolle Ergebnisse hervorbringen, insbesondere wenn es die Komplexität räumlicher Optimierungsprobleme erschwert, jede Lösung mithilfe der klassischen mathematischen Programmierung zu bewerten. *Parameterized Region-Growing* (PRG) ist dabei eine Fusion zweier Ideen: Zum einen wird durch ein Zelleignungswachstum („simple Region-Growing“, SRG) iterativ die am besten geeignete Nachbarzelle hinzugefügt (bei gleicher Eignung von zwei oder mehr Zellen wird diejenige gewählt, die dem Ausgangspunkt am nächsten liegt). In dieser Untersuchung ist das Fuzzy-Gesamteignungsraster die Grundlage für das Zelleignungswachstum. Zum anderen werden mit einer räumlichen Regionseignung („Parameterized Shape-Growing“, PSG) der Abstand und die Richtung der Zelle zur Ausgangszelle mit einem *Score* bewertet. Hierbei wird der gleiche iterative Prozess verwendet wie beim *simple Region-Growing*. Dieser basiert aber

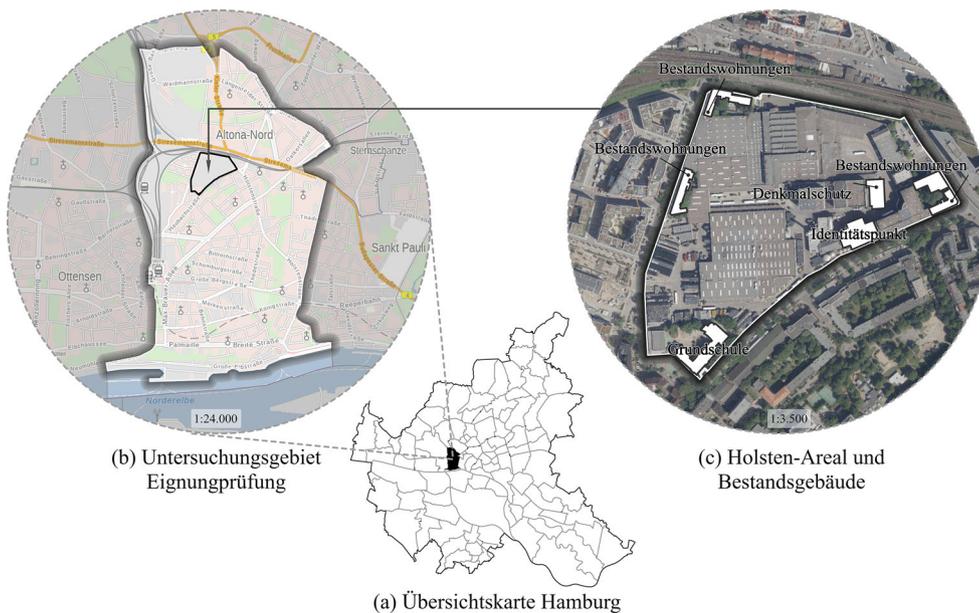
auf einer räumlichen Eignungsbewertung, die durch die Länge und die Richtung zur Ausgangszelle bestimmt wird. *Parameterized Shape-Growing* beginnt mit der geeignetsten Nachbarzelle in Bezug auf den *Score* und addiert iterativ angrenzende Zellen, die in jedem Schritt des Verfahrens neu bewertet werden (Brookes 1998: 96). Der PRG-Algorithmus berechnet schließlich aus dem gewichteten Mittelwert der *Scores* von *simple Region-Growing* (SA_i) und *Parameterized Shape-Growing* (SS_i) den Gesamtwert der i -ten Zelle ST_i . Diese ergibt sich also aus einem Kompromiss aus dem Beitrag der Zelle zur Aufrechterhaltung der gewünschten Gestalt (z. B. Rechteck oder Kreis) und ihres attributiven Eignungswertes:

$$ST_i = (w_1 \times SA_i) + (w_2 \times SS_i) \quad (5)$$

Hierbei stehen SA_i und SS_i für die *Scores* aus *simple Region-Growing* und *Parameterized Shape-Growing*, w_1 und w_2 sind Gewichtungsfaktoren für den *Trade-off* zwischen SA_i und SS_i (Brookes 1997b: 381; Malczewski/Rinner 2015: 148). In der Fallbeispielanwendung wird eine 30:70-Gewichtung zugunsten der räumlichen Übereinstimmung des PSG-*Scores* gewählt. Der Wachstumsprozess stoppt, wenn die Region auf die gewünschte Größe angewachsen ist. Regionen sind Gruppen von zusammengehörigen Zellen ähnlicher Werte. In dieser Untersuchung stellen die Regionen die Baufelder für die städtebauliche Projektentwicklung dar.

Die Größe, Grenzkonfiguration, Ausdehnung und Orientierung an einer idealen Form der Baufelder werden a priori festgelegt, auch ein Verfahren zum Eliminieren von Löchern in den Baufeldern ist im Algorithmus eingebaut (Brookes 1997b: 375). Das Wachstum der Baufelder auf der Fläche des Areals erfolgt dabei sinnvollerweise rechteckig, um die Parzellenform zu erhalten. Die zulässige Minimalfläche jeder Region beträgt 3.000 m², zwischen denen ein Abstand von mindestens 15 Metern vorgeschrieben ist. Die Maximalgröße beträgt 7.000 m², was in etwa der Größe eines großen Baufeldes zur (Hochbau)projektentwicklung entspricht. Mit diesen Restriktionen ergeben sich bei zwei Drittel Gesamtlächenausnutzung der 8,7 ha großen Fläche im Mittel rund zwölf Baufelder ($(2/3 * 8,7 \text{ ha} / ((0,3 \text{ ha} + 0,7 \text{ ha}) / 2))$).

Der Wachstumsprozess kann theoretisch für jeden Zellwert durchgeführt werden, jede Zelle auf dem Areal ist ein potenzieller Ausgangspunkt. Da dies aber die Verarbeitungszeit am Rechner potenzieren würde, muss über eine Evaluierungsmethode eine Präferenz für die Ausgangspunkte angegeben werden. Sie kann auf der Grundlage einer Eignungsstatistik (z. B. höchste Durchschnittswerte) oder einer räumlichen Anordnung der Zellen (größte Kerngebietszone) festgelegt werden. In der Untersuchung werden die höchsten Fuzzy-Eignungswerte als Ausgangspunkt für das Wachstum der Baufelder verwendet (in diesem Fall 12 Ausgangszellen für die 12 Baufelder).



Datenlizenz Deutschland – Digitale Verwaltungsgrenzen Hamburg – Version 2.0; LGV Hamburg, Maxar, Microsoft

Abbildung 1 Verortung des Areals in (a) Hamburg, (b) in Altona und (c) zu erhaltenden Bestandsgebäuden

Tabelle 2 Datengrundlagen

Kategorie Indikatoren	Datengrundlagen	Analysemethode	Quelle	Fuzzy-Zugehörigkeitsfunktion	Zeitpunkt der Datenerhebung
Fußläufige Erreichbarkeit					
Kita	Kita-Einrichtungen Hamburg	Netzwerkanalyse Fußgänger	Geoportal Metropolregion Hamburg	Small	2017
Grundschule	Grundschulen Hamburg	Netzwerkanalyse Fußgänger	Geoportal Metropolregion Hamburg	Small	2017
Lebensmittelhändler	Supermarkt Hamburg	Netzwerkanalyse Fußgänger	Geoportal Metropolregion Hamburg	Small	2020
Grünfläche	Parkanlagen Hamburg	Netzwerkanalyse Fußgänger	Geoportal Metropolregion Hamburg	Small	2017
Haltestelle	HVV-Fahrplandaten (GTFS)	Netzwerkanalyse Fußgänger	Transparenzportal Hamburg	Small	2020
Sportstätte	Stammdaten Hamburger Sportstätten	Netzwerkanalyse Fußgänger	Geoportal Metropolregion Hamburg	Small	2020
ÖPNV-Anbindung					
Flughafen	Eigene Verortung	Netzwerkanalyse Transit-Modell	Eigene Verortung	Small	2020
Medizinische Versorgung	Deutsches Krankenhausverzeichnis	Netzwerkanalyse Transit-Modell	Geoportal Metropolregion Hamburg	Small	2017
Fernbahnhof	Eigene Verortung	Netzwerkanalyse Transit-Modell	Eigene Verortung	Small	2020
Kulturelle Einrichtung	OpenStreetMap: arts_centre, artwork, attraction, museum, theatre	Netzwerkanalyse Transit-Modell	OpenStreetMap	Small	2020
Anbindung des motorisierten Individualverkehrs					
Fahrtzeit zur Autobahn	Verkehrsinfrastruktur Hamburg	Netzwerkanalyse Auto-Modell	Geoportal Metropolregion Hamburg	Small	2019
Entfernung Magistrale	Magistralen Bauforum	Entfernungsakkumulation	Geoportal Metropolregion Hamburg	Small	2017
Geländeeigenschaften					
Geländeneigung	Digitales Geländemodell (DGM1)	Neigungsanalyse	Transparenzportal Hamburg	Small	2020
Versickerungspotenzial	Versickerungspotenzialkarte (VPK)	Klassifizierung Versickerungspotenzial	Geoportal Metropolregion Hamburg	Large	2018
Nächtliche Lärmimmissionen Verkehr	Lärmkarten Hamburg	Überlagerung mit Lärmkartierungen	Geoportal Metropolregion Hamburg	Small	2018
Sichtbarkeit Bahnschienen	Geo-Streckennetz DB, DGM1	Sichtfeldanalyse	Deutsche Bahn (DB)	Small	2019
Vorhandene verkehrliche Erschließung	Inspire Verkehrsnetze	Entfernungsakkumulation	Geoportal Metropolregion Hamburg	Small	2017
Verschattung Bestandsgebäude	3D-Stadtmodell LoD2-DE Hamburg	Sonnenschattenhäufigkeit	Geoportal Metropolregion Hamburg	Small	2020

Tabelle 2 (Fortsetzung)

Kategorie Indikatoren	Datengrundlagen	Analysemethode	Quelle	Fuzzy-Zugehörigkeitsfunktion	Zeitpunkt der Datenerhebung
Planungsrecht					
Gebäudehöhe	3D-Stadtmodell LoD2-DE Hamburg	Geostatistische Interpolation: Areal Interpolation	Transparenzportal Hamburg	Large	2020
Grundflächenzahl (GRZ)	Xplanung: Baugebiets-TeilFlaeche	Geostatistische Interpolation: Areal Interpolation	Transparenzportal Hamburg	Large	2020
Geschossflächenzahl (GFZ)	Xplanung: Baugebiets-TeilFlaeche	Geostatistische Interpolation: Areal Interpolation	Transparenzportal Hamburg	Large	2020

3.3 Forschungsdesign auf dem Holsten-Areal in Hamburg

Der Ansatz wird anhand der ehemaligen Holsten-Brauerei in Hamburg demonstriert. Das Areal befindet sich im Stadtteil Altona-Nord, angrenzend an die Altonarer Altstadt (vgl. Abbildung 1a). Die Brauerei verlagerte die Produktion 2019 weiter aus der Kernstadt heraus nach Hamburg-Hausbruch. Auf der 8,7 ha großen Planfläche in zentraler Lage soll, angrenzend an das im Osten neu entstandene Stadtquartier Mitte Altona, ein neues städtebauliches Projekt entstehen. 2016 verständigten sich der Eigentümer Carlsberg Deutschland mit der Stadt- und Bezirksverwaltung in einem *Letter of Intent* auf Planungsziele, die auf zirka 160.000 m² Bruttogrundfläche (BGF) überwiegend Wohnnutzungen und einen Anteil von 25.000 m² für verschiedene Gewerbeflächen (Büros, Hotel, Einzelhandel, Gastronomie) vorsehen. 10 Prozent der Fläche sind für Gemeindebedarf, weitere 10 Prozent für Parkanlagen reserviert.

Ein städtebaulich-freiraumplanerischer Wettbewerb fand 2017 statt. Nach nun insgesamt vier Eigentümerwechseln wurde der Baubeginn laut aktuellem Entwickler, der Consus AG, auf das Jahr 2021 terminiert.² Das vorliegende Fallbeispiel ist insofern ein typisches Beispiel für die Problematik von Akteurwechseln, mit denen Kommunen in der Zusammenarbeit mit privatwirtschaftlichen Entwicklungsunternehmen aufgrund der Problematik des *Land Banking* in deutschen Großstädten oft konfrontiert sind. Ein Satzungsentwurf für den Bebauungsplan liegt mittlerweile vor und wird beschlossen, sobald sich die Parteien im Rahmen eines städtebaulichen Vertrags über die Ziele der Entwicklung rechtsverbindlich einigen.

Der Suchraum für die Entscheidungsalternativen der Landeignungsprüfung und der Verortung der Baufelder

zur optimalen Landnutzung ist unterschiedlich, da die Eigenschaftsprüfung auch die Stadtteile Altona-Nord und Altona-Altstadt (54,2 ha; 7.330.728 Zellen; vgl. Abbildung 1b) berücksichtigt. Die Optimierung findet nur noch auf dem Holsten-Areal statt, wobei auf dem Gelände befindliche Gebäude, bei denen aus verschiedenen Gründen (z. B. Denkmalschutz) keine Neubebauung stattfinden kann (vgl. Abbildung 1c), ausgenommen sind. Zur Generierung der Fuzzy-Landeignung für Wohnbauflächen werden Attribute aus den fünf Zielkategorien erfasst, die in Tabelle 2 aufgeführt sind und im Folgenden erläutert werden.

Die Auswahl der Zielkategorien erfolgte aufgrund der im *Letter of Intent* vereinbarten, überwiegenden Wohnnutzung nach Standortpräferenzen spezifisch für diese Kategorie. Grundsätzlich eignet sich die Methodologie aber auch für andere Nutzungen wie etwa Einzelhandel, sofern eine Anpassung der Zielkategorien erfolgt. Im Wohnbereich wird die Erreichbarkeit von Infrastrukturen als essenzieller Faktor bei der Bewertung von Entwicklungen angesehen (Peiser/Hamilton 2012: 78; Alda/Hirschner 2016: 84). Die Auswahl der Einrichtungen und Verkehrsträger erfolgte dabei in Anlehnung an Nadler, Spieß und Müller (2018: 448) und berücksichtigt aufgrund von Untersuchungen zu Nutzerpräferenzen im Wohnbereich auch die Erreichbarkeiten von Nahversorgung, Naherholung, medizinischer Versorgung und Freizeitnutzungen (LBS 2017: 71). Als Datengrundlage zur Analyse der fußläufigen und ÖPNV-Anbindung wird mittels eines frei verfügbaren *General Transit Feed Specification (GTFS)-Datasets* des Hamburger Verkehrsverbundes (HVV) ein multimodales Netzwerk-Modell für ÖPNV- und Fußwege erstellt. Der motorisierte Individualverkehr wurde mittels des Netzwerk-Modells des ArcGIS-Routing-Services ermittelt.

Die Geländeeigenschaften subsumieren Merkmale, die notwendigerweise zur Bebaubarkeit des Geländes hergestellt werden müssen (Johnson 2008: 7). Hierbei werden Landmerkmale auf physisch-technische Eignung als Baugebiet untersucht. Die Analyse von Neigung und Topogra-

² <https://www.consus.ag/projektentwicklung/projekte/projekte-hamburg/holstenquartier-hamburg> (11.11.2021).

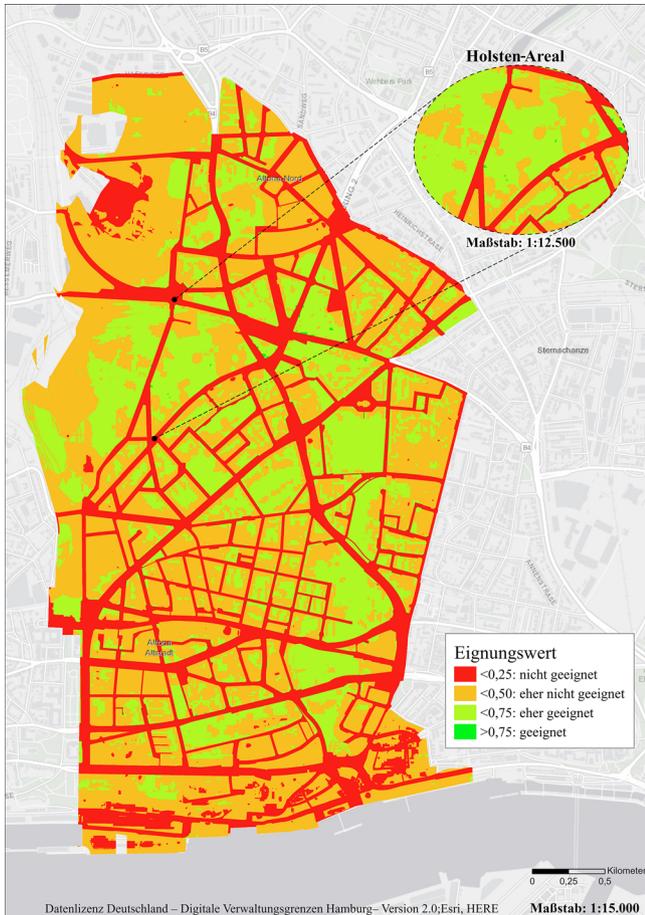


Abbildung 2 Unschärfe Gesamtbewertung der Landeignung im Untersuchungsraum

phie spielt dabei eine wichtige Rolle (Johnson 2008: 11; Peiser/Hamilton 2012: 78; Dewberry 2019: 153). Ebenso sollte aber die Beschaffenheit des Bodens beachtet werden, da diese die Baukosten beeinflussen kann, beispielsweise durch zusätzliche Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen im Gebiet (Johnson 2008: 9; Dewberry 2019: 169).

Nicht zuletzt sollten Planungsansätze danach streben, den Nutzen von Blickbeziehungen und visuellen Auswirkungen zu maximieren (Johnson 2008: 19; Wieland 2104: 165). Hierbei sind gerade die Blickbeziehung und die Verschattung durch den Gebäudebestand entscheidend. Eine bestehende verkehrliche Erschließung kann weiterhin die Kosten positiv beeinflussen. Auch die frühzeitige Auseinandersetzung mit dem Planungsrecht ist für Projekte essentiell (Alda/Hirschner 2016: 84; Dewberry 2019: 41). Dieses sollte aus der Sicht des Entwicklungsträgers möglichst viel Fläche erlauben und sich zur Genehmigung der Planung nach Art und Maß in die Umgebungsbebauung einfügen. Aus dem Planungsrecht der Umgebungsbebauung werden dazu die städtebaulichen Dichtekennwerte Grundflächenzahl (GRZ) und Geschossflächenzahl (GFZ) ebenso

wie die Gebäudehöhen abgeleitet und in der Landeignungsprüfung bzw. in der folgenden Landnutzungsoptimierung erfasst. Die erforderlichen Daten hierfür stammen aus dem XPlanungs-System von Hamburg, einem standardisierten und maschinenlesbaren Datenaustauschformat für Planungsdaten (Leitstelle XPlanung/XBau 2020: 6). Grundlage für die Beurteilung waren die Angaben aus den Polygonen der Baugebietsteilflächen. Die Übertragung der Planungswerte auf die nicht beplanten Gebiete (z. B. das Untersuchungsgebiet Holsten-Areal) erfolgte mittels der *Areal-Interpolation*-Methode. Bei dieser geostatistischen Interpolationsmethode werden Schätzungen von einer Ausgangsmenge von Polygonen zu einer überschneidenden, aber nicht deckungsgleichen Menge von Zielpolygonen gebildet (Krivoruchko/Gribov/Krause 2011: 19). So lassen sich Flächenattribute simulieren, die durch die Bestandsparameter bedingt werden (in dieser Untersuchung Gebäudehöhen und -dichtewerte wie GRZ und GFZ).

4 Diskussion über den erreichbaren Mehrwert des Optimierungsmodells für die städtebauliche Projektentwicklung

4.1 Ergebnisse der (Bau)landleistungsbewertung

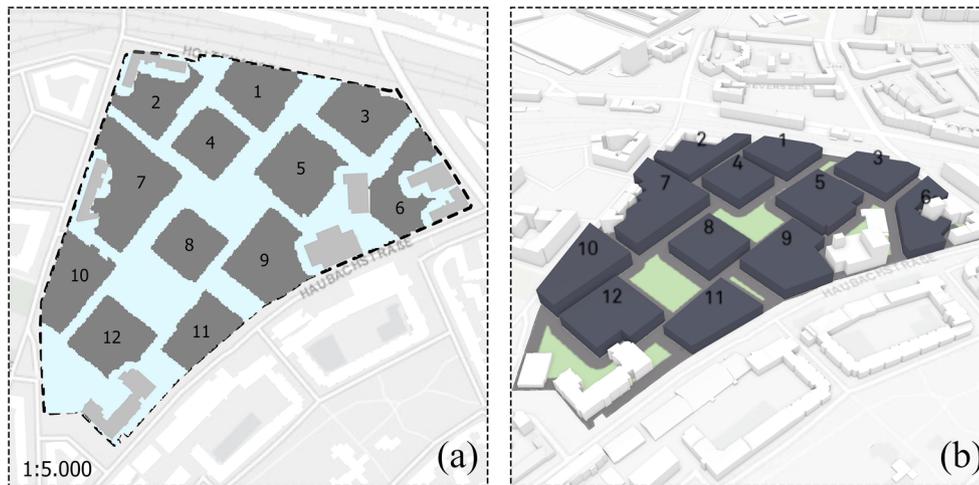
Die räumliche Verteilung der unscharfen Landeignungsbewertung über alle Attribute der Tabelle 2 inklusive der entsprechenden Überlagerung der Zugehörigkeitsfunktionen wird in Abbildung 2 dargestellt. Diese ergibt ein recht heterogenes Gesamtbild, bei dem kleinräumige Cluster hoher und niedriger Eignung zu erkennen sind. Die Verteilung entspricht einer leicht rechtsschiefen annähernden Normalverteilung und liegt im Mittel bei 0,45, was impliziert, dass die meisten untersuchten Zellen eher nicht den im Untersuchungsansatz gestellten Anforderungen an Wohnbauflächen entsprechen.

Etwa 32,1 Prozent der Zellen weisen eine Eignung über 0,5 auf (ohne Ausschlussflächen wie Straßen) und sind daher als eher geeignet für eine Bebauung zu sehen. So gut wie keine Zelle ist als geeignet bewertet worden (0,02%). Die als eher geeignet bewerteten Zellen finden sich hauptsächlich in Altona-Nord, entlang einer Parkstruktur zwischen dem Wohlers Park und dem Emil-Wendt-Park im Osten sowie im Bereich des später fokussiert zu betrachtenden Holsten-Areals. Lediglich 2,5 Prozent der nicht ausgeschlossenen Flächen weisen einen Wert von unter 0,25 auf, was eine Eignung im Modell ausschließt. Diese Flächen konzentrieren sich stark in einem Gewerbegebiet im nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes sowie an der Elbe im

Süden. Die aktuelle Bodennutzungskategorie der Grünflächen schneidet aufgrund der guten Erreichbarkeit und der Geländeeigenschaften (flache Topographie, Sickerfähigkeit, geringe Verschattung) mit einem Mittelwert von 0,44 am besten ab. Die als Gewerbegebiet ausgewiesenen Flächen haben mit 0,37 im Mittel in etwa die gleiche Eignung wie die Wohnflächen, die bei 0,36 liegen. Hiernach folgen die gemischten Bauflächen und Flächen für den Gemeinbedarf (im Mittel: 0,32 bzw. 0,30).

Das aktuell als gewerbliche Fläche festgesetzte Holsten-Areal schneidet im Durchschnitt mit 0,51 („eher geeignet“) etwas besser ab, mit einigen Ausreißern nach oben und un-

ten (Standardabweichung = 0,11). Es hat also eine grundsätzlich hohe Bedeutung als künftige Wohnbaufläche für den Stadtteil. Die schlecht bewerteten Flächen befinden sich besonders im Nordosten nahe der Bahnschienen, höher bewertete Flächen tendenziell im Süden und Südwesten. Hier von ausgenommen ist die Landfläche rund um die Grundschule im äußersten Süden des Areals, die eine schlechte Eignung besitzt.



Datenlizenz Deutschland – 3D-Stadtmodell LoD2-DE Hamburg – Version 2.0; Esri, HERE, Garmin, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS user community; LGV

Abbildung 3 Ergebnis der generierten Baufelder mit *Parameterized Region-Growing* (a) sowie Modellierung der Höhenentwicklung (b)

Tabelle 3 Zusammenfassende Darstellung der Merkmale der aus der Landnutzungsoptimierung erzeugten Baufelder

Attributive und geometrische Eigenschaften										Städtebauliche Kennwerte				
ID	Mittelwert ^a	Summe ^a	Median ^a	Max ^a	Min ^a	Kernfläche (m ²)	Kernsumme ^a	Kantenmenge	Größe (m ²)	GRZ	GFZ	Höhe	Geschosse	BGF (m ²)
0	Keine Baufläche								41.080					
1	0,48	1.824	0,52	0,64	0,34	3.440	1.672	1,19	3.735	0,6	2,1	14,4	4	7.753
2	0,44	1.487	0,38	0,60	0,28	2.978	1.311	1,49	3.337	0,7	3,0	12,8	6	9.944
3	0,35	1.449	0,34	0,46	0,31	3.835	1.327	1,17	4.160	0,8	2,1	12,6	5	8.606
4	0,55	1.838	0,55	0,56	0,37	3.049	1.674	1,14	3.327	0,7	2,6	15,0	5	8.682
5	0,45	2.264	0,48	0,64	0,31	4.591	2.086	1,21	4.967	0,8	2,0	13,5	4	10.155
6	0,53	1.990	0,46	0,71	0,30	3.301	1.741	1,72	3.714	0,9	2,1	12,4	5	7.659
7	0,58	3.852	0,60	0,66	0,40	6.080	3.550	1,43	6.559	0,8	3,0	17,3	6	19.677
8	0,66	2.209	0,64	0,73	0,51	3.056	2.016	1,13	3.378	0,8	2,8	15,3	5	9.371
9	0,63	3.130	0,63	0,74	0,58	4.586	2.884	1,22	4.897	0,8	1,9	14,5	4	9.226
10	0,59	2.465	0,62	0,74	0,41	3.794	2.240	1,31	4.187	0,7	3,0	18,3	6	12.499
11	0,57	1.917	0,61	0,71	0,40	3.024	1.736	1,22	3.318	0,7	1,8	12,6	5	5.937
12	0,63	2.620	0,62	0,74	0,55	3.820	2.403	1,18	4.139	0,7	2,5	15,2	5	10.180

Anmerkung: Die in der Überschrift mit a markierten Zellen beziehen sich auf die Werte der Fuzzy-Gesamteignung. Die maximal ausnutzbare Bruttogeschossfläche (BGF) ergibt sich aus dem Produkt der Baufeldgröße und der Geschossflächenzahl (GFZ).

4.2 Ergebnisse der (Bau)landnutzungsoptimierung

Auf der Basis dieses lokal erzeugten Eignungsrasters erfolgte die Generierung der Wohnbaufelder auf dem Gelände mit dem Optimierungsalgorithmus *Parameterized Region-Growing*. Das Ergebnis und die dreidimensionale Darstellung der Baufelder in Verbindung mit aus der Umgebung interpolierten städtebaulichen Kennwerten können Abbildung 3 und Tabelle 3 entnommen werden. Um unerwünschte Artefakte in der Geometrie zu entfernen, erfolgte eine Normalisierung der Flächen mittels Glättung und Winkeltreue.

Es entstehen zwölf Baufelder, die sowohl eine ähnliche Gesamtbewertung als auch ähnliche Größen und Formen aufweisen. Die durchsichtig dargestellten Flächen (ID 0) gehören keiner Region bzw. keinem Baufeld an und können beispielsweise zur verkehrlichen Erschließung oder als Freiflächen genutzt werden. Der Median der Eignungsbewertung der Baufelder liegt zwischen 0,34 (Baufeld 3) und 0,64 (Baufeld 8). Die Gesamtsumme der Eignungswerte schwankt zwischen 1.449 (Baufeld 3) und 3.852 (Baufeld 7), was sich unter anderem aus der unterschiedlichen Größe der Baufelder ergibt (0,3 ha bis 0,6 ha). Die Kernsumme³ ist dabei stets niedriger als die Gesamtsumme der Eignungswerte innerhalb der Felder, die Flächen sind also kumulativ geeigneter als ihre Umgebungszellen. Auch die Kantenmenge, die als Verhältnis zwischen Umfang des Baufelds zum Umfang eines Kreises mit derselben Fläche ausgedrückt wird,⁴ ist für alle Baufelder nahe 1, was eine kompakte Form der Bauflächen anzeigt. Es lässt sich daher zunächst ungeachtet planerischer Implikationen resümieren, dass die Generierung von attributiv und räumlich gleichartigen Baufeldern aus den Eignungswerten erwartungsgemäß funktioniert hat.

Die Verschneidung mit den bereits für die Fuzzy-Eignungsbewertung interpolierten Höhe- und städtebaulichen Dichtewerten ermöglicht eine Orientierung an möglichen städtebaulichen Kennwerten, die sich auf den Baufeldern realisieren lassen. Dies erlaubt die differenzierte Höhen- und Dichteentwicklung aus den Daten der Eignungsanalyse (vgl. Tabelle 3).

Die Tabelle 3 zeigt, dass sich für die Baufelder eine Geschossflächenzahl zwischen 1,8 und 3,0 ergibt. Gemäß den

³ Als Kerngebiet werden alle Zellen bezeichnet, die sich mehr als eine Zelle vom Rand der Region entfernt befinden. Die Kernsumme ist die Summe der Eignungswerte der Kerngebiete.

⁴ Die kompakteste geometrische Form ist der Kreis, weshalb der Wert immer > 1 ist und theoretisch unendlich sein kann. Hohe Werte weisen auf eine wenig kompakte, kompliziert geschnittene Bauform hin.

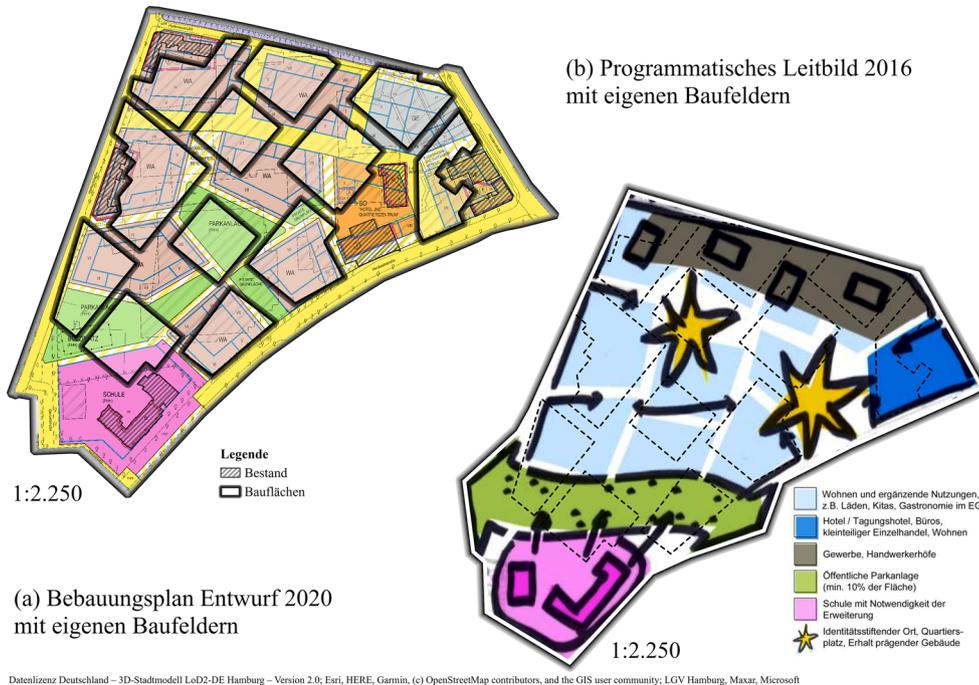
Obergrenzen für die Bestimmung des Maßes der baulichen Nutzung aus § 17 Abs. 1 BauNVO⁵ sind diese GFZ-Werte lediglich für urbane Gebiete, Kerngebiete sowie Gewerbegebiete, Industriegebiete und sonstige Sondergebiete zulässig. Die geplante kleinteilige Nutzungsmischung könnte also beispielsweise über die Gebietskategorie „Urbanes Gebiet“ (§ 6a BauNVO) realisiert werden. Auch andere vorwiegend dem Wohnen dienende Baunutzungskategorien können festgesetzt werden, sofern dies städtebaulich begründet wird und „allgemeine Anforderungen an gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse nicht beeinträchtigt werden“ (§ 17 Abs. 2 BauNVO). Dies ist jüngst in anderen Planungsverfahren für Bebauungspläne in der Umgebung mit dem Verweis auf einen zeitgemäßen Städtebau geschehen (z. B. Bebauungsplan Altona-Nord 26). Die Grundflächenzahl der erzeugten Baufelder liegt zwischen 0,6 und 0,9, was ebenfalls aus der dichten Umgebungsbebauung resultiert. Die Höhenentwicklung, die sich an den Höhen der nächstgelegenen Umgebungsbebauung orientiert, liegt zwischen 12,6 und 18,3 Metern. Es kann mit mindestens vier bis sechs Vollgeschossen kalkuliert werden. Über diese Werte kann die maximal realisierbare Bruttogrundfläche (BGF) eingeschätzt werden. Diese beträgt für die Baufelder zwischen 5.937 m² (ID 11) und 19.677 m² (ID 7). Das westlich gelegene neue Stadtquartier Mitte Altona übt dabei Einfluss auf die zunehmenden Dichte- und Höhenentwicklungen aus, weshalb hier wahrscheinlich deutlich mehr Wohneinheiten realisiert werden können als im östlichen Teil. Die dargelegten Annahmen ergeben eine überschlägige Bruttogrundfläche von insgesamt 119.689 m² für die gesamte Quartiersentwicklung.

4.3 Vergleich der Optimierungsergebnisse mit der traditionellen (Ist-)Bauleitplanung

Zur städtebaulichen Einordnung der Ergebnisse erfolgt ein Vergleich mit dem programmatischen Leitbild des Holsten-Areals und dem aktuellen Bebauungsplan mit dem Stand November 2019 (vgl. Abbildung 4). Die vorgeschlagenen Baufelder sind mit 0,3 ha bis 0,6 ha etwa so groß wie die geplanten Flächen, die zwischen 0,3 und 0,7 ha liegen. Insgesamt ergeben die Flächen im Modell 4,9 ha, im Bebauungsplan liegt diese mit ca. 5,4 ha bei nur 10 Baufeldern etwas höher.

Der markanteste Unterschied stellt die Planung der Parkanlagen im künftigen Quartier dar: An den Stellen im (traditionell erstellten) Bebauungsplan, an denen Parkanlagen

⁵ Baunutzungsverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 21. November 2017 (BGBl. I S. 3786), die durch Artikel 2 des Gesetzes vom 14. Juni 2021 (BGBl. I S. 1802) geändert worden ist.



Datenlizenz Deutschland – 3D-Stadtmodell LoD2-DE Hamburg – Version 2.0; Esri, HERE, Garmin, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS user community; LGV Hamburg, Maxar, Microsoft

Abbildung 4 Vergleich des Modellergebnisses mit dem programmatischen Leitbild und dem Bebauungsplan

geplant sind, findet sich im Optimierungsmodell ein Bau-
feld, da hier eine Clusterung von besonders geeignetem
Bauland identifiziert wurde. Die Nähe zu der bestehen-
den Grünfläche im Westen und die relativ dichte Bebau-
ung des angrenzenden Quartiers wirken sich dabei positiv
auf die Bewertung aus. Hieran zeigt sich exemplarisch auch
ein Zielkonflikt städtebaulicher und immobilienwirtschaftlicher
Bewertung, bei dem die Weiterführung des Grünzugs
mit der baulichen Nutzung einer guten Lagebewertung in
Konkurrenz stehen. Die gewachsenen Baufelder im Opti-
mierungsmodell haben die Orientierung um etwa 40 Grad
Richtung Nord-Süd-Achse gedreht. Im Bebauungsplan wird
die Erschließung ebenfalls gedreht, um das Erschließungs-
system an die Umgebungsstraßen anzupassen. Dabei knickt
die Erschließung mittig ab, um die Durchgängigkeit des Ge-
bietes zu gewährleisten, was im Modell nicht gelingt. Der
Ansatz hat insgesamt Verbesserungsbedarf beim Einbezug
von Entwicklungsparametern, die außerhalb der Untersu-
chungsregion das Entwurfsdesign beeinflussen. Dies zeigt
sich insgesamt bei der Verlängerung des Grünzugs aus dem
Quartier Neue Mitte Altona und beim Einbezug der ver-
kehrlichen Erschließung.

Das programmatische Leitbild enthält keine Aussage
(mit Ausnahme von sogenannten identitätsstiftenden Orten)
zum Umgang mit Bestandsgebäuden. Im Optimierungs-
modell wurden diese berücksichtigt und an die Bauflächen
angeschlossen. Ähnlichkeiten mit dem Leitbild bestehen
bei der Platzierung des Quartiersplatzes im Nordosten. Im

Modell besteht eine Freifläche um die Bestandsgebäude im
Nordosten, was mit den Planungen aus dem Leitbild ver-
einbar ist. Der zweite Quartiersplatz hingegen wurde etwas
weiter südwestlich verortet.

Im aktuellen Bebauungsplan ist die Zahl der Geschosse
erwartungsgemäß bereits differenzierter dargestellt. Gene-
rell wurden deutlich höhere Geschossigkeiten geplant als
in der Umgebung. Auf dem Areal sind fünf bis sieben Voll-
geschosse zulässig, einzelne Hochpunkte in Richtung Bahn-
schienen im Norden besitzen sogar acht Vollgeschosse. Von
der geschlossenen, höheren Bebauung wird vermutlich eine
abschirmende Wirkung gegenüber dem Schienenlärm er-
wartet. Dies wird im Modell ähnlich, wenn auch niedrigge-
schossiger vorhergesagt. Lediglich das an der Bahn liegen-
de Baufeld ID 3 fällt mit nur vier Vollgeschossen aus dem
Raster, hier verzerrt ein niedriggeschossiges Gebäude die
Interpolation nach unten. Die nördlich und westlich ge-
legenen Flächen haben eine Geschosszahl von fünf, in Richtung
des im Westen gelegenen neuen Stadtquartiers „Neue Mitte
Altona“ steigt die Geschosszahl auf sechs. Die Spannweite
ist geringfügig höher als im Bebauungsplan, wo alle Bau-
felder im Mittel bei etwa sechs Vollgeschossen liegen.

Auf Angaben zur Grundflächenzahl und Geschossflä-
chenzahl wurde im traditionellen Planentwurf verzichtet,
vermutlich weil die Baugrenzen ohnehin wenig Spielraum
bei der Ausnutzung der Grundstücksfläche übriglassen.
Dennoch lässt sich zum Vergleich überschlägig ein Wert
für die Baufelder berechnen, indem die Fläche der Baugren-

zen durch die gesamte Fläche des Baufeldes geteilt wird. Die Baufelder mit der Wohnbebauung besitzen eine Grundflächenzahl zwischen 0,5 und 0,6, die Gewerbe-, Misch- und Sondergebiete im Osten der Fläche liegen zwischen 0,7 und 0,9. Im Optimierungsmodell liegt die Grundflächenzahl aufgrund des etwas höheren Maßes der baulichen Nutzung in der Umgebung zwischen 0,6 und 0,8. In dem vom Bebauungsplan als Gewerbe-, Misch- und Sondergebiet festgesetzten Teil liegt diese bei fast 1. Dies kommt der Vorgabe im traditionellen Bebauungsplan schon recht nahe. Für die Durchmischung mit Gewerbeflächen würde auch die beste fußläufige Erreichbarkeit und Sichtbarkeit der Fläche im Eignungsmodell sprechen.

Insgesamt ergibt sich mit 119.689 m² eine geringere Bruttogrundfläche als die in der Planung angepeilten 160.000 m². Dies ist der im Modell kleineren Gesamtfläche der Baufelder, der niedrigen Geschossigkeit und der nicht mit einberechneten Bestandsgebäude geschuldet. Werden diese addiert, erhält man bereits eine Bruttogrundfläche von etwa 145.700 m², was einer Abweichung von noch rund 9 Prozent entspricht. Das Optimierungsmodell unterschätzt dabei die Höhe und überschätzt die Dichte, kann sich aber insgesamt den tatsächlich festgesetzten Werten aus der Flächenplanung annähern. Eine Plausibilisierung der Werte ist in der Entwurfsphase aber immer noch notwendig, allein schon deswegen, weil die städtebaulichen Parameter politisch festgelegt werden und sich daher einer exakten Vorausberechnung entziehen. Das Zusammenspiel der Werte ergibt sich letztlich aus dem finalen städtebaulichen Entwurf. Dennoch können die Modellwerte ebenso wie die verorteten Baufelder als frühzeitige Arbeitsgrundlage beispielsweise für wirtschaftliche Kalkulationen von Ankaufsentscheidungen von Projektentwicklern ebenso wie als Arbeitsgrundlage für den Rahmen- und Gestaltungsplan der kommunalen Bauleitplanung sehr dienlich sein, da sie aus Parametern der Umgebung abgeleitet sind und daher die Eigenart der näheren Umgebung widerspiegeln.

Es ist wichtig die Grenzen des Modells einzuordnen. Das übergeordnete Ziel ist die Entwicklung eines GIS-basierten Ansatzes, um Planerinnen und Planern zu helfen, das flächenbezogene städtebauliche Entwicklungspotenzial besser zu analysieren. Das Modell ist nicht als Substitut für einen städtebaulichen Entwurf zu verstehen. Vielmehr liefert es den kommunalen Städtebauerinnen und Städtebauern ebenso wie den privatwirtschaftlichen Land- und Projektentwicklern effiziente, digitale Unterstützung bei der Bestimmung städtebaulicher Parameter und der Verortung von Gebäuden und Verkehrsflächen zur Orientierung für die weitere Planung. Insofern bildet sich ein Effizienzvorteil im städtebaulichen Prozess durch die Beschleunigung der Verfahren aus. Dies gilt insbesondere nach erstmaliger Modellaufstellung für einen (groß)städtischen Untersuchungsraum

wie Hamburg. Denn auch für andere Areale könnte dasselbe Modell die Entwicklungspotenziale beider Zielgruppen (Kommunen und Entwickler) in Echtzeit aufzeigen. Damit bestehen methodologische Transferpotenziale, die in dem bestehenden Datenmodell für noch nicht beplante Flächen gerade in wachstumsstarken Großstädten und Metropolräumen skaliert angewendet werden können. Zudem hilft es ein tieferes Verständnis für die Fläche im Zusammenhang mit ihrer Umgebung zu erhalten und hierüber frühzeitige Erkenntnis über mögliche Problembereiche sowie Potenziale zu erlangen. Je nach Präferenz der *Stakeholder* ist eine parametrische Anpassung über die Auswahl und Gewichtung der Standortfaktoren möglich, sodass auf dieser Basis auch unterschiedliche Bebauungspräferenzen räumlich simuliert werden können. Transparenzvorteile ergeben sich weiterhin, wenn die Ergebnisse als Grundlage zur Diskussion im Rahmen der Beteiligung von Bürgerinnen und Bürgern sowie Trägern öffentlicher Belange genutzt werden. So lassen sich realistische Planungsoptionen schneller bewerten und fachlich begleiten.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Beitrag zeigt, beispielhaft anhand eines Konversionsareals in Hamburg-Altona, wie das städtebauliche Entwicklungspotenzial einer Fläche digital eingeschätzt und räumlich verortet werden kann. Hierfür werden Bewertungsverfahren aus der GIS-gestützten Landeignungsbewertung und Landnutzungsoptimierung angewandt, die mittels eines Fuzzy-Ansatzes räumliche Schwerpunkte hoher Bebauungseignung identifizieren. Durch die Anwendung des heuristischen Optimierungsalgorithmus *Parameterized Region-Growing* werden diese anhand expliziter räumlicher Kriterien zu einem Verortungsvorschlag für mögliche Baufelder sowohl für die kommunale Bauleitplanung als auch für die privatwirtschaftliche Baulandentwicklung zusammengefasst. Im Gegensatz zur bestehenden Landeignungsbewertung geht diese Methodik weitere Schritte hin zur optimalen räumlichen Aufteilung der knappen urbanen Bodenressourcen.

Insbesondere aus der Perspektive des Vorhabenträgers und der öffentlichen Planungsbehörde bieten sich die Arbeitsprozesse als Anhaltspunkt zur Entscheidungsfindung von wichtigen Parametern in der städtebaulichen Planung an. So können bereits im Rahmen des städtebaulichen Wettbewerbs sehr frühzeitig wichtige Vorgaben für die Masterpläne zur Baulandentwicklung gemacht werden, was gegebenenfalls Anpassungsbedarfe im Laufe des Projektes vermindert. Auch Defizite im Untersuchungsbereich können frühzeitig erkannt und einbezogen werden. Das systematische Vorgehen spielt seine Vorteile ebenfalls bei der Kri-

terien- und Bewertungstransparenz aus und wird in der Konsequenz für die an der Planung beteiligten Projektpartner nachvollziehbar. Letztlich können hierdurch schnellere Entscheidungsfindungen und eine effizientere Durchführung der Bebauungsplanverfahren ermöglicht werden. Da ausschließlich frei verfügbare Geodaten genutzt werden, ergeben sich auch zahlreiche Entwicklungs- und Anpassungspotenziale für die diversen *Stakeholder* der städtebaulichen Projektentwicklung (z. B. Projektentwickler oder private Planungsbüros). Auch lassen sich Kosten und Erlöse der Bauflächen für die Ankaufsentscheidungen ableiten.

Bei der Anwendung auf dem Holsten-Areal zeigte sich, dass attributiv gleichartige, kompakte Baufelder aus den Eignungswerten generiert werden können. Die räumliche Verortung der bewerteten Flächen ist also aus technischer Sicht gelungen. Im Vergleich mit den existierenden planerischen Werken des Leitbilds und dem Entwurf des Bebauungsplanes zeigten sich sowohl Unterschiede als auch Gemeinsamkeiten. Zunächst hatten die Baufelder im Vergleich mit den tatsächlichen Planwerken in etwa die gleiche Größe. Das Modell und die tatsächliche Planung unterscheiden sich aber im Hinblick auf die Verortung der Flächen. So wurde beispielsweise im Leitbild der öffentliche Park an Stellen verortet, wo bei der Eignungsbewertung das größte Potenzial für die Bebauung gesehen wird. Anhand der verkehrlichen Erschließung zeigte sich, dass Revisionsbedarf beim Einbezug der Bestandssituation außerhalb der Fläche besteht. Das Modell berücksichtigt beispielsweise nicht den Anschluss an Bestandsstraßen oder Grünanlagen in der Umgebung. Um dieses Problem zu vermindern, können in Zukunft freizuhaltende Flächen (Bindungen) als Bestandsregionen festgelegt werden. Die Verortung von Flächentypen und die Näherung an städtebauliche Kennwerte wie etwa die als Gewerbe- und Mischgebiet festgesetzten Gebiete ist hingegen annähernd kongruent zur Planung. Obwohl das Modell die Höhenentwicklung unterschätzt und die Dichte überschätzt, liefert es geeignete Grundlagen zur städtebaulichen Kalkulation der realisierbaren Gesamtfläche auf dem Areal.

Somit führt das dargelegte Verfahren zu aufschlussreichen Ergebnissen, dem Ansatz sind jedoch auch praktische Grenzen gesetzt. Neben der bereits erwähnten teilweisen Inkonsistenz bei der Platzierung von freien Flächen ist der Arbeitseinsatz kritisch zu betrachten, der für eine sorgfältige und umfangreiche Datenstruktur und die Ableitung von Ergebnissen für das Eignungsmodell erforderlich ist. Bei häufiger Verwendung lässt sich dies jedoch skalieren. Bei inkrementellen Anpassungen bleibt die Methode aber unflexibel, da die Berechnungszeit für die Optimierung zwischen mehreren Minuten bis mehrere Stunden beträgt. Ein besonderes Augenmerk sollte zudem auf der Wahl der Datengrundlage zur Einschätzung der Kennwerte liegen. Wie sich

auch bei der Untersuchung zeigte, kann sich die Interpolation städtebaulicher Parameter aus der Umgebungsbebauung je nach Einbezug unterschiedlicher Gebäude ändern. Diese sollte also zunächst nur als Orientierung für die weitere städtebauliche Planung genutzt und nicht als belastbare Entscheidungsgrundlage gesehen werden.

Schließlich sollte die Auswahl der Indikatoren für die Eignungsbewertung zukünftig differenziert nach weiteren Nutzungstypen erfolgen, sodass eine explizite Empfehlung zur Nutzung auf der Fläche abgeleitet werden kann. So kann in einem weiteren Schritt ein optimaler Nutzungsmix auf der Fläche gemäß der Eignung kalkuliert werden. Hierfür sind jedoch entsprechende weitere Zielindikatoren für die Standortpräferenzen anderer Nutzungsarten zu ermitteln. Durch den Einbezug einer zielgruppenorientierten Marktanalyse lässt sich der Ansatz weiterhin um Parameter erweitern, die nicht rein städtebaulichen/stadtplanerischen Motiven entsprechen. Weiterhin können durch die Auswahl neuer Kriterien weitere Planungsvarianten geschaffen werden, welche gegebenenfalls die Präferenz anderer *Stakeholder* (z. B. Anwohnerinnen/Anwohner) besser widerspiegeln.

Literatur

- Abart-Heriszt, L. (1999): GIS-Modell zur landesweiten Beurteilung der Standorteignung für Industrie und Gewerbe in der Steiermark. In: Strobl, J.; Blaschke, T. (Hrsg.): *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung – Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg IX*. Salzburg, 1–10.
- Alda, W.; Hirschner, J. (2016): *Projektentwicklung in der Immobilienwirtschaft. Grundlagen für die Praxis*. Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-13930-8>
- Brookes, C. J. (1997a): A genetic algorithm for locating optimal sites on raster suitability maps. In: *Transactions in GIS* 2, 3, 201–212. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.1997.tb00011.x>
- Brookes, C. J. (1997b): A parameterized region-growing programme for site allocation on raster suitability maps. In: *International Journal of Geographical Information Science* 11, 4, 375–396. <https://doi.org/10.1080/136588197242329>
- Brookes, C. J. (1998): *A genetic algorithm for designing optimal patch configurations in GIS*. Dissertation am University College London.
- Cao, K.; Huang, B. (2019): Spatial optimization for land use planning: Opportunities and challenges. In: *Transactions in GIS* 23, 4, 641–644. <https://doi.org/10.1111/tgis.12573>
- Cao, K.; Huang, B.; Wang, S.; Lin, H. (2012): Sustainable land use optimization using Boundary-based Fast Genetic Algorithm. In: *Computers, Environment and Ur-*

- ban Systems 36, 3, 257–269. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2011.08.001>
- Caprioli, C.; Bottero, M. (2020): Addressing complex challenges in transformations and planning: A fuzzy spatial multicriteria analysis for identifying suitable locations for urban infrastructures. In: *Land Use Policy*, 102, 105147. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105147>
- Cardone, B.; Di Martino, F. (2021): GIS-based hierarchical fuzzy multicriteria decision-making method for urban planning. In: *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* 12, 1, 601–615. <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02043-6>
- Chaidee, S.; Pakawanwong, P.; Suppakitpaisarn, V.; Teerasawat, P. (2017): Interactive land-use optimization using Laguerre Voronoi Diagram with Dynamic Generating Point Allocation. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-2/W7*, 1091–1098. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W7-1091-2017>
- Chandramouli, M.; Huang, B.; Xue, L. (2009): Spatial change optimization: Integrating GA with visualization for 3D scenario generation. In: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 75, 8, 1015–1022.
- Chen, S.-J.; Hwang, F. P.; Hwang, C.-L. (1992): Fuzzy multiple attribute decision making. *Methods and applications*. Berlin.
- Church, R.L.; Gerrard, R. A.; Gilpin, M.; Stine, P. (2003): Constructing Cell-Based Habitat Patches Useful in Conservation Planning. In: *Annals of the Association of American Geographers* 93, 4, 814–827. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.2003.09304003.x>
- Destatis (2021): Bevölkerung und Demografie. Auszug aus dem Datenreport 2021. Wiesbaden.
- Dewberry, S. O. (2019): *Land development handbook. A practical guide to planning, engineering, and surveying*. New York.
- Dickinson, D.; Shahab, S. (2021): Post planning-decision process: Ensuring the delivery of high-quality developments in Cardiff. In: *Land Use Policy* 100, 105114. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105114>
- Dueker, K. J.; Delacy, P. B. (1990): GIS in the land development planning process. Balancing the needs of land use planners and real estate developers. In: *Journal of the American Planning Association* 56, 4, 483–491. <https://doi.org/10.1080/01944369008975451>
- Eastman, J. R.; Jin, W.; Kyem, P.; Toledano, J. (1995): Raster procedure for multi-criteria/multi-objective decisions. In: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 61, 5, 539–547.
- Fina, S.; Henger, R.; Siedentop, S. (2020): Erfolgreiche Wege für mehr Wohnungsbau. Eine Analyse der Mobilisierung von Baulandpotenzialen in NRW. Köln. = IW-Report 41/2020.
- Guhl, P. (2018): Die Entwicklung neuer Stadtquartiere aus städtebaulicher Sicht. Analyse der Projekte seit 1990. Essen. = *Dortmunder Beiträge zur Raumplanung* 148.
- Isenhöfer, B.; Väh, A.; Hofmann, P. (2008): Immobilienanalyse. In: Schulte, K.-W. (Hrsg.): *Immobilienökonomie. Band 1: Betriebswirtschaftliche Grundlagen*. München, 391–451.
- Johnson, D. E. (2008): *Fundamentals of land development. A real world guide to profitable large-scale development*. Hoboken.
- Juszczak, A.; Reith, H. (2020): Mehr Wohnbauland am Rhein. Eine GIS-gestützte Flächenanalyse als Grundlage für die Regionalplanung. In: *Informationen zur Raumentwicklung* 47, 3, 56–65.
- Kaufman, L.; Rousseeuw, P.J. (2005): *Finding groups in data. An introduction to cluster analysis*. Hoboken. <https://doi.org/10.1002/9780470316801>
- Köster, C. (2006): Städtebauliche Qualitätssicherung bei der Entwicklung neuer Stadtquartiere. Zur Zusammenarbeit öffentlicher und privater Partner. Münster.
- Krivoruchko, K.; Gribov, A.; Krause, E. (2011): Multivariate Areal Interpolation for Continuous and Count Data. In: *Procedia Environmental Sciences* 3, 14–19. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.02.004>
- LBS – Westdeutsche Landesbausparkasse (2017): *Wohnwünsche 2017*. Münster.
- Leitstelle XPlanung/XBau (2020): *Handreichung XPlanung-XBau*. Hamburg.
- Ma, C.; Zhou, M. (2018): A GIS-Based Interval Fuzzy Linear Programming for Optimal Land Resource Allocation at a City Scale. In: *Social Indicators Research* 135, 1, 143–166. <https://doi.org/10.1007/s11205-016-1476-1>
- Malczewski, J.; Jankowski, P. (2020): Emerging trends and research frontiers in spatial multicriteria analysis. In: *International Journal of Geographical Information Science* 34, 7, 1257–1282. <https://doi.org/10.1080/13658816.2020.1712403>
- Malczewski, J.; Rinner, C. (2015): *Multicriteria decision analysis in geographic information science*. New York.
- Mantelas, L.; Prastacos, P.; Hatzichristos, T.; Koutsopoulos, K. (2012): Using fuzzy cellular automata to access and simulate urban growth. In: *GeoJournal* 77, 1, 13–28. <https://doi.org/10.1007/s10708-010-9372-8>
- Morio, M.; Schädler, S.; Finkel, M. (2013): Applying a multi-criteria genetic algorithm framework for brownfield reuse optimization: Improving redevelopment options based on stakeholder preferences. In: *Journal of Environmental Management* 130, 331–346. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.09.002>
- Mrosek, H.F. (2012): *Städtebauliche Projektentwicklung*

- durch private Immobilienunternehmen. Essen. = Dortmunder Beiträge zur Raumplanung 140.
- Müller, K.; Weber, K. (2002): Städtebauliche Projektentwicklung. Optimierung der Wirtschaftlichkeit durch Methoden der Immobilienökonomie. Regensburg. = Volkswirtschaftliche Schriften 24.
- Nadler, M.; Spieß, F.; Müller, G. (2018): Landeignungsprüfung in prosperierenden Großstädten. Ein GIS-basiertes Entscheidungsunterstützungssystem für Unternehmensimmobilienentwicklungen in der Stadt Düsseldorf. In: *Raumforschung und Raumordnung | Spatial Research and Planning* 76, 5, 437–460. <https://doi.org/10.1007/s13147-018-0545-0>
- Natividade-Jesus, E.; Coutinho-Rodrigues, J.; Henggeler Antunes, C. (2007): A multicriteria decision support system for housing evaluation. In: *Decision Support Systems* 43, 3, 779–790. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2006.03.014>
- Nguyen, X. L.; Chou, T. Y.; Fang, Y. M.; Lin, F. C.; Hoang, V. T.; Huang, Y. M. (2017): Combination of Geographic Information System, Fuzzy Set Theory And Analytic Hierarchy Process For Rationality Assessment Of Planned Industrial Zones: A Case Study In Vietnam. In: *International Refereed Journal of Engineering and Science* 6, 3, 72–79.
- Nissen, V. (2007): *Ausgewählte Grundlagen der Fuzzy Set Theorie*. Ilmenau. = *Ilmenauer Beiträge zur Wirtschaftsinformatik* 2007-03.
- Peiser, R.; Hamilton, D. (2012): *Professional Real Estate Development. The ULI Guide to the Business*. Washington DC.
- Rezayan, H.; Najian, A. H. (2008): Land use allocation optimization using advanced geographic information analyses. In: *World Applied Sciences Journal* 3, S1, 136–142.
- Schütz, E.; Feldmann, P. (2008): Quartiersentwicklung am Beispiel des Arnulfparks in München. In: Schulte, K.-W.; Bone-Winkel, S. (Hrsg.): *Handbuch Immobilien-Projektentwicklung*. Köln, 843–868.
- Stewart, T. J.; Janssen, R.; van Herwijnen, M. (2004): A genetic algorithm approach to multiobjective land use planning. In: *Computers and Operations Research* 31, 14, 2293–2313. [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(03\)00188-6](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(03)00188-6)
- Suppakitpaisarn, V.; Ariyarat, A.; Chaidee, S. (2021): A Voronoi-based method for land-use optimization using semidefinite programming and gradient descent algorithm. In: *International Journal of Geographical Information Science* 35, 5, 999–1031. <https://doi.org/10.1080/13658816.2020.1841203>
- Ustaoglu, E.; Aydinoglu, A. C. (2019): Land suitability assessment of green infrastructure development: A case study of Pendik district (Turkey). In: *Journal of Land Use, Mobility and Environment* 12, 2, 165–178. <https://doi.org/10.6092/1970-9870/6118>
- Ustaoglu, E.; Aydinoglu, A. C. (2020): Suitability evaluation of urban construction land in Pendik district of Istanbul, Turkey. In: *Land Use Policy* 99, 104783. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104783>
- Vanegas, P.; Cattrysse, D.; van Orshoven, J. (2008): Comparing exact and heuristic methods for site location based on multiple attributes. An afforestation application. In: Gervasi, O.; Murgante, B.; Laganà, A.; Taniar, D.; Mun, Y.; Gavrilova, M. L. (Hrsg.): *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2008*. Berlin, 389–404.
- Wieland, A. (2014): *Projektentwicklung Nutzungsgemischter Quartiere. Analyse zur Generierung von Erfolgsfaktoren*. Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-06903-2>
- Wilson, M. W. (2020): GIS: A method and practice. In: Ward, K. (Hrsg.): *Researching the city. A guide for students*. Los Angeles, 125–144.
- Zhao, Y.; Zhang, Y.; Murayama, Y. (2011): Field-based fuzzy spatial reasoning model for constraint satisfaction problem. In: Murayama, Y.; Thapa, R. B. (Hrsg.): *Spatial Analysis and Modeling in Geographical Transformation Process. GIS-based Applications*. Dordrecht, 29–44. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0671-2_2