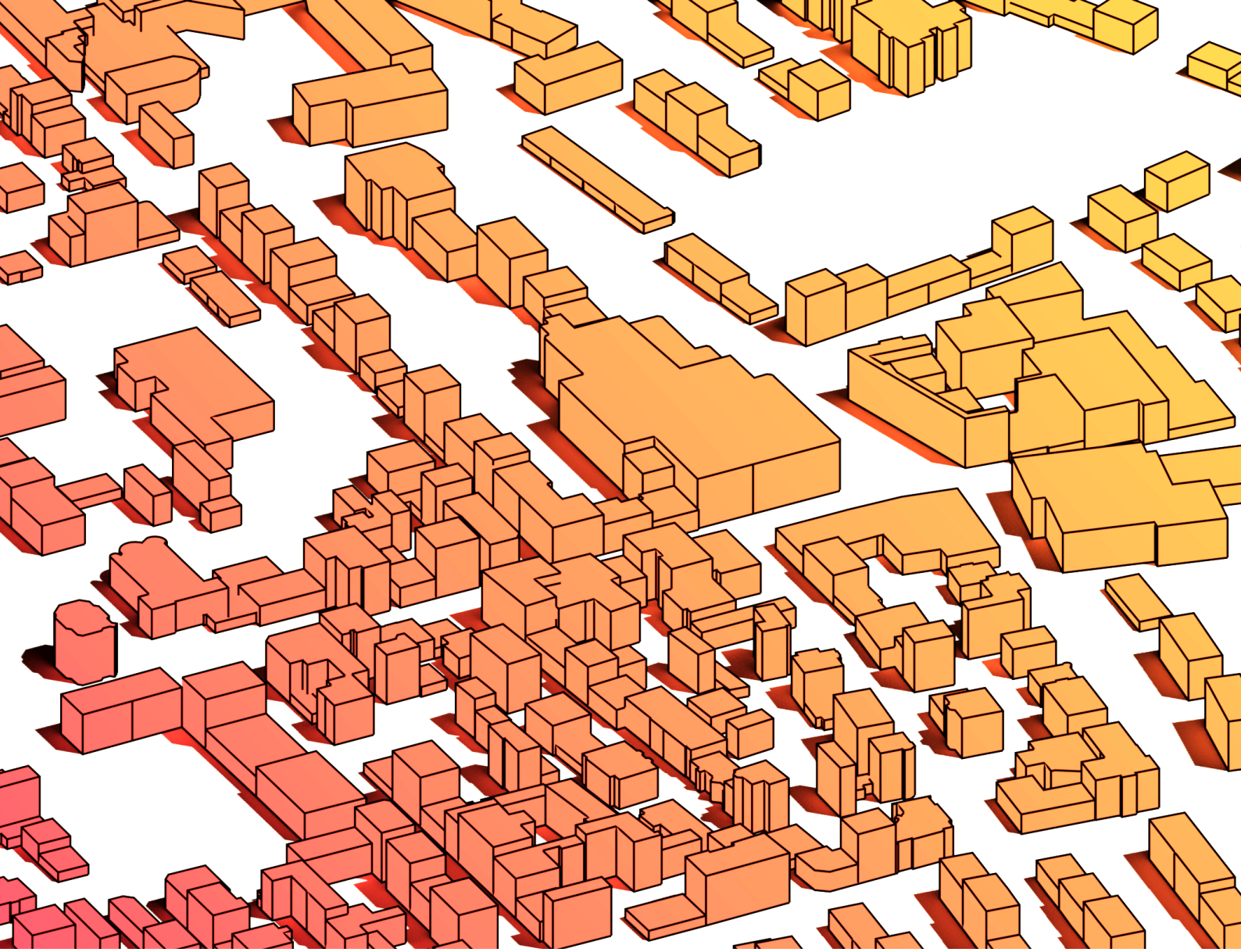
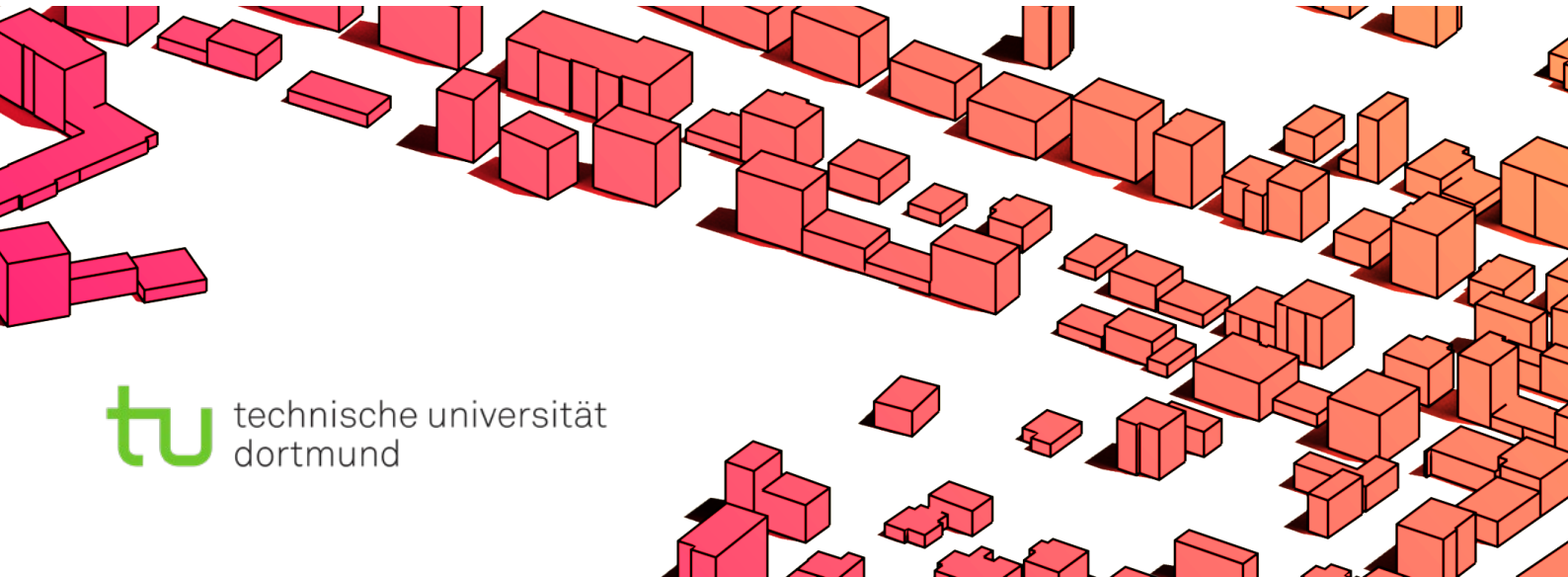


PROZEDURALE 3D-GENERIERUNG VON STADTRÄUMEN

Raummodellierung für städtebauliche Entwürfe und planerische Kommunikation durch Open Geodata in Blender

Alin Linda Krause 2025 – Studiengang M.Sc. Raumplanung

Gutachter: Jose Mauricio Velazco Londono und Prof. Dr. Thinh Nguyen



technische universität
dortmund

Titelbilder: eigene Darstellung

sbp StädteBauProzesse

raumbezogene informationsverarbeitung und modellbildung rim

rp° Fakultät Raumplanung

Vielen Dank an meine Betreuer Jose Mauricio Velazco Londono und Prof. Dr. Thinh Nguyen von den Lehrstühlen SBP und RIM, die mich bei dieser Masterarbeit bereits früh und präzise unterstützt haben, mein Wunschthema umzusetzen, und wie es nach wissenschaftlichen Ansprüchen umgesetzt werden kann.

Inhalt

Abbildungsverzeichnis 5

Abkürzungsverzeichnis 7

Glossar 8

Teil A: Theorie 13

A.1. Fernerkundung und GIS ... 14
A.2. Digital Twins und Raumplanung ... 14
A.3. Geometrische Grundlagen ... 17
Meshes, Objekte und Metadaten ... 17
A.4. Begriffe des modularen Bauens ... 18
A.5. Prozeduralität ... 19
A.6. Gebäude und Typologien ... 21
A.7. Statistik deutscher Haustypen ... 25
A.8. Der raumrelevante Haustyp ... 28
Erwartete Grenzfälle ... 34
Kriterien für die Empirie ... 35

Teil B: Empirie 36

B.1. Wahl & Umfang der Proben ... 39
Beschreibung des Forschungsgebiets ... 39
Geodaten und Vorbereitung ... 40
Auswahl der Proben ... 41
Einteilung in Cluster ... 44
B.2. Primärerhebung ... 46
B.3. Analyse der Ergebnisse ... 47
Äußere Statistik ... 49
Innere Statistik ... 55
Kurzbeschreibung der Modellmuster ... 57
Rangordnung der Modulbauteile ... 60

B.4. Synthese und Geonodes 61
Vorbereitung, Logik & Implementation 64
Gruppe A 66
Gruppe B 66
Gruppe C 67
Gruppe D 67
Gruppe E 68
Weiterführende Zuweisung 70
Modellierung 70
B.5. Case Study 74
Maß des Erfolges 77
Ablauf der Case Study 77
Case Study: Probe 1 79
Case Study: Probe 2 82
Visuelle Qualität und Genauigkeit 84

Teil C: Diskussion **87**

Bewertung Arbeitsschritte 88
Evaluation der Ergebnisse 89
Schlussfolgerung 91

Literaturverzeichnis **92**

Anhang **95**

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 12
Abb. 2 15
Abb. 3 15
Abb. 4 17
Abb. 5 17
Abb. 6 17
Abb. 7 18
Abb. 8 19
Abb. 9 20
Abb. 10 20
Abb. 11 21
Abb. 12 22
Abb. 13 22
Abb. 14 23
Abb. 15 24
Abb. 16 25
Abb. 17 26
Abb. 18 27
Abb. 19 27
Abb. 20 29
Abb. 21 30
Abb. 22 31
Abb. 23 33
Abb. 24 38
Abb. 25 39
Abb. 26 42
Abb. 27 45
Abb. 28 46
Abb. 29 48
Abb. 30 49
Abb. 31 50
Abb. 32 52
Abb. 33 53
Abb. 34 54
Abb. 35 55
Abb. 36 57
Abb. 37 57

Abb. 38 58
Abb. 39 58
Abb. 40 59
Abb. 41 59
Abb. 42 61
Abb. 43 62
Abb. 44 62
Abb. 45 63
Abb. 46 63
Abb. 47 65
Abb. 48 66
Abb. 49 67
Abb. 50 69
Abb. 51 70
Abb. 52 72
Abb. 53 73
Abb. 54 73
Abb. 55 74
Abb. 56 75
Abb. 57 75
Abb. 58 76
Abb. 59 76
Abb. 60 77
Abb. 61 78
Abb. 62 78
Abb. 63 79
Abb. 64 80
Abb. 65 80
Abb. 66 81
Abb. 67 82
Abb. 68 83
Abb. 69 84
Abb. 70 85
Abb. 71 85
Abb. 72 85
Abb. 73 86

Abkürzungsverzeichnis

CAD..... Computer-aided design, Computergestütztes Design

engl. ..... englisch

etc..... et ceteri, und so weiter

IWU..... Deutsches Institut Wohnen und Umwelt

i.d.R ..... in der Regel, üblicherweise

i.V.m ..... in Verbindung mit

u.a. ..... unter anderen

z.B..... zum Beispiel

Glossar

Attribut ..... Messbare Eigenschaft

Bauweise ..... Lagebeziehung eines Gebäudes im Umfeld, häufigste Kategorisierung sind die offene, halboffene und geschlossene Bauweise

Boolean ..... Schaltvariable mit Zuständen falsch/wahr, oder null/eins, 1 Bit

Blender ..... Open Source 3D-Softwareprogramm (genau: Vertexmanipulationsprogramm)

(Beziér) Curve, Kurve ..... Vektorkurve, beschrieben durch zwei Ankerpunkte

Edge ..... Geometrische Kante, auch Vektor von Punkt A nach B

(Geometrisches) Element ... Grundbausteine von Geometrie: Punkte, Kanten, Flächen, Polygone

Face ..... Geometrische Fläche im Sinne einer Ebene, bestehend aus Punkten und Kanten

Float ..... Floating-point number, Gleitkommazahl, 32 Bit

Geometry Nodes ..... System der bauteil- und knotenbasierten, visuellen Programmierung von Geometriedaten in Blender

Haustyp ..... Grobe Kategorisierung eines Wohngebäudes als Einfamilienhaus, Doppelhaus, Reihenhaus, Mehrfamilienhaus und andere

Integer ..... Ganze Zahl, 8-Bit

Mesh ..... Gitternetz, nicht notwendigerweise mannigfaltiger geometrischer Körper

Mesh Data ..... Daten, die ein Mesh beschreiben

Metadaten ..... Daten, die Daten beschreiben

Modifier (in Blender) ..... Ort der Benutzeroberfläche eines prozeduralen Algorithmus wie z.B. Geometry Nodes

N-gon ..... Polygon unbestimmter Punkt- und Kantenanzahl, in der Regel ist größer vier gemeint

Node (Graph) ..... Visuell-funktionaler Programmknoten, verarbeitet Input zu Output. Eine Gesamtheit von Nodes ist ein Node Graph

Objekt, Object ..... Behälter von Elementen mit Metadaten

Object Data ..... Daten, die ein Objekt beschreiben

Open Source ..... Quelloffen, üblicherweise kostenfreie Software oder Daten

Open Data ..... Frei verfügbare Daten ohne Nutzungsbeschränkungen

Parametrisch ..... Durch Variablen nach festen Regeln definiert oder gesteuert

Polygon, Polys ..... Geometrische Form mit Fläche, unbestimmte Punkt- und Kantenanzahl, in der Regel sind Dreiecke oder Vierecke gemeint

Prozedural ..... Parametrische Erstellung neuer Inhalte aus Einzelteilen nach festen Regeln

Quad, Quads ..... Polygon mit vier Punkten und Kanten

Shape Key ..... Aufnahme einer Veränderung von Geometrie, die dann wieder abgerufen werden, der Faktor ist normalisiert null bis eins

Sichtbare Attribute ..... Exposed attributes, Attributwerte, die User direkt zur Veränderung präsentiert bekommen

Tri, Tris ..... Polygon mit drei Punkten und Kanten

Variable ..... Quantifizierbarer Wert oder Menge

Vertex, Vertices ..... (Eck-)Punkte alleinstehend oder Teil eines Polygons, auch als Element einer Punktwolke

Vertex Group ..... Tabelle von Vertices mit Werten von null bis eins als float

Einführung

Informatik und Geoinformationssysteme haben in den letzten Jahren in allen Bereichen der Raumplanung rapide an Bedeutung gewonnen. Von der Digitalisierung alter Kataster über die freie Verfügbarkeit von raumbezogenen Daten, bis hin zu teilautomatisierten Prozessen zur 3D-Modellierung von Bauwerken anhand von Satelliten- und Luftbildern.

Auf Grundlage des E-Government-Gesetzes und die 2017 in Kraft getretene Änderung mit §12a waren Behörden in Deutschland erstmalig dazu verpflichtet, von Ihnen erhobene, unbearbeitete Daten als Rohdaten entgeldfrei und in maschinenlesbarer Form zu veröffentlichen. Damit wurde die Grundlage für eine kontinuierlich gepflegte, freie zugängliche und gemeinwohlorientierte Datenbank geschaffen; von Einwohner:innendaten über Wirtschaftsstatistiken bis Geodaten (Bundesministerium des Innern und für Heimat (BMI) 2023).

Motivation: Zugänglichkeit

Die somit frei zugänglichen und gepflegten Geodaten erweisen sich sowohl Verwaltungsintern als auch in der Forschung und Wirtschaft als unschätzbare Quelle von Grundlagenmaterial. Ob Katasterblätter, die tatsächlich zumeist als Vektordaten vorliegen und daher umfassend und mit Leichtigkeit visuell zu Karten und Darstellungen verarbeitet werden können, oder mit Objektdaten angereicherte Shapefiles, die die schnelle statistische Auswahl und Analyse mit Geoinformationssystemen erlauben, ist bis zu georeferenzierten Luftbildern und historischen Karten ein im Nutzen nahe unbegrenzter Datensatz vorhanden.

In Verbindung von Informatik, Geoinformationssystemen und automatisierter, benutzer:innenfreundlicher Modellierung besteht das Potential, die Rohdaten tatsächlich der interessierten Bevölkerung näherzubringen. Als immerwährender Aspekt der Raumplanung ist die Beteiligung der planungsbetroffenen Bevölkerung neben dem Gemeinwohl von grundlegendem demokratischem Interesse. Neue Werkzeuge der Datenverarbeitung mit Benutzer:innenoberfläche machen es einfacher denn je, die freien Fachinformationen verständlich, raumbezogen und alltagstauglich durch Modellierung visuell zu präsentieren, sodass sie als Teil des Beteiligungsprozesses Planung und Bevölkerung näherbringen und die Reibung zwischen Wissenschaft, Verwaltung und Laien zum Vorteil stärker demokratisch legitimierter Entscheidungen verringern kann.

Zielsetzung der Forschung

Diese Forschungsarbeit beschäftigt sich mit dem Thema, aus öffentlich zugänglichen Geodaten ein für Planer:innen und Bürger:innen einfach bedienbares Tool zu erstellen, dass bestehende Daten um die dritte Dimension und Bautypologien erweitert, reale Baustrukturen fundiert aufgreift und das Potential hat, den planerischen Kommunikations- und Entscheidungsprozess durch Illustration zu verbessern.

Weiterhin ist der Kerngedanke der prozeduralen Stadtmodellierung in dieser Arbeit, mit so wenig Benutzerinput wie möglich bereits eine präsentables 3D-Modell zu erschaffen. Dies kann vor allem durch vordefinierte Kategorisierung des Inputs erfolgen (Freistehende Gebäude gewisser Größe sind Einzelhäuser, sehr großflächige Dächer in der Regel Flachdächer und ähnliche Annahmen). Die zentrale Forschungsfrage lautet:

Was kann ein auf Open Source Software basiertes, prozedurales Werkzeug für die Modellierung von Stadträumen und die einhergehende Entscheidungsfindung leisten?

In dieser Frage sind die eingangs angeschnittenen Konzepte der digitalen Zusammenführung von räumlicher Information und die Frage der Zugänglichkeit verbunden mit dem Anspruch, als ein Werkzeug der dreidimensionalen Modellierung von Stadträumen einen Mehrwert u.a. für planerische Kommunikation zu schaffen. Um die Arbeitsschritte und gesuchten Erkenntnisse besser strukturieren zu können, werden Teilfragen gebildet:

1. Inwiefern können Digital Twins und prozedurale Modellierung als Grundlage für den städtebaulichen Modellprozess mit Geometry Nodes verwendet werden?

Die theoriebasierte Erkundung der Möglichkeiten, inwieweit beide Konzepte dem Zweck der Modellierung und Programmierung eines Gebäudegenerators dienen können, ist relativ offen und muss letztlich reflektiv anhand des ausgeführten, endgültig entschiedenen Weges bewertet werden, da insbesondere die Erstellung des Generators aufgrund der noch zu erkundenden Grundlagen offen bleibt.

2. Auswahl des Suchgebietes und Erhebung: mit welcher Datengrundlage und Gebäudetypologie kann ein Stadtteil des Ruhrgebietes beschrieben werden?

3. Wie kann man Gebäudemerkmale in einen prozeduralen Algorithmus zur Stadtmodellierung integrieren?

Diese Fragen zielen auf die Erhebung von realen Baustrukturen und Mustern ab, und inwiefern diese als Datengrundlage für den Prozess gelten werden. Bereits bei der Erstellung des Generators sollte dies ersichtlich werden, da die Basis allgemein genug und robust sein muss, dass von ihr aus Deduktionen für die Gebäudetypen erfolgen wird, und ansonsten die Methodik angepasst werden muss.

In welchem Maße ist es möglich, diese Prozesse zur Identifizierung der Typologien und Modellierung in anderen Suchgebieten effektiv anzuwenden?

Hinsichtlich der Überprüfung und Bewertung der Verallgemeinbarkeit der Forschungsinhalte soll eine Fallstudie nach Erstellung des Generators vollzogen werden, und anhand eines vorher definierten Erfolgsmaßes (z.B. Anteil der korrekten Typenabdeckung) bewertet werden.

Allgemeines Vorgehen

In dieser Forschungsarbeit sollen die frei zugänglichen Primärdaten der Bundesregierung aus dem Open Data Geodatensatz mithilfe von teilautomatisierten Prozessen sowohl Planer:innen als auch der Bevölkerung durch visuelle Aufbereitung als 3D-Modell zugänglich gemacht werden. Dabei sollen neuartige, nach geoinformatischen Methoden eigens angefertigte Werkzeuge für sogenannten prozedurale Modellierung in der Open Source 3D-Suite Blender (siehe Blender Foundation 2024) erstellt, und in einem Fallbeispiel getestet werden.

Die für die prozedurale Modellierung notwendige Identifizierung von Bautypologien dient der Analyse und anschließenden Abstraktion in vorgefertigte, repräsentative Bauteile, die innerhalb des Programms nach bestimmten, Nutzer:innenbeinflussbaren Regeln zu Gebäuden zusammengefügt werden. Somit sollen ganze Stadtteile „auf Knopfdruck" nach auf der Analyse der Bebauung der realen Welt basierenden Regeln zusammengefügt und nachträglich veränderbar werden.

Die thematische Struktur dieser Forschungsarbeit kann somit wie in Abb.1 dargestellt zusammengefasst werden.

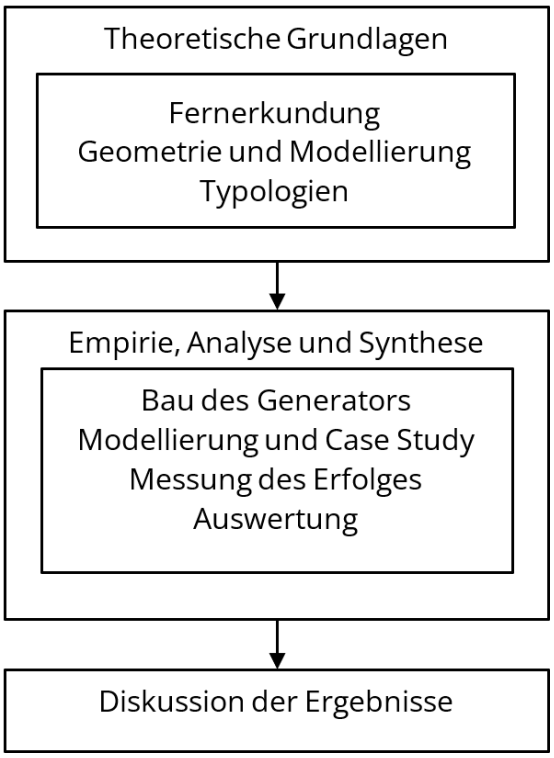
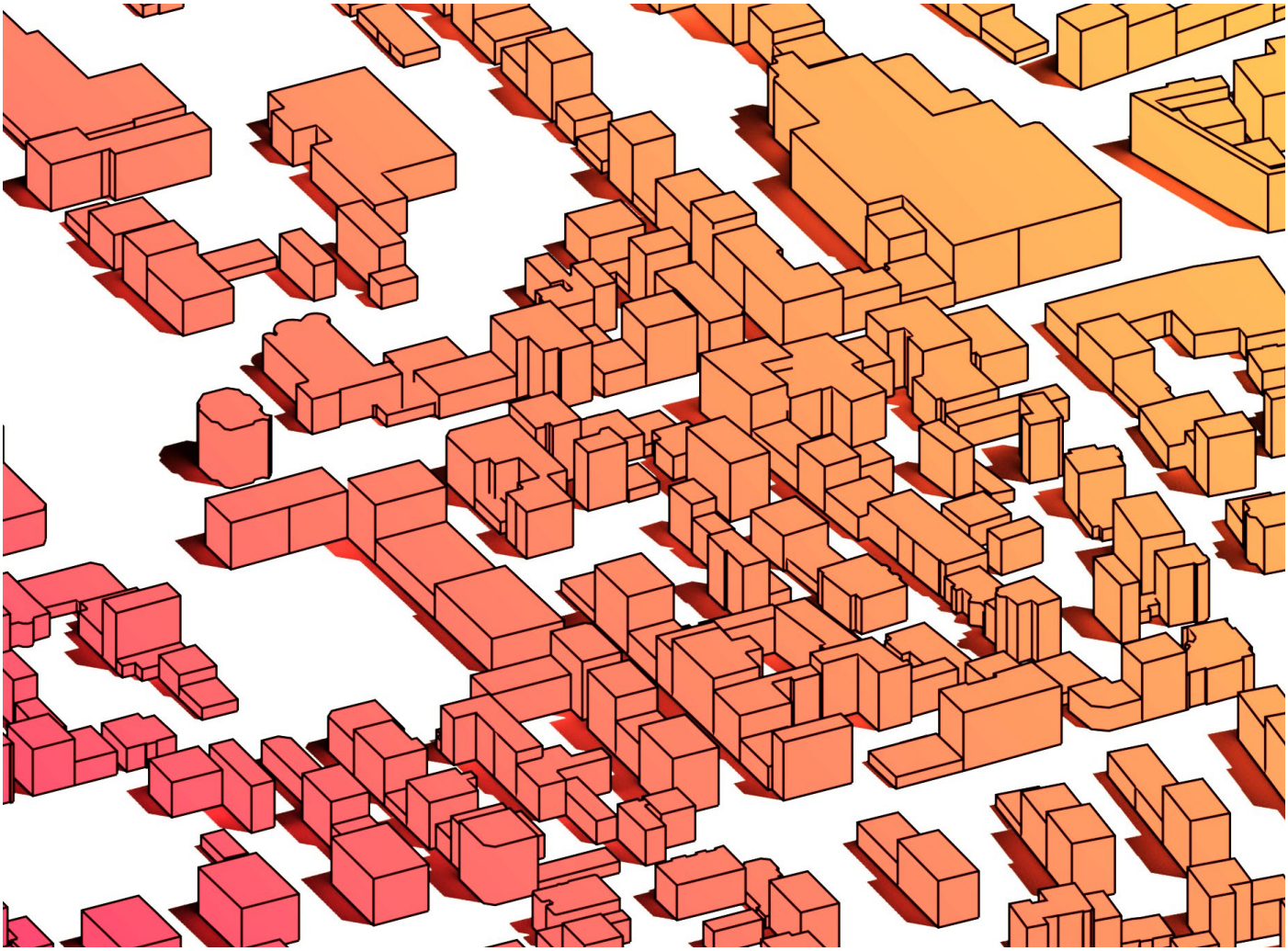


Abb. 1: *Flussdiagramm der thematischen Blöcke A, B und C: Theorie, Empirie, Diskussion. (eigene Darstellung)*



TEIL A: THEORIE

Im diesem Teil sollen die theoretischen Kernthemen dieser Arbeit hinsichtlich des Standes der Forschung hergeleitet und begründet werden, sowie das Interesse dieser Forschungsarbeit in Bezug auf noch nicht erkundete Ansätze erläutert und Bezugsrahmen der Operationalisierung konkretisiert werden.

A.1. Fernerkundung und GIS

Die Fernerkundung ist, analog zur theoretischen Wissenssammlung und Forschungsvorbereitung, ein kontextualisierender, wissen schaffender Schritt, der als theoretische Basis für Feldforschung gelten kann, aber auch als eigene Erhebung Verwendung findet. Generell ist es relevant, die abstrahierten Daten auf ihre Legitimität durch Begehung des Feldes zu prüfen, z.B. mit Stichproben, oder genaue Informationen zur Operationalisierung und Filterung der Daten zu besitzen.

Technologien zur Datenerfassung, entweder zum Schaffen eines generellen räumlichen Wissensschatzes (Geodaten) oder spezifisch für die anschließende Fernerkundung und Forschung (Geoanalyse) hinsichtlich eines Projektes sind: die Felderkundung (Kartierung, Beobachtung), die topographische Vermessung (Luftbilder, Radarverfahren, flugzeuggestützt) oder die terrestrische Vermessung (Satellitengestützt, terrestrisches Laser Scanning, GPS). (Lange 2020, S. 185)

Die so erschaffenen Primärdaten entstehen durch analog-digital-Wandlung der optoelektischen Information (Diskretisierung) und werden in verschiedenen Verfahren, entweder als Rasterpixelbild oder Vektordaten, georeferenziert, also über Metadaten wird auf den entsprechenden realen Ort, den sie darstellen, verwiesen. Die Geodaten können dann mit Geoinformationsystemen (GIS) weiterverarbeitet werden, indem ihre geographischen Informationen zum Dateninhalt erhalten und gekoppelt bleibt (üblicherweise mit Hilfe der Übertragung auf ein Koordinatensystem). Ein Geodatenelement ist ein Feature, z.B. eine Datenebene, die die Höhe über Normalnull in einem zehn Meter Raster beinhaltet. Auch einzelne Polygone, wie die Vektor-Umrandung eines Hausgrundrisses, ist ein Feature, und aufgrund der mathematischen Beschreibbarkeit eines Vektorpolygons können statistische Analysen direkt durchgeführt werden (im Unterschied zur pixelbasierten Statistik). Diese Vektorpolygonstatistik soll im Laufe dieser Forschungsarbeit von entscheidender Bedeutung sein, da Geodaten aus freier Quelle auf diese Weise hinsichtlich realer Gebäudedarstellungen der digitalen Reproduktion dienen.

A.2. Digital Twins und Raumplanung

Digitale Zwillinge in der Stadtplanung sind virtuelle Repräsentationen der urbanen Umgebung. Allgemein umfasst der Begriff die Kombination von Stadtmodellen mit Echtzeitdaten, etwa für dynamische Analysen, Szenarienplanungen, Resilienzstudien, Nachhaltigkeitsbewertungen oder Verkehrssteuerung. Neben Datenschutz und der Qualität der zugrunde liegenden Daten ist die Datenhoheit ein interessanter Punkt, da die Zusammenführung ansonsten unübersichtlich verteilten Steuerelementen voraussichtlich konzentriertere, effizientere Kontrolle ermöglichen wird (Daten-Kompetenz für Städte & Regionen 2024).

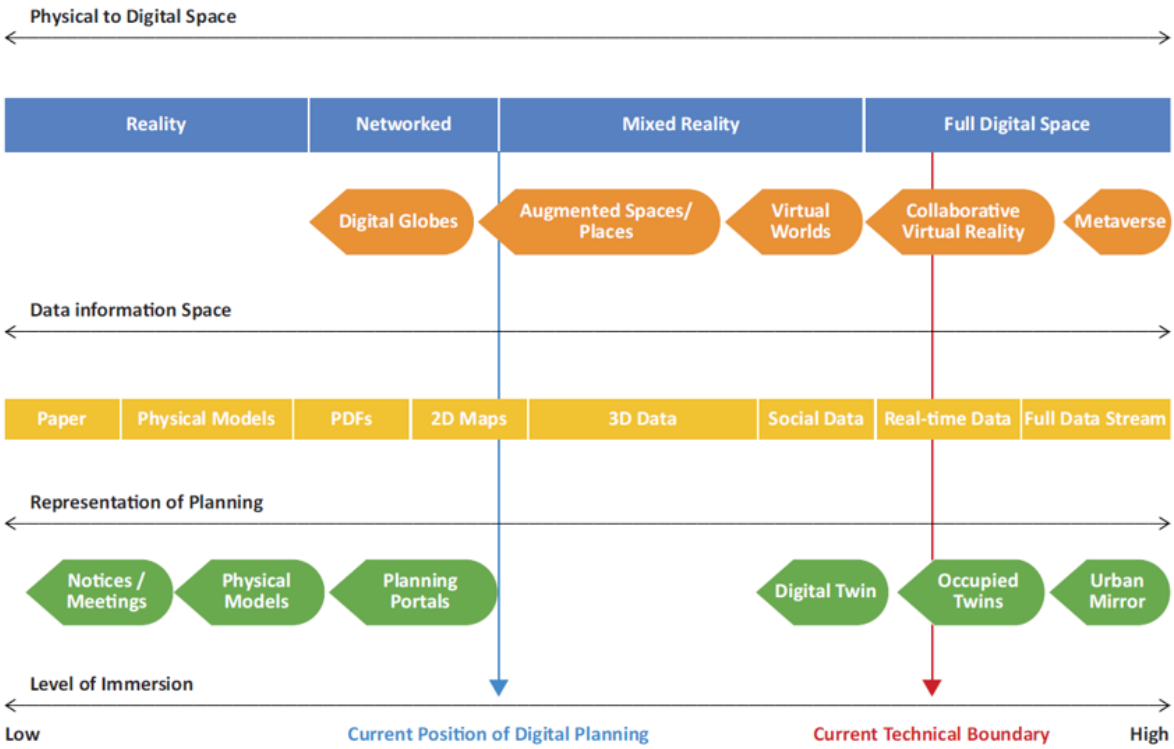


Abb. 2: *Zeitstrahl, Abstraktionsgrad und Immersion digitaler Reproduktionen. (verändert nach: Hudson Smith 2022, S. 345)*

Auch Abbildungen der Realität mit neuen, immersiveren Technologien erhöhen, beschleunigen und bündeln das Verständnis von Räumen, wie Panoramaaufnahmen, 3D-Videos oder virtuelle Rundgänge in einem Plangebiet, sodass die Informationshoheit für Menschen mit den Mitteln, dieses Wissen aus der Überlagerung umfassender Datensätze komprimiert und visualisiert abzurufen zu können, überwiegenden Einfluss auf das Verständnis der Gegenwart und zukünftiger Planungen haben kann (Hudson Smith 2022, S. 345–346).

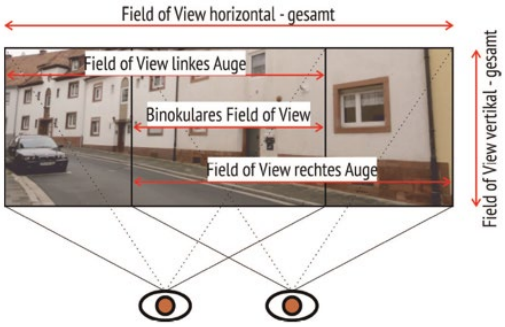


Abb. 3: *Neue Möglichkeiten durch 3D-VR und AR-Feldforschung festzuhalten und zu übermitteln. (verändert nach: Steffen Folz et al. 2016, S. 541)*

Für diese Forschungsarbeit sind Digital Twins insoweit relevant, dass Primärdaten zwar größtenteils durch Regelungen wie Open Data verfügbar sind, jedoch die Verarbeitung, Aufbereitung und realitätsnahe Darstellung von Unternehmen proprietären Systemen „vorenthalten“ wird; das legitime wirtschaftliche Interesse erhöht die Schwelle der Informationsbeschaffung hin zu Unternehmen und Institutionen, da einzelne Bürger:innen und Verbände weder die Ressourcen noch das Wissen besitzen, diese Datenmacht anzapfen zu können (Kaplan und Di Lenardo 2020, S. 310). Demokratische Entscheidungen könnten somit einerseits aufgrund ungleicher Informationslage, andererseits durch höhere Einstiegsinvestitionen beeinflusst werden.

Im Rahmen dieser Arbeit soll die digitale Kopie als Methode und Ziel, die Realität vereinfacht und verkleinert darzustellen gelten, um sie für die planerische Kommunikation in der räumlichen Dimension handhabbar und zugänglich zu machen. Die Zielskalierung des Maßstabes soll bei 1:500 angesetzt werden, einerseits aufgrund des städtebaulichen Kontextes, andererseits aufgrund Leistungsgründen von Computersystemen der Endnutzer:innen, aber nachträglich kann die Sammlung der Bauteile, der Baukasten, ausgetauscht werden, um für andere Maßstäbe und Zwecke verwendet werden zu können. Das System soll offen und frei zugänglich nach Open Source Maßstäben erstellt werden: als Bedingungen werden ausschließlich freie Software und Daten verwendet, deren Lizenz somit auch für das Produkt gilt.

A.3. Geometrische Grundlagen

Es gibt eine Vielzahl an mathematischen und topologischen Definitionen von geometrischen Körpern. Im Sinne dieser Arbeit und der Verwendung in der 3D-Computergrafik werden jedoch folgende vereinfachte Annahmen, die mit der Nomenklatur und Ordnung Blenders übereinstimmen, verwendet.

Die Grundlegende Form der Geometrie ist das Polygon. Ein Polygon besteht aus einer Anzahl von Punkten, genannt Vertex (Mehrzahl Vertices), einer Anzahl an Kanten (engl. Edges) und einer Fläche (engl. Face). Vertices und Edges, die keine Fläche, also kein Face haben, sollen kein Polygon sein. (Weisstein 2024)

Umgekehrt kann ein Face eine beliebige Anzahl an Vertices und Edges haben. Ein Face mit drei Vertices und Edges wird spezifisch Trigon (Mehrzahl kurz Tris) genannt. Ein Face mit vier Vertices und Edges wird Quad genannt. Ein Face mit mehr als vier Vertices oder Edges wird N-gon genannt (in Bezug auf den mathematischen Index n). Somit sind Fünfecke, Sechsecke etc. immer N-gons. Allerdings ist speziell sowohl für Tris als auch Quads die unspezifische Bezeichnung als Polygon geläufig. (Weisstein 2024; Wikipedia 2024b)

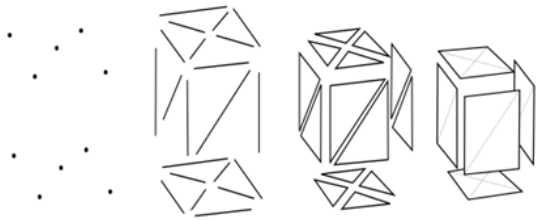


Abb. 4: *von links nach rechts Vertices, Edges, Trigone/Polygone, Faces/Polygone. (Verändert nach: Wikipedia 2024b)*

Meshes, Objekte und Metadaten

Polygone sowie ihre Elemente können gruppiert werden. Ein Würfel, der aus sechs Seiten, also 6 Quads, oder 12 Tris besteht, kann als Polygon Mesh oder kurz nur Mesh (engl. für Gitter) definiert werden. Ein Mesh ist somit eine Menge an Vertices, Edges oder Faces. (Wikipedia 2024b)

Ein hinreichendes Mindestkriterium soll für diese Arbeit die Existenz von Faces/Polygonen innerhalb einer Gruppe sein, um als Mesh zu gelten, jedoch muss keine geschlossene Oberfläche (Mannigfaltigkeit) bestehen – ein Mesh darf Löcher oder „fliegende“ Vertices oder Edges haben.

Abb. 5: *Verschiedene Polygone. Links Trigon, Mitte und Rechts N-gons. (Verändert nach: Weisstein 2024)*

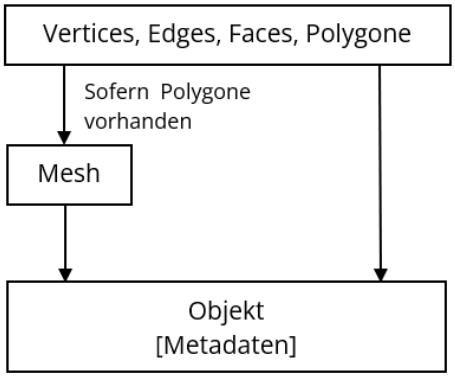


Abb. 6: *Ordnungssystem der Grundbausteine, Meshes und Objekte. (eigene Darstellung)*

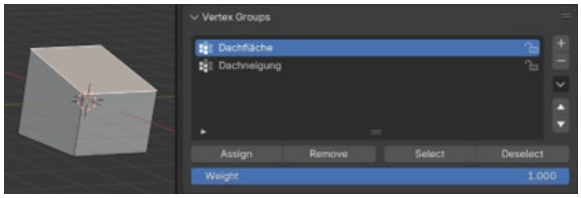


Abb. 7: *Die obere, ausgewählte Fläche ist der Vertex Group „Dachfläche" mit einem Gewicht von 1.0 zugeordnet. (eigene Darstellung)*

Eine Anzahl an Meshes kann weiterhin als ein Objekt definiert werden. Auch Vertices, Edges oder Faces, deren Kriterien nicht hinreichend für die Definition als Mesh sind, können dennoch als Objekt gruppiert werden.

Die Bedeutung von Objekten liegt in ihrer Behältereigenschaft: alle Elemente sind mindestens Objekte. Sie können einzeln ein Objekt sein, oder eine große Gruppe. Objekte können zusammengeführt werden, oder Inhalte aus einem Objekt herausgetrennt, und in ein neues Objekt eingefügt werden. Objekte haben eigene Geometrie- und Metadaten, also Daten, die sowohl das Objekt selbst als auch den Inhalt des Objektes beschreiben. Die Informationen zum Objekt selbst sind Object Data, und unpassenderweise werden Daten des Inhaltes auch von nicht-Meshes als Mesh Data bezeichnet.

Object Data sind ein Name und die Transformation des Objektes (Position, Rotation, Skalierung). Mesh Data sind die Statistik des Objektinhaltes, also Anzahl von Vertices, Edges und Faces, deren lokale Position im Objekt, sowie der Vertex-Index als eindeutige, von null aufsteigende Nummerierung. Auch können einer Anzahl an Vertices neue Daten zugeordnet werden. Dies wird Vertex Group genannt. Dabei wird allen Vertex-Indices in einer Tabelle ein Wert von null bis eins zugewiesen (Datentyp float). Mit Vertex Groups können räumliche Daten zwischen null und eins zu Polygonen oder ihren Vertices zugeordnet werden, z.B. Dachflächen (1 = ist Dachfläche), oder Dachneigung (1 = 90°).

Weiterhin existieren neben den Meshes, der Typ Curves, also Kurven. Insbesondere Beziér-Curves sind der häufigste Vertreter dieser Art, dessen weitere Varianten wie NURBS-Kurven oder Pfade sich durch das Interpolationsverfahren unterscheiden. Im Folgenden soll mit Kurve oder Curve immer eine Beziér-Curve gemeint sein. Eine Kurve wird beschrieben als ein Vektor zwischen zwei Ankerpunkten (engl. handles). Dabei existieren, hier ebenfalls Mesh Data genannt, Metadaten, die Position der Ankerpunkte und deren Tangente beschreiben, sowie die „Verdrehung" (engl. tilt). Im Rahmen dieser Arbeit sind Curves von untergeordneter Bedeutung, werden jedoch u.a. benutzt, um Edges zu Vektoren zu konvertieren, um so die Werte der Länge oder Richtung verwenden zu können.

A.4. Begriffe des modularen Bauens

Das Bauen mit sogenannten Modulen hat eine lange Historie der witterungsunabhängigen Vorbereitung von Bauelementen unter optimalen Bedingungen, ob diese Elemente nun Schrauben, Stahlträger oder Gebäudewandelemente sind; die Qualität der Fertigung kann konstant hoch und die Bauzeit vor Ort niedrig gehalten werden (Staib et al. 2008, S. 40).

Elemente werden durch Typisierung in ihrer Gestalt und Ausführung der Fertigung festgelegt, um in einem Bausystem verwendet werden zu können. Als Modul wird das Grundmaß des Bausystem-Ordnungsprinzips bezeichnet, wobei

das Modul als prägende technische Größe das gesamte System in ein Raster einteilt. (Staib et al. 2008, 42, 44)

Übertragen auf 3D-Software wie Blender können Module als Objekte gesehen werden, dessen Maß ebenfalls das System-Raster dimensioniert. Das modulare Bauen, als prozesshaftes Zusammensetzen in veränderbaren Positionen und Konfigurationen, kann als analog zur prozeduralen Modellierung des Geometry Node Systems gesehen werden: „handgefertigten" Baublöcke behalten eine real unübliche Veränderbarkeit der Maße, während die Planung von Gebäuden für die (Re)produktion aus Bauteilen erfolgen kann. Die Bauteile werden, je nach dem, was das Bauteil darstellt und welche Funktion es hat, Gruppen zugeordnet, z.B. Erdgeschosswände, Wände mit Fenstern, Balkone, Flachdächer, Dachkanten und viele mehr.

A.5. Prozeduralität

Mit dem Update 4.0 der Open Source Software Blender wurde eine umfassende Toolbox für prozedurale, nondestruktive Modellierung eingeführt. Mit dieser ist es visuell nachvollziehbar und ohne größere Programmierfähigkeiten möglich, Grundkörper aber auch für diesen Fall angefertigte Meshes wie Gebäudewände mit Türen, Fenstern oder auch Dächern nach definierten Regeln zu kombinieren und per Klick anzupassen, vorausgesetzt bestimme Variablen werden an ein User Interface (UI) übergeben. Die vom Benutzer eingegebenen Daten sollen mit dem UI relativ leicht verändert werden können. (siehe Blender Foundation 2024)

Blender ist, anders als CAD-Software, ein Vertexmanipulationsprogramm, das bedeutet, dass Ecken und Kanten sowie Flächen direkt ohne mathematische Formeln transformiert werden können. Diese Transformation z.B. eines Würfels erfolgt auf drei Achsen, X, Y, und Z, wobei in Blender Z „oben" ist. Transformation als Verschiebung von Objekten wird begleitet durch die Operationen der Skalierung und Rotation. Alle Dimensionierungen in Blender sind metrisch, sofern dies nicht anders eingestellt oder angegeben wird. Skalierungen sind Faktoren ohne Einheit, Rotationen üblicherweise in Grad.

Es gibt zwei vorherrschende Koordinatensysteme: globale und lokale Koordinaten. Die Besonderheit und Funktionalität dieser beiden Systeme im gemeinsamen Gebrauch ist die vereinfachte Verwendung von Vektoren durch die Schachtelung von Lokalkoordinaten in einem Objekt, das von globalen Koordinaten beschrieben wird; lokal ist der Nullpunkt üblicherweise, wo der Objektmittelpunkt ist, auch wenn das Objekt selbst nicht auf dem Nullpunkt liegt. (Abb. 8)

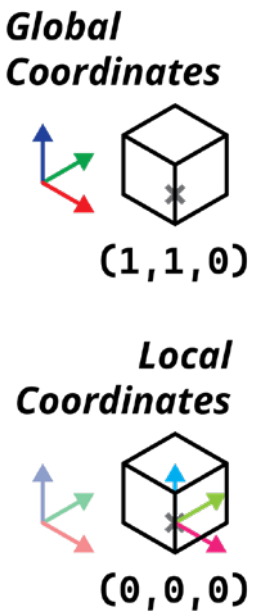


Abb. 8: *Die zwei relevantesten Koordinatensysteme in Blender. Rot, grün und blau entsprechen den X-, Y- und Z-Achsenkomponenten des Vektors. (eigene Darstellung)*

Weiterhin sind Shape Keys eine relevantes und hilfreiches Werkzeug zur nondestruktiven Bearbeitung von Meshes, aber auch eine Möglichkeit, eine leichte Dimensionierungen von vorbereiteten Objektelementen zu treffen. Shape Keys sind Vektoren je eines bestimmten Vertex. Im Grunde wird eine Abweichung durch Ummodellierung des Modells festgehalten, die dann normalisiert von null bis eins skaliert angewandt werden kann, um die originale und die relative transformierte Position zu erreichen. Die nicht beschriebenen Komponenten (Analog zu Key Frames in der Animation) werden nicht transformiert. Dennoch ändern sich Flächengrößen und Volumina (Blender Foundation 2025b). Somit kann mit nur einem Schieberegler diese vorbereitete Transformation ausgelöst werden (siehe Abb. 9).

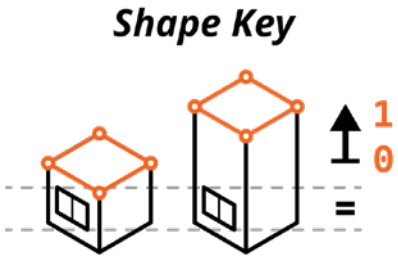


Abb. 9: *Schematische Darstellung der Transformation von Vertices eines Objektes durch einen Shape Key. Die Maße aller anderen, nicht im Shape Key beschriebenen Komponenten bleibt unverändert. (eigene Darstellung)*

Eine sogenannte Geometry Node lässt sich allgemein als eine Operation darstellen, die einen Input zu einem Output verarbeitet. Dieser Output kann wiederum für eine andere Node ein Input sein. Üblicherweise beeinflussen Variablen, wie die Operation den Input verändert; bei einer Skalierung etwa ist die Geometrie, die verändert wird, der Input, und der Skalierungsfaktor die Variable. Auch können durch eine Operation Variablen zusätzlich zum Output ausgegeben werden (Abb. 10), z.B. eine Operation, die alle Elemente in einem Umkreis findet, könnte neben der im Suchbereich positiv liegenden Eingangsgeometrie auch die Anzahl der geprüften Elemente ausgeben.

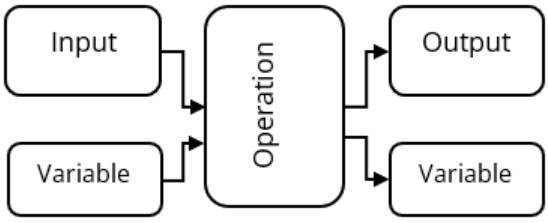


Abb. 10: *Logik und Logistik einer Geometry Node. (eigene Darstellung)*

Für die Arbeit mit Geometry Nodes ist es weiterhin grundlegend, von sogenannten Fields Gebrauch zu machen. Diese „Felder“ sind eine unbestimmte Anzahl von Inputs; etwa die Flächengröße je Face Island (zusammenhängende Faces). Somit ist die Flächengröße nicht ein einzelner Wert, sondern eine Sammlung spezifischer Werte je eines Elementes von Interesse.

Geometry Nodes besitzen somit eine Vielzahl von Inputs, Outputs, und Variablen; jene Variablen, die spezifisch einem Element zugewiesen sind, werden Attribute genannt (z.B Flächengröße, Geschossanzahl). Dabei können Attribute direkt vom Element berechnete, aber auch unmittelbare Informationen beinhalten, wie Hausnummern. Bei der Arbeit mit Geometry Nodes kann Wert darauf gelegt werden, bestimmte Inputs und Attribute „sichtbar“ (exposed) in einem User

Interface den Benutzer:innen zur Verfügung zu stellen, sodass diese leicht verständlich bestimmte Funktionen im Node Graph auslösen und verändern können (Abb. 11).

Die Bedeutung für die Programmierung von Geometry Nodes oder generell visuellen Programmiersprachen liegt darin, dass durch die räumliche Darstellung annähernd eines Ereignisbaumes oder Flussdiagramms die Nachvollziehbarkeit erhöht und andererseits die Einstiegsschwelle verringert wird, falls keine Programmiersprachenkenntnisse vorhanden sind. Die Fehleranfälligkeit durch Benutzer:inneneingaben ist im Vergleich zum textbasierten Programmieren reduziert, da bereits funktionale, vorgefertigte Operationen „nur" mit Steckverbindungen zu Systemen aufgebaut werden, statt kontextuelle und syntaktische Fachkenntnisse für die Bearbeitung vorauszusetzen.

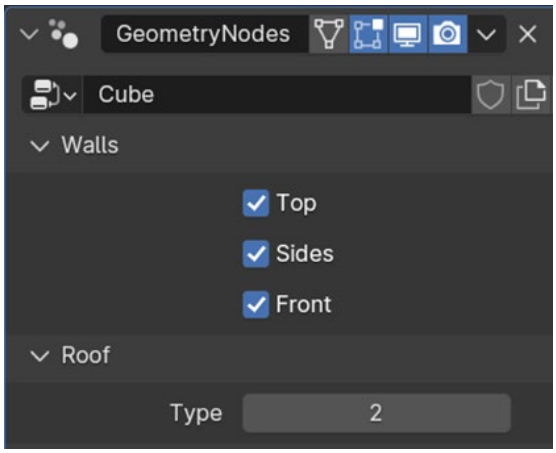


Abb. 11: *Benutzeroberfläche in Blender für Variablen der Geometry Nodes. Werte und Funktionen des Node Graphs können in der Benutzeroberfläche exponiert werden, um von Nutzer:innen ohne tiefgreifende Fachkenntnisse angesteuert zu werden. (eigene Darstellung)*

Für die Verarbeitung von Geodaten zu Gebäudemodellen ist eine Sortierung und Kategorisierung notwendig. Nach welchem System die Informationen für die Verarbeitung erhoben und analysiert werden sollen, soll durch Vergleich mit bereits bestehenden Typologien und Abgleich mit den für diese Forschung relevanten Aspekten erfolgen; aus der behandelten Theorie heraus soll ein Grundgerüst von Kategorisierung und Sortierung für die weitere Arbeit entstehen.

A.6. Gebäude und Typologien

Um die komplexen und interdisziplinären Zusammenhänge eines raumwissenschaftlichen Forschungsgegenstandes Strukturieren zu können, ist es sinnvoll, einen Ansatz der Typisierung zu verfolgen. Im Gegensatz zu Mittelwerten und Standardisierungen, sind Typen als Zuspitzung heterogener Elemente auf bestimmte Merkmale am ehesten Geeignet, eine chaotische städtebauliche Situation nach Schwerpunkten zu gliedern. Eine Sammlung an Typen zu einem bestimmten Gegenstand wird Typologie genannt, eine Wissenschaft der Abbilder. (Blum und Gruhler 2010, S. 5)

Das Einordnen von Elementen nach Abbildern kann schnell an die Grenzen der Definitionen stoßen – insbesondere, wenn die Elemente chaotisch und heterogen sind, wie die einzigartige Komplexität einer Sammlung von Bauwerken, die jeweils ihre eigene innere und äußere Logik und Nutzung auf sich selbst bezogen und im städtischen Kontext besitzen.

Typologie behandelt die Lehre von Typen. Dabei sind diese für die empirische Forschung insofern relevant, dass eine komplexe Realität anhand von Charakteristika und Attributen reduziert wird, um so eine differenzierte Einschätzung unterschiedlicher Situationen zueinander zu ermöglichen. Mit Blick auf das Forschungsinteresse werden Bauwerke somit typologisiert, um die vielfältigen,

physischen Existenzen von Gebäuden anhand ihrer Substanz, Geschichte und Nutzung auf gemeinsame Gruppen zu reduzieren. Dies kann etwa erfolgen durch die grobe nutzungsbezogene Gliederung in Wohn-, Gewerbe oder Industriebebauung, oder genauere Unterteilungen z.B. nach baualtersklassenbezogenen Gebäudetypen. (Blum und Gruhler 2010, S. 5)

Im Zusammenhang mit der Art und Nutzung von Wohngebäuden finden sich in der Literatur eine Vielzahl an Begriffen, die teilweise Synonym, teilweise ungenau verwendet werden. Für diese Forschungsarbeit sollen diese häufig vorkommenden und relevanten Begriffe im Folgenden definiert, voneinander abgegrenzt und eine für das Forschungsinteresse angepasste Klassifizierung begonnen werden, die als Grundlage für die Analyse und Synthese von Bauteilen für die prozedurale Modellierung dienen kann. Die in der behandelten Literatur diversen Kategorisierungen innerhalb des Systems Bautypologie sollen somit als theoretische Grundlage zusammen mit der Empirie neue, auf das Forschungsziel ausgerichtete Typen bilden.

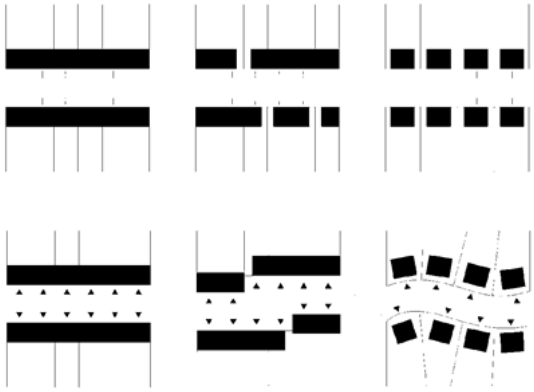


Abb. 12: *Die Formen und Erschließung einer Reihenbebauung, von links nach rechts geschlossene, halboffene und offene Bauweise. (verändert nach: Reicher 2017, S. 77)*

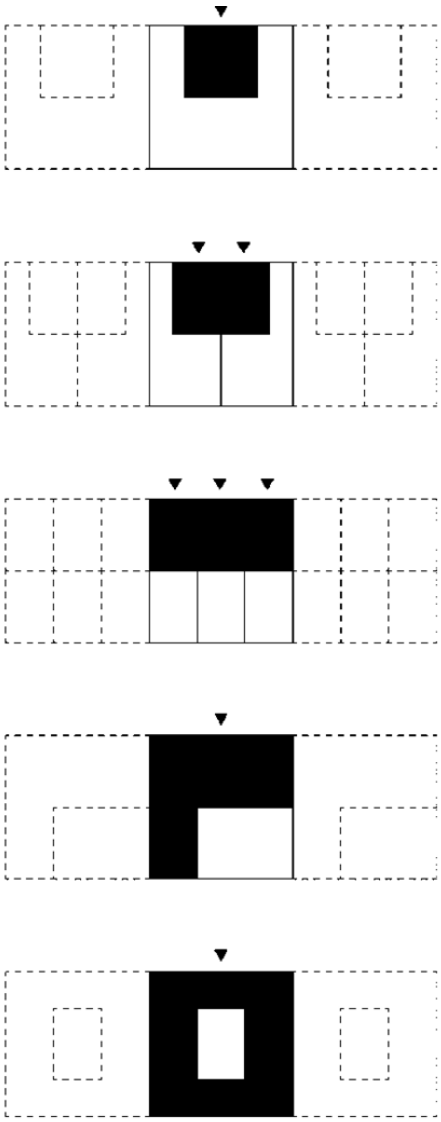


Abb. 13: *Einfamilienhaustypen, freistehend, Doppelhaus, Reihe, Winkel, Atrium. (verändert nach: Reicher 2017, S. 123)*

Nach Reicher sind Strukturtypen die Art und Weise wie Baukörper angeordnet sind, wie sie durch ihre Anordnung Räume formen, und wie sie genutzt werden können. Beispielhafte Strukturtypen sind der Block, die Reihe, die Zeile oder das Solitär. Dabei umfasst die Beschreibung der Typen die Größe des Grundrisses, seine Form und die Erschließungsrichtung zu einer Straße. (Reicher 2017, 64f)

Innerhalb dieser Strukturtypen wird für Wohngebäude eine einfache, aber ebenso grundlegende Zweigliederung nach Einfamilien- und Mehr-

familienhaus vorgenommen. Dies ermöglicht anhand der Differenzierung nach Wohneinheiten die untergliederten Haustypen einzuteilen. Nach Reicher sind Haustypen das freistehende Haus, das Doppelhaus, das Reihenhaus, das Winkelhaus und das Atriumhaus (siehe Abb. 12). Mehrfamilienhaustypen sind lediglich nach der inneren Position der Wohneinheiten gegliedert, z.B. Dreispänner. (Reicher 2017, 122f)

Ebenfalls relevant ist die Verwendung des Begriffes Bauweise nach Reicher. Die Bauweise wird über die Haustypen hinweg als die Lagebeziehung der Gebäude zueinander verwendet – eben diese Spezifizierung als offene, halboffene oder geschlossene Bauweise vergrößert den Möglichkeitsraum der Ausgestaltung verschiedener Haustypen sehr: isoliert betrachtet ist ein Reihenhaus in offener Bauweise nicht zu unterscheiden von einem Solitär (siehe Abb. 13).

Auch in der Architektur und Immobilienbranche findet der Begriff Haustyp ähnliche Verwendung als die charakterisierende Art von Bauwerken hinsichtlich Nutzung, Funktional geprägt durch die Anzahl an Wohneinheiten, teilweise jedoch mit branchenspezifischen Ausführungen: Das Immobilienmagazin DasHaus unterschiedet Haustypen nicht nur durch Einteilung nach Anzahl der Wohneinheiten („Bewohner“: Einfamilienhaus, Mehrfamilienhaus), sondern auch nach Bauweisen und Materialien (Fertighaus, Massivhaus u.a.), Position (Doppelhaus, Reihenhaus u.a.), Grad der Eigenleistung bei Planung und Bau (Architektenhaus, Bausatzhaus u.a.), Energieeffizienz (Passivhaus, Niedrigenergiehaus u.a.) sowie dem Baustil (Tiny House, Bungalow, Stadtvilla u.a.) (Deckert 2022). Im Gegensatz zur stadtstrukturellen Definition von Reichert stehen baustrukturelle Merkmale im Vordergrund.

Kontrastierend wird die Bauform in der Architektur in Bezug zu äußeren, stilistischen Formen eines Bauwerkes verwendet, mit Betonung eines gestaltgebenden Konzeptes für ein Bauwerk bzw. eine bestimmte Gattung von Bauwerken – etwa neuer, traditioneller oder klassischer Bauform, im Sinne von formgebenden Bauelementen (Digitales Wörterbuch der deutschen Sprache (DWDS) 2024). Ein architektonisch verwandter Begriff ist somit die Kubatur, als das formgebende Volumen der Gebäudehülle.

Baustile werden im Gegensatz zur Bauform als eine epochale Formensprache verstanden, als übergeordnete Kunstströmung, wie etwa die römische Antike, die Romanik, Gotik, Renaissance, Barock, Klassizismus, Historismus und die Moderne (segu Geschichte 2021).

Baustruktur wird in der Literatur weitestgehend synonym für Bausubstanz verwendet – der physikalischen Realität von Konzepten wie Wänden, Dächern, und Gebäuden, deren Beschaffenheit und Materialität. Der Begriff Baustruktur zielt eher auf Qualitäten im Bauwesen ab und ist insoweit für das Forschungsinteresse zu kleinteilig auf Einzelbauten bezogen. (Glosbe 2024)

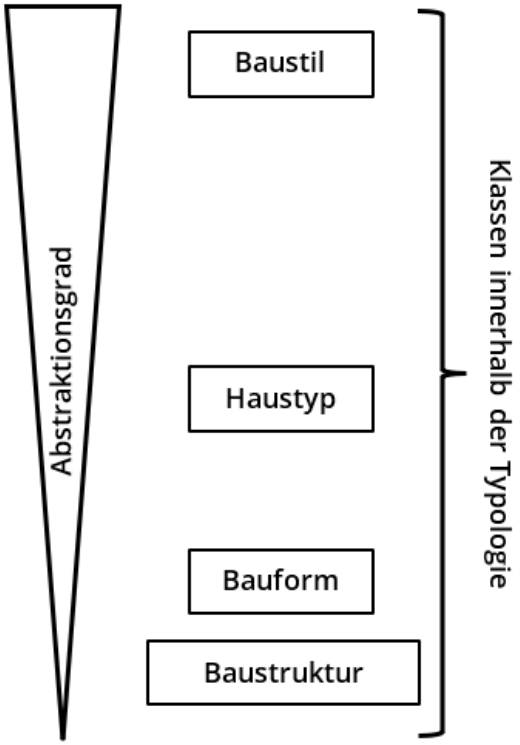


Abb. 14: *Ordnung der beschriebenen Klassen nach Abstraktionsgrad. (eigene Darstellung)*

Die Bautypologie ist eine Gesamtheit von verschiedenen Kategorisierungen von Bauwerken nach Gebäudemerkmalen. Die Einordnung von Elementen kann nach Blum und Gruhler als Klassifizierung und Allokation verstanden werden. Dabei umfasst die Klassifizierung die Entdeckung, Begründung und Bestimmung von Klassen (offen), und geht der Typenbildung voraus – als abgeschlossene Ordnung von Interpretation und sprachlicher Bezeichnung der gefundenen Klassen. Die Allokation ist die Erkennung von Klassenzugehörigkeit und die Zuordnung von Objekten zu den bereits definierten Klassen. (Blum und Gruhler 2010, 12, 14)

Die Klassifizierung soll somit zunächst theoretisch, dann aus dem empirischen Material heraus geschehen. Ähnlich der Typologie des IWU, die für beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz typische Wohngebäude beschreibt, sollen für die Darstellung der Volumina und raumrelevanter Merkmale von Wohngebäuden Attribute aus den Typologien Haustyp sowie der Bauform und Kubatur verwendet werden. Geschossmaße, Dachform und Details sollen in die Klassifizierung einfließen. Das äußere Wesen sowie typische Merkmale zur Wiedererkennbarkeit von Gebäuden sollen reproduziert werden. Die bevorzugte Benennung dieser Klassifizierung ist, angelehnt an die Verwendung bei Reicher, der Haustyp.

Die Arbeit mit Typologien führt zu der Notwendigkeit einer wesentlichen, konzeptionellen Unterscheidung in Real- und Idealtypen. Realtypen sind empirische Typen, die auf Grundlage von statistischer Analyse aus empirischen Daten gewonnen werden – diese natürlichen Typen sind so oder sehr ähnlich in der Wirklichkeit zu finden. Im Gegensatz dazu sind Idealtypen Konstrukte aus der theoretischen Vorarbeit, die als begriffliche Werkzeuge zur vergleichenden Analyse dienen; diese künstlichen Typen sind eine zugespitzte Reinform und nicht in der Wirklichkeit

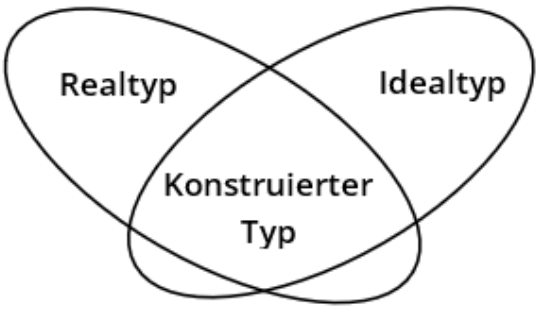


Abb. 15: *Verschneidung typologische Ansätze. (nach Blum und Gruhler 2010)*

zu finden, da sie auf dieser theoretischen Idee basieren. (Blum und Gruhler 2010, S. 11)

Die für die Forschung relevante Zusammenführung von theoretischer Idealisierung und real beobachten Typen ist der konstruierte Typ; dieser wird mit spezifischen Hinblick auf das Forschungsziel geschaffen und befindet sich in einem Wechselspiel der iterativen Annäherung von Theorie und Empirie. (Blum und Gruhler 2010, S. 18)

Vorgehend der Empirie und Analyse soll somit die theoretische Synthese die Arbeitstypologie des raumrelevanten Haustyps nach Abb. 15 in dargestellter Ordnung sein. Begründet wird diese Klassifizierung durch die naheliegende, schrittweise Ausgestaltung von Merkmalen aufgrund des Grundrisses und Erschließung. Alle detaillierteren Unterkategorien sind durch die Geometrische Analyse ausdifferenziert und je nach Informationsgrad erreichbar. Innere Unterschiede wie Einteilung der Geschosse nach Wohneinheiten werden vernachlässigt, lediglich raumrelevante Merkmale werden zur Klassifizierung herangezogen. Inwieweit die Einteilung auf Basis von Grundrissstatistiken und Beziehungen hinreicht, um diese konstruierten Typen auszudifferenzieren, soll in der Analyse überprüft werden, und gegebenenfalls die Klassifizierung angepasst werden. Eine genauere Beschreibung je Element der konstruierten Typen ist im Folgenden in A.8

zu finden, nachdem empirische Statistiken aus der Literatur zur Einordnung in den städtischen Kontext herangezogen wurden.

Die Möglichkeit, Grenzfälle zu behandeln, soll nach dem Praxistest gegeben sein – eine vorgehende Eingrenzung ist notwendig, um eben jene Grenzen neu stecken zu können. Der raumrelevante Haustyp ist fern einer abgeschlossener Klassifizierung; die Ordnung erfolgt hiermit zunächst theoretisch-intuitiv. (Blum und Gruhler 2010, S. 11)

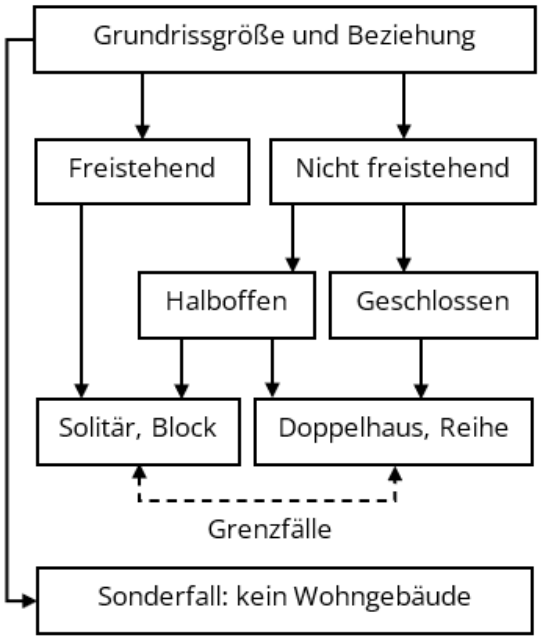


Abb. 16: *Arbeitstypologie der „raumrelevante Haustyp". Verwendet werden Aspekte der Definition nach Reicher sowie der architektonischen Kubatur. (eigene Darstellung)*

Nach der erstiegen Klassifizierung, der folgenden Analyse des Materials und anschließender der Erstellung von prozedural verwendbaren Bauteilen sollen die so erstellten Gebäudemodelle probeweise mit ihrem Zwilling aus der Wirklichkeit verglichen werden. Mit dem Praxistest wird versucht, auf die ursprünglichen Typen zurückzukommen, die Klassifizierung zu bestätigen, gegebenenfalls auszudifferenzieren und anzupassen (Blum und Gruhler 2010, S. 18). Aufgrund der Abstraktion ist ein Detailverlust sowohl unvermeidlich als auch Teil des Prozesses der Idealisierung. Insbesondere Sonder- und Grenzfälle der Klassifizierung sollen dokumentiert und, sofern im Rahmen der Forschungsarbeit vertretbar, die Klassifizierung angepasst werden, sodass ein möglichst hohes, anteilige Maß an korrekter Abdeckung und Varianz zwischen dem realen Aussehen und dem Abstrahierten, Wiederholbaren besteht.

A.7. Statistik deutscher Haustypen

Die in Deutschland vorherrschende Gebäudetypologie der Haustypen ist im EPISCOPE, dem Nachfolger des 2012 beendeten Projektes TABULA der europäischen Union beschrieben. Die deutsche Typologie wurde vom Deutschen Institut für Wohnen (IWU) bereits 1989 begonnen und zur Energieberatung verwendet, seitdem fortgeschrieben und ist letztlich die nationale Ausprägung des EPISCOPE geworden. Das Projekt dient vorrangig der Klassifizierung von Wohngebäuden anhand Haustyp und Baualter hinsichtlich energetischer Bewertung Vergleichbarkeit und Sanierung. Im TABULA sind Beispielrechungen und Effizienzen standardisiert, um Maßnahmen pro Wohngebäude leichter prüfen und planen zu können (Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) 2016, 2015, S. 17).

Wohngebäude sind nach Baualtersklassen, die nach technischen und Baukulturellen Epochen gegliedert sind, sowie der „Größenklasse", die größtenteils der Anzahl der Wohneinheiten entspricht, geordnet (Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) 2016, 2015, S. 17). Diese fünf vorherrschenden Kategorien der Gebäudegröße sind das Einfamilienhaus (EFH), dem Reihenhaus (RH), dem Mehrfamilienhaus (MFH), dem großen Mehrfamilienhaus (GMH) sowie dem Hochhaus

(HH). Interessant sind die auf den ersten Blick rein nach Wohneinheiten erfolgten Definitionen: wonach im Einzelnen nur freistehende Wohngebäude mit weniger als drei Wohnungen als Einfamilienhaus gelten, und ein Wohngebäude mit ein bis zwei Wohnungen als ein Doppelhaus, gereihtes Haus oder sonstiger Gebäudetyp unter „Reihenhaus (RH)“ fällt sofern es nicht freistehend ist (Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) 2015, S. 17). Mehrfamilienhäuser definieren sich lediglich durch die Anzahl von drei bis zwölf Wohnungen und gelten darüber liegend als große Mehrfamilienhäuser (GMH) (ebd.).

Der Klassifizierung nach Wohneinheiten ist somit noch eine Komponente der Lagebeziehung zu anderen Gebäuden angefügt: die Bedingung freistehend oder nicht freistehend. Neben Besonderheiten der Zuordnung hinsichtlich der Kategorien MFH und GMH, die sich aufgrund fehlender Beispielgebäude älterer Epochen beziehen, oder Subtypen nach Bauarten (etwa Fertighäuser und industrielles Bauen) wird hervorgehoben, dass die IWU-Gebäudetypologie nicht zwangsläufig vorgegeben und Kontextabhängig ist (Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) 2015, S. 17). Die Somit bestimmende Lagebeziehung eines Wohngebäudes als grundlegendes Element der Zuordnung muss und ist dennoch konkret anhand des empirischen Materials begründet: sortiert man die Gebäude nach der Anzahl der Wohneinheiten, dominieren bei Ein- und Zweifamilienhäuser die Bauweise als freistehendes Gebäude (66,5%), gefolgt von Doppelhaushälfte und Reihenhaus etwa gleicher Anteile (Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) 2015, S. 20). Anders ist es bei Mehrfamilienhäusern, bei denen die Zeilenbauweise mit 56-prozentiger Inzidenz die freistehende Bauweise um etwa 10% übersteigt (ebd.)

Durch den Fokus auf die Bauweise ergibt sich jener aufschlussreicher Blickwinkel hinsichtlich weiterer Ausdifferenzierung: die Dreiteilung der Ein- bis Zweifamilienhäuser führt zu einer räumlich weitaus relevanteren Beschreibung als über Wohneinheiten der Gebäude. Aus den Bauweisen offen, halboffen und geschlossen lassen sich die Haustypen freistehendes Haus, Doppelhaushälfte oder Reihenhaus ableiten. Gleiches gilt für Mehrfamilienhäuser, mit den weitaus überwiegenden zwei Bauweisen offen und geschlossen als freistehendes Mehrfamilienhaus und Zeilenbebauung; letztere kann sowohl wie der Name suggeriert als Gebäuderiegel typisch für Sozialbauwohnungen, aber auch als Gründerzeit-Blockrandbebauung interpretiert werden (siehe Abb. 17).

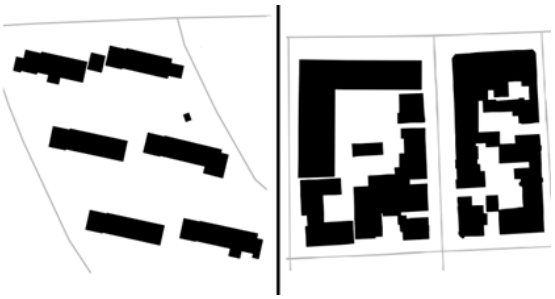


Abb. 17: *Mehrfamilienhaus-Zeilenbauweise als Riegel links und als Blockrandbebauung rechts. (eigene Darstellung, Daten verändert nach OpenStreetMap)*

Inwieweit die Definition der „Größenklassen“-Gebäudetypen des IWU für die Arbeitstypologie von Hilfe sein kann, soll nach der empirischen Erhebung bei der gleichschreitenden Analyse, Synthese und probeweisen Anwendung überprüft werden (siehe Teil B: Empirie).

Die Baualtersklassen lassen Anhand von kleinteiligen insbesondere architektonischen Merkmalen der Gebäudehaut Rückschlüsse auf das Alter und die innere Materialität zu. Epochentypische thermische Isolierung als Hauptinteresse der Kategorisierung, schließen die Klassen von vergleichbaren, von Innen untersuchten Gebäuden auf gleichartige Attribute (Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) 2015, S. 148). Die statis-

tischen Analysen der Baualtersklassen durchgeführt durch das IWU geben einen wertvollen Einblick für den Kontext der vorherrschenden Epochen, ihrer Häufigkeit und Verteilung je Haustyp. Beispielsweise ist die überwiegende Anzahl der Gebäude in Dortmund mit den Baujahren vor 1919 bis 1979 vertreten (siehe Abb. 18). Im Vergleich zur Tabelle Gesamtdeutschlands liegt dies auf mit den im Durchschnitt um die in den1950er Jahren erbauten Gebäude. (siehe Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) 2015, S. 18)

Die Kategorisierung des Baualters gibt somit weitere Aufschlüsse über die räumlich relevanten Merkmale der Wohngebäude, wie etwa die überwiegende Inzidenz von Spitzdächern bei Altbau-Gebäuden im Vergleich zu Flachdächern von Neubauten (Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) 2015, S. 20).

Alle Baualtersklassen lassen sich der Abb. 19 dargestellten Tabelle entnehmen, im Bericht des IWU sind textliche Beschreibungen der Merkmale zur Erkennung der verschiedenen Bauepochen angefügt, mit jenen äußerlich die Gebäude zuzuordnen sind. (Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) 2015, S. 9–16)

Die über die hier genannten Gebäudetypen und Subtypen herausgehenden Klassen, die sich etwa auf Fertighäuser, Hochhäuser oder ausschließlich auf den Baubestand der neuen Bundesländer beziehen, sind aufgrund des außerordentlich seltenen oder fehlenden Vorkommens für das Forschungsinteresse nicht relevant und werden in dieser Arbeit keine Verwendung finden (siehe Abb. 18, Abb. 19).

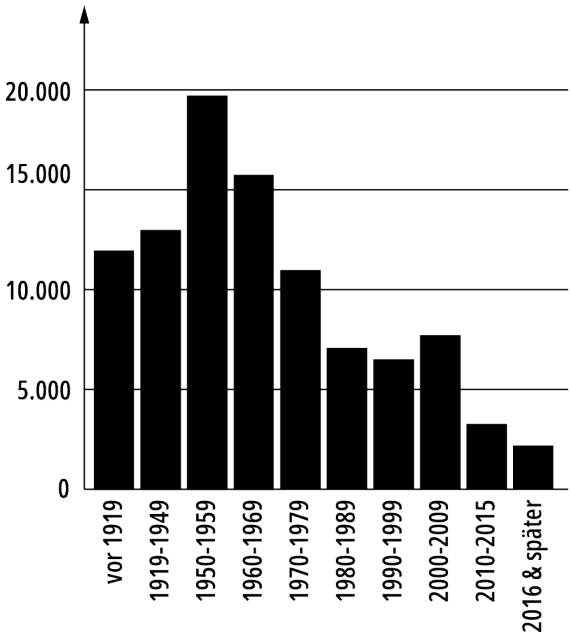


Abb. 18: *Anzahl der Gebäudealtersklassen in der kreisfreien Stadt Dortmund bis 2016. (Daten nach: Statistisches Bundesamt 2024)*

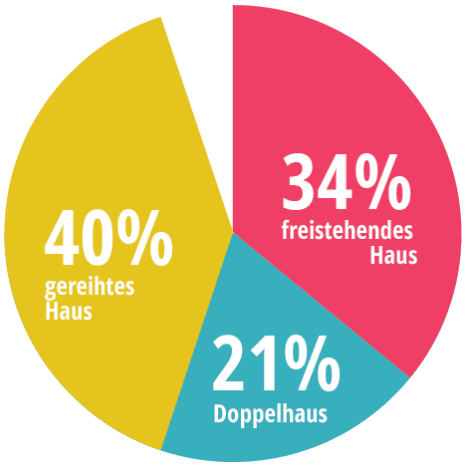


Abb. 19: *Allgemeine Aufteilung der Haustypen in Dortmund im Jahr 2016. Es wird nicht spezifisch nach der Anzahl der Wohneinheiten unterschieden, sondern der Lagebeziehung zu anderen Gebäuden. (Daten nach: Statistisches Bundesamt 2024)*

A.8. Der raumrelevante Haustyp

In A.6 wird aus der in der städtebaulichen und architektonischen Literatur gängigen Typologie für Wohngebäude eine für das Forschungsinteresse dieser Arbeit angepasster Arbeitstypologie konstruiert, sie wird vorläufig als „der raumrelevante Haustyp“ bezeichnet. Die Bezeichnung bezieht sich auf die Vermischung Gebäudeinnerer Attribute, die dennoch das äußere Aussehen beeinflussen, sowie der äußeren Beziehung des Gebäudes zu anderen Baustrukturen in der Stadt, teilweise bestimmt durch den inneren Nutzen; namentlich die Bauweise (offen, halboffen, geschlossen) und Wohneinheiten (z.B. Solitär oder Doppelhaus).

Um den Weg von der Klassifizierung jedes einzelnen Gebäudes optimieren und automatisieren zu können, ist es zuallererst grundlegend, die einfachste Form des Problems zu erforschen und zu lösen. Im Sinne der automatisierten Rekonstruktion von Wohngebäuden als digitaler Zwilling, auch in abstrahierter Form, ist dies die erstmalige Definition der Klassen. Im Sinne der Idealtypen nach Blum und Gruhler ist dies ein literarisch basierter, dennoch beginnend „intuitiver“ Prozess der Forschenden, der als Startpunkt benötigt wird (Blum und Gruhler 2010, S. 11). Solitär, Block, Doppelhaus und Reihe sollen im Folgenden über Steckbriefe ausdifferenziert werden (siehe Abb. 20). Diese Definition bildet die Grundlage für den späteren Vergleich mit dem erhobenen Material, der Analyse zwischen realen, einzelnen Bedingungen und dem operationalisiertem konstruierten Typen. Aufbauend darauf wird die Anpassung anhand des empirischen Materials der Objekte und der probeweisen Anwendung auf jene Daten der Objekte erfolgen.

Die Abschließende Feinjustierung und Einordnung von Grenzfällen soll somit vor der Studie eines neuen Gebietes erfolgen: die Case Study. Jene Erkenntnisse, Abweichungen und Erfolge sollen anschließend in Teil C diskutiert werden.

Der Übersichtlichkeit halber ist jedem der drei Steckbriefe eine zusammenfassende als auch ergänzende Notiz zugefügt; aus bestimmten Annahmen und hinreichenden Bedingungen, die nötig sind, damit ein Objekt in die Kategorie des Steckbriefes sortiert werden kann, ergeben sich daraus resultierende notwendige Bedingungen: beispielsweise ergibt eine vollständig offene Bebauung, unter der Annahme, dass nach geltendem Recht der Bauordnung gebaut wurde, dass Abstandsflächen existieren, die in Wohngebieten 40% der Gebäudehöhe betragen, mindestens jedoch drei Meter (BauO NRW §6 Fn 8 Nr. 5 Abs. 1). Somit sollten alle Solitäre drei Meter Abstand zu Umgebungsbebauung besitzen (dies wird weiterhin als bestimmender Faktor der Bauweise verwendet); ob bauliche Anlagen wie Geräteschuppen oder Garagen zur umgebenden Bebauung gezählt werden sollen und wo die Grenze der Größe dieser liegt, muss im Weiteren getestet werden. Ebenfalls folgt die empirische Probe der Typen, ihren Annahmen und Bedingungen in Teil B, und damit die Erweiterung und Konkretisierung des auf der Kubatur basierenden des raumrelevanten Haustyps (siehe A.6).

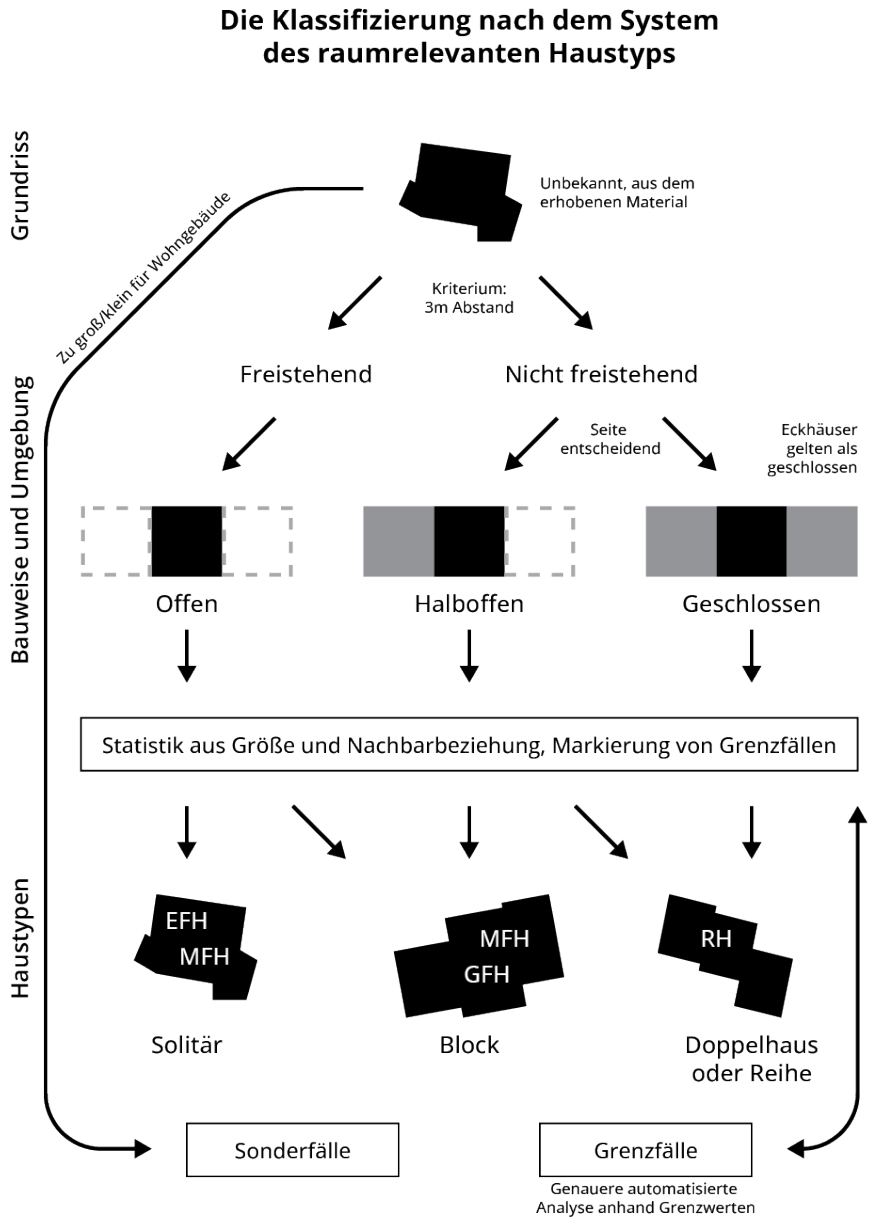
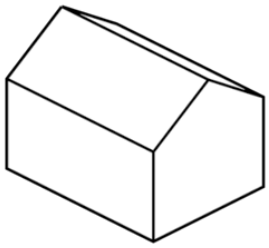


Abb. 20: *Übersicht der Klassifizierung und vorläufigen Bedingungen für die neuen Haustypen. Die Statistik erfolgt während der Arbeit am prozeduralen Generator und die Werte werden beizeiten getestet und festgehalten. Die Beziehung zu klassischen Typen der IWU-Typologie nach Wohneinheiten ist in Weiß über den Haustypen eingetragen. (eigene Darstellung)*

Steckbrief Solitär



Annahmen

- Grundriss größer Reihe
- 1-2 Vollgeschosse

Hinreichende Bedingungen

- offene Bauweise
- größer Doppelhaus oder Reihenhaus
- Mögliche Gleichförmigkeit zu anderen: „offenes Reihenhaus“

Notwendige Bedingungen

- freistehend mit mindestens 3m Abstand zu umgebenden Bauten
- Orientierung unabhängig von umgebenden Bauten

Das solitäre Wohngebäude ist nach Reicher der allgegenwärtigste Strukturtyp und findet sich von Bauernhäusern über Rat- und Kulturhäusern bis Kirchen vertreten in allen Epochen. Der identifizierende Aspekt ist die isolierte Lage in der Landschaft oder bewusste Distanzierung zu anderen Bauten. (Reicher 2019, S. 16)

Das Solitär kann folgend der Klassifizierung des raumrelevanten Haustyps sowohl Einfamilienhaus als auch Mehrfamilienhaus sein. Der Flächeninhalt des Grundriss-Polygons soll zunächst größer als jener eines Doppelhauses festgelegt werden. Die Bauweise ist ausschließlich offen, ansonsten handelt es sich um ein Doppelhaus (halboffen), Reihenhaus oder überwiegender Größe als Block. Die Geschossigkeit soll nach IWU ein bis zwei Vollgeschosse betragen (Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) 2015, S. 13).

Die Beispielhaustypen in dieser Gruppe sind klassische Einfamilienhäuser wie im Bild, Mehrfamilienhauszeilen und eingangs genannte Sonderbauten. Wie den nachfolgenden Typen sind die hier aufgeführten Bedingungen Annahmen, die sich aus der bisher behandelten Literatur begründen, und dessen Grenzwerte noch im Folgenden getestet und angepasst werden. Im Folgenden sollen freistehende, gleichförmig gebaute Solitäre, ansonsten teilweise auch „Reihenhäuser“ bezeichnet, als Solitär gelten.

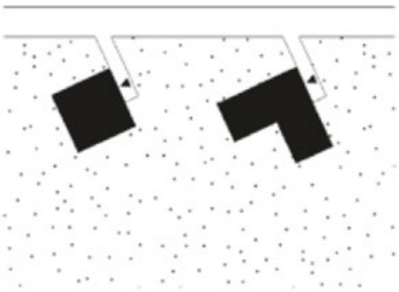
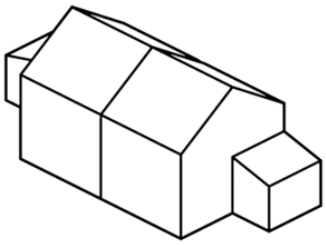


Abb. 21: *Gebäudegrundriss zweier Solitäre mit Straße und Erschließungspfeil. (Reicher 2019, S. 14)*

Steckbrief Doppelhaus & Reihe



Annahmen

- Grundriss kleiner Solitär und Block
- 2 bis 3 Vollgeschosse
- Bei Doppelhaus zwei Endhäuser

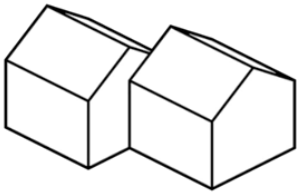
Hinreichende Bedingungen

- Halboffene oder geschlossene Bauweise
- kleiner als ein Block

Notwendige Bedingungen

- Mindestens ein Nachbargebäude
- Üblicherweise Fassade Richtung Erschließung
- Mögliche gleichartige Nachbarn: Doppelhaus- oder Reihenhaussiedlung

Die Reihe kommt als Strukturtyp entlang von Erschließungswegen oder eigenes Anordnungsmuster zum Einsatz (Reicher 2017, S. 15). Reihen eine lineare Addition von Gebäuden entlang einer Straße, die gerade, geknickt oder gekrümmt verlaufen kann, die Ein- und Zugänge zu den Gebäuden sind jeweils zur Straße orientiert (ebd.). Reihenhäuser kommen somit generell in allen Bauweisen vor, geschlossen, halboffen mindestens als Endhäuser, sowie mit Abstand, aber vom Grundriss her gleichförmig einheitlich – letztere sollen aber nach dieser Definition als Solitäre, nicht als Reihenhäuser gelten (siehe Steckbrief Solitär).



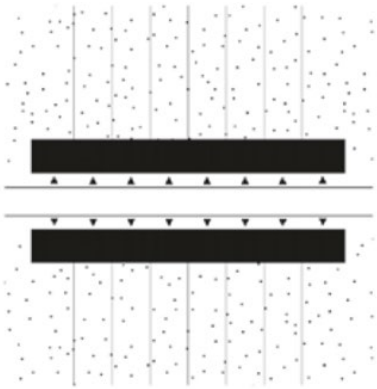


Abb. 22: *Grundrisse von stadtstruktureller Zeilenbebauung, die auf Gebäudeebene als Reihe in geschlossener Bauweise gelesen werden kann (Reicher 2017, S. 14).*

Doppelhäuser sind von ihrer Zweigliedrigkeit her ausschließlich halboffen vorzufinden; es sind zwei Wohngebäude, sie sich eine Wand teilen. Die Einfassung des Doppelhauses als Subtyp in die Reihe begründet sich durch die ähnliche Kubatur und Beziehung. Demnach sind Doppelhäuser Reihenhäuser, die aus nur zwei (gleichartigen) Elementen bestehen. Inwieweit diese

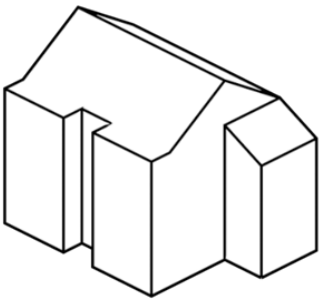
Vereinfachung akzeptable Ergebnisse hinsichtlich der Klassifizierung liefert, soll ebenfalls im folgenden Teil B empirisch überprüft werden.

Das realtypische Vorbild der Reihe sind sowohl Doppelhäuser als auch Reihen. Der nach Vollziehbarkeit beinhaltet der Titel sowohl den Idealtypen „Reihe“ sowie seinen Subtypen des „Doppelhauses“. Entsprechend der Einordnung des IWU sind typische reale Vertreter aus der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts, üblicherweise mit zwei bis drei Vollgeschossen und Satteldach (Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) 2015, S. 14)

Der Block gehört ebenfalls zu den traditionellen Grundbausteinen der Stadt und ist über Jahrhunderte hinweg als Strukturtyp im Gefüge der Stadt zu finden (Reicher 2019, S. 13). Die einzelnen Elemente des Blocks, also das Gebäude, sollen als mit Bedingung der halboffenen bis geschlossenen Bauweise definiert werden, entweder als Endhaus zu einer Baulücke oder als Eckhaus, sowie größer als die Reihe.

Die erste, grobe Definition dieser Typ ergibt sich aus dem Vorbild des klassischen Blockrandgebäudes aus der deutschen Gründerzeit, sowie alle anderen, von der Kubatur her ähnlichen großen Wohngebäude. Dieser Typ sollte nur

Steckbrief Block



Annahmen

- Grundriss größer Reihe
- 3 bis 8 Vollgeschosse
- Breite Seite parallel zu Straße

Hinreichende Bedingungen

- Halboffene oder geschlossene Bauweise (auch Eckhaus)
- größer als Solitär oder Reihenhaus

Notwendige Bedingungen

- Mindestens ein direkt anliegende Nachbargebäude
- Möglicherweise vorhandene Baulücke (=halboffen)
- Fassade Richtung Erschließung, grenzt Baukante
- Orientierung abhängig von umgebenden Bauten

Mehrfamilienhäuser beinhalten. Die Anzahl der Vollgeschosse von drei bis acht soll das MFH und GMH des IWU einschließen (Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) 2015, S. 15).

Inwieweit die typische Struktur des allseitig von Straßen umgeben Blockraumes, sowie des Innenhofes zur Identifikation im prozeduralen Generator verwendet werden kann, ist bisher nicht sicher, wird hier jedoch als mögliches Identifikationsmerkmal festgehalten (siehe Abb. 23).

Die besondere Bedeutung der Ecksituation als geschlossene, jedoch nicht lineare Bebauung, muss anhand der Kanten des Grundrisspolygons als Richtungsänderung beachtet werden.

Es besteht die Möglichkeit, dass diese Definition des Blocks nicht ausreichend unterschiedlich zum Doppelhaus und der Reihe ist; lediglich die Grundrissgröße ist ein sicheres Unterscheidungskriterium, während das Solitär vor allem durch die notwendig isolierte Lage, und das Reihenhaus durch die Dualität von halboffener und geschlossener Bauweise einzigartig sind. Dies muss in der folgenden praktischen Anwendung geprüft werden.

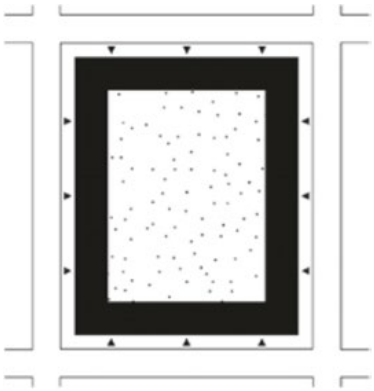


Abb. 23: *Grundriss eines Straßenblocks mit Blockrandbebauung. Die Bebauung ist zur Straße orientiert mit markanter Abgrenzung zu den Innenhöfen. (Reicher 2019, S. 14)*

Erwartete Grenzfälle

Hinsichtlich der Klassifizierung heterogener, notwendigerweise baulich einzigartig ausgeführter sowie historisch unterschiedlich kontextualisierter Gebäude in vier Kategorien ist es abzusehen, dass eine Abstraktion von Details auf den klassenspezifischen Informationsgehalt (die erwarteten Attribute) stattfindet. Die Bauwerke werden von ihrem Realtypen, der die forschungsinteressengeleiteten Ausprägungen beinhaltet, also vom physischen Zustand empirisch auf Merkmale reduziert; um dann anhand dieser Merkmale letztlich in die Haustypen eingeordnet zu werden. Die zweifache Abstraktion der Erhebung und Einordnung besitzt somit zwei filternde, reduzierende Vorgänge.

Im Gegensatz zur methodisch notwendigen Generalisierung soll jedoch anhand der beibehaltenen Attribute wieder zurück auf einen Ausschnitt des Ganzen geschlossen werden; die methodische Komprimierung der Forschungsobjekte macht die folgende Verarbeitung und Schlussfolgerung auf ein abstrahiertes Abbild der Realität handhabbar. Es ist deswegen dennoch auch zu erwarten, dass von einem Teil der Forschungsobjekte nicht zurück auf das ganze vollständig ohne Verlust geschlossen werden kann – sofern die relevanten Teile befriedigend synthetisiert werden können, sollte dies jedoch kein Problem darstellen.

Das Ausmaß und Stärke von Grenzfällen ist ohne Vergleichsmaterial ohne Test zu diesem Zeitpunkt nicht absehbar, deswegen ist es von höchster Wichtigkeit, jegliche Grenzfälle zu notieren und anhand von kleineren Tests während der Analyse und Synthese Struktur und Methode in die Zählung und Bewertung von Grenzfällen zu bringen. Im Teil B soll während der Arbeit Notiz zu den Effekten und Grenzen der Methodik geführt werden, um sie in Teil C reflektieren zu können.

Es ist anhand der am offensten formulierten Klassenbedingungen des Haustyps Solitär abzusehen, dass dieser als Auffangkategorie gilt, also für jene Elemente, dessen Attribute den anderen Klassen nicht hinreichend sind. Auch sind Überschneidung verschiedener Typen zu erwarten, da sich manche Bedingungen je nach Grenzwerten nicht ausschließen (etwa MFH und RH, oder DH und RH). Durch iterative Prüfung und Anpassung von Grenzwerten wie der Grundrissgröße oder Bauweise als differenzierende Faktoren für die Klassifizierung als die erwarteten Typen, also jenen die am ehesten dem Realtypen entspricht, sollten die Überschneidungen und Fehlklassifizierungen zu verringern, wenn auch nicht zu vermeiden sein.

Sichtbar werden theoretisch nicht genau bestimmte Grenzen zwischen Bauweisen auch im System des IWU, auf welchem der raumrelevante Haustyp teilweise basiert: zwischen Doppelhäusern und Reihenhäusern wird nicht unterschieden (Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) 2015, S. 17). Auch Sonderfälle von Baukörpern besonderer Bauweisen (im Vergleich zur bebauten Umgebung) wie beträchtlichen Höhenunterschieden oder besonderen sozioökonomischen Planungen, etwa großflächiger sozialer Wohnungs- und Plattenbau und Hochhauswohnsiedlungen sind Fälle, die von grenzwertigem Interesse für diese Forschung aufgrund der isolierten Bedeutung sind, aber auch ohne Input voraussichtlich nicht korrekt klassifizierbar von allgemeineren Gruppen abzugrenzen sind.

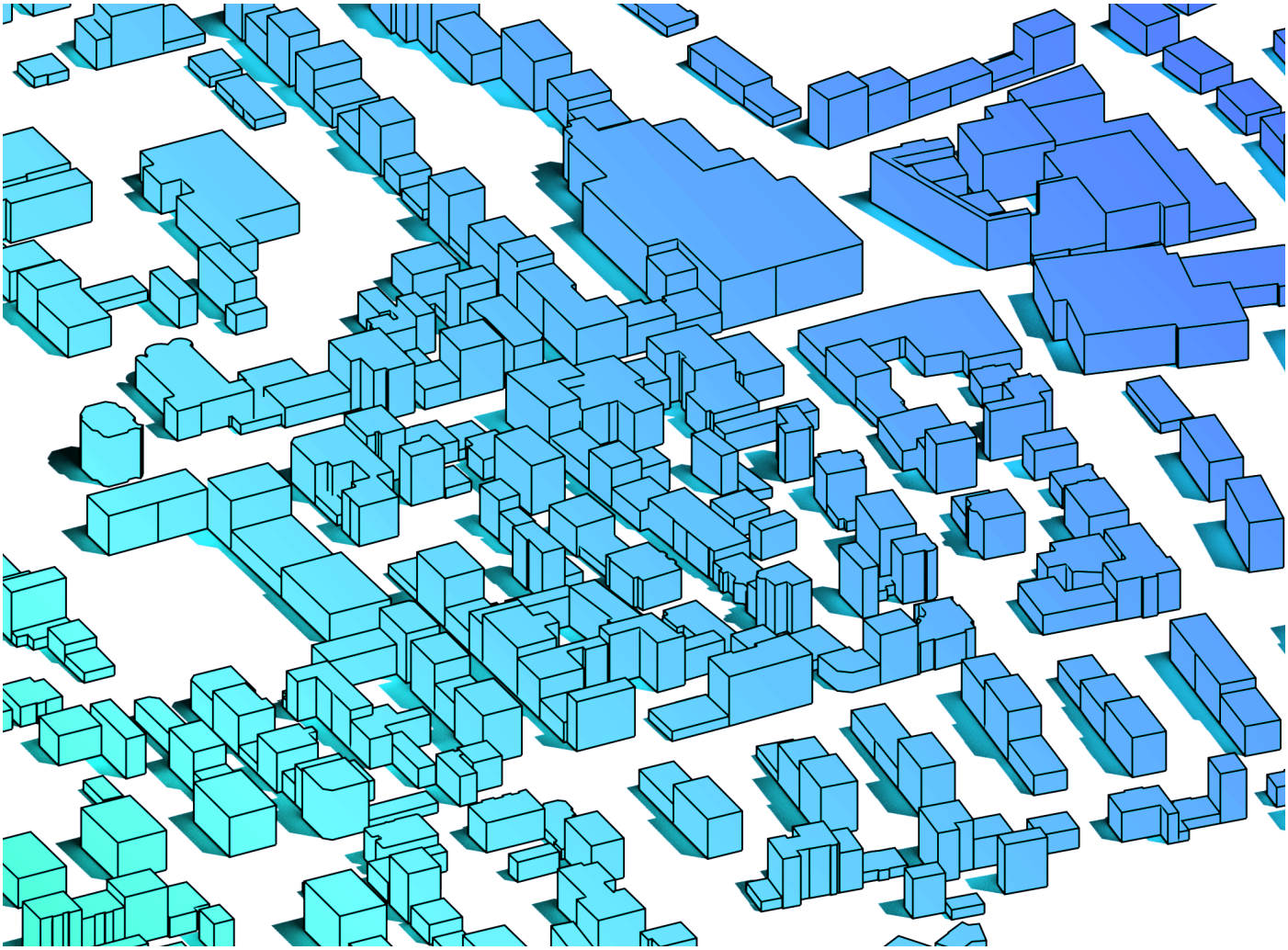
Kriterien für die Empirie

Für die Erstellung eines Gebäudegenerators ist es notwendig, dass für einen ersten Schritt der Klassifizierung die raumrelevanten Attribute einer repräsentativen Auswahl der Wohnbebauung eines für das Ruhrgebiet beispielhaften, begrenzten Gebietes im erhoben wird. Dies ist wichtig, um grundlegende, handfeste Daten zu Realtypen zu schaffen. Dazu wird eine Auswahl an realen Gebäuden im Plangebiet erst über Fernerkundung, dann durch Feldforschung begangen und ihre relevanten Attribute erhoben. Die zu Erhebenden Maße der Gebäude sind die Bauweisen, Dachformen und Grundflächenmaße.

Dadurch wird es möglich, analytisch auf für die Erfassung und Reproduktion von Eigenschaften von Wohngebäuden wichtige Muster zu schließen, sowie Annahmen aus dem raumrelevanten Haustyp überprüfen und verbessern zu können. Nach Analyse, Einordnung und folgender Synthese des Geometry Node basiertem Generators soll zum Modellieren von Bauteilen auch die interne Modellierumgebung von Blender benutzt werden.

Die Darstellung eines Quartiers mit dem Generator soll in einem angemessenen Maßstab angestrebt werden, in dem auch Computer Performanceoptimierung beachtet wird, um die Zugangsschwelle auch mit gering-Leistungsfähigen Systemen zu ermöglichen. Ein raumplanerisch wie städtebaulich verbreiteter Maßstab für die Betrachtung von Quartieren oder Stadtteilbereich ist der Maßstab 1:500, mit jenem noch metergroße Details sichtbar sind, während die Kubaturen von Gebäuden und der öffentliche Raum im Vordergrund der Darstellung bleiben.

Für die Sammlung der Entscheidungen, Annahmen und Daten der Haustypen sollen Steckbriefe zur einfachen Identifikation erstellt werden. Diese dienen einerseits als Zusammenfassung, und andererseits als Orientierung für die Klassifizierung.



TEIL B: EMPIRIE

Zuerst erfolgt die Betrachtung des Forschungsgebietes über Fernerkundung mit Satellitenbildern und 3D-Darstellungen (z.B. GEOPortal oder 3D.RUHR), das Auffinden von äußeren Mustern und Clustern und die Kontrolle der Diversität von Haustypen. Danach werden in GIS die Berechnung von Grundrissgrößen sowie erste Betrachtung der Bauweisen und Baubeziehungen, insbesondere Abstände, der Gebäude zueinander vollzogen. Um die Fernerkundungsdaten durch reale Messungen zu überprüfen und erweitern zu können, werden mithilfe der wissenschaftlich behaupteten Typologie des IWU die Baualtersklassen und Gebäudetypen erhoben. Die Beschreibungen für die Feldforschung für ein Klemmbrett ausgedruckt und die Kategorie auf dem jeweiligen Gebäude in einer Gebietskarte aus dem Kataster notiert. Die Feldforschung erfolgt zu Fuß durch Begehung des Forschungsgebietes.

Die Größenordnung der Erkundung ist einerseits in einem sinnvollen, zweckmäßig ausreichenden Umfang durchzuführen, andererseits müssen die zeitlichen Ressourcen angemessen verteilt werden, da auch für die Case Study eine Fernerkundung und Feldforschung zur Kontrolle notwendig sein wird. Eine Anzahl von Straßenzügen im Forschungsgebiet ist als Maß in diesem Fall zu bevorzugen, auch da Straßen nach dem Zufallsprinzip in GIS gewählt werden können, und mit einem Erhebungsschlüssel, z.B. jedes fünfte Gebäude, eine kleinräumlich nicht allzu statische Aufnahme erfolgt.

Abb. 24: *Luftbild des statistischen Bezirks Dortmund Hombruch und anliegendes Umfeld. Der dargestellte Bereich umfasst den Ortskern, den Bahnhof sowie Hauptverkehrsstraßen. (Maßstab 1:10.000. Verändert nach: Bezirksregierung Köln 2024b)*

B.1. Wahl & Umfang der Proben

Für die Feldforschung wird der Dortmunder Stadtteil Hombruch, genauer der statistische Bezirk, ausgewählt. Innerhalb Dortmunds liegt Hombruch im Südwesten, etwa vier Kilometer von der Innenstadt entfernt, nahe der Bundesautobahnen A40 und A45. Aufgrund der diversen Haustypen verschiedener Baualtersklassen und Epochen sowie der Beispielhaftigkeit als ein Ortsteil einer Stadt im Ruhrgebiet mit Industrie, Bergbau, Wachstum und Strukturwandel, sowie der vergleichsweise einfachen intersubjektiven Begehbarkeit und Überprüfung durch räumliche Nähe, fällt die Wahl auf Hombruch. Die Wahl erfolgt somit neben der informierten Entscheidung teilweise subjektiv; dies ist aber nicht unbedingt ein Nachteil, da üblicherweise der Beginn einer Typologie nach Blum und Gruhler aus der begründeten Erfahrung theoretisch intuitiv geschieht und anhand von Empirie angereichert und verbessert wird (Blum und Gruhler 2010, S. 11).

Beschreibung des Forschungsgebiets

Der Dortmunder Stadtbezirk Hombruch, der sowohl Hombruch selbst als auch 17 weitere Ortsteile (statistische Bezirke) umfasst, ist flächenmäßig der größte Stadtbezirk Dortmunds und an dritter Stelle der Einwohner:innenzahlen. Der Ortsteil Hombruch besitzt Reste historischer Ortskerne, Fußgänger:innenzonen und ein breites Warenangebot, das lediglich hinter der Dortmunder Innenstadt in der Region liegt. Die Entwicklung Hombruchs ist vom Steinkohlenbergbau und der Eisenindustrie geprägt; im Stadtbezirk Hombruch liegt auch die Technische Universität Dortmund mit 32.500 Studierenden. (Stadt Dortmund 2024)

Die erste Erwähnung Hombruchs als Siedlungsname existiert aus dem Jahr 1395, aus der frühen Zeit sind die Relevanz des Lennhoffs Hof und der Ölmühle bekannt, die sich im Ortsteil Hombruch befanden. Von einem Besitzwechsel der Herzogschaft 1609 ist bekannt, dass die Mühlen und der Hombrucher Wald von bereits jahrhundertelang betriebenen Bergbau arg verwüstet war. 1899 wurde Hombruch an den öffentlichen Personennahverkehr angeschlossen; in der Folgezeit um die Jahrhundertwende erlebte Hombruch eine weitere wirtschaftliche Blüte mit Erweiterung der Stahlindustrie, während der Bergbau nach 1918 weiter nach Norden wanderte. Bis 1989 wurden Stahlgüter im Stadtbezirk Hombruch (Baroper Walzwerk) gefertigt. Hombruch ist ein beliebter Vorort Dortmund und besitzt überörtlich bedeutsame Einkaufsgelegenheiten, zu denen insbesondere der Hombrucher Markt und die Harkotstraße zählen. (Hombrucher Geschichtsverein e.V. 2020).

Abb. 25: *Ansicht des Hombrucher Marktes an der Harkotstraße, im Hintergrund rechts die evangelische Kirche, fertiggestellt 1896 (Datierung etwa 1900. Verändert nach: Hombrucher Geschichtsver-*

Geodaten und Vorbereitung

Der Erhebung der Wohngebäudebaustrukturen geht zunächst eine Fernerkundung voran; das Gebiet soll somit großflächig gesichtet, grundlegende Strukturen erkannt und weiterführende Schritte fundiert werden. Der Siedlungsbereich Hombruchs soll danach genauer auf seine Baustrukturen hinsichtlich der Haustypen untersucht werden. Für die Fernerkundung werden frei verfügbare Daten bereitgestellt durch das Land NRW (über die Server der Bezirksregierung Köln) und OpenStreetMap herangezogen; von Ersteren Orthofotos des Plangebietes und Hausumrisse der Gebäude, von Letzteren Linienzeichnungen der Straßen.

Für die Gebäudegrundrisse wird als Geodatenquelle der Onlinedienst Geoportal.NRW verwendet. Mithilfe eines Auswahlrechtecks über Hombruch werden die Hausumringe als geeignete Daten identifiziert; Die Hausumringe enthalten keine Ausgestaltungsgeometrien und keine Dächer (Bezirksregierung Köln 2023; Land NRW 2024). Jedoch funktioniert die Auswahl nicht; die Paketierung erfolgt nach der Auswahl von Gesamt-NRW mit über 850 Megabyte Datengröße (komprimiert). Der Ausschnitt der Daten muss daher dennoch mit GIS durchgeführt werden. Die Auswahl erfolgt über eingeladenen Hausumringe, und einer Auswahl des statistischen Bezirks Hombruch (Grenzen der Statistischen Bezirke 2024). Über die QGIS-Funktion „Vector->Research Tools->Select by Location“ mit Bedingung „Intersect“ werden die Flächen die überlappenden Features der Hausumringe ausgewählt. Statt direkt die Clip-Funktion zu verwenden, also die Features anhand des Bezirks zu beschneiden, werden so die gesamten Polygone, die innerhalb des Forschungsgebietes gelegen sind oder dieses am Rande teilweise berühren, ausgewählt, und können so ohne Schnitt, falls sie denn über die Grenze hinausragen, extrahiert werden. Dadurch werden die Gebäudegrundrisse nicht verändert, um für die Statistik keine verfälschten Flächen zu bekommen.

Für die Straßen sollten die Daten des Straßennetzes des Landesbetriebs Straßenbau NRW verwendet werden; jedoch sind bis auf Autobahnen in keiner der Linien- und Flächenfeatures, anders als in der Datenbeschreibung angegeben, Land- oder Kreisstraßen vorhanden. Alle verfügbaren Features, die keine Punktdaten sind, wie die Abschnitte und Äste, Betriebskilometer, Fahrstreifen, Netzknoten und Ortsdurchfahrten, enthalten lediglich die Bundesautobahnen im Bereich Dortmund. Sucht man im Webgeodatenbrowser von Geoportal.NRW, werden für alle Arten von Straßen Overlay-Layer für digitale Orthofotos ausgegeben. (Land NRW 2024)

Es muss somit für die weitere Forschung zur Referenz der Straßen auf die Datenbank von OpenStreetMap zurückgegriffen werden, in denen von Autobahnen bis Erschließungsstraßen alle Verkehrswege vorhanden sind (Geofabrik GmbH 2018).

Auswahl der Proben

Die Stichproben werden nach Zufallsprinzip ausgewählt; da das Plangebiet Bautypologisch sehr divers ist (siehe Abb. 24), liegt es im Forschungsinteresse, zunächst eine ungerichtete Erhebung vorzunehmen, um eine typologisch möglichst breit gestreute und subjektiv unbeeinflusste Menge an Daten zu erhalten, und diese dann anschließend qualitativ zu erweitern, sollten bestimmte Bautypen in ungleich verteilten Anteilen vorzufinden sein, wovon allgemein auszugehen ist. Nichtsdestotrotz ist bei dieser ersten Stichprobe ein deduktives Vorgehen anhand großflächiger, weniger theoriebeeinflussten Probenwahl vorzuziehen, um bisher unbeachtete Erkenntnisse nicht vorweg zu verzerren. Es soll folgende Erhebungsformel angewandt werden: innerhalb des zusammenhängenden Siedlungskörpers des statistischen Bezirks Dortmund Hombruch werden drei Haupt- oder Nebenstraßen gewählt, und jedes vierte Gebäude wird näher betrachtet und erhoben. Die Hierarchisierung der Straßen wird den Geodaten von OpenStreetMap des Webdienstes Geofabrik entnommen, da wie beschrieben die zur Verfügung gestellten Daten des Landes NRW unzureichend sind (Geofabrik GmbH 2018).

Die Zufallsauswahl erfolgt in Zwei Schritten; dies geschieht aus dem Grund, einen realen Mix von Bauwerken „von der Straße“ zu bekommen – zwar erhöht es nicht den Anteil möglicher geringrepräsentierter Haustypen, stellt dennoch eine reale Situation in ihrer gewachsenen Zusammensetzung dar. Der erste Schritt der Auswahl ist die randomisierte Selektion von Verkehrswegen oberhalb der ausschließlichen Fuß- und Erschließungswege sowie niedrigerer Ordnung als Bundesautobahnen, da diese im ersten Fall überaus kurz gestückelt, unregelmäßig in Lagebeziehung zu Gebäuden und der Stadt sein können, und im zweiten Fall frei von direkt anliegender Wohnbebauung sind. Es werden mithilfe des QGIS-Tools Random Selection (unter Vector/Research Tools/) drei Gemeinde-, Kreis- oder Landstraßen zufällig aus den Straßen-Linienfeatures ausgewählt. Der erste Durchlauf wurde verworfen, da eine falsch kategorisierte, kurze Erschließungsstraße sowie eine den Plangebietsrand kreuzende und überwiegend außerhalb verlaufende Straße selektiert wurden. Im zweiten Anlauf fiel die Zufallswahl des Algorithmus auf folgende drei Straßen Hombruchs: die Heisterstraße, die Wupperstraße und die Lütgenholthauser Straße (siehe Abb. 26).

Abb. 26: *Lage der zufällig ausgewählten Straßen im Plangebiet. Während die Heisterstraße und Wupperstraße in ihrer Gesamtheit ausgewählt wurden, ist die Lütgenholthauserstraße am nördlich dargestelltem Ende durch eine kreuzende Straße unterbrochen; diese Unterbrechung wurde beibehalten und der Fokus auf das vergleichsweise längere südliche Stück gelegt*

Jedes vierte Wohngebäude auf beiden Seiten der Straßen soll erhoben werden. Die zu notierenden Attribute sollen die Geschosshöhe, der Gebäudetyp nach IWU sowie die Baualtersklasse sein (Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) 2015, 9-11, 13-15). Die Charakterisierung soll nach den in beiden Tabellen beschriebenen Merkmalen erfolgen, sowie anhand der Beispielgebäude. Insbesondere bei der Baualtersklasse wird jedoch nicht der Anspruch erhoben, dass diese korrekt von mir zugeordnet werden können, da dies einerseits von untergeordneter Bedeutung für diese Forschung ist, und ich andererseits zu wenig architektonische Erfahrung habe, um durchgängig sichere Schätzungen abzugeben. Nur der Vollständigkeit halber wurde die Baualtersklassenzuordnung vorgenommen, falls sich ein Anwendungsfall ergibt.

Für die Erhebung der Gebäude auf den drei Straßen soll erst eine Seite der Straße erhoben, und dann am Ende gedreht und die andere Seite begonnen werden. Die Erhebung soll zu Fuß erfolgen, von jedem zu erhebenden Haus sollen, wenn möglich, drei Fotos (von links, Mitte und rechts) aufgenommen werden. Die Auswahl jedes vierten Gebäudes erfolgt in QGIS durch Abzählung der Gebäudegrundrisse; somit zählen Doppelhaushälften und Reihenhäuser als eigenständiger Indexpunkt. Die zu erhebenden Gebäude werden als Handkarte gedruckt und per Klemmbrett im Feld mit Luftbildern abgeglichen, um tatsächlich und mit großer Sicherheit das korrekte, markierte Gebäude zu erheben.

Weiterhin werden in QGIS als vollkommen zufällige Auswahl ein Prozent aller Gebäude, die größer als 25m² sind, erhoben. Die statistische Methode in QGIS für diesen Vorgang sollen die Centroid-Punkte (Vector/Geometry Tools/Centriods) sein, von denen dann mit der zufälligen Auswahl von Features (Vector/Research Tools/Random Selection) anstelle einer gesuchten Featurezahl ein Prozentsatz von zehn verwendet wird. Diese Zufallsauswahl dient als zweite Probe, um die Felderhebung kontextualisieren zu können; es kann gegengetestet werden, ob die zu erhebenden Gebäude der drei Straßen besondere, ungewöhnliche Ansammlungen von Ausreißern aufgrund unvorhergesehener Lagebeziehungen beinhalten.

Einteilung in Cluster

Die erste Fernerkundung des Plangebietes erfolgt über Orthofotos verschiedener Maßstäbe der beiden kostenlosen Online-Kartendienste TIM-Online und GEOportal.NRW. Diese werden von der Bezirksregierung Köln und dem Land NRW betrieben, und enthalten viele verschiedene von Bund und Ländern erhobene Geobasisdaten, die nach Open-Data Prinzipien kostenfrei zur Verfügung gestellt müssen (Bezirksregierung Köln 2024b; Land NRW 2024). Daher ist jede Nutzung ohne Einschränkungen oder Bedingungen zulässig. (Land NRW 2024; Bundesministerium des Innern und für Heimat (BMI) 2023). Im Vergleich mit den Gebäudeumrissen Hombruchs werden die Luftbilder in QGIS Seite an Seite auf musterhafte Wiederholungen, Unregelmäßigkeiten und Ansammlungen von Gebäuden gleicher Typen und ihren Lagebeziehungen untereinander erforscht. Dieser Schritt erfolgt manuell durch Betrachtung und Schlussfolgerung mit dem Wissen aus A.7 in Verbindung mit der beschreibenden Systematik des raumrelevanten Haustyps (Abb. 16), das Ergebnis ist in Abb. 27 dargestellt. Als Cluster werden alle Ansammlungen von gleichartigen Haustypen bezeichnet, die in direkter Lage zueinander mindestens zehn Gebäude umfassen. Diese Grenze ist arbiträr gesetzt, um aufgrund der Häufigkeit gemischter Haustypen je Straße nicht zu kleinteilig, sondern mit Blick auf das gesamte Plangebiet Cluster erkennbar darstellen zu können. Die Clusterung soll deshalb auch nicht präskriptiv sein; sie soll lediglich den Blick auf das Plangebiet leiten und das Verständnis im Zusammenhang mit den eingangs beschriebenen Haustypen komprimieren.

Auf der Ostseite der Stadtbahntrasse sind zwei Gewerbeansammlungen zu finden (siehe Abb. 27), ebenfalls ist ein Neubaublock auf der Harkotstraße von Gewerbe und Einzelhandel geprägt (hellblau). Mehrere Mehrfamilienhauscluster sind zentral bis östlich zu finden, und grenzen teilweise an Hochhaussiedlungen (Südosten). Ansonsten sind neben der homogenen Reihenhaussiedlung im Süden am Rebhuhnweg kleinere Nachbarschaften gleichartiger Haustypen vorhanden, jedoch überwiegt eine Mischung von Haustypen verschiedener Dichte, mit der höchsten Dichte im Hombrucher Ortskern am Umfeld des Marktes.

Abb. 27: *Orthofoto überlagert mit der Grenze des statistischen Bezirks Hombruch (weis) sowie der manuellen Clusterung anhand der ersichtlichen Bebauung. (Maßstab 1:5.000. Verändert nach: Bezirksregierung Köln 2024b; Grenzen der Statistischen Bezirke 2024)*

B.2. Primärerhebung

Die Feldforschung in Dortmund Hombruch findet nachmittags am 5. Oktober sowie nochmals am 30. November 2024 statt (beides samstags). Der Zeitpunkt der Erhebung sollte aufgrund der unabhängigen physischen Beschaffenheit der Bebauung keinen Einfluss auf die Empirie haben, jedoch wird für ausreichend belichtete Fotos hinsichtlich des spätjährigen, tiefen Sonnenstandes vorabendliche Zeit gewählt. Zusätzlich zu den Gebäudefotografien werden die Straßenräume der ausgewählten Verkehrswege zur Kontextualisierung und Einordnung in Verbindung mit den Luftbildern abgelichtet, diese sind im Anhang zu finden.

Wie geplant werden die vorweg ausgewählten Gebäude straßenseits begangen, die Fassade fotografiert und die Vollgeschosszahl notiert, wobei für ausgebaute Dachstühle wie in der Kategorisierung des IWU aufgrund Unzugänglichkeit und damit unbekannter Geschosshöhe davon ausgegangen wird, dass diese keine Vollgeschosse sind (Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) 2015, S. 13–15). Bis auf einzelne Fälle, bei denen die Gebäudefassade ohne eindringen auf das Grundstück nicht aus mehreren Winkeln einsehbar ist, sind drei Fotos der Wohngebäude erstellt worden, falls das Gebäude frei oder teilweise freisteht, ist die Seite ebenfalls sofern möglich, fotografiert.

An der Lütgenholthauserstraße herrscht aufgrund des anliegenden Friedhofes an der Westseite der Straße ein einseitiges Fehlen von Bebauung: zum Ausgleich wurde am südlichen Ende in beiden Parallelstraßen, der Erschließungsstraße am Rotkehlchenweg bei Hausnummer 1 sowie der Straße „Vor der Brügge“, die Wohnbebauung erhoben. Dies ist damit zu erklären, dass beide Bebauungsreihen von der Lütgenholthauserstraße direkt einsehbar sind und teilweise mit Türen und Toren anliegen.

Es sind keine Reihenhäuser in den drei Straßen vorhanden; aufgrund der Gleichzeitigkeit der Erhebung und der Erstellung der theoretischen Grundlage des raumrelevanten Haustyps wurde das Vorkommen von Reihenhäusern an den Straßen der Zufallsprobe vor der ersten Feldforschungsbegehung nicht beachtet. Eine gezielte Nacherhebung im südlichen Cluster ist erfolgt. Jedoch ist das Vorkommen von Reihenhäusern im Plangebiet sehr selten und gehäuft, wie dem südlichen Cluster und der kleinen Siedlung an der östlichen Gebietsgrenze (Abb. 27).

Abb. 28: *Wupperstraße Blick nach Norden. Sehr sichtbar ist die geschlossene Mehrfamilienhaus-Blockbebauung rechts sowie ein halboffenstehendes Mehrfamilienhaus am linken Rand. (eigene Darstellung)*

B.3. Analyse der Ergebnisse

Für das weitere Vorgehen ist eine Analyse des erhobenen Materials hinsichtlich der in A.8 für wichtig befundenen Merkmale zweckmäßig: Bauweise, Geschosszahl, Dachform sowie Proportionen von Fassadenelementen wie Fenstern und Türen. Zunächst soll vom großen Maßstab, der äußeren städtebaulichen Form eine Betrachtung der räumlichen und funktionellen Beziehungen der Elemente für den Zweck der dargelegten Forschung erfolgen. Danach werden je Element Besonderheiten und Regelmäßigkeiten verglichen und in statistisch verdichteter Form in dieser Arbeit dargestellt, kontextualisiert und weiterverarbeitet, um Schlussfolgerungen aus einem Teil der realen Welt für die reduzierte, regulierte und regelmäßig abstrahierte Rekonstruktion Digital zu ermöglichen.

Die Realtypen einer zweifachen Zufallsauswahl von Gebäuden im Forschungsgebiet wurden mit Hinblick auf bestimmte Attribute nach dem bereits ausgereiften System der Gebäudetypen des Institutes Wohnen und Umwelt, sowie der bereits absehbaren notwendigen Informationen für den raumrelevanten Haustyp betrachtet und ihre Werte notiert. Dazu zählen zusammengefasst die Bauweise (offen, halboffen, geschlossen, siehe Abb. 16), die Anzahl der Vollgeschosse, des Gebäudetyps nach IWU (EFH, RH, MFH, GMH), die Abschätzung der Baualtersklasse (Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) 2015, S. 9–11) sowie den Fernerkundungsdaten wie Grundrissgröße, Form und Position hinsichtlich Nachbarbebauung basierend auf den Daten der Bezirksregierung Köln (Bezirksregierung Köln 2023).

Die Weiterverarbeitung der hier im folgenden betrachteten Zusammenhänge und Einzelfälle soll dem Forschungszweck dienen, aufbauend auf den nach Aspekten des raumrelevanten Haustyps analysierten Realtypen, Schlussfolgerungen für Muster zuzulassen, die als Schablone für die digitale Rekonstruktion dienen werden. Für diese Mustergebäude, oder besser, Musterhaustypen, werden dann folgend Modulbauteile digital ebenfalls in Blender nach dem üblichen, händischen Modellierverfahren erstellt. Dies wird ebenfalls dokumentiert und Designentscheidungen kurz zusammengefasst. Diese Analyse sowie Modellierung wird schrittweise vom Prozess der nodebasierten Programmierung für die parametrische Komposition der Baumodule nach den Regeln des raumrelevanten Haustyps begleitet; im Forschungsprozess findet die Arbeit an der Analyse und Synthese nicht unbedingt in Folge aufeinander aufbauend statt. Die teilweise Gleichzeitigkeit ist schwierig prozesshaft festzuhalten, ohne von relevanten Inhalten abzuweichen oder kleinere „Proben“ von Vorgängen, wie letztlich die hier genannten Aufgaben umgesetzt werden sollen, verlässlich, nachvollziehbar und sequenziell sinnvoll festzuhalten.

Letztlich soll im Rahmen der Analyse-Synthese der erstellte Generator auf ein anderes, ähnliches Forschungsgebiet als Casestudy angewandt und Schlüsse für die Kategorisierung und Attribuierung gezogen werden. Zu Beginn dieses Forschungsprojektes ist nicht abzusehen, inwieweit der Schritt der Casestudy „brauchbare“, relevante Ergebnisse liefern wird und kann, da an sich die Ausführung aufgrund der neuartigen Natur der Methode nicht genau vorhersehbar ist. Generell ist es jedoch für die Probe der Verwendbarkeit des Generators erstrebenswert, eine empirische Probe durchzuführen, zu vergleichen und zu bewerten.

Wiederholung: relevante Merkmale

Die aus der Feldforschung stammenden Daten wurden im Vorfeld, und werden im Nachhinein mit Fernerkundungsdaten verglichen und ergänzt, sofern notwendig. Zusammen mit den Daten der Zufallsstichprobe lässt sich durch die

Verwendung von Luftbildern darauf schließen, dass keine Reihenhaustypen erhoben worden sind, sowohl nach der IWU-Typologie (Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) 2015, S. 17) als auch entsprechend dem System des raumrelevanten Haustyps. Das Fehlen von Reihenhäusern in der Stichprobe ist weder während der eingängigen Fernerkundung noch der Feldforschung festgestellt worden; dies war eine Unachtsamkeit der eingehenden Kontrolle der zufälligen Auswahl. Im Nachgang lässt sich dies jedoch auch damit erklären, dass Reihenhäuser im Forschungsgebiet sehr selten und gehäuft existieren, etwa in einem Cluster südlich des Rebhuhnweges und in einer kleinen Siedlung an der östlichen Gebietsgrenze (Abb. 27). Straßen mit Reihenhäusern wurden nachträglich am Rebhuhnweg gezielt begangen, fotografiert sowie ihre Grundrisswerte zu den Geodaten hinzugefügt. Ebenfalls nicht spezifisch erhoben wurde der Subtyp des Mehrfamilienhaus-Zeilenbau, wobei dieser auch bereits in QGIS keine belastbaren Unterschiede zu MFH in Blockbauweise zulässt.

Die für die weiterhin folgende Erstellung von Modulbauteilen für die digitale Rekonstruktion notwendige Abstraktion basiert nach Abwägung und Designentscheidungen während der Programmierung (genauer erläutert in B.3) auf den Werten der Grundrissfläche, der Geschossanzahl, der Bauweise und der Zuordnung unter dem raumrelevanten Haustyps.

Abgesehen vom Erhebungsausfall des Reihenhaustyps deckt die qualitative Zufallsstichprobe die verschiedenen Haustypen und Bauweisen relativ divers, jedoch mit einem höheren Gewicht bei Mehrfamilienhäusern ab: von 26 genauer erhobenen Gebäuden sind fünf und sechs dem Typ Einfamilienhaus beziehungsweise Doppelhaus zuzuordnen, und 16 Gebäude als Mehrfamilienhäuser (siehe Abb. 26).

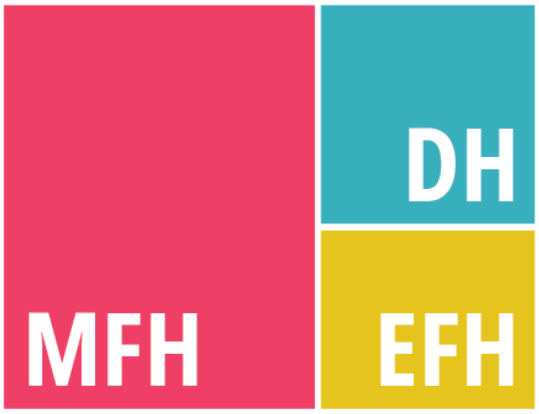


Abb. 29: *Flächenhafte Anteile der drei erhobenen Typologien. (eigene Darstellung)*

Dieses Übergewicht an Mehrfamilienhaustypen innerhalb der Probe lässt sich darauf zurückzuführen, dass zwei der drei erforschten Straßen dem unmittelbaren Altstadtkern und baulichem Zentrum Hombruchs zuzuordnen sind (Heisterstraße und Wupperstraße, siehe Abb. 26 i.V.m. Abb. 27)

Die Beispielhaftigkeit der Probe für das gesamte Forschungsgebiet kann anhand der Cluster abgeschätzt werden (Abb. 27 mit Kreisen). Die in der Probe beinhalteten Typen und architektonischen Ausgestaltungen sind teilweise wiederkehrend über die Straßenzüge hinweg. Etwa im Vergleich der Fassadenelemente und Kubatur der Gebäude H01 und W08 sind bei den in unterschiedlichen Straßen ansässigen Gebäuden ursprünglich gleiche Bauart zu erkennen; Materialität, Farbmuster, Gebäudeeingang, Treppenhausfenster und Erker sowie vorhandene Fenstergeländer sind sehr ähnlich (siehe Anhang).

Äußere Statistik

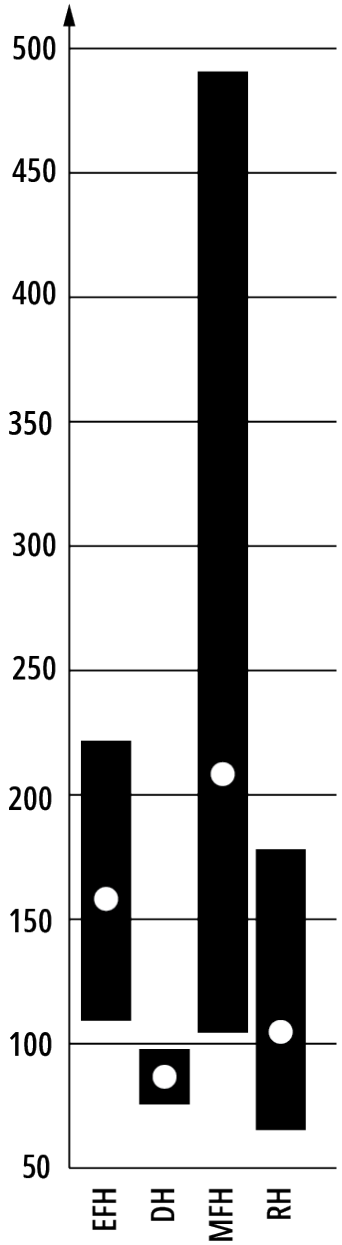
Im Gesamtzusammenhang des Forschungsgebiet betrachtet, gibt es stark unterschiedliche bauliche Dichten. Einerseits lässt sich das ausgefüllte Fassungsvermögen des Raumes durch die Abdeckung des Gebietes mit „Gebäudefußabdrücken", Grundrissen, im Vergleich zum offenen Raum abschätzen, wobei einerseits zwischen dem versiegeltem und unversiegeltem Raum nicht unterschieden wird, sofern dieser keine kubaturhafte Bebauung beinhaltet – also Straßenräume und private Gärten zählen ebenso zum unbebauten Raum wie Grünflächen. Andererseits wird die Dichte eben physisch durch die dritte räumliche Dimension hervorgerufen; die Wirkung von Volumina im Verhältnis zum Freiraum, zu Flächen.

Für das Dichtemaß sollen aufgrund der Annahmen und gesetzten Begrenzungen keine weiter umfassenden Daten für Gebäudegeschosse herangezogen werden, da diese einerseits nicht bereits in die Datenquelle der Hausumringe oder vergleichbaren Varianten eingepflegt sind, und ansonsten spezifische statistische Methoden erfordern, um von anderen voluminösen Datengrundlagen (etwa LOD-Gebäudemodelle, z.B. Bezirksregierung Köln 2024a) die Geschossanzahlen zurückzuführen. Dabei werden ebenfalls Dachformen grundsätzlich nicht beachtet (LOD1). Diese unvollständige Datengrundlage „aus einem Guss" erschwert grundsätzlich nicht besonders spezifizierte Analysen und Verwendungen, sofern nicht das Fachwissen vorhanden ist, die verschiedenen Daten aus unterschiedlichen Quellen und Darstellungen zusammenzuführen.

Ein Maß für die Dichte der Bebauung ist an für sich nicht von besonderer Relevanz für diese Forschungsarbeit, außerhalb kontextualisierenden Informationen. Die Dichte und Clusterbildung basiert aber auf der Betrachtung des Forschungsgebietes unter anderem auf Orthofotos und Laserscandaten, die diese Satellitenaufnahmen um die dritte Dimension erweitern, wie es z.B. bei OpenStreetMap Buildings oder Google Maps mit der Option „Globusansicht" unter den Kartenebenen der Fall ist (Google 2024; OpenStreetMap 2024). Die Ansicht über die Gebäudeformen ist sehr hilfreich in Verbindung mit Luftbildern, um auch ohne die genauen Daten einen Einblick in das Forschungsgebiet zu erhalten (Abb. 27). Weiterhin liefert der Kontrast zwischen bebauter und unbebauter Fläche eines Schwarzplans (Abb. 33) einen binären Eindruck zwischen Freiraum und Kubaturen.

Nach der Typologie des IWU lassen sich die in der Feldforschung und GIS erhobenen Typen und Gebäudegrundrissflächen in folgender Tabelle in Abb. 32 aufgeteilt und zusammengerechnet darstellen, wobei dennoch zwischen Doppelhäusern und Reihenhäusern anhand der Trennbedingung des raumrelevanten Haustyps differenziert wird, da in der Erhebung keine Reihenhäuser erhoben wurden und die Differenzierung aufgrund der angestrebten Verwendung der Daten sinnvoll ist.

Abb. 30: *Blick in das Forschungsgebiet Dortmund Hombruch von süd-west auf den Hombrucher Markt. Die Gebäudehöhen sind überwiegend nicht detailliert dargestellt, sondern uniform auf etwa 15 Meter gesetzt. (OpenStreetMap 2024)*



m²	Min	Max	Summe	Mittel	Anzahl
Alle*	72	492	4520	174	26
EFH	106	219	747	149	5
DH	72	94	401	80	6
RH**	23	172	11479	105	200
MFH	100	492	3372	210	16

Abb. 31: *Tabelle und Grafik der Flächenstatistiken Minimum, Maximum, Mittelwert in Quadratmetern sowie Gruppenelementanzahl gesamt und je Haustyp. Ein Stern bedeutet ohne RH-Werte, zwei Sterne sind die nachträglich über Fernerkundung erhoben Reihenhäuser.*

Im Diagramm wird sichtbar, dass sich einerseits Einfamilienhaustypen und Mehrfamilienhäuser die Grundflächengrößen von etwa 100m² bis 220m² teilen, jedoch der Mittelwert für MFH nahezu am oberen Rand des Maximalwertes von EFH liegt (210m²). Die Trennung zwischen EFH und MFH ist somit zwar im unteren MFH-Größenbereich nicht eindeutig, aber dennoch vorhanden mit Gewicht Richtung des Mittelwertes. Eindeutig dagegen ist die Trennung von Doppelhäusern im Vergleich zu den beiden ersteren Typen: DH setzen sich sowohl in der Maximalgröße als auch im Mittelwert klar von EFH und MFH ab; erhobene Doppelhäuser sind ausschließlich unterhalb 100m² Grundfläche. Reihenhäuser sind sowohl in der Tabelle sowie in der Grafik gesondert, da sie nicht Teil der Zufallsstichprobe sind, und stark durch das südliche Cluster in ihren erhobenen Ausprägungen beeinflusst sind; die Rebhuhnweg-Siedlung ist städtebaulich „aus einem Guss", besteht nahezu vollständig aus Gebäuden gleicher Bauausführung und Baualtersklasse (siehe Anhang). In die nachträglich erhobenen Reihenhäuser sind der gesamte Bestand dieser Siedlung eingeflossen (mit Ausnahme auf dem Luftbild identifizierten nicht-Wohngebäuden) sowie der östlichen Siedlung Traugottweg, um keine selektive Verzerrung zu erzeugen; der weitaus größere Umfang der RH-Probe verzerre jedoch – direkt gegenübergestellt – die qualitativen Ergebnisse der Stichprobe. Weiterhin können durch die lediglich durchgeführte Fernerkundung Zuordnungsfehler trotz Abgleiches mit Luftbildern entstanden sein. Diese sind möglicherweise Teil des sehr geringen Minimums für RH (Abb. 31), jedoch konnten in GIS keine falsch ausgewählten Gebäudeumrisse identifiziert werden.

Neben der 3D-Darstellung des Forschungsgebietes und der 2D-Aufsicht im Schwarzplan wird der Versuch einer dritten Variante der Darstellung von Dichte unternommen: die „Kleinteiligkeit" mithilfe der Voronoi-Polygone. Die mit dieser

Methode erstellte Heatmap (Abb. 32) zeigt, wie „kleinteilig bebaut“ das Gebiet ist. Als Maß wird die Fläche eines Voronoi-Polygons verwendet, dass vom geometrischen Mittelpunkt des Hausumrisses gebildet wird. Danach werden die Voronoi-Flächeninhalte berechnet, und dann auf das nächstliegende Hausumrisspolygon zurückübertragen. Je kleiner der Grundrisse und je geringer der Abstand zum Nachbargebäude, desto höher somit die „Dichte“. Diese „Dichte“ ist an sich jedoch nicht direkt plausibel, da viele, kleinere nah beieinander stehende Gebäude das Maß stark in die Höhe treiben; die Voronoi-Polygone „kristallisieren“ kleinteilig und besitzen somit kleinere Flächeninhalte – große Gebäude, die sehr nah beieinander stehen, haben nach dieser Methode eine geringere „Dichte“. Dennoch lässt sich augenscheinlich Ähnlichkeiten zu den allgemein dicht eingeschätzten Gebieten im Schwarzplan zur Heatmap erkennen, insbesondere im Ortskern um den Hombrucher Markt (vergleiche Abb. 26 und Abb. 32)

Das Verhältnis Bebauung zu Freiraum (ohne Verkehrswege oder Bodenversiegelung) ist gemessen anhand der Hausumringe in der Fläche Ortsteils/statistischen Bezirks Hombruchs wie folgt errechnet:

$$\frac{2{,}21\mathrm{km}^2}{0{,}42\mathrm{km}^2} \approx 19{,}00\%$$

Somit ist etwas unter einem Fünftel der Fläche von Gebäuden jeglicher Art bebaut; dies ist im Vergleich zu anderen Städten im Ruhrgebiet weit im unteren Versiegelungsbereich (Regionalverband Ruhr (RVR) 2024). Einerseits ist Hombruch zwar ein Stadtteil von Dortmund, andererseits aber auch am südwestlichen Stadtrand gelegen, daher ist eine geringere Dichte als in der Innenstadt zu erwarten.

Die angewandte Methode zur Erstellung und Berechnung der Kleinteiligkeit über Voronoi-Polygone erfolgte in QGIS nach folgendem Vorgehen:

Aufrufen der Funktion Vector/Geometry Tools/Centroids, dann Auswahl der erstellten Punktfeatures, folgend Vector/Geometry Tools/Voronoi Polygons mit 20% Buffer der Größe, dann Verschneidung der entstandenen Flächenfeatures mit der Grenze des Plangebietes. Anschließend Flächenberechnung der Features über den Tabellenkalkulator. Die Voronoipolygone basieren somit auf Punktfeatures aus den Centroids der Flächen; daher ist anzunehmen, je weniger quadratisch die Ausgangsfläche war, desto weniger aussagekräftig das Maß hinsichtlich der Form der Fläche – etwa sehr lange, dünne Flächen erzeugen ein gleichen Centroid wie eine kleine Quadratische Fläche am Mittelpunkt. Dennoch ist dies aufgrund des Zusammenhangs, dass kleinteilige Gebäude üblicherweise in Dichten Clustern vorkommen, ausreichend.

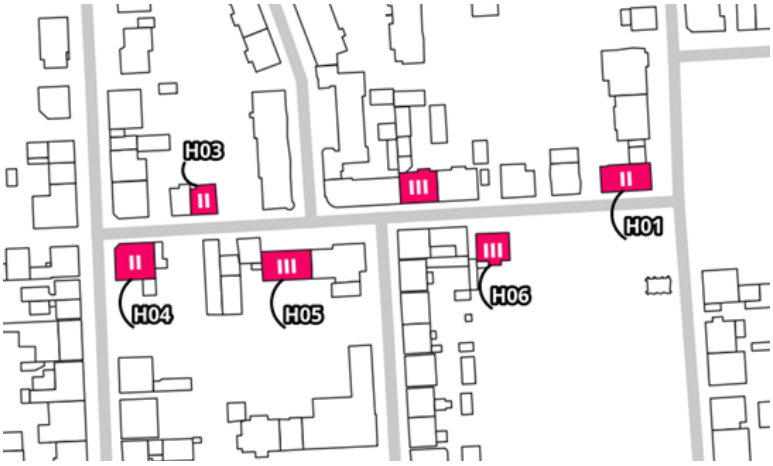
Der Bestand von Anbauten und ihre Häufigkeit ist insbesondere in Verdichteten Bereichen Hombruchs sehr hoch (siehe Abb. 33) und tritt teilweise auch im Maß der Kleinteiligkeit in Abb. 32 auf. Um diese Nicht-Wohngebäude wie Gartenschuppen oder Garagen, oder jenseits des oberen Endes der Wohnhausgrößen liegende Strukturen wie Gewerbehallen und Supermärkte herauszufiltern, sollen die erhobenen Minimal- und Maximalmaße der Wohngebäude angewandt werden. Nach Vergleich mit Luftaufnahmen scheint das Größenkriterium für Wohngebäude 50m² nicht zu unterschreiten; dennoch können fehlerhaft oder regelmäßig geteilte Baukörper dieses Maß verzerren, etwa wenn Anbauten bewohnt und Teil der Gesamtwohnfläche sind, oder aufgrund ungenauer Daten als separates Gebäude gekennzeichnet sind.

Es ist denkbar, dass weiterführende, fortgeschrittene Statistiken wie bei Cluster-Analysen, Polygon-Kantenausrichtungen oder andere Methoden noch mehr Information aus den Gebäudeumrissen erschließen und erzeugen können, etwa die Unterscheidung von Zeilen- und Blockbau-MFH oder verbesserte Eingrenzung der Typen anhand anderer Maßstäbe, dies ist aber derzeit nicht im absehbaren Nutzen für diese Forschungsarbeit und soll hier nicht weiter verfolgt werden.

Abb. 32: *Heatmap nach Voronoi-Polygonen. Dargestellt ist die berechnete „Kleinteiligkeit", die sich aus der Vielzahl von geschlossen gebauten, kleinen Gebäuden in unmittelbarer Nähe ergibt. Je dunkler die rote Fläche ist, desto höher die errechnete Kleinteiligkeit des Gebäudes. (Ohne Maßstab. Eigene Darstellung, Daten von: Bezirksregierung Köln 2023)*

Abb. 33: *Schwarzplan der Bebauung (Hausumringe) des statistischen Bezirks Dortmund Hombruch. Die außen liegende Bebauung ist grau dargestellt. (Ohne Maßstab. Eigene Darstellung, Daten von: Bezirksregierung Köln 2023)*

Abb. 34: Im Uhrzeigersinn erhobene Gebäude auf der Wupperstraße, Lütgenholthauserstraße und Heisterstraße. Mehrfamilienhäuser sind Magenta, Einzelhäuser Gelb und Doppelhäuser Cyan gefärbt. Die Geschosszahl ist in römisch angegeben, das Identifizierkürzel mit Bogenpfeil. (Daten verändert nach: Bezirksregierung Köln 2023; Geofabrik GmbH 2018)



Innere Statistik

Innerhalb der identifizierten Gruppen von Gebäudetypen sollen Regelmäßigkeiten und Besonderheiten Aufschluss liefern, inwieweit für diese Typen Muster existieren und folglich Modulbauteile entwickelt werden können.

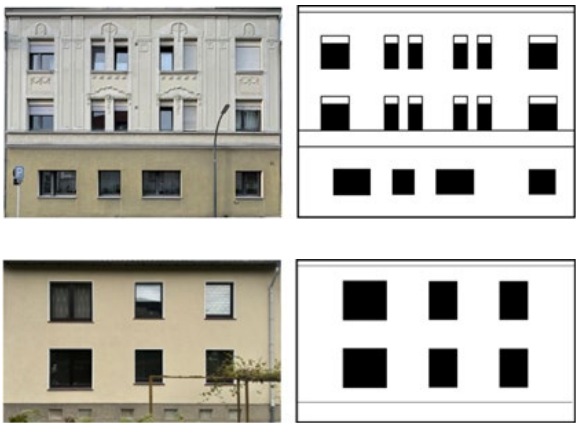


Abb. 35: Fassaden erhobenerer Gebäude (H02 und L01) links entzerrte Aufnahmen der Fassade, rechts schematische Darstellung der Proportionen der größten Fassadenelemente. (eigene Darstellung)

Verschiedene Haustypen besitzen unterschiedliche, aber innerhalb ihrer Gruppe wiederkehrende Merkmale der Fassadenelemente. Etwa H02, H03 und W03 sind aufgrund der stuckbesetzen Fassade und Materialität und Ausgestaltung generell der Epoche der deutschen „Gründerzeit" zu Beginn des 20. Jahrhunderts zuzuordnen (vergleiche Aufnahmen im Anhang). Andere Gebäude, insbesondere Wohngebäude mit Aufputzdämmung oder generell Dämmsysteme mehrerer Ebenen (Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) 2015, S. 29), besitzen recht dickte Gebäudeaußenhäute, die an Gebäudeöffnungen markant als Vertiefung des Bauelementes in der Fassade in Erscheinung treten (z.B. bei L10).

Weiterhin sind die Proportionen der Elemente unterschiedlich und hängen einerseits von der künstlerischen Freiheit der Architekt:innen ab, andererseits ist die Größe der Fassadenfläche ein entscheidender Faktor für den Raum zwischen und der Größe der Elemente: die erhobenen Reihenhäuser besitzen eher dicht gedrängt wirkende Fassadenelemente, insbesondere die Türen und Fenster, aufgrund der kleineren Fassadenfläche im Vergleich mit einem verziertem Mehrfamilienhausaltbau wie H02, dessen Fenster nicht notwendigerweise Zweckmäßig zweigeteilt sind, auch wenn das Erdgeschoss eine vermutlich nachträglich entstandene abweichende Aufteilung aufweist.

Die verschiedenen Ausprägungen der Fassadenelemente vor allem als Fenster und Türen (und ihren Bauteil-Dimensionen) können aufgrund der dominanten Praxis auch bei den erhobenen Gebäuden der Beletage, also unterschiedlich ausgestaltetem, meistens detaillierterem Erdgeschoss, von den oberen Geschossen getrennt werden. Die Aufteilung zwischen Fassadenelementbauteilen für das Erdgeschoss sowie folgende Obergeschosse ermögliche somit eine größere Freiheit bei der Reproduktion dieser Ausprägungen – und innerhalb von zu selektierenden Modulbauteilgruppen können im Vorhinein Erdgeschosselemente wie Türen als Bauteile von Obergeschossen ausgeschlossen werden.

Die Geschosse der Gebäude erhoben in der Zufallsstichprobe sind in Abb. 34 mit römischen Ziffern innerhalb der Gebäude angegeben. Insgesamt bestätigen diese Werte die in der Typologie des IWU angegebenen Geschossanzahlen für den jeweiligen Gebäudetyp, tendieren jedoch insbesondere bei MFH und DH zur unteren angegebenen Grenze von drei beziehungsweise zwei Geschossen (Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) 2015, S. 13–15).

Die Dächer der besichtigten Wohngebäude sind überwiegend in Satteldach- und Flachdachart ausgestaltet (siehe auch Abb. 26). Da keine Besichtigung des Inneren der Gebäude mit dem Forschungsziel in diesem Fall als verhältnismäßig oder essenziell zu rechtfertigen ist, werden Satteldächer generell nicht als Vollgeschosse gezählt, sofern nicht bereits eindeutig von außen ersichtlich abschätzbar ist, dass eine ausreichend lichte Geschosshöhe von drei Metern und eine Mindestgröße der Geschossfläche von drei Vierteln des unterliegenden Geschosses erreicht ist (BauNVO NRW §2 Abs.6).

Die Fassadenmaterialien und Farben je Haustyp variieren mit Unikaten besonderer Farbwahl und Fassadenverkleidung, tendieren jedoch überwiegend grober Putz gestrichen in Sand- und Steintönen, selten ist aber auch Schieferverkleidung bei Obergeschossen zu finden, vor allem bei Doppelhaustypen (L05, L08, L09). Die Zuweisung von Materialien und Farben soll durch Vorbereitung zur einfachen Veränderbarkeit durch Benutzer:innen über Materialvorlagen in Blender gewährleistet werden, sodass eine veränderliche Auswahl an häufigen Materialien vorzufinden ist aber auch noch relativ leicht abgeändert werden kann, sofern dieser zusätzliche Schritt in die Tiefe gewünscht ist.

Der Fokus der Darstellung der Fassadenelemente soll auf grundlegende Proportionen, statt genauen Dimensionierungen gelegt werden. Einerseits aufgrund der nicht im Forschungsinteresse relevant zu erhebenden Fassadenelementmaße, andererseits da bisher nicht absehbar ist, wie verallgemeinbar diese Maßbauteile sein werden. Daher wird die Entscheidung getroffen, proaktiv die Anpassungsmöglichkeit über ein bereits existierendes System in Blender den Benutzer:innen in die Hand zu legen: optional ist eine individualisierbare Gestaltung der Fassadenelemente möglich durch das Einbeziehen von sogenannten Shape Keys. Diese sind im Vorhinein vorbereitete Minimal- und Maximalveränderungen von Dimensionen – vorstellbar über einen Schieberegler, mit dem z.B. die Fensterbreite zwischen den Multiplikatoren größer null bis zwei verändert werden kann, also nahezu keine Breite bis 200% der ursprünglichen Fensterbreite. Genauer wird dieses Vorgehen in B.3 behandelt.

Darstellung über Modellmuster

Um Modelle zu erstellen, die den real existierenden, physischen Präsenzen der Bebauung innerhalb eines abstrahierten Rahmens ähnlich sehen, ist es notwendig, zu definieren, was dargestellt werden soll. Während eben nicht jedes Gebäude exakt, sondern anhand von Annahmen und Verallgemeinerungen rekonstruiert wird, gibt es dennoch gewisse Ausprägungen von Attributen: Grundrisse, Geschosshöhen oder Dachformen können zwischen zwei Gebäuden gleich sein, dennoch können sie real anders ausgestaltet sein. Da aufgrund der notwendigen Abstraktion jedoch der Fokus in dieser Forschungsarbeit lediglich auf „raumrelevante" Ausprägungen gelegt werden soll, ist dennoch die Notwendigkeit gegeben, anhand der drei raumrelevanten Haustypen (siehe A.7 sowie Abb. 16) Ausprägungen der Attribute auszuwählen – die drei Typen sind klassifizierend zur Einordnung von Bauweisen, jedoch nicht ausreichend, um die reale Bebauung erkennbar genug in Funktion darzustellen.

Um anhand den raumrelevanten Haustypen und erhobenen Daten nun 3D-Modelle zu erstellen, ist eine Festlegung auf eine Anzahl und Art der gewünschten Ergebnissen nötig; im Grunde, wie jene Daten dargestellt werden sollen. Zu diesem Zweck werden Modellmuster definiert: als eine Art Musterform, vergleichbar mit einer Kuchenbackform. Dem Kuchenteig mit all seinen Zutaten wird Form gegeben – zwar besitzt die Form gewisse Eigenschaften wie Material, Höhe und Geometrie, jedoch können die Zutaten einzigartige Ausgestaltungen innerhalb der Form annehmen. Nach diesem Prinzip funktionieren

Modellmuster: die Vielzahl an Daten wird in Muster „gebacken“, um ihnen Konsistenz zu geben. Die Formen/Modellmuster sind im Grunde austauschbar, der gleiche „Teig“ kann verschieden modelliert werden. Nach diesem Prinzip werden daher in der Feldforschung qualitativ als für häufig und repräsentativ befundene Gebäudemuster verwendet, um die Daten visuell aufzubereiten.

Um aufgrund der begrenzten Ressourcen sowie der Austauschbarkeit und nicht zuletzt nachrangiger Relevanz wird keine umfängliche Erhebung für diese Modellmuster vollzogen; die Modellmuster lediglich visuell repräsentativ und austauschbar, um die Daten dazustellen, je nach gewünschtem Zweck.

Den Modellmustern als die „Backform“ für die Ausprägung der Gebäudeattribute nachgeordnet sind letztlich Sammlungen von Bauteilen: Module, die vom prozeduralen Algorithmus anhand der Gebäudeattribute in bestimmter Konfiguration positioniert, rotiert und skaliert werden (siehe Abb. 36).

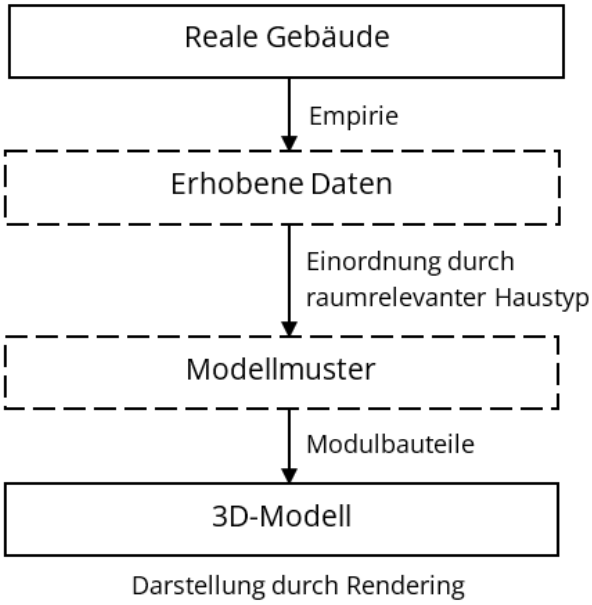


Abb. 36: *Prozess der Datenverarbeitung vom realen Typen über Analyse und Synthese zum digitaler Zwilling als 3D-Modell. Die gestrichelten Rahmen umfassen jene Schritte, die nicht unmittelbar sichtbare Ergebnisse erzeugen.*

Im Sinne der Kuchenmetapher nehmen die Modulbauteile die Rolle der sichtbaren Elemente des fertigen Kuchens ein: Boden, Seiten, Decke und Dekoration.

Kurzbeschreibung der Modellmuster

Für die Auswahl der Modellmustergebäude werden im Erhebungsgebiet vorkommende, qualitativ als beispielhaft bewertete Gebäude herangezogen. Die Gebäude im Plangebiet weisen auch nach dem System der Haustypen des IWU wiederkehrende Formen auf: innerhalb des Einfamilienhaustyps die Einfamilienhäuser selbst sowie Doppelhaushälften, sowie Reihenhäuser, und im Mehrfamilienhaustyp die Zeilenbebauung und Blockrandbebauung. Die Auswahl erfolgt ebenfalls anhand der Erfahrungen aus der Feldforschung im Gebiet in Verbindung mit Belegen aus Luftbildern, dass jene Eindrücke eine reale Häufigkeit von Typen widerspiegeln, die zu einem Muster kondensiert werden können.

Abb. 37: *Freistehendes Einfamilienhaus mit Garten, Garage sowie Souterrainkeller im bewegten Gelände. (Erhoben als L11, eigene Darstellung)*

Das Einfamilienhaus ist wie bereits in A.8 als Art des Solitär beschrieben, Ein freistehendes Gebäude, dass nach der hier geltenden Definition des raumrelevanten Haustyps kleiner als ein Mehrfamilienhaus ist, sowie als einzelne Wohneinheit gilt, wobei letzteres kein Ausschlusskriterium sein soll, sofern es keine Auswirkung auf die Kubatur hat, also äußerlich wie ein „übliches" freistehendes Einfamilienhaus aussieht. Im Erhebungsgebiet Hombruch gibt es eine Vielzahl an Einfamilienhäusern insbesondere in den weniger dichten Bereichen im Süden, sichtbar auf Luftbildern sowie in der Clusterung (siehe Abb. 27). Häufig sind Anbauten und freistehende Bauten auf dem Grundstück anzutreffen (siehe Abb. 37). Während es sehr verschiedene Ausgestaltungen (Ausprägungen) der Attribute gibt, etwa Zechenhäuser, freistehende Reihenhäuser, Bungalows. Gründerzeitgebäude oder Fachwerk, wird der Fokus auf eine simple Darstellung gelegt, mit gleichartiger Materialität und Farbe der Gebäudeaußenhaut sowie Satteldach (Abb. 37).

Abb. 38: *Doppelhaushälfte, sichtbar ist die haushälfteneigene Gaube sowie der seitliche Eingang und Garage. (Erhoben als L02, eigene Darstellung)*

Perspektivisch kann die Darstellung und Ausgestaltung frei aus einer Sammlung von Modulbauteilgruppen gewählt werden. Für die Wände, Fenster und Türen können die Bauteile des Einfamilienhauses als Muster gelten oder direkt wiederverwendet werden, sofern keine differenzierenden Ausprägungen die Kubatur beeinflussen.

Das Doppelhaus, einzeln die Doppelhaushälfte, ist ein besonderer Typ, der im Klassifizierungssystem des raumrelevanten Haustyps als Unterkategorie der Reihe gilt. Die ausschließliche Ausprägung als halboffene Bebauung mit üblicherweise an der Trennwand gespiegelter Geometrie wird durch Anlagen wie Garagen und Erschließungswege benachbart. Ebenfalls mehrfach insbesondere auf der Lütgenholthauserstraße anzutreffen sind Doppelhaushälften mit eigener, oder mit dem Nachbargebäude geteilter Gaube (Abb. 38). Bis auf die Symmetrie zum Nachbargebäude ist die Ausgestaltung sehr ähnlich zum Einfamilienhaus; Modulbauteile können voraussichtlich mit diesem Muster geteilt werden, und unterscheiden sich lediglich in der mittig-lateralen Platzierung.

Das Reihenhaus ist ein Gebäudetyp, der selten vereinzelt vorkommt: Im Erhebungsgebiet gibt

Abb. 39: *Zeilenhaussiedlung südwestlich der Lütgenholthauserstraße. Die Reihenhausbauweise setzt sich in beide Richtungen der Straßenseite sowie der südlichen Parallelstraße fort. (eigene Darstellung)*

es lediglich zwei Cluster, in denen Reihenhäuser räumlich zusammenhängend vorkommen (siehe Abb. 27). Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass keine kleinen Reihen von drei Reihenhäusern gebaut werden, sondern sie üblicherweise als Siedlung dieses Typs geplant werden. Reihenhäuser haben, sofern sie keine Reihenendhäuser sind, nur eine vom öffentlichen Straßenraum sichtbare Seite: die Vorderseite. Die Positionierung der Fenster und der einzelnen Tür ist ähnlich jenen eines Einfamilienhauses, jedoch in Anordnung der Elemente kompakter; sie wirken dadurch auch größer. Ansonsten sind Spitzdächer verbreitet, in der Siedlung südöstlich der Lütgenholthauserstraße sind, neben den Bungalowbauten, auch Reihenhäuser mit Flachdächern anzutreffen (Abb. 39). Der Mehrfamilienhaus-Zeilenbau ist in Hombruch mehrfach in kleineren Clustern von regelmäßig unter zehn gleichförmig

Abb. 40: *Mehrfamilienhaus-Zeilensiedlung südlich der Wupperstraße. (eigene Darstellung)*

gebauten oder positionierten Einheiten im Erhebungsgebiet anzutreffen (Abb. 40), jedoch häufig und verteilt anzutreffen. Im Erhebungsgebiet ist eine größere Ansiedlung im Nordosten an der Lütgenholthauserstraße zu finden. Der Zeilenbau zeichnet sich durch die Anreihung mehrerer einzelner Mehrfamilienhäuser als halboffene und geschlossene Bauweise aus. Markant ist das zentrale, große Treppenhaus sowie die vergrößerte Eingangstür, teilweise als Erker und anderer Materalität (siehe Abb. 40 sowie H01 und W08 im Anhang). Inwieweit das zentrale Treppenhaus korrekt dargestellt werden kann, hängt davon ab, ob im Rahmen dieser Forschungsarbeit die relevanten Techniken implementiert werden können: einerseits das Auffinden der straßengerichteten Seite, andererseits die Bemessung der Mitte dieser Seite und Dimensionierung in Zusammenhang mit den umliegenden Baumodulen. Insbesondere die automatisierte „Suche“ nach der straßennächsten Seite kann rechenaufwändig und für den Forschungsrahmen zu detailliert sein; dies muss im Prozess der Implementierung der für diese Attribute notwendigen Funktionen getestet werden.

Der Mehrfamilienhaus-Blockrandbau ist nur in den baulich dichteren Clustern zu finden. In geschlossener oder halboffener Bauweise grenzt an den Baublock üblicherweise ringsum der Stra-

Abb. 41: *Blockrandecke mit Erdgeschossnutzung als Klinik, die farblich hervorgehoben ist. (Erhoben als W05, eigene Darstellung)*

ßenraum an. In den hinteren Bereichen finden sich eine Vielzahl an kleinen Anlagen wie Garagen und Gartenhäuser. Teils sind Baulücken anzutreffen. Der Blockrandbau ist in seiner Raumbeziehung nicht unähnlich dem Reihenhaus; es wird eine größtenteils geschlossene Front zur Baukante gebildet. Allerdings ist der Grundriss des MFH-Blocks bei weitem größer, auch ähnelt die Ausgestaltung eher dem MFH-Zeilenbau. Die

Abgrenzung über die Parameter aus dem Grundriss heraus zum Zeilenbau könnte sich von daher schwierig erweisen, da die einzelnen Hausumringe grundlegend gleich zum Zeilenbau aussehen. Möglicherweise ist eine Clusterung der zusammenhängenden Bebauung notwendig, damit die korrekte Kategorisierung im Zweifel händisch, jedoch unkompliziert angepasst werden kann. Welche Variante umgesetzt wird, muss während der Implementierung erkundet werden.

Von den Ausprägungen her sind die Kubaturen und Formen der Fassadenelemente sehr vergleichbar mit dem Mehrfamilienhaus-Zeilenbau und könnten somit geteilt werden. Jedoch sind teilweise gewerbliche Erdgeschossnutzungen anzutreffen, die durch Materialität und Farbe vom Wohnbau abgesetzt werden (Abb. 41).

Rangordnung der Modulbauteile

Mit Blick auf die Größe, Form und den Wiedererkennungswert von Elementen für den Haustyp werden die Bauteile, aus denen die Modellmuster erstellt werden, im Folgenden in drei Kategorien nach ihrer Relevanz eingeteilt. Die Rangordnung bestimmt, inwieweit die Elemente mit Blick auf den angepeilten Maßstab ausdifferenziert und detailliert dargestellt werden sollen.

Primäre Strukturen sind Hausaußenwände, sowie Dachformen, also Spitz-, Sattel- oder Flachdächer, als auch „alles andere“, das größte Kubatur besitzt, wie auch der Baukörper selbst. Garagen und Gartenhäuser werden zu den primären Strukturen gezählt, jedoch von den Minimal- und Maximalbedingungen herausgefiltert und vereinfacht ohne eigene nachrangige Strukturen dargestellt.

Sekundäre Strukturen sind Elemente vor allem der Hauswände wie Fenster, Türen, Balkone, Erker, sowie große Dachelemente wie Gauben und Aufbauten von Flachdächern, die nicht als Vollgeschosse gelten oder nicht den tertiären Strukturen zugeordnet werden können.

Tertiäre Strukturen sind Elemente wie Schornsteine, und generell voluminöse, große Ornamentik. Kleinteilige Details wie Funkantennen, Satellitenempfangsschüsseln, Müllsammelstellen, Gartenhecken, Zäune und ähnliches werden aufgrund der geringen Relevanz als raumbildende Gebäudeelemente nicht beachtet.

Da der Maßstab im Fokus dieser Arbeit eine Darstellung ähnlich einer kartenhaften Visualisierung im Maßstab von 1:500 zum Ziel hat, werden tertiäre Strukturen und außerhalb des Ressourcenbudgets liegende sekundäre Strukturen mit Blick auf den Umfang des Ergebnisses voraussichtlich vernachlässigt. Dennoch ist die Ausgestaltung durchaus möglich, zumal Systeme für die Verteilung insbesondere tertiärer Strukturen im Baukastensystem des Buildify-Generators vorhanden sind (Olivia 2022). Letztlich hängt die Erweiterung und Verwendung des in dieser Forschungsarbeit geschaffenen Gebäudemodellgenerators von Fachwissen ab. Das Ziel der Zugänglichkeit bleibt im Vordergrund, begründet jedoch auch die Abstraktion einerseits aufgrund der Umfänglichkeit des Themas, andererseits durch Performance-Gesichtspunkte für Echtzeit-Feedback der Interaktionen mit dem Generator auf Rechensystemen der Zielgruppe, die voraussichtlich weniger Leistung als meine eignes System besitzen.

Ansonsten besteht nach der automatischen Klassifizierung die Möglichkeit der händischen Detaillierung, Reklassifizierung und Veränderung der Attribute im vorbereiteten Rahmen mit geringer Komplexität für die Anwender:innen. Ob die Unterscheidung der Elemente durch Teilen in eigene Objekte oder das Markieren der Elemente geschieht, ist aus dem Prozess heraus zu entscheiden.

B.4. Synthese und Geonodes

Das Kernthema dieser Forschungsarbeit ist die Erstellung eines prozeduralen Algorithmus für die Gebäudevisualisierung. Dieser basiert auf den als passend identifizierten 2D-Grundrissdaten (Hausumringe) aus Open-Data-Quelle. Die Verarbeitung erfolgt mit Open Source Software QGIS und Blender, besonders der programmeigenen visuellen Geometrieprogrammiersprache Geometry Nodes.

Umriss des Vorgehens

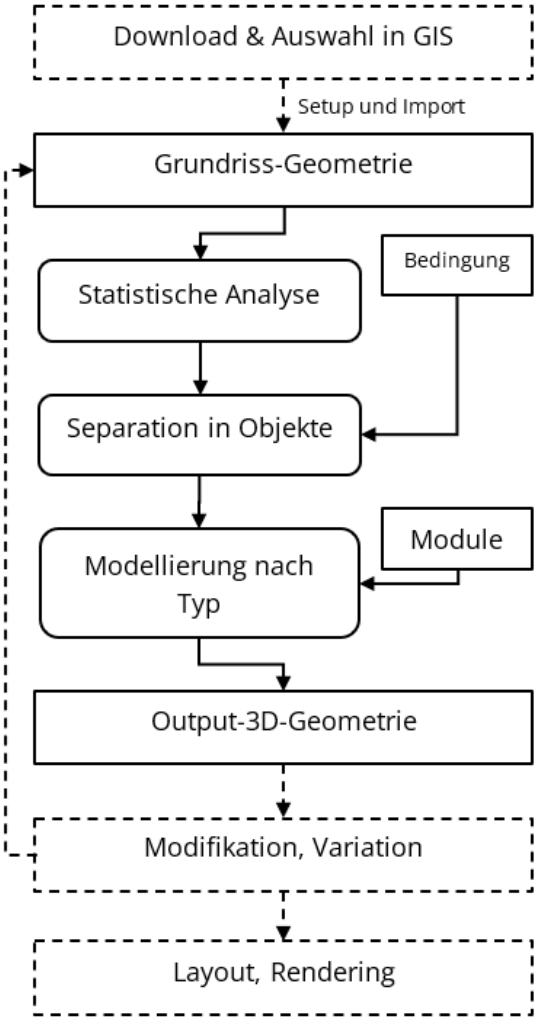


Abb. 42: *Vorgehen zur Erstellung des prozeduralen Modellierungsalgorithmus in Blender, mit vorbereitenden Schritten wie optionaler Beschneidung der Daten, und möglicher folgender Bearbeitung wie Modifikation zur Darstellung von Varianten (eigene Darstellung).*

Der Hausgenerator Buildify

Das in dieser Arbeit verwendete und erweiterte Geometry Nodes System von Pavel Olivia soll im Folgenden erläutert werden, um anhand diesem die Kombination mit den Attributen und Modulen des raumrelevanten Haustyps und der Modellmuster aufzuzeigen.

Die frei verfügbare Buildify 1.0 Version (Olivia 2022) basiert auf einem vorgeschalteten Attributrechner, vier Hauptgruppen, zwei nachgeordneten Detaillierungsgruppen (Abb. 43 und Abb. 44). Der erwartete Input für Buildify sind Faces auf der XY-Ebene, also zweidimensionale Flächen (in Blender ist +Z oben). Der Attributrechner erzeugt eine zufällige Anzahl (sofern nicht ebenfalls die unterstützten Addons BLOSM oder ADE verwendet werden) in einem Attribut „building:levels“ für jede Face Island, also für alle Faces, die zusammenhängen oder sich Kanten teilen. Diese haben somit die gleichen Geschossanzahlen.

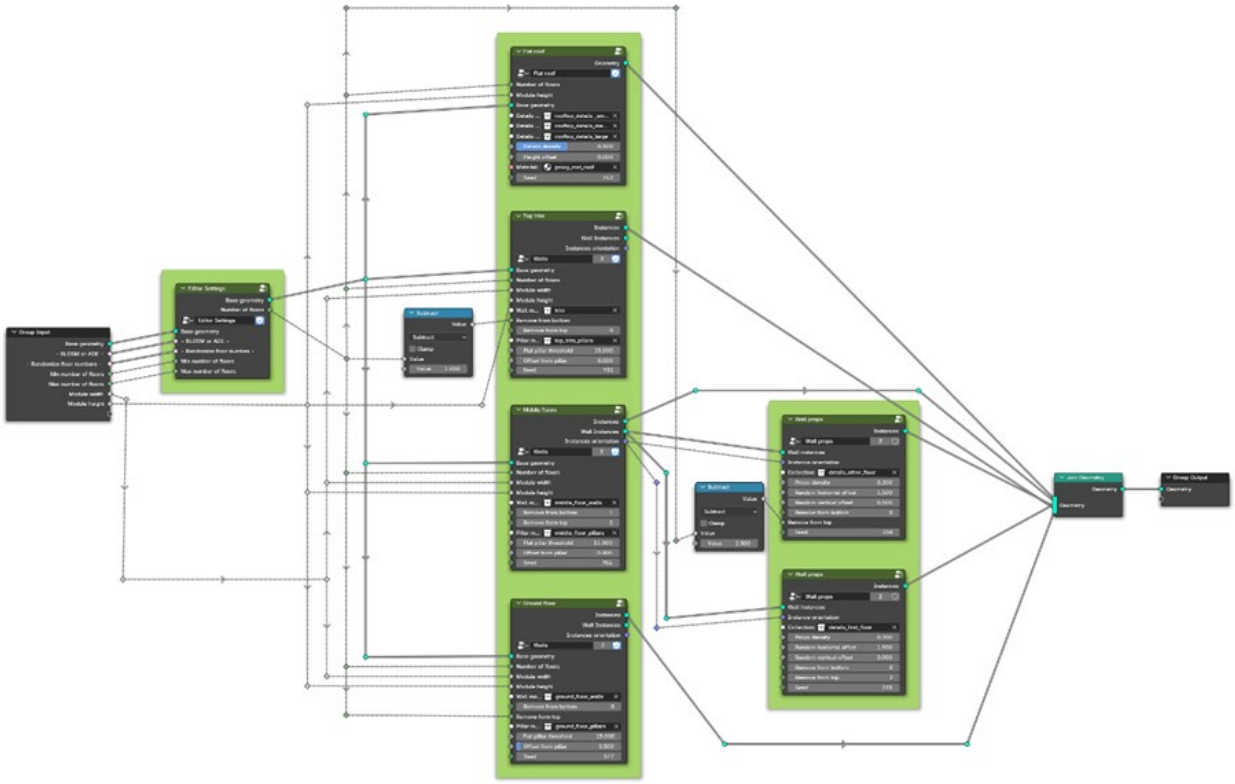


Abb. 43: *äußeres Nodesystem des Buildify 1.0. Jeder grün umrandete Kasten ist eine Gruppe, in der die Inputs ebenfalls verarbeitet und wieder ausgegeben werden. (eigene Darstellung nach Olivia 2022)*

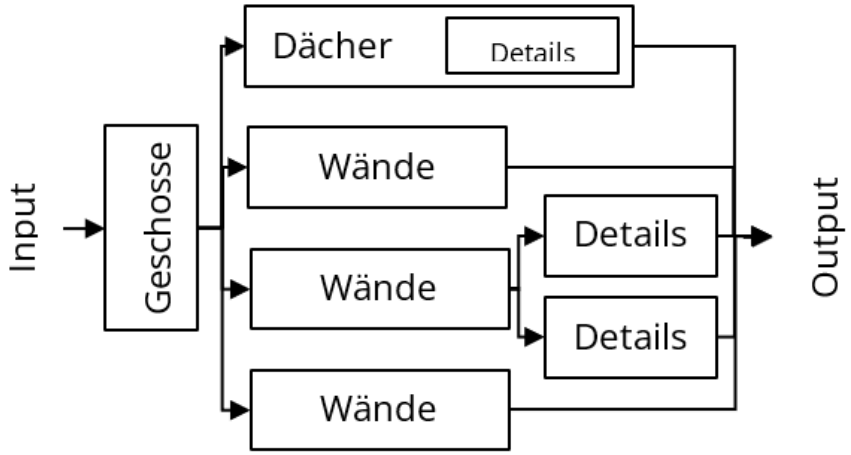


Abb. 44: *Schematische Darstellung der funktionalen Gruppen in Buildify. (eigene Darstellung)*

Weiterhin wird die Gruppe „Wände“ dreimal mit unterschiedlichen Inputs verwendet, um Erdgeschosse, Obergeschosse und Attika zu erzeugen (jeweils verschiedene Modellgruppen und Maße). Die Gruppe Dächer ist einzigartig und in Buildify 1.0 nur für die Erstellung von Flachdächern geeignet. Sie besitzt ein eigenes Detailsystem für Dachaufbauten wie Schornsteine, Radioantennen und Gebäudebetriebsgeräte. Die Detailgruppe hinter den OG-Wänden wird zweimal verwendet, um etwa Werbeflächen und Satellitenschüsseln an Obergeschossen zu verteilen; einmal für das erste Obergeschoss, dann für alle darüberliegenden.

Danach werden alle in den jeweiligen Schritten zusammengefügten Bauteile nochmals in ein Mesh vereint (cyanfarbene Node rechts). Der Output ist somit ein einziges Mesh, dessen Attribute durch das Zusammenfügen verfallen.

Hinsichtlich der „sichtbaren“ Attribute, also jener, die Benutzer:innen leicht ohne Verständnis der Geometry Nodes zur Veränderung zur Verfügung gestellt bekommen, sind nicht viele in Buildify gegeben. Lediglich, ob die Geschosszahl zufällig zwischen zwei Zahlen erzeugt werden soll, sofern keine Attribute bereits durch andere GIS-Importaddons erstellt wurden. Ansonsten sind noch die Moduldimensionen veränderbar, dies ist jedoch nicht wirklich sinnvoll ohne auch die Module händisch zu verändern, und dient wohl eher der Präsentation des Systems (Abb. 45).

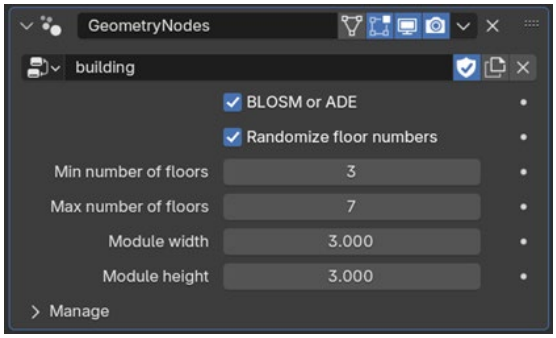


Abb. 45: *Sichtbare Attribute von Buildify, die den Benutzer:innen direkt im Modifier angezeigt werden und leicht verändert werden können. (eigene Darstellung*

Abb. 46: *von oben nach unten: erwarteter Input des Buildify-Generators, mitgelieferte Module, und fertige Ausgabe als 3D-Gebäude mit Texturen. (eigene Darstellung)*

Der Standardinput von Buildify ist ebene Face-Flächen, und als Output werden somit in Verbindung mit den Buildify-Modulen dreidimensionale Gebäude mit größtenteils auf Zufall basierenden Ausprägungen und Auswahl der vorgefertigten Modulbauteile erstellt (siehe Abb. 46).

Vorbereitung, Logik & Implementation

Im Folgenden soll der in dieser Arbeit erstellte, prozedurale Generator kurz als „der Gebäudegenerator" bezeichnet werden, um Beschreibungen wie „prozeduraler Algorithmus zur Visualisierung von Stadträumen" zu verringern und Verwechslungen mit Systemen wie Buildify zu vermeiden.

Zuallererst steht für die Erstellung als auch für die spätere Verwendung des Gebäudegenerators das Importieren von Geodaten in das Programm an, sowohl um basierend auf den Daten parallel Programmabschnitte testen und überprüfen zu können als auch im Nachhinein für die eigentliche Anwendung des Gebäudegenerators.

Die Geodaten der darzustellenden Bebauung sind die zweidimensionalen Grundrisse der Gebäude im Forschungsgebiet oder, bei der nachfolgenden Verwendung, des Untersuchungsgebietes. Die Grundrisse sind in ausreichender Qualität und Abdeckung in der Open-Geodatensammlung der Bezirksregierung Köln vorhanden (Bezirksregierung Köln 2023). Abgerufen können sie direkt über den Download-Link oder über Auswahl eines Bereiches im Online-Kartendienst GEOPortal.NRW, wobei jedoch trotz spezifizierter Auswahl die gesamte Sammlung aller Hausumringe in Nordrheinwestfalen heruntergeladen werden muss. Die Beschneidung der Daten kann wie in B.1 beschrieben in GIS, z.B. QGIS, erfolgen. Der Zuschnitt der Daten ist technisch optional aber faktisch notwendig, um in Echtzeit mit einem üblichen PC weiterzuarbeiten.

Der Export der Geodaten erfolgt als Shapefile (.shp). Dies ist nicht zwingend notwendig, auch andere gängige Formate wie Collada, FBX oder OBJ sind möglich, aber nicht mit dem in dieser Arbeit behandelten Workflow getestet und unüblich für GIS. Die Shapefile-Hausumringe werden wiederum in Blender mithilfe des Addons BlenderGIS (domlysz 2024) in Blender importiert. Damit sind für die späteren Anwendungen die Daten schon bereit, in Blender mit dem hier im folgenden erstellten Gebäudegenerator visualisiert zu werden.

Der prozedurale Algorithmus dieser Arbeit, der „Gebäudegenerator", basiert auf dem eingangs in diesem Kapitel beschriebenen System Buildify (Olivia 2022). Der Unterschied ist jedoch, dass ein Sortier-, Filter- und Klassifizierungsalgorithmus einem modifizierten Buildify-System vorgeschaltet ist. Der Node Graph, also die Gesamtheit dieser Programmeinheiten und digitalen Arbeitsschritte (Nodes) des Geometry Node Systems wird zum Zweck der Übersichtlichkeit in Gruppen von A bis E unterteilt. Die genaue Abgrenzung ist im Anhang dargestellt, da der Node Graph recht umfangreich ist und Verschachtelungen beinhaltet. All dies ist in mehreren großen Abbildungen zerlegt mit Kurzbeschreibung zusätzlich zu den Erläuterungen hier festgehalten.

Die importierten Daten aus QGIS liegen als Polygone eben auf der XY-Ebene vor. Die Skalierung ist bereits korrekt durch das BlenderGIS-Addon gesetzt und muss nicht korrigiert werden. Um zu beginnen, wird den Geodaten, die nun als ein einzelnes Objekt und Mesh vorliegen, ein Geometry Nodes Modifier zugewiesen und die Nodegruppe „Gebäudegenerator" erstellt/zugewiesen. Zum Zeitpunkt der folgenden Beschreibungen ist der Gebäudegenerator bereits erstellt und getestet worden. Um die Komplexität des Aufbaus des Nodesystem herunterzubrechen, wird zunächst von außen der Aufbau und die Logik des fertigen Produktes angesprochen, bevor danach auf die einzelnen Gruppen innerhalb und ihre Funktion eingegangen wird. Somit ist zwar die Wirkung mit

dem Mittel zeitlich vertauscht, jedoch eindeutiger illustrierbar.

Der fertiggestellte Gebäudegenerator weist die in Abb. 47 dargestellten, sichtbaren Attribute auf, die im Modifier-User-Interface leicht verändert werden können. Neben der üblichen prozeduralen Option des „Seed“, also die reproduzierbare Basis für die verwendeten Zufallszahlen, gibt es im oberen Bereich zwei Checkboxes und eine Dimensionierung „Freistehend ab“. Die Input-Attribute werden im Folgenden bei ihrer Verwendung in den jeweiligen Gruppen genauer erklärt. Weiterhin gibt es die Dropdown-Menüs „Typ 1“ bis „Typ 5“: diese entsprechen fünf möglichen zuweisbaren Haustypen. Die Einschränkung auf eine begrenzte Anzahl von Haustypen ist der derzeitigen Begrenzung der Übergabe von Attributen in Blender geschuldet, könnte jedoch in Zukunft oder über direkte Programmierung in Python überbrückt werden – letztlich besteht auch die Möglichkeit, den Generator anders aufzubauen, ich habe mich allerdings für diese Art entschlossen, da es noch relativ nachvollziehbar, wenn auch teilweise redundant ist. Alle fünf Menüs sind gleich aufgebaut und in der Abbildung aufgrund der Wiederholung bis auf das erste eingeklappt. Das letzte Menü „Manage“ ist Blender-Standard und listet alle verwendeten benannten Attribute auf, ist aber außerhalb von technischer Kontrolle der Operationen oder Fehlersuche nicht für die angestrebten Benutzer:innen relevant und wird nicht verwendet.

„Hinter den Kulissen“ befindet sich der Node Graph, sichtbar im Geometry Node Editor. Die äußerste Gruppe des Node Graphs ist in Abb. 53 dargestellt. Der Fluss der Ereignisse läuft generell von links nach rechts, kann aber ähnlich in einem elektrischen Schaltplan über Knoten zur Verbesserung der Lesbarkeit umgelenkt werden. Im Anhang sind alle enthaltenen Gruppen und Segmente vergrößert und lesbar dargestellt. Orientierung liefert die cyanfarbene Linie, jene stellt die Geometrie dar, sie wird durch alle anderen Nodes bemessen, geteilt, ausgewählt, bearbeitet, zusammengefügt und ähnliches. Für spezifische Erläuterungen der einzelnen Nodes und ihrer Funktionen bitte ich, die Blender Dokumentation zu konsultieren, da die Beschreibung jeder einzelnen Node ansonsten überbordend umfangreich werden würde. (siehe Blender Foundation 2025a)

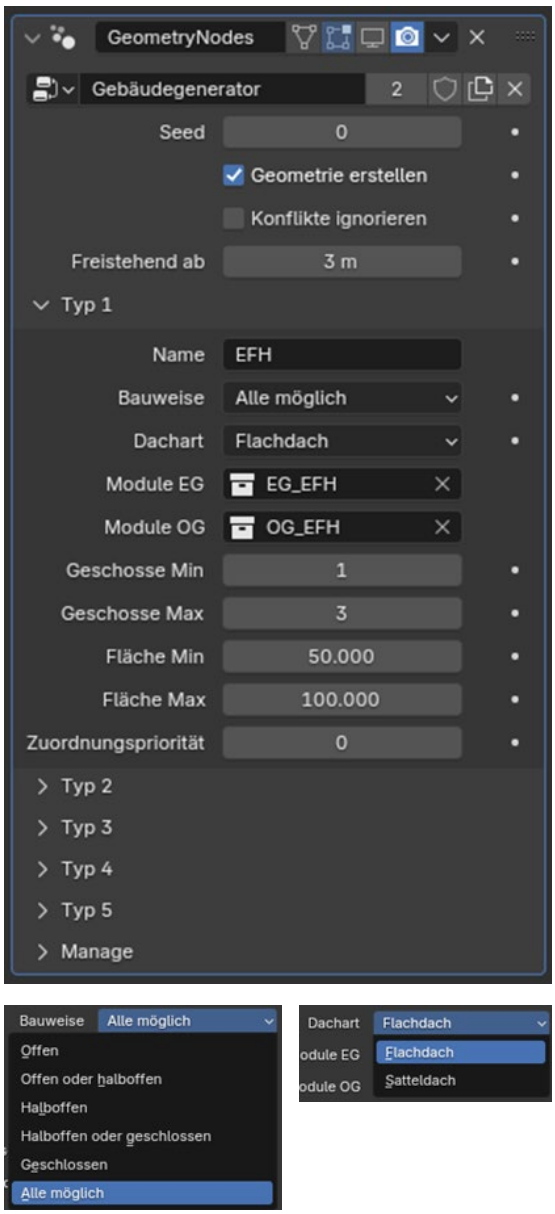


Abb. 47: User Interface des Gebäudegenerators im Geometry Nodes Modifier. Alle Attribute besitzen Standardwerte, die von den Benutzer:innen verändert werden können. Unten links und rechts sind die Untermenüs dargestellt. (Eigene Darstellung)

Gruppe A

Innerhalb der ersten Gruppe von Nodes, für Illustration siehe Anhang, Blender Geometry Nodes, Gruppe A, wird die importierte Geometrie mit einer „Merge by Distance"-Funktion bereinigt: alle Vertices, die näher als 0,1m aneinander liegen, werden an ersterer oder letzterer zusammengefügt. Die Reihenfolge dieser Operation kann als zufällig angesehen werden; sie folgt dem inneren Index der Vertices, mit dem diese im Programm referenziert werden. Danach folgen zwei „Seperate Geometry" Nodes mit einer Field-Selection der Geometrie, die alle Faces unterhalb 30m² und oberhalb 500m² vorerst aussortiert. Trotz der in B.3 und Abb. 31 erkannten Maximal- und Minimalwerte sind untere Werte größer 30m² zu groß und Filtern im Ausschnitt etwa zehn Reihenhausgebäude fälschlicherweise. Daher wird 30 als erprobter Wert beibehalten. Abb. 51 zeigt die importierten Flächen sowie ihre Gitteransicht nach den erläuterten Schritten; kleinste Flächen sind verschwunden.

Anschließend erfolgt die Berechnung und Zuteilung der Anzahl der Anlieger – also wie viele andere Face Islands (Gebäudeumrisse) jede zusammenhängende Gruppe von Faces innerhalb der Distanz „Freistehend ab" aus Abb. 47 besitzt, die Standarddistanz ist mit 3m festgesetzt. Die Zuweisung erfolgt innerhalb einer Untergruppe mit einer Sammlung von Nodes (verändert nach Alex 2024), welche die Anzahl von umliegenden Anliegern ausgibt. Über drei „Compare" Nodes wird zwischen keinen, einen und zwei oder mehr Anliegern unterschieden und drei Attribute (offen, halboffen, geschlossen) für jedes Face erstellt, die diese Zuweisung entsprechend als Boolean für folgende Operationen speichert.

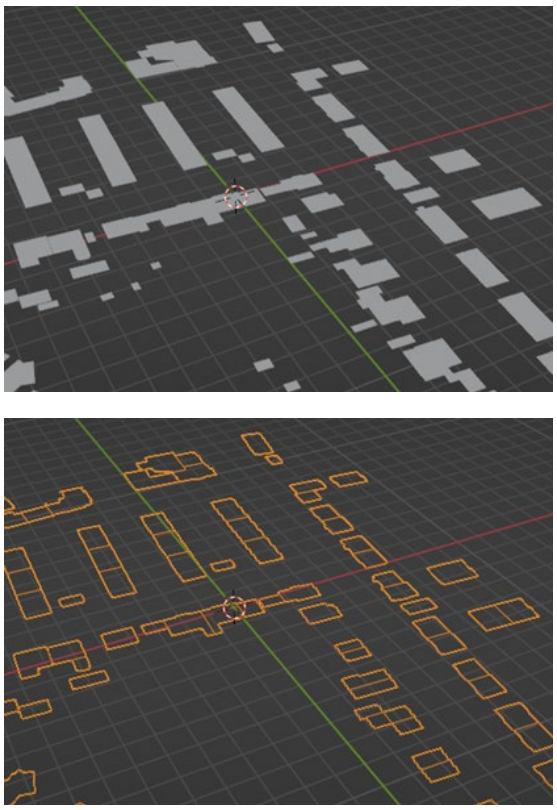


Abb. 48: *Importierte Daten der Hausumringe aus QGIS nach Beschneidung auf das Forschungsgebiet, oben in solider, unten in Gitteransicht zur visuellen Hervorhebung der einzelnen Polygone. (eigene Darstellung)*

Gruppe B

Nach der ersten Filterung und Zuweisung der Bauweise beginnt die Erstellung und Zuweisung der Größenbedingungen und Bauweisen all jener Faces zu den Haustypen, die den in Abb. 47 dargestellten, sichtbaren Werten entsprechen. Diese Zuweisung erfolgt durch eine geschachtelte Auswahl, bei der alle Faces zwischen der jeweiligen Minimal- und Maximalgröße sowie auch der notwendigen Bauweise ausgewählt werden, und ein neues Attribut bekommen, dass dem Typennamen entspricht, der im User Interface eingegeben wird. Erfolgt keine Eingabe eines Namens, wird die Zuweisung nicht erfolgen, auch wenn Filterbedingungen für jenen Typ angegeben sind. Auf diese Weise können Typen leicht „ausgeschaltet" werden, ohne die Werte bereinigen zu müssen. Die Bauweise wird vor dem Verschnitt mit allen

passenden Elementen der Min/Max-Größenbedingung konvertiert; aus dem ausgewählten String der Bauweise im Modifier wird ein Integer von eins bis sechs, entsprechend den sechs Auswahlmöglichkeiten (Abb. 47 unten).

Diese Gruppe ist fünfmal nacheinander geschaltet, mit den jeweiligen Inputs der Typen eins bis fünf in die Nodegruppe eingestöpselt. Somit besitzt jede Face bis zu fünf frei wählbar benannte Attribute, die beschreiben, ob jenes Face Teil dieses Haustyps ist oder nicht; auch keine oder doppelte Zuweisung ist hier möglich (Abb. 49).

	sharp_face	Offen	Halboffen	Geschlossen	Haustyp 1	Haustyp 2
206	☑	☐	☑	☐	☐	☐
207	☑	☐	☐	☑	☑	☐
208	☑	☐	☐	☑	☐	☐
209	☑	☐	☑	☐	☐	☑
210	☑	☐	☑	☐	☐	☐
211	☑	☐	☐	☑	☐	☐
212	☑	☐	☑	☐	☑	☑
213	☑	☐	☐	☑	☑	☐
214	☑	☐	☑	☐	☐	☐

Abb. 49: *Blick in den Spreadsheet-View, der die benannten Attribute der Faces darstellt. Alle Attribute hier sind Booleans, daher die Checkbox-Darstellung. Ganz links ist die Leiste mit den Indizes, die erste Zeile„sharp_face", ist ein Standardattribut für die Darstellung der Flächennormalen und kann ignoriert werden.*

Gruppe C

In der dritten thematischen Gruppe findet die Filterung aller Faces statt, denen vorausgehend in Gruppe B mehr als einen Typ zugewiesen worden ist. Die Filterung nach doppelten Zuweisungen erfolgt leider aufgrund der technischen Begrenzung auf die visuelle, nodebasierte Programmierung ohne Möglichkeit, Python-Programmschnipsel einzubringen, über ein Netz boolescher Selektionen, Kombinationen und Verschnitte. Während es visuell kompliziert aussieht, werden alle Faces ausgewählt, die zwei oder mehr Typen positiv zugewiesen sind. In Python würde dies mit einem einfachen Switch-Case weitaus kompakter sein. Unterhalb existiert ein ausgeschalteter Abschnitt, der ursprünglich die Möglichkeit geben konnte, nach Priorität, die von null aufsteigend geringer relevant sortiert, die Haustypenzuweisung zu überschreiben. Dies funktionierte mit lediglich zwei existierenden Haustypen, ab drei wurde die Entscheidung und Vergleich der Prioritäten zu kompliziert, mit Nodes zu bestimmen. Es müssten ähnlich dem Filter für die mehrfache Zuordnung alle Paarvarianten geprüft werden, was folgender Matrix und Potenz,

$$\binom{5}{2} = 2!\,(5-2)!\,5! = 25 \cdot 4 = 10$$

$$2^{10} = 1024$$

mit über eintausend Vergleichen entsprechen würde. Da dies nicht realistisch mit einer visuellen Programmiersprache fehlerfrei oder nachvollziehbar zu leisten ist, wird beschlossen, jenen doppelt zugewiesenen Faces ein Attribut „Konflikt" zu geben, dass in Gruppe E zur Markierung des Gebäudes als Konfliktfall führen wird. Die Prioritätsordnung wird „auskommentiert", also deaktiviert, jedoch bleibt das Ganzzahlwert-Attribut als „Zuordnungspriorität" weiterhin vorhanden, aber nicht sichtbar (in Abb. 47 noch sichtbar), um durch die fehlende Funktionalität keine Verwirrung zu erzeugen; eine mögliche zukünftige Implementation kann aber an diese Stellen anknüpfen.

Gruppe D

In der vierten thematischen Gruppierung von Nodes findet die Zuweisung der im User Interface ausgewählten Geschosszahl und Dachart auf die entsprechenden Faces als Vorbereitung der Geometrieerstellung statt. Die positive Zuweisung erfolgt über den Vergleich der booleschen Werte der Attribute der Typennamen: wenn wahr, dann folgt in der Untergruppe „Etagen & Dachart" die Erstellung und Festlegung eines Zufallswertes je Face zwischen den angegebenen Minima und Ma-

xima der Geschossanzahlen und Speicherung als „Etagen“ (Abb. 47, „Geschosse“). Weiterhin wird die Menüauswahl der Dachart in Integer konvertiert, wobei für Flachdach „1“ und für Satteldach „2“ verwendet wird. Die Indizierung erfolgt nicht bei null, da dies hinsichtlich folgenden Auswahlen als boolesches „falsch“ interpretiert wird (und bei Nichtzuweisung der Wert ebenfalls null beträgt). Die Dachart wird ebenfalls als Integer in einem neuen Attribut „Dachart“ für jedes Face gespeichert. Diese Zuordnung erfolgt ähnlich jener in Gruppe B fünfmal für jede der möglichen angegebenen Typen. Ein dritter Schritt, der in dieser Gruppe erfolgt, ist das Herausfiltern aller „unbeachteten Fälle“. Dies erfolgt im Graph direkt unterhalb der obigen Zuweisungen – alles, was keinen Typennamen mit „wahr“ besitzt, wird zu einer Selektion zusammengefasst und in Gruppe E als Restflächen in einer vereinfachten Darstellung visualisiert. An dieser Stelle sei angemerkt, dass diese Restflächen nur Faces, also Grundrisse, sein können, die nicht bereits durch das Größenkriterium in Gruppe A herausgefiltert worden sind; es sind aus der Typenzuordnung übriggebliebene Faces, die entweder nicht den angegebenen Bauweisen und/oder nicht ihren Flächenkriterien entsprechen.

Gruppe E

Für die Erzeugung der Gebäudegeometrie wird wie eingangs erwähnt eine im Rahmen dieser Forschungsarbeit modifizierte Variante von Buildify 1.0 verwendet. Buildify erzeugt im Sinne von Modulbauweise das „Raster“, wie und wo die Module angeordnet werden, und das Verteilen selbst. Diese Version wurde insoweit modifiziert, dass die hier erzeugten Attribute namentlich korrekt verwendet und neben Flachdächern auch Sattel- beziehungsweise Spitzdächer dargestellt werden können; die genaue Ausprägung letzterer hängt davon ab, ob pro Grundriss mehr als ein Face zusammenhängend vorhanden ist, also eine Face-Island mit Faceanzahl größer eins. Die Nodegruppe, die diese Satteldacherstellung vollzieht, ist leicht verändert (nach quellenform 2024) in Buildify an die entsprechende Stelle der Dacherstellung integriert worden. Weiterhin sind einige Funktionen von Buildify deaktiviert, wie die Verteilung von tertiären Details auf Dächern und an Wänden, sowie Säulen- und Gebäudekantenstrukturen.

Die Geometrie im Gebäudegenerator-Nodegraph fließt von Gruppe D in E, wo sie sich siebenfach aufspaltet: ersteres als komplettes Überspringen der Darstellung falls „Geometrie erstellen“ im User Interface nicht angewählt ist, nützlich, um Rechenzeit zu sparen wollen die Benutzer:innen an der Eingangsgeometrie arbeiten oder die Module verändern, ohne dass der Gebäudegenerator in Echtzeit die Änderungen übernimmt. Die nächsten fünf Abspaltungen sind alle Faces, die positiv auf einen der fünf Typennamen attribuiert sind, dort werden die ausgewählten Modulgruppen, die Dachart und die Etagenzahl an Buildify übergeben. Die siebte Abzweigung der Geometrie separiert die Inputgeometrie von Gruppe E anhand der Selektion der „unbeachteten Fälle“ übergeben aus Gruppe D: dies bedeutet, nun kann allen nicht zugeordneten, aber auch nicht herausgefilterten Grundrissen eine vereinfachte Darstellung zugewiesen werden. Dies erfolgt als eine Extrusion von sechs Metern, und das Setzen eines Standardmaterials. Gleiches erfolgt an dieser Stelle für die nun einbezogenen, zu Beginn herausgefilterten Geometrien aus Gruppe A: Faces unterhalb der Minimalgröße werden mit drei Metern extrudiert, jene oberhalb der Maximalgröße auf zwölf Meter. Dies ist ein arbiträrer Wert und wurde nach Vergleich mit Satellitenbildern als generell ausreichend bewertet, dennoch sollen diese drei Extrusionsmaße nicht sichtbar im Modifier User Interface präsentiert werden, um die Anzahl der Inputs dort gering zu halten; dies kann aber relativ leicht nachträglich

erfolgen. Auch werden diesen letzteren beiden herausgefilterten Gruppen nun zwei Materialien zugewiesen – diese können zur Hervorhebung unterschiedlich gefärbt sein. Somit werden auch baulich relevante Kubaturen, wenn auch keine Wohngebäude, dargestellt.

Die Erzeugung der Gebäudegeometriepunkte innerhalb von Buildify ist kompakt, aber dennoch umfangreich; insbesondere die Berechnung des Rasters selbst und der Positionierung der Module ist mathematisch komplex und basiert auf etwa einhundert Nodes innerhalb verschachtelter Operationen; aufgrund der robusten, vielseitigen und anpassbaren Weise, in der Olivia Buildify erstellt hat, ist die Wahl als Geometrieverteiler für diese Arbeit gefallen. Eben diese Verteilung ist technisch keine Erzeugung neuer Geometrie, also Meshes (und ihren Objekten). Als sogenannte Instanziierung werden Meshes aus den Modulgruppen „kopiert", ohne auf dem berechnenden CPU (oder falls aktiviert, GPU) erneut geladen werden müssen (Wikipedia 2024a). Dies spart Rechenleistung, je häufiger die gleichen Module verwendet werden, statt sehr viele Modulgruppen (und Typen) zu haben. Die technische Begrenzung des Gebäudegenerators ist voraussichtlich somit eher die komplexe Zuordnung, Berechnung der Bauweise und Verteilung der Instanzen durch Buildify. Dies soll in der Case Study ebenfalls betrachtet werden.

Hinsichtlich der Auswahl und Verteilung von Instanzen, erfolgt diese über die zufällige Zuweisung basierend auf dem Seed. Die Instanzen werden aus den Gruppen der Modulbauteile (genannt Collection) gewählt, die für den jeweiligen Typ, also eins bis fünf, für Erdgeschosse oder Obergeschosse im Modifier User Interface angegebenen sind. Vertikal basiert die Auswahl für jedes Geschoss auf der gleichen Zufallszahl wie das darunterliegende Element, sodass ab dem Erdgeschoss die Elemente aufwärts das gleiche Modul werden. Dies ist auf die Referenz des gleichen Seeds für jede Face-Edge am Grundriss zurückzuführen. Weiterhin ist ein dimensionales Strecken der Bauteile auf ihrer breiten Achse (X) möglich, sofern der „Sprung" zur nächstgrößeren, restlosen Differenz durch die unzureichende Länge der Kante nicht möglich ist (Abb. 50).

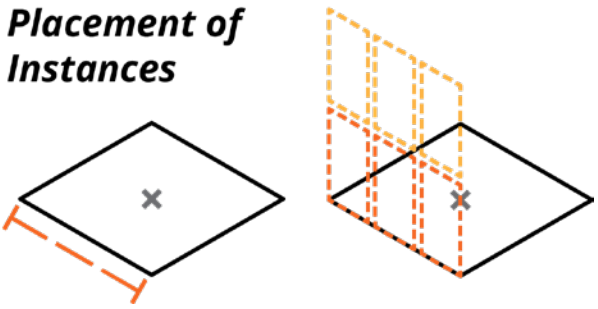


Abb. 50: *Die Berechnung der Platzierung der Modulbauteile (als Instanzen) erfolgt über das Modulo der jeweiligen Face-Edge. (eigene Darstellung)*

Die Erstellung der Dächer ist für den Buildify-Standardfall nicht besonders; die Grundfläche wird kopiert, neu eingefärbt und auf die oberste Geschosshöhe, plus einmal sich selbst, und 0,5m addiert, gesetzt und eine Attika nach gleichen Prinzip der Wände erstellt. Der Generator für das Spitz- oder Satteldach besitzt aufgrund der sehr effizienten Berechnung (quellenform 2024), die ohne Suche nach umliegenden Kanten oder ähnlichen iterativen Gruppen auskommt, den Effekt, dass wenn nur ein Face pro Island besteht, ein Spitzdach zu erstellen, da keine Orientierung für mögliche Giebel in der Berechnung vorgenommen wird. Einzelne Faces pro Islands sind jedoch sehr häufig der Fall bei den importierten Geodaten.

Letztlich werden in Gruppe E alle Geometrien zusammengefügt, und bei positivem Attribut „Konflikt“, dass in Gruppe C zugwiesen wurde, das Dach rot eingefärbt. Dies kommt daher, dass Buildify den Grundriss für die Dachform übergibt, und der Grundriss bei Abschluss gelöscht wird. Statt das Gebäude komplett einzufärben, wird diese Lösung als ausreichend und zweckmäßig angesehen.

Weiterführende Zuweisung

Über diese automatisierten Klassifizierungen herausgehende Zuweisungen durch Benutzer:innen sind durchaus möglich und zielführend, um Grenzfälle der Zuordnung aufzulösen. Die Separation der Inputgeometrie in verschiedene Objekte und die Erstellung eines neuen Modifiers mit dem Gebäudegenerator erfordert zwar grundlegendes Wissen für die Benutzung von Blender, ist aber auch nicht fortgeschritten. Bei Separation in kleinere Meshes ist einerseits eine bessere Performance gegeben, da durch das Teilen nun kleinere Objekte mit weniger Datenmengen bearbeitet werden und nur das aktuell veränderte auch in Echtzeit berechnet wird.

Modellierung

Für die Modellierung der Modulbauteile werden für Blender übliche 3D-Modellierverfahren verwendet; Extrusion, direkte Vertexmanipulation, Spiegelungen, Materialerstellung und -zuweisung sowie Shape Keys (siehe A.5). Die Modulbauteile sind in Gruppen (Collections) sortiert. Es gibt eine Anzahl von Bauteilen für die Erdgeschosse, und für Obergeschosse. als Inspiration und Auswahl, wie diese Bauteile aussehen sollten, galten einerseits die erhobenen Gebäude, andererseits die Maxime, die Module leicht veränderbar zu halten, was über die Erstellung Shape Keys erfolgt, sodass Benutzer:innen Module auswählen und per Schieberegler relevante Maße von Fenstern

Abb. 51: *Fenster des „Outliners“ in Blender, das Collections und Objekte anzeigt. Zu sehen sind die Collections MFH Zeile und EFH mit ihren EG- und OG-Untergruppen, in denen sich die Meshes befinden. (eigene Darstellung)*

und Türen verändern können (Abb. 52). Ebenfalls kann das Material ausgewechselt werden, das Projekt besitzt eine grundlegende Auswahl zum einfachen Austausch.

Es werden drei generelle Varianten erstellt: Wand, Wand mit Fenster, Wand mit Tür. Diese werden nochmals nach Erdgeschoss und Obergeschoss ausdifferenziert, da Erdgeschosse üblicherweise eine Traufkante oder ähnliche bodennahe Strukturen besitzen und häufig abweichende Materialität von den Obergeschossen besitzen können. Drittens werden für diese fünf Module (Wand EG, Tür EG, Fenster EG, Wand OG, Fenster OG) nochmals Ausprägungen als thermisch gedämmte Wände erstellt; insbesondere voluminöse Dämmsysteme erzeugen tiefe Rahmen an Gebäudeöffnungen (Varianten genannt „Aufputzdämmung"). Die Modulbauteile und ihre Variationen können von Benutzer:innen in die verschiedenen Collections verschoben werden, um sie den Typen zuzuordnen zu können (Abb. 51). Die Collections werden wiederum im User Interface des Geometry Modifiers referenziert, sodass sie auch in Gruppe E an Buildify übergeben und werden (Module EG, Module OG in Abb. 47). Die Bauteile können beliebig kopiert und in Form und Farbe verändert werden. Je mehr Bauteile in einer Collection vorhanden sind, desto geringer die einzelne Chance, ausgewählt zu werden; auf diese Weise kann aber auch leicht die Auswahl beeinflusst werden, indem z.B. ein einfaches Wandbauteil dreimal in die gleiche Collection kopiert wird, während nur ein Wandfensterbauteil in dieser existiert. Somit ist die Chance einer glatten Wand zu einer Wand mit Fenster drei zu eins.

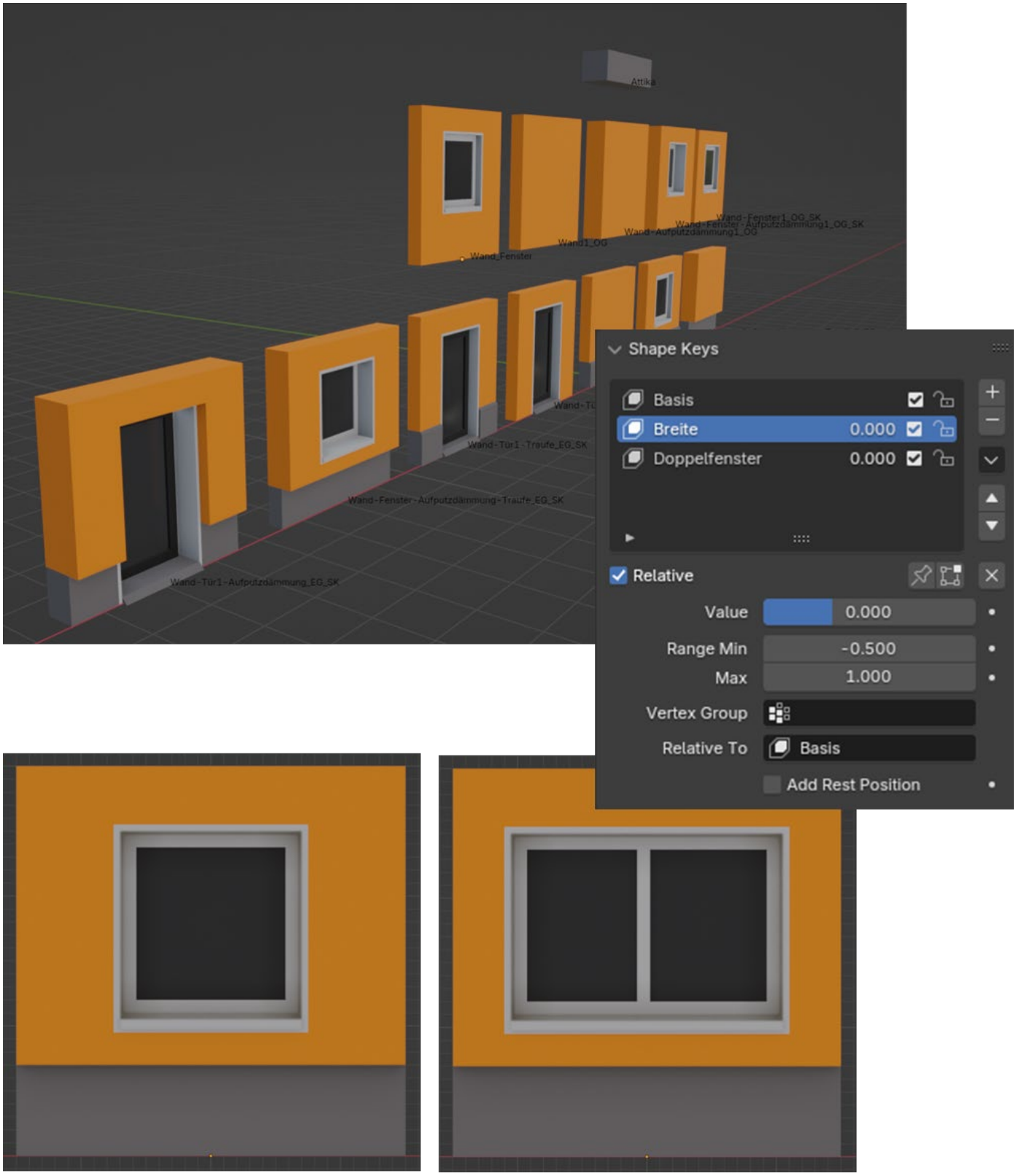


Abb. 52: *oben erstellte Modulbauteile in ihren verschiedenen Varianten. Unten und rechts die Veränderbarkeit der Module über Shape Keys (Versionen mit _SK im Namen). (eigene Darstellung)*

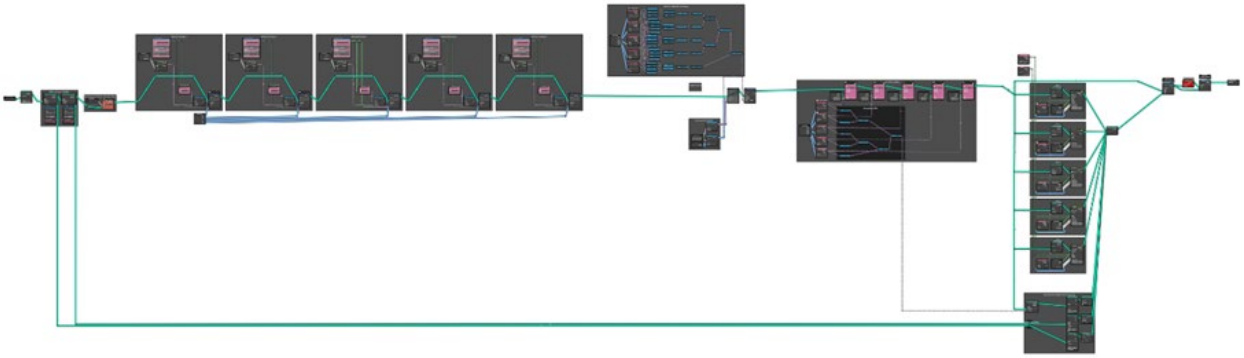


Abb. 53: *Die Hauptgruppe des Node-Graphs. Die verschachtelten Untergruppen können nicht gleichzeitig dargestellt werden, sind jedoch im Anhang einzeln abgebildet, ihre Position im Graphen lokalisiert und beschrieben. (eigene Darstellung)*

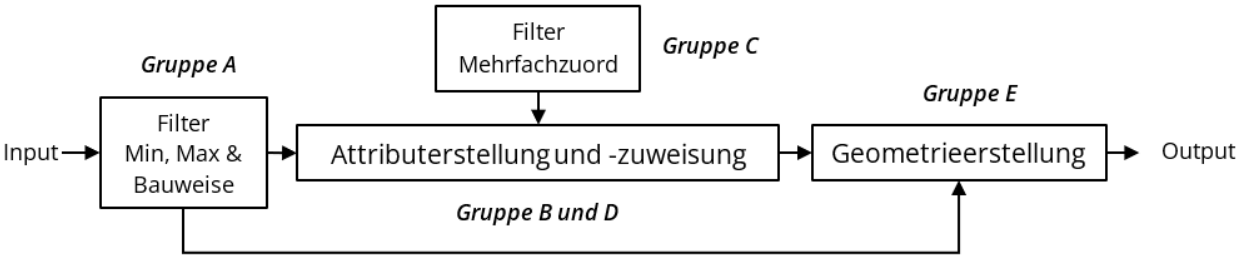


Abb. 54: *Schematische Darstellung des Gebäudegenerators als Flussdiagramm der thematischen Arbeitsschritte und der Gruppenzuweisung. (eigene Darstellung)*

Abb. 55: *Untersuchungsgebiet der Case Study: Wohngebiet zwischen Essen Steele und Freisenbruch. Markiertes Gebiet: 0,56km² Flächeninhalt. (ohne Maßstab, eigene Darstellung nach: Land NRW 2024)*

B.5. Case Study

Für die Probe der Funktionalität und Übertragbarkeit des Gebäudegenerators soll ein Versuch mit einem anderen Stadtteilgebiet erfolgen, dass im Ruhrgebiet liegt; das Vorgehen wird im Folgenden erfolgt zunächst anhand des Festsetzens von Parametern, die das Maß der erfolgreichen Klassifizierungs- und Darstellungsgenauigkeit beschreiben können, operationalisiert, danach durchgeführt, dokumentiert und die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Aussage über den Generator, die Inputs und Grenzwerte analysiert und aufgearbeitet.

Die Wahl des Gebietes für die Case Study fällt auf die Stadt Essen, insbesondere der Stadtteil Freisenbruch, der sich am östlichen Rand des Stadtgebietes befindet und an Bochum (Wattenscheid) grenzt. Die Auswahl erfolgt aufgrund meiner Kenntnisse des Stadtteils als Bewohnerin; einerseits existieren hier ähnlich diverse Haustypen wie in Dortmund Hombruch, andererseits kann das Maß der Zuordnung und Übereinstimmung mit den Realtypen relativ leicht aufgrund meiner alltäglichen Erfahrung des Stadtgebietes und der Zugänglichkeit überprüft werden. Die Wahl findet somit nicht nach strengem Auswahlverfahren statt; dies war aber auch bereits zu Beginn dieser Forschung angestrebt, da Hombruch bereits aufgrund der lokalen Kenntnisse diverser Haustypen und Vielfältigkeit sowie Zugänglichkeit gewählt wurde, und dies ist für Freisenbruch ebenfalls auf gleiche Weise begründbar: beide Stadtteile sind Lagen am Rand der Gesamtstadt; die Innenstadt grenzt nicht direkt an die Stadtteile, und beide Stadtteile besitzen ein im Vergleich zu anderen ein relativ eigenständiges Stadtteilzentrum. Im Falle Essen ist das östliche Stadtteilzentrum jedoch eher dem an Freisenbruch angrenzenden Stadtteil Steele zuzuschreiben; die Gebäudety-

pologien in Steele sind jedoch stark von Blockrand-Mehrfamilienhäusern und Einkaufsstraßen geprägt, insbesondere um den Markt herum, da dieser Stadtteil in einer bergigen, agglomerierten Tallage mit starker räumlicher Begrenzung liegt (Abb. 55). Ebenfalls ist Steele von Ruhr, zwei großen Hauptstraßen und zwei Bahnlinien durchzogen; kleinere Gebäudetypen wie Doppelhäuser oder Einfamilienhäuser sind im Steeler Kessel nahezu kaum anzutreffen, die Gebäude stammen größtenteils aus der Gründerzeit. (Stadt Essen 2023; Steeler Archiv e.V. 2025)

Abb. 56: *Kaiser-Otto-Platz in Steele mit Blick nach Süden. Zu sehen sind erhaltene Gründerzeitbauten, die insbesondere im Zentrum und westlich zu finden sind. (Stadt Essen 2023)*

Hinsichtlich der Wahl von Freisenbruch spricht die nicht allzu beschränkte Lage auf mehreren Hügelkämmen, ähnlich Hombruch, sowie weniger großräumiger Barrieren wie in Steele, die voraussichtlich die ansonsten anders gestaltete Art und Lage von Bebauung beeinflusst. Jenseits der Grenze zwischen Steele und Freisenbruch, etwa auf Höhe der Kreuzung Bochumer Landstraße und Freisenbruchstraße, sind sehr unterschiedliche Gebäudetypen anzutreffen: entlang des Hellwegs sind Mehrfamilienhäuser, Einfamilienhäuser, Reihenhäuser und Doppelhäuser anzutreffen, an der Steeler Bergstraße nahezu durchgängig Mehrfamilienhäuser in geschlossener und halboffener Bauweise und epochenüblicher der Gründerzeitbauweise (Abb. 56). Die Bochumer Landstraße von Steele herauf bis zur Stadtgrenze nach Bochum (Seitenstraßen eingeschlossen) besitzt Gebäudeansammlungen, in denen alle Haustypen vertreten sind. Auch ist die ruhrgebietstypische Historie ähnlich: Bergbau, bedeutende religiöse Stätte, Transport und Handel von Waren. In Essen vor allem im Bezug des Wasserverkehrsweges Ruhr; die Eigenständigkeit Hombruch und Steele galt bis in das frühe 20. Jahrhundert (beide bis 1929) durch Eingemeindung als Stadtrandteil. (Steeler Archiv e.V. 2025; Hombrucher Geschichtsverein e.V. 2020

Abb. 57: *Blick auf freisenbrucher Gebäude mit den Rückseiten der Gebäude an der Bochumer Landstraße auf Höhe des Sachsenrings. (Leweux 2020)*

Hinsichtlich des Gebiets wird ein Areal von 750 Metern Kantenlänge festgesetzt; die Maße erstrecken sich vom Steele Ostbahnhof bis etwa zur Vietingstraße. Das Gebiet von somit etwas über einem halben Quadratkilometer beinhaltet Mehrfamilienhaussiedlungen, Einzelhäuser, Straßen mit geringerer Bebauungsdichte, höherer Verdichtung entlang Hauptstraßen, sowie Mehrfamilienhaus-Zeilenbausiedlungen und kleineren Übergangsgebieten (siehe Abb. 57). Doch ist bereits bei der Fernerkundung im Vergleich mit Hombruch ersichtlich, dass insbesondere um die mittlere Augenerstraße und den oberen (nördlichen) Teil der Steeler Bergstraße mehrere Gebäude vorhanden sind, die zusätzlich zu ihrer Doppelhaus- oder Mehrfamilienhausartigkeit durchaus auch als Reihenhäuser klassifiziert werden könnten (Abb. 58).

Abb. 58: *oben sind drei aneinandergebaute Gebäude zu sehen, die sowohl die Qualitäten von Doppelhäusern als auch die Bauweise von Reihenhäusern besitzen. Dennoch, in Bezug zur Umgebungsbebauung, sind gleichartige Gebäude als reines Doppelhaus ausgeführt. Unten ist ein zweiter Fall dargestellt: Mehrfamilienhäuser, die von der Größe und Bauweise eher Reihenhäusern entsprechen könnten. (verändert nach: Regionalverband Ruhr (RVR) 2024b)*

Der Schwarzplan des Gebietes verdeutlicht die unterschiedlichen Dimensionen und Gebäudetypen: neben Sonderbauten wie den drei Schulen und des Supermarktes sind die Zeilenbausiedlung an der Freisenbruchstraße und die typologisch gemischte Augenerstraße, mit ihren Gründerzeitbauten als auch späteren MFH und einzelnen EFH im mittig-westlichen Bereich vertreten. Auch wie im Gebiet Hombruchs sind Freiflächen, wie ein Friedhof, ein Park und zusätzlich, eine Kleingartenanlage vorhanden (Abb. 60).

Anders als Hombruch jedoch besitzt dieses Forschungsgebiet der Case Study weniger als ein Viertel der Fläche von Hombruch; einerseits ist dies aufgrund der bereits erhobenen Dimensionen und Grenzwerte aus Hombruch möglich, andererseits sollte das Gebiet „überschaubar" gewählt werden, um die Anwendung des Generators sinnvoll und im angemessenen zeitlichen Rahmen bewerten zu können; zwar wird der Vergleich und die Bewertung des Erfolges über Luftbilder und begrenzte Feldforschung stattfinden, doch dies muss gerade aufgrund der fortgeschrittenen Zeit dieser Forschungsarbeit in einem kleinen Rahmen geschehen, da die zeitlichen Ressourcen überwiegend für die Erhebung der Typologien in Hombruch und Erstellung des Generators investiert wurden.

Abb. 59: *Cluster von Wohngebäudetypen im Gebiet der Casestudy. (ohne Maßstab, eigene Darstellung nach: Land NRW 2024)*

Abb. 60: Schwarzplan des Case Study Gebietes, sowie umgebender Bebauung in grau. (eigene Darstellung nach: Bezirksregierung Köln 2023)

Maß des Erfolges

Für die Operationalisierung der Bewertung, inwieweit der Gebäudegenerator mit den aus Hombruch erhobenen Daten auch auf andere Stadtgebiete angewandt werden kann, soll der Anteil der korrekt attribuierten Gebäude betrachtet und gegen die Gesamtanzahl der Wohngebäude gestellt werden; zunächst wird der Generator mit den erhobenen Daten und Grenzwerten angewandt und das erste Maß genommen. Danach wird untersucht, inwieweit die Kategorisierung durch Anpassung der Werte verbessert werden kann, und erneut Maß genommen. Da die Anzahl der Gebäude immer noch trotz des kleinen Gebiets bei mehreren hundert Baukörpern liegt, sollen drei Straßen nach gleichen Regeln aus der Erhebung in angemessen nun reduzierter Weise betrachtet werden; statt vollständiger Aufnahme und Fotographie wird auch jedes vierte Gebäude betrachtet, der Haustyp erhoben und mit dem zugewiesenen Typ des Generators verglichen.
Die Wahl der Straßen erfolgt diesmal nicht nach Zufallsprinzip, sondern nach Auswahl qualitativ vielseitiger Straßenräume: die Steeler Bergstraße besitzt vom nördlichen Beginn bis zum Ende im Süden an der Bochumer Landstraße Doppel-Reihenhäuser, Einfamilienhäuser und Mehrfamilienhäuser. Die Augenerstraße verläuft zentral von Westen nach Osten durch das Gebiet und ist mit Mehrfamilienhäusern und Doppelhäusern bestückt. Der Krekelerweg besitzt entlang der Hangorientierung ein Cluster von Reihenhäusern und nördlich Zeilen-Mehrfamilienhäuser.

Ablauf der Case Study

Der Generator wird anhand eines neuen Ausschnittes von Geodaten, erstellt mit QGIS aus dem Set der Hausumringe (Bezirksregierung Köln 2023) innerhalb des in Abb. 55 dargestellte quadratischen Gebiet mit 750m Kantenlänge geprüft. Zunächst wird der Generator mit den Grenzwerten aus Hombruch verwendet, die Anzahl der korrekt zugeordneten Gebäude gezählt und die visuelle Darstellung anhand der Realtypen bewertet, danach wird versucht, dieses Maß durch Veränderung der Werte und gegebenenfalls Anpassung der Modulbauteile zu verbessern. Auch soll der Blick auf Realtypen gerichtet werden, dessen Darstellung mit keinem der in dieser Arbeit im Rahmen des raumrelevanten Haustyps erstellten Klassifizierungen angemessen digital reproduziert werden kann.

Abb. 61: *von oben nach unten Blicke in die Straßenräume des Krekelerweges, der Steeler Bergstraße und der Augenerstraße*

Die Realtypen jedes vierten Wohngebäudes (beider Straßenseiten) der Steeler Bergstraße, Augenerstraße und des Krekelerwegs sind in Abb. 62 nach gleichem Vorgehen aus der Analyse (B.3) dargestellt.

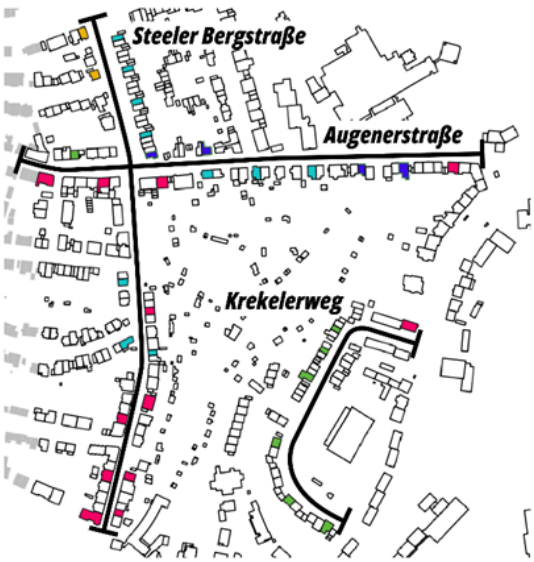


Abb. 62: *Über Fernerkundung erhobene Gebäudetypen nach dem System des IWU, um Vergleichbarkeit mit der Erhebung in Hombruch beizubehalten. In Gelb EFH, Cyan DH, Magenta MFH Hellgrün RH und dunkelblau für Sonderfälle. (Maßstab 1:5000. Verändert nach: Bezirksregierung Köln 2023)*

Die eingangs erwähnten Wohngebäude von in Bezug auf die Daten aus Hombruch ungewöhnlicher Art und Form werden bei mehrfacher Möglichkeit der Zuordnung im Sinne des raumrelevanten Haustyps folgend mit „S“ für Sonderfall markiert; es kann aufschlussreich sein, wie der Gebäudegenerator diese unterschiedlich deutbaren Fälle entscheidet. Von 35 erhobenen Typen teilen sich die Haustypen nach IWU (plus Sonderfälle) wie folgt auf:

Realtypen	Anzahl
EFH	2
DH	10
RH	7
MFH	12
S	4

Case Study: Probe 1

Die erste Anwendung des Gebäudegenerators erfolgt, nachdem die Geodaten Gebäudeumrisse in QGIS auf das Gebiet der Case Study zugeschnitten und mit BlenderGIS als Shapefile importiert wurden. Die Daten sind direkt bereit, einen Modifier mit dem Generator zugewiesen zu bekommen. Im User Interface werden für die vier Arten von Gebäuden aus dem raumrelevanten Haustyps (A.8) die in Hombruch erhobenen Werte eingesetzt (B.2, Abb. 31).

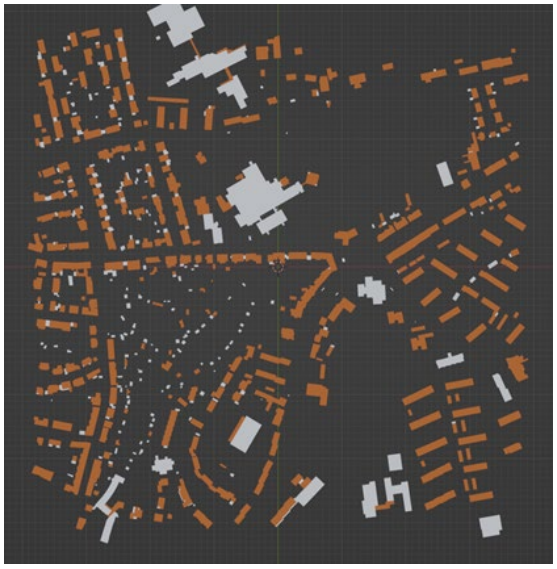


Abb. 63: *Blick direkt nach der Anwendung des Modifiers (keine Typen festgelegt). Zu erkennen ist bereits, dass größtenteils Nichtwohngebäude und Sonderbauten wie die Schulen und das Krankenhaus korrekt herausgefiltert werden (weis). (eigene Darstellung)*

Die Geschosszahlen werden aus den Gebäudetypen des IWU übernommen; die Analyse in Hombruch bestätigt als typisch angegebene Anzahl der Geschosse (Abb. 62). Somit sollen EFH und DH ein bis zwei, und RH und MFH zwei bis drei Geschosse besitzen. Die Geschosszahl für MFH wird jedoch nicht wie im Raster des IWU auf maximal fünf gesetzt (Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) 2015, S. 15), sondern soll bei drei begrenzt werden; keine der erhobenen MFH in Hombruch lag über diesem Wert. Die Bauweisen werden auf die gleichen Varianten für die Haustypen gesetzt wie in Abb. 16 festgesetzt. Die Dacharten sind im Gebiet der Case Study nach der ersten Fernerkundung nahezu ausschließlich Satteldächer – da dies die Zuordnung nicht direkt beeinflusst, und aus den Werten für Hombruch keine Dachart bestimmt wurde, werden die Dacharten somit hier bereits passend gesetzt.

Da auch in Hombruch keine zufriedenstellende Unterscheidung zwischen MFH-Blockbebauung und Zeilenbebauung erreicht werden konnte, wird im Generator nun nur der Typ „MFH“ für beide Subtypen verwendet. Sowohl die Dachart , Geschosszahl und Bauweisen sind nach erstem Blick in das Gebiet gleichartig. Die Unterscheidung müsste somit von Hand durch Auswahl von z.B. Zeilenhaussiedlungen erfolgen.

Abb. 64: *User Interface des Gebäudegenerators mit den Werten der raumrelevanten Haustypen. Die Collections sind probeweise erstmals auf die EFH-Varianten gesetzt. (eigene Darstellung)*

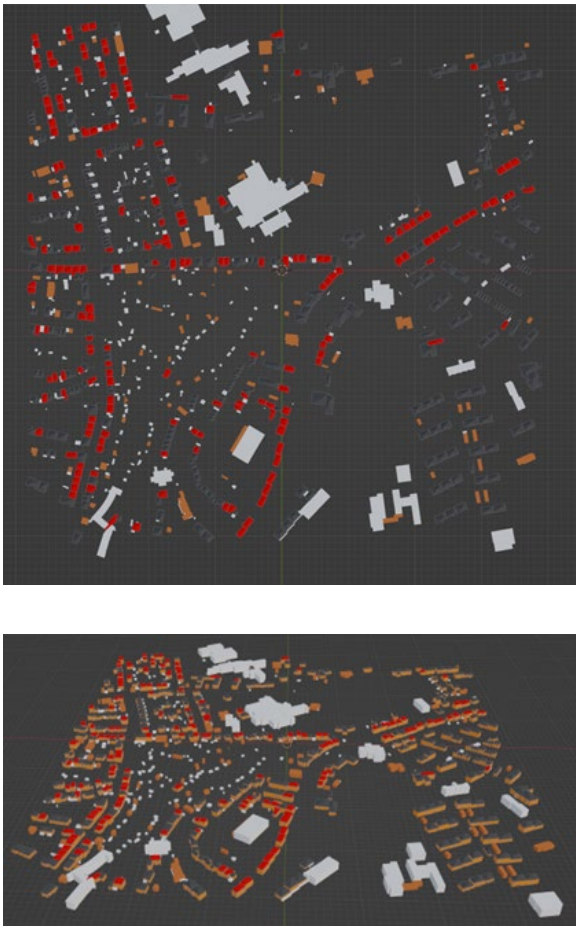


Abb. 65: *Blick in das Gebiet der Case Study, nachdem der Gebäudegenerator mit den Hombrucher Werten angewandt wurde. Rote Dächer indizieren doppelte Klassifizierungen, weiße Gebäude als Nichtwohngebäude herausgefilterte Bauten, und dachlose Gebäude als unbeachtete Fälle/unklassifiziert. (eigene Darstellung)*

Für die erste Probe soll keine Zuordnung von veränderten Modulbauteilen (alle verwenden EFH-Varianten) oder Farben erfolgen, da in diesem ersten Schritt zunächst die Überprüfung der Klassifizierung und der Kubaturen stattfinden soll.

Direkt nach der Ausführung des Gebäudegenerators mit den bisherigen Werten aus Hombruch fällt bereits auf, dass es viele Überschneidungen von Typenzuordnungen gibt, sowie einige unbeachtete Gebäude, die nicht durch den Filter eingangs entfernt wurden, sondern keinem Typen zugeordnet werden konnten.

Von den 35 genauer erhobenen und zu betrachtenden Grundrissen des Case Study Gebietes sind bei der ersten Probe die in erster Tabelle in Abb. 66 dargestellten Werte herausgekommen. Davon sind die korrekt (den in Feldbesichtigung erhobenen Realtypen) zugeordneten Anzahlen in der folgenden Tabelle aufgeführt, wobei in zweiter Tabelle noch festgehalten ist, wie die Sonderfälle (S*) nochmals nach EFH, DH, RH oder MFH durch den Generator klassifiziert wurden. Dabei sind Mehrfachzuweisungen einmal als DH und RH, und zweimal als RH und MFH vorhanden.

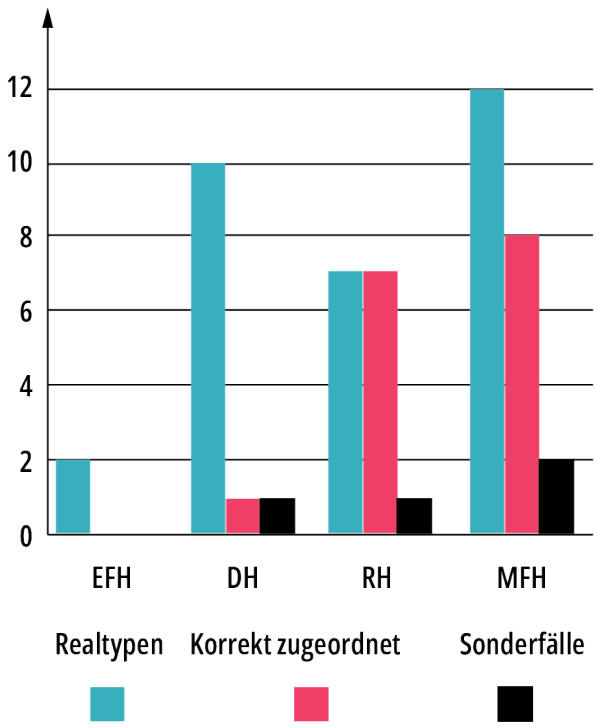
Hinsichtlich des Erfolgsmaßes lassen sich die Verhältnisse und Anzahlen somit wie folgt darstellen: von 35 Gebäudegrundrissen wurden (Sonderfälle mitgezählt ohne Doppelung) 20 den richtigen oder passenden Typen zugeordnet, und dies entspricht etwa 57% (20 zu 35), ohne Sonderfälle einbezogen etwa 45% (16 zu 35).

Fehlzuweisungen beziehen sich auf Zuweisungen von Grundrissen, die vollständig nicht dem Haustyp des realen Gebäudes entsprechen, auch nicht als Teil einer Mehrfachzuweisung. Die Tabelle aus Blender mit den Haustyp-Zuweisungen der ersten Probe, auf denen die hier aufgeführten Daten basieren, ist im Anhang zu finden.

Zuordnung Haustyp	Anzahl
Solitär/EFH	2
DH	3
RH	31
MFH	16
Nicht zugeordnet	1
Mehrfachzuweisungen (Konflikte)	18

Korrekt Klassifiziert	Anzahl
EFH	0
DH	1
RH	7
MFH	8
S*	0/1/4/2
Fehlzuweisungen	12

Abb. 66: *Zuordnungen der Gebäudegrundrisse in der zweiten Probe des Generators nach Veränderung der Grenzwerte mit Blick auf die Attribute in der Tabelle in Blender. (eigene Darstellung)*



Case Study: Probe 2

Es ist festzuhalten, dass über die Realtypen und Klassen hinweg der größte Versatz in der ersten Probe bei Doppelhäusern anzutreffen ist; von zehn Grundrissen ist nur einer korrekt zugeordnet worden, also 10% Genauigkeit in dieser Klasse. Die zweitgrößte Fehlallokation ist bei den Mehrfamilienhäusern zu finden, mit einem Versatz von vier gegenüber zwölf, also 33% Genauigkeit (Abb. 66). Interessanterweise sind Reihenhäuser vollständig korrekt zugeordnet; Einfamilienhäuser jedoch mit Zuordnungsausfall auffallend (ebd.). Für die zweite Probe soll somit versucht werden, die größten Versätze der Klassifizierungen, die DH- und MFH-Zuordnungen, zu verbessern, um eine erhöhte Gesamtgenauigkeit erreichen zu können. Anschließend sollen die visuellen Qualitäten betrachtet werden; inwieweit die dargestellten Gebäude der realen Bebauung annähern.

Korrekt Klassifiziert	Anzahl	Realtypen
EFH	1	2
DH	6	10
RH	7	7
MFH	7	12
S	0/1/3/4	4
Fehlzuweisungen	7	-

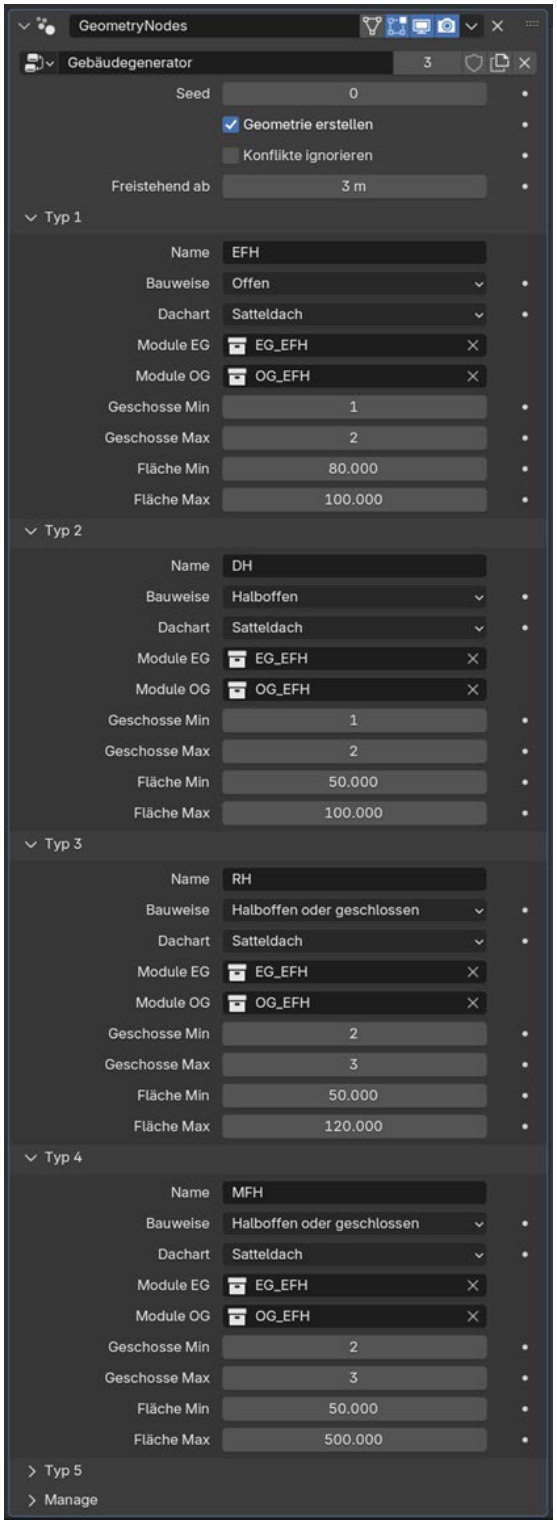


Abb. 67: *Veränderte Werte des Gebäudegenerators im Vergleich mit der internen Attributtabelle (vollständig abgebildet im Anhang). Mit Blick auf Konfliktreduzierung wurden die Grenzwerte so eng wie möglich gesetzt, ohne mehr als ein Viertel der Zuweisungen zu verlieren. (eigene Darstellung)*

Es soll im Folgenden versucht und festgehalten werden, inwieweit durch Veränderung der Minimal- und Maximalwerte sowie der Bauweise die Genauigkeit der Zuordnung verbessert werden kann.

Die Einfamilienhauskategorisierung ist nur zu verbessern, wenn alle Bauweisen zugelassen werden; dies jedoch erhöht Konflikte mit anderen Typen drastisch. Dennoch lassen sich die Grenzwerte leicht ohne Verlust von Elementen enger fassen.

Die Doppelhauskategorisierung lässt sich immens verbessern durch Verändern der Maße: von 72m² minimal auf 50m², und von 172m² maximal sind 100m² ausreichend, ohne zugewiesene Grundstücke zu verlieren. Die geringfügige Lockerung der dimensionalen Bedingung ist ebenfalls vollständig ausschließlich hinsichtlich EFH, da die Bauweisen exklusiv sind.

Die Reihenhauszuweisung konnte von ursprünglich 23m² bis 172m² auf 50m² bis 100m² eingeschränkt werden, ohne die Genauigkeit zu verringern; die Anzahl der Zuweisungen ist konstant bei sieben.

Die Mehrfamilienhausklassifizierung konnte um 20% auf zehn Zuordnungen verbessert werden, indem der untere Grenzwert herabgesetzt (von 100m² auf 50m²) wurde. Der obere Grenzwert kann bis 250m² verringert werden, ohne das Zuweisungen verloren gehen; da jedoch dieser Typ die größten Wohngebäude darstellt, soll das aus Hombruch stammende Maximum bei 500m² verbleiben, alles Größere wird durch den Eingangsfilter in Gruppe A entfernt.

Eine Veränderung des Abstandes, ab wann Gebäude als freistehend gelten, ist nicht zielführend; jegliche Änderung verschiebt die Zuweisungen stark in EFH- oder RH-Gebiet.

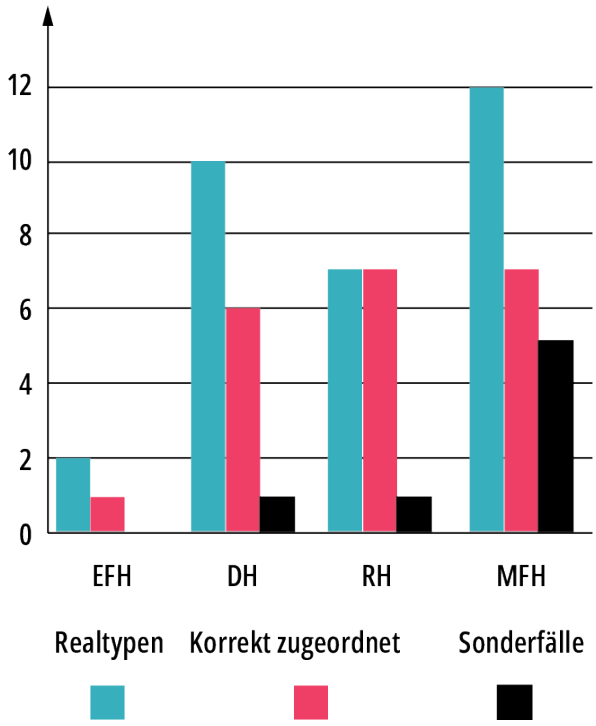


Abb. 68: *Zuordnungen der Gebäudegrundrisse in der zweiten Probe des Generators nach Veränderung der Grenzwerte mit Blick auf die Attribute in der Tabelle in Blender. (eigene Darstellung)*

In Zahlen ist die Genauigkeit der Zuordnung (inklusive Sonderfälle ohne Doppelung) somit auf von 20 korrekten Klassifizierungen in der ersten Probe auf nun 25 von 35 Elementen gesteigert worden, dies entspricht einer Genauigkeit von nun etwa 71%, ohne Sonderfälle 60%.

Der Preis dieser verbesserten Zuordnung jedoch zeigt sich in der erhöhten Anzahl der Konflikte: von 18 ist die Menge der Grundrisse, die doppelt einem Haustyp zugewiesen werden, auf 26 gestiegen. Dies ist insbesondere beachtlich, da dies nahezu 75% Konfliktfälle durch Mehrfachzuordnung bedeutet.

Es soll experimentiert werden, ob durch Teilen der Geometrie in kleinere Objekte, um Teilzuweisungen zu ermöglichen und doppelte Klassifizierungen zu verringern. Jedoch lässt sich wie in

Abb. 67 dargestellt bereits erkennen, dass der überwiegende Teil der Fehlzuweisungen in typologisch gemischten Gebieten vorrangig ist; lediglich die Reihenhaustypen, welche vollständig ebenfalls falsch doppelt bei Mehrfamilienhäusern eingeordnet sind. Durch Trennen der Geometrie in eigene Objekte (Auswahl und Rechtsklick im Editor, Separate, by Selection) können nun z.B. separierte DH- oder RH-Typen vollständig einer Klasse zugeordnet werden, dies ist insbesondere dann einfach, wenn die Gebäude in Clustern auftreten, wie es am oberen Bereich der Steeler Bergstraße und im Krekelerweg der Fall ist. Die Grenzwerte können dann vollständig aufgehoben werden (sofern nur ein Typ vorherrscht). Diese händische Separation soll jedoch nicht als Erfolg oder verbesserte Genauigkeit gezählt werden; letztlich ist es der optionale nächste Schritt, von der automatisierten Zuordnung auf die händische Nachbearbeitung überzugehen und als Mittel der visuellen Aufbereitung Farben und Materialien zuzuweisen.

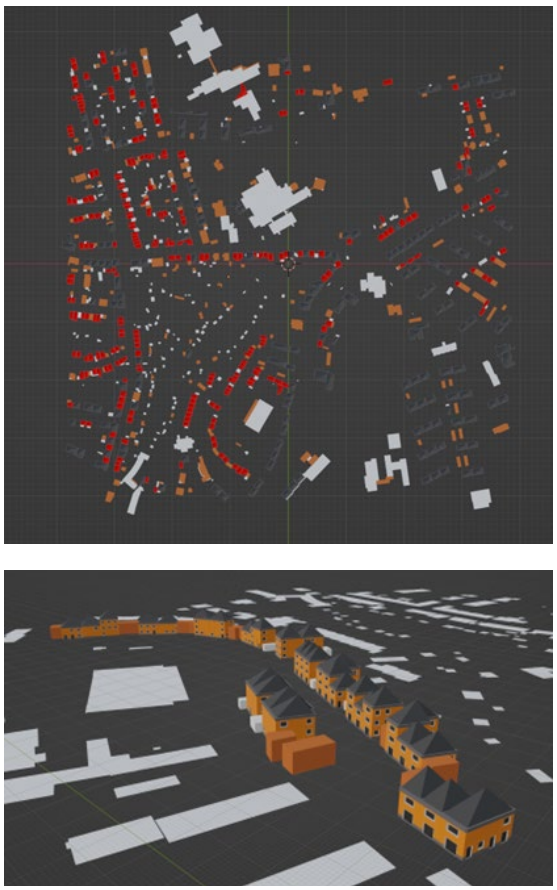


Abb. 69: *oben Konflikte bei allen Reihenhaus-Grundrissen am Krekelerweg: durch Separation in eigene Objekte und Löschen der anderen Typen (entfernen des Namens im Namensfeld ausreichend) fällt die Doppelzuweisung wie unten sichtbar schnell weg. (eigene Darstellung)*

Visuelle Qualität und Genauigkeit

Hinsichtlich der Darstellung der Gebäudekubaturen und Attributsausprägungen, ist es nun folglich an der Zeit, die Modulbauteile entsprechend ihren Realtypen besser auszuwählen und ihnen Materialität zuzuordnen. Von den 13 Modulbauteilen besitzen fünf variable Maße durch Shape Keys. Für die visuelle Aufbereitung sollen nun die Gebäude in Handarbeit voneinander abgehoben, an ihre Realität angelehnt, dargestellt werden.

Zunächst verbleiben Einfamilienhäuser aufgrund ihrer geringen Zahl mit der Standardzuordnung der EFH-Module in Orange.

Den Doppelhaus-Modulen wird eine rotbraune Farbe in Anlehnung der Gebäude an der Kreuzung Augenerstraße und Steeler Bergstraße gegeben (Abb. 58, Abb. 61).

Reihenhäuser besitzen weitaus verschiedenere Ausprägungen (z.B. Krekelerweg, Abb. 71), dessen unterschiedliche Materialien aufgrund der Wiederverwendung der klassensortierten Bauteile schwierig mit dem hier erstellten System darzustellen sind. Es wäre möglich, eine Auswahl von mehreren Materialien den Bauteilen zuzuordnen, falls sie sich auf der gleichen Mesh Island befinden – ansonsten wäre das Material jedes Bauteils des Hauses randomisiert. Es werden einfache beige Farben gewählt, sowie die Fenster mithilfe der Shape Keys vergrößert, um die

Abb. 70: oben Doppelhäuser auf der Steeler Bergstraße in teilweise geschlossener Bauweise, der rote Klinker ist ein markanter Kontrast. Unten Reproduktion mit dem Gebäudegenerator in Blender. (eigene Darstellung)

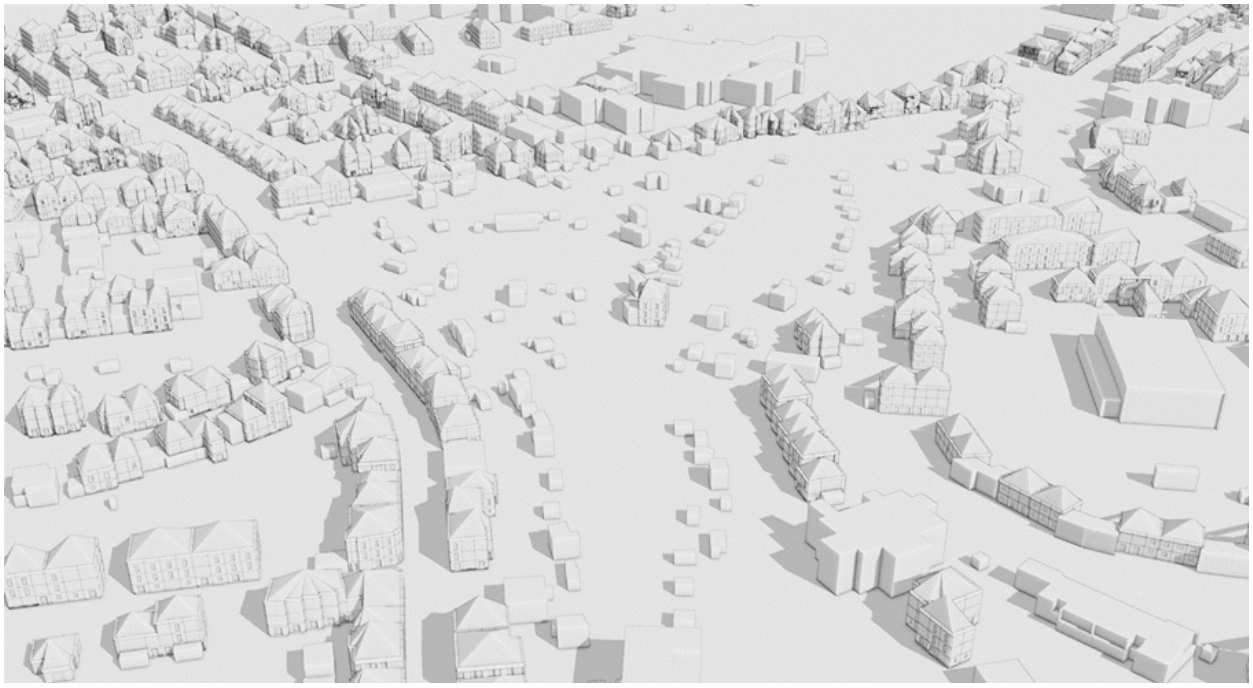
Abb. 71: Oben mehrere Reihenhäuser auf dem Krekelerweg, Blick nach Süden. Unten noch nicht gerenderte Darstellung in Blender. (Eigene Darstellung)

Abb. 72: Blick aufwärts die Steeler Bergstraße auf der Höhe der Willekestraße. Der öffentliche Raum ist von geschlossener Bebauung mit Stuckfassaden dominiert. (eigene Darstellung)

geringere Außenfläche und damit Lichteinfall zu kompensieren.

Mehrfamilienhäuser sind sowohl in Zeilen- wie auch Reihenbauweise (oft Gründerzeitstil, etwa Abb. 72 die Steeler Bergstraße) häufig im Gebiet der Case Study anzutreffen. Auch einfach gestaltete Fassaden sind in gemischten Bereichen zu finden, häufig mit Aufputzdämmung. Für spezifische Darstellungen mit Fokus (etwa eines Straßenraumes) ist es durchaus zweckmäßig, einzelne Gebäude detaillierter an ihr reales Aussehen anzupassen. Für das gesamte Gebiet der Case Study liegt aber kein Fokus auf einem Teilraum; es wird eine allgemeine Darstellung der MFH in graugelb in Verbindung mit engen, hohen zweiteiligen Fenstern verwendet.

Den Konfliktfällen werden automatisch durch den Generator mehrere Klassen zugewiesen; dadurch werden mehrere Gebäude übereinander erstellt. Dies könnte zwar einerseits dadurch verhindert werden, indem die ausgeschaltete Gruppe zur Regelung des Konfliktvorranges in Gruppe C reaktiviert wird; aufgrund der Beschränkung der Vergleiche und Prioritätenprüfung mit dem Node-basierten System ist eine vollständig funktionierende Priorisierung derzeit nicht möglich; es könnten mit diesem System allen Konfliktfällen automatisch ein Konfliktfall-Typ zugeordnet werden (z.B. Typ 1). Andererseits entstehen dadurch dennoch ein Ausfall und Reduktion auf eine gemeinsame Gruppe von Elementen, die teilweise keine Gemeinsamkeiten haben. Vorzuziehen ist es daher, für visualisierungskritische Bereiche von Hand durch Objektseparation den Grundrissen die richtigen Klassen zuzuordnen.



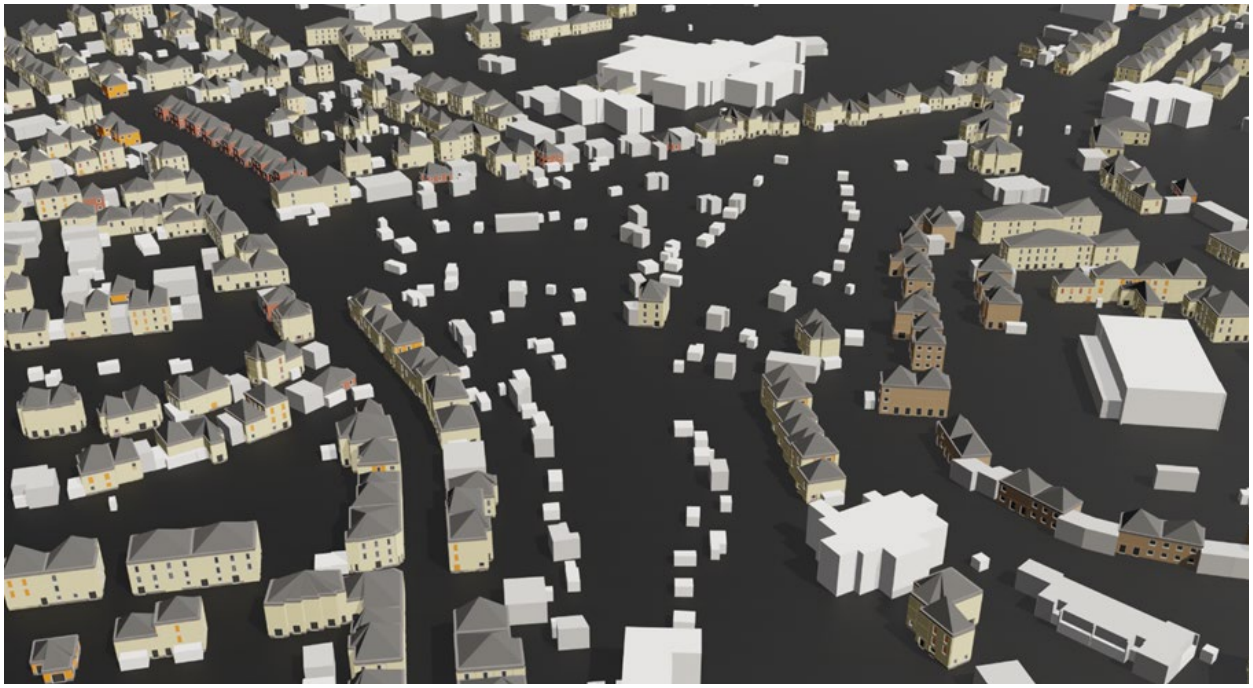
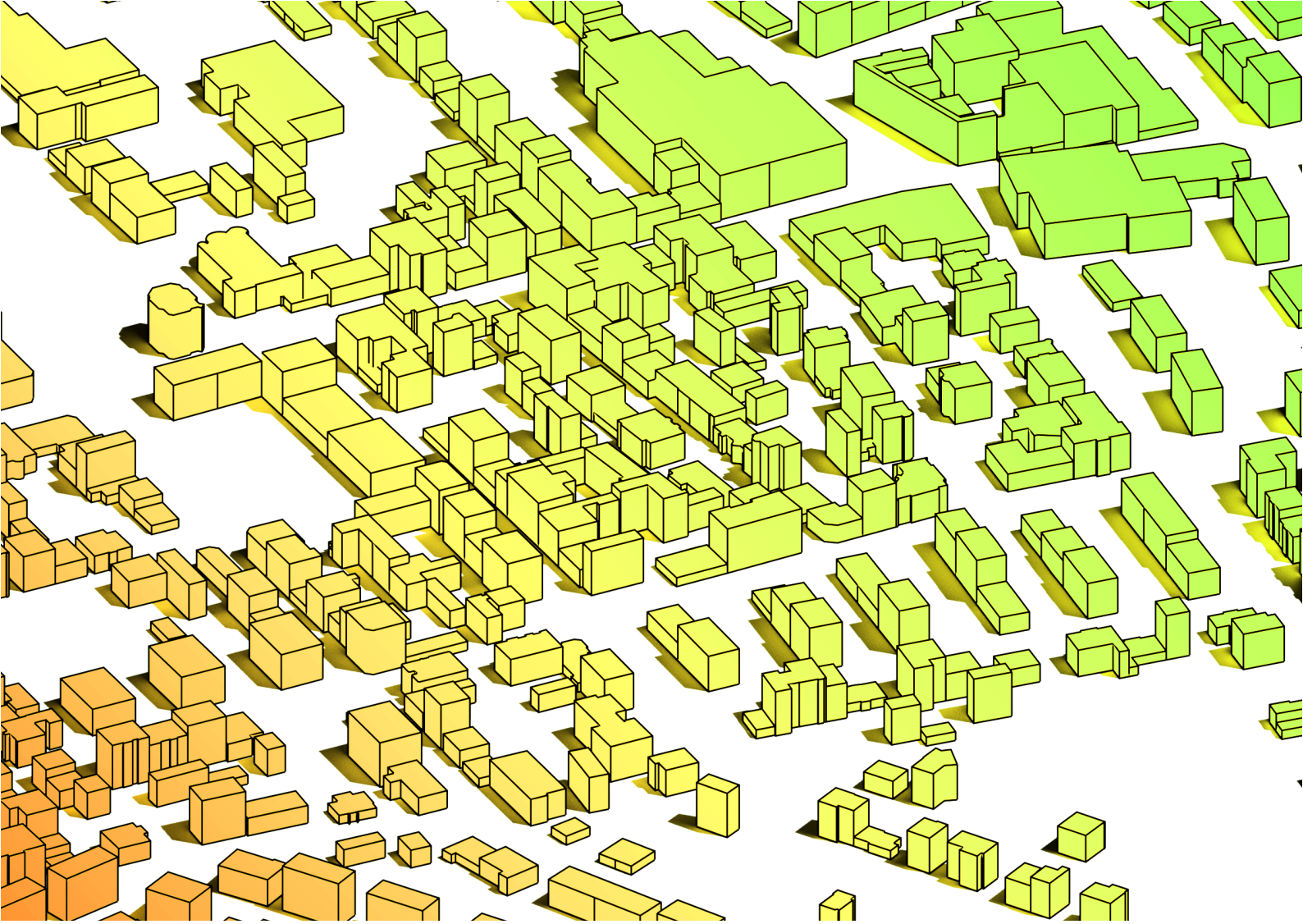


Abb. 73: *Renderings der mit dem Gebäudegenerator virtuell reproduzierten Bebauung in Essen Steele und Freisenbruch. Oben und mittig abgebildet ist der Blick nach Norden 200m oberhalb der Steeler Bergstraße über die Kleingartenanlage hinweg. Mittig sind teilweise Geometrieüberlagerungen vorhanden, die jedoch hier zur Dokumentation nicht von Hand entfernt werden sollen. Unten eine gerenderte Straßenansicht auf dem Krekelerweg nach Süden. (eigene Darstellung)*



TEIL C: DISKUSSION

Nach der theoretischen Ausarbeitung einer neuen, auf diese Arbeit eigens zugeschnittene Typologie, den raumrelevanten Haustyp, nach der Erhebung von realen Fällen und Daten, mit denen ein Klassfizierungssystem – vorgeschaltet einem 3D-Gebäudegenerator – geschaffen und realen Maßen angepasst werden konnte, nach der Fallstudie mit zwei Testläufen und Modifikation der Grenzwerte, erfolgte die Bemessung, Betrachtung und Auswertung des Erfolges dieser Arbeit. In diesem letzten Teil C sollen nochmals alle Arbeitsschritte rückblickend hinsichtlich ihrer Auswirkungen betrachtet und diskutiert werden, und eine Evaluation der Ergebnisse, sowohl der Klassifizierung – bezüglich Grenzfällen, Praxistests, und Überarbeitung – als auch der Visualisierung, wie Genauigkeit der Darstellung, stattfinden. Auch ein Blick soll geworfen werden auf die spezifische Übertragbarkeit, den Nutzen und die Anwendbarkeit für Bürger:innen, Planer:innen oder Studierende. Als Betrachtung der Annahmen und Beschränkungen des erarbeiteten Systems erfolgt eine abschließende Einordnung und Ausblick.

Bewertung Arbeitsschritte

Insbesondere die Arbeitsschritte der theoretischen Erarbeitung einer Typologie, die auf diese Forschungsarbeit und ihre Anforderungen zugeschnitten ist, als auch die Erhebung von zufällig gewählten Realtypen für die Analyse hinsichtlich realer Ausprägungen der für theoretisch wichtig erachteten, raumrelevanten Ausprägungen, sowie die Synthese des Generators mit seiner Klassifizierung, fand teilweise, vor allem in der strukturkonzeptionellen Phase, parallel statt. Dadurch sind später als wichtig erkannte Gebäudetypen zunächst nicht spezifisch erhoben und eingeplant worden; dies ist besonders bei den Reihenhäusern und Mehrfamilienzeilenbauten der Fall, deren geringe Abgrenzbarkeit anhand der Grundrisse allein durch anderwärtige Informationen hätte verbessert werden können.

Der raumrelevante Haustyp an sich ist mit der Reduzierung auf Bauweise und Kubaturen ausreichend gewesen, stellt sich aber letztlich als Teillösung heraus; eine Kombination mit weiteren Cluster-Analysen innerhalb der Klassifizierung im Generator, etwa Analyse von Ähnlichkeiten zu umliegender Bebauung, wurde vernachlässigt aufgrund unsicherer zeitlicher Ressourcen. Dies stellte sich gegen Ende dieser Forschung auch als vorteilhaft heraus, da letztlich die finalen Schritte der Case Study und Modellierung/Visualisierung nahezu doppelt so viel Zeit zugeordnet werden musste, um die Inhalte angemessen er- und darstellen zu können.

Die Erhebung in Hombruch und die Auswahl des Gebietes selbst ist allgemein positiv zu bewerten, da durch die diversen, gemischten Haustypen eine umfängliche Anzahl an Gebäudedaten erhoben werden konnte; dennoch hätte eine größere Anzahl an Eingangsdaten sowie statistische Gewichtung mit Mittelwerten oder Gauß'scher Normalverteilung in Verbindung mit einer „weichen" Klassifizierung durch Gewichtungsfaktoren die Zuordnung von Gebäuden verbessern können. Teilweise ist dies der Begrenztheit durch die visuelle Programmiersprache Blender Geometry Nodes zuzuordnen; bisher ist es mindestens aufgrund fehlender Implementation einer Python-Schnittstelle für den Node Graph nicht möglich, auf externe Datenquellen wie Exceltabellen zuzugreifen. Die Eingabe der Daten muss direkt im Programm erfolgen. Auch ist keine Separation in einzelne, eigene Objekte durch Geometry Nodes möglich – dies muss von Hand geschehen. Auch die generelle Schwierigkeit, rekursive oder repetitive Operationen mit unterschiedlichen, undefinierten Variablen wie Einspeichern und

Auslesen der Variablen pro Element umzusetzen, sowie der Begrenzung, dass keine Fields für z.B. Geometrie-Switches verwendet werden können, macht für die klassische Programmierung triviale Aufgaben umständlich. Dass keine Anzeigenamen für Variablen im User Interface zugeordnet werden können – dass mit diesen im Node Graph so gearbeitet werden muss, wie sie für die Benutzer:innen dargestellt werden, macht die Unterscheidung von Attributen entweder schwieriger oder verwirrend benannt im UI.

Dennoch konnte im zeitlich begrenzten Rahmen dieser Forschungsarbeit ein funktionales, automatisiertes System zur Klassifizierung und Visualisierung von ganzen Stadtteilen erstellt werden. Von der Optimierung und Planung her wäre es vorteilhaft, die Arbeitsschritte in mehrere Teilgraphen auszulagern, die nacheinander ausgeführt werden, etwa Klassifizierung und Geometriepositionierung mit Buildify einzeln. Dies führt voraussichtlich nicht nur zu zeitlich schneller berechneten Ergebnissen, sondern auch zu besserer Feinkontrolle, da weniger Annahmen aufgrund der vollständigen Automatisierung getroffen werden müssen.

Schließlich wurden zur Rahmensetzung und Begrenzung des Umfanges eine Anzahl an Annahmen getroffen und Grenzen gesetzt, um im endlichen Zeitrahmen eine themenumfängliche Forschung und Ausarbeitung des Forschungsgegenstandes sowie die Aufarbeitung und Präsentation der Ergebnisse vollziehen zu können. Die Reduzierung auf fünf Haustypen, die begrenzte Auswahl an Klassifizierungsbedingungen sowie vereinfachte, aber flexible Modulbauteile bieten dennoch eine Basis, auf der ein weitaus umfassenderer, automatisierender 3D-Gebäudegenerator erstellt werden könnte. Es wäre höchstwahrscheinlich notwendig, fortgeschrittene Methoden der klassischen Programmierung und Datenbankverwaltung einzubeziehen. Hinsichtlich der Erweiterbarkeit von Blender sollte dies auch möglich sein, auch etwa mit einem umfassenderen User Interface, Notierung von Annahmen und Bearbeitbarkeit von Zwischenschritten. Technisch ist der gesamte Gebäudegenerator „offen“ zugänglich; im Geometry Node Editor ist der Graph einsehbar und kommentiert. Für die Interpretation und Erweiterung über die hier erarbeiteten Inhalte hinaus ist Fachwissen hinsichtlich Blender, Programmierung und tieferen mathematischen Verständnis von Topologie und Geometrie in der Computergrafik nötig.

Evaluation der Ergebnisse

Die Übertragbarkeit der Forschung und des Generators ist dem Erfolgsmaß der Case Study nach teilweise, eher grundlegend gegeben, da die Klassifizierung im Gebäudegenerator mit einem Erfolg von 71% korrekter Zuordnungen verzeichnet wird, jedoch ist dies auf Kosten einer Fehlergrenze von mindestens 29%, und einer durchschnittlichen Anzahl von der doppelten Zuordnungen von 75% gegeben. Die automatisierte Klassifizierung und folglich die Darstellung dreidimensional ist letztlich mit diesem System möglich; erfordert dennoch geringe bis teilweise erhebliche Nachbearbeitung der Ergebnisse, je nach Datenlage und Verwendungszweck. Denn die Begrenzung auf Grundrisse (Hausumringe) anstelle LOD mit Dachformen, die bereits technisch vollständig frei verfügbar, aber praktisch nicht ohne proprietäre Software verwendbar ist, sowie die Begrenzung auf Modellmuster, das Überspringen von Terraingenerierung oder Höhenanpassung der Gebäude sind Schnittpunkte, an denen diese Forschung fortgeführt werden könnte. Auch die Begrenzung der Dachformen aufgrund komplexer Berechnung, oder dass Türen nicht mittig oder einzigartig pro Geschoss sind, sind aufgrund des sehr spezifischen technischen Anspruchs nicht beachtete Details, die ansonsten weitaus mehr Ressourcen mit für die gesamte Arbeit geringeren Effekt beansprucht hätten.

Letztlich wurde das Echtzeit-Kriterium eingehalten, doch bei größeren Gebieten wie der Case Study mit über 600 Faces ist eine reduzierte Performance von unter 24 Bildern pro Sekunde präsent. Auch die einfache, generalisierte, wenig detaillierte Darstellung, ist mit Blick auf die Performance und den angestrebten Maßstab von 1:500 zu rechtfertigen; dennoch sollten noch vor allem sekundäre und größere tertiäre Strukturen einbezogen werden, was letztlich nicht im Zeitrahmen umgesetzt werden konnte. Die Darstellung einfach gehalten – Farben, Materialien und Texturen sind zuweisbar, jedoch verringern insbesondere Bildtexturen die Performance (und Dateigröße) und wurden daher nicht verwendet. Letztlich ist Darstellung eher kurz gekommen, aber ist auch die visuelle Qualität nicht Fokus dieser Arbeit und für die grundlegende Darstellung von Kubaturen in drei Dimensionen eher weniger relevant.

Die größten Herausforderungen dieser Forschungsarbeit war die ungewisse, teilweise nicht mögliche Planung von bestimmten Schritten und Vorgängen, weshalb mehrere Aufgaben zu Beginn zeitgleich ausgeführt werden mussten, um insgesamt eine Planung des Vorgehens und des Umfangs möglicher und erwünschter Forschungsergebnisse im Rahmen des gesamten Themas eingrenzen und spezifizieren zu können. Das Ergebnis dieser Forschung ist einerseits der Prozess, die dokumentierten Lehren aus dem Vorgehen von Planung, Operationalisierung, Begrenzung und Umsetzung eines 3D-Gebäudegenerators, als auch der Output des Generators, mit dem bereits mehrere Schritte für Renderings oder 3D-Druck von Modellen eingespart werden können, und die Weiterarbeit und Erweiterung für bestimmte Projekte durch die Modulbauteilgruppen und ihre Modularität beschleunigt werden – je nach gewünschten Detailgrad teilweise auch vollständig vom Generator übernommen werden können.

Ausblick

Die Anwendung der mit dem Gebäudegenerator erstellten Quartiers- oder Stadtteilvisualisierungen sollte vor allem in der reduzierten Form für VR/XR und generelle mobile Anwendungen (z.B. Beteiligungsapps mit 3D-Ansicht) ausreichend optimiert sein, und im Vergleich mit dem Output von Architektur-CAD-Software wie ArcGIS Cityengine oder Vectorworks Enscape im oberen Performancebereich liegen; die Ausgangsgeometrie des Gebäudegenerators liegt bei unter 100.000 Polygonen und je nach Wunsch bei einem bis ein paar einzelnen Objekten, was weiterhin die draw calls des GPU verringert im Vergleich zu CAD-Exporten, dessen Szenen oft hunderte Objekte mit mehreren einzigartigen Texturen pro Objekt besitzen.

Die Anwendung für die Lehre und Forschung, z.B. für schnelle, automatisierte städtebauliche Visualisierungen von Gestaltungsplänen ist an weiterer Fall, der direkt über die Geometrieschnittstelle (über das BlenderGIS-Addon) aus Shapefiles von sehr geringem Aufwand ist; eine rapides testen von bestimmten Kubaturen, automatisch zugeordneten Gebäudehöhen in gewissen Rahmen und gewünschten Bauteilen hat das Potential, für Arbeitsmodelle und Renderings eingesetzt zu werden und so die oft vernachlässigte Dreidimensionalität bereits bei frühen Konzeptionierungen ohne großen Aufwand in die Forschung zu bringen. Verwendungen für städtebauliche Fach- und Bürger:innenbeteiligungen im frühzeitigen Rahmen sollten aus gleichen Gründen generell gegeben sein, da der Gebäudegenerator „out oft he box“ funktioniert; der Outputs kann oder muss letztlich doch je nach Eingangsdaten, Fachwissen, Zeit und Nachbearbeitungsinteresse für den Anwendungszweck und den gewünschten Detailgrad der Darstellung verbessert werden.

Schlussfolgerung

Open Source basiert, funktioniert, es ist ein Anfang und zeigt, dass es auch ohne proprietär lizensierte Produkte möglich ist, automatisiert dreidimensionale Stadtmodelle für die Planung und Diskussion außerhalb formalisierter und institutionalisierter Kontexte zu erschaffen, ohne besondere Fachkenntnisse für die Verwendung zu benötigen und durch die freie Zugänglichkeit der Mittel und Informationen, wie sie zu benutzen sind, die räumliche Planungspraxis weiter demokratisieren.

Das Konzept der Digital Twins und prozeduralen Modellierung haben sich zusammen verwendet mit Geometry Nodes als eine brauchbare Grundlage für den städtebaulichen Modellprozess ergeben. Zwar sind Digital Twins eher eine Systematik der städtebaulichen Informatik, der Informationsbereitstellung etwa für Kontrollzentren hinsichtlich z.B. Ressourcenmanagement, aber im generelleren Sinne des digitalen, stetig aktualisierten, abstrahierten Abbild einer gefilterten Realität für den Zweck der planerischen Steuerung angemessen.

Die Auswahl des Suchgebietes und Erhebung spielte für die Schaffung einer Datengrundlage von Gebäudetypen nach den Erkenntnissen aus zwei Felderkundungen nur insoweit eine Rolle, dass die Suchgebiete eine bestenfalls große Diversität von Haustypen aufweisen; bei begrenzten Ressourcen muss darauf geachtet werden, ob bestimmte Gebäudetypen nur räumlich geclustert vorkommen, wie die Reihenhäuser oder MFH-Zeilenbau, und dass diese spezifisch erhoben werden – bestenfalls mehrere Proben verschiedener Cluster. Die Datengrundlage war allgemein ausreichend, auch aufgrund der Unterscheidung nach Bauweisen und dem Vergleich mit dem vielfach erprobten System des IWU. Ein zweiter Stadtteil des Ruhrgebietes konnte erfolgreich dargestellt werden.

Die Gebäudemerkmale kommen besonders vorteilhaft durch die prozedurale Art und Weise der Modulbauteile hervor, auch wenn das Forschungsinteresse in dieser Hinsicht begrenzt gehalten werden musste. Die Normativität von Typisierten Bauelementen kann in einem gewünschten Rahmen weitaus offener gehalten werden, als es in der Realität der Fall ist; die Vorteile der der digitalen Verschachtelung aus Generator und Shape Keys (und ähnlicher Systeme) bietet Potential, weiter erforscht zu werden.

Die zentrale Forschungsfrage, was kann ein auf Open Source Software basiertes, prozedurales Werkzeug für die Modellierung von Stadträumen und die einhergehende Entscheidungsfindung leisten kann, kann somit beantwortet werden, dass ein grundlegender Schritt für Open Source Software in Verbindung mit Open Data bereits im Rahmen einer Abschlussarbeit möglich ist, die Ausgestaltung zwar hinsichtlich gewisser Aspekte begrenzt gehalten werden musste, jedoch das Potential, die Ausbaufähigkeit und Modularität in dieser Forschungsarbeit hoffentlich nähergebracht werden konnten. Die Verringerung von Zugangsschwellen für neue technologische Möglichkeiten und Synergien muss zum Wohl einer informierten, demokratischen Gesellschaft geschehen und weiter gefördert und erforscht werden.

Literaturverzeichnis

Alex (2024): Get the number of edges per island. Blender Stack Exchange. Online verfügbar unter https://blender.stackexchange.com/a/328429/200568.

Bezirksregierung Köln (Hg.) (2024a): 3D Gebäudemodelle. Bezirksregierung Köln. Online verfügbar unter https://www.bezreg-koeln.nrw.de/geobasis-nrw/produkte-und-dienste/3d-gebaeudemodelle, zuletzt aktualisiert am 04.04.2024, zuletzt geprüft am 04.04.2024.

Bezirksregierung Köln, Geobasis NRW (Hg.) (2023): Hausumringe. Online verfügbar unter https://www.bezreg-koeln.nrw.de/geobasis-nrw/produkte-und-dienste/liegenschaftskataster/aktuelles-liegenschaftskataster/hausumringe, zuletzt aktualisiert am 03.12.2024, zuletzt geprüft am 03.12.2024.

Bezirksregierung Köln, Geobasis NRW (2024b): TIM-online. Onlinekartendienst. Online verfügbar unter https://www.tim-online.nrw.de/tim-online2/, zuletzt geprüft am 23.09.2024.

Blender Foundation (2024): blender.org. Home of the Blender project - Free and Open 3D Creation Software. Online verfügbar unter https://www.blender.org/, zuletzt aktualisiert am 24.04.2024, zuletzt geprüft am 24.04.2024.

Blender Foundation (2025a): Geometry Nodes - Blender 4.3 Manual. Online verfügbar unter https://docs.blender.org/manual/en/latest/modeling/geometry_nodes/index.html, zuletzt aktualisiert am 01.01.2025, zuletzt geprüft am 01.01.2025.

Blender Foundation (Hg.) (2025b): Introduction to Shape Keys. Online verfügbar unter https://docs.blender.org/manual/en/latest/animation/shape_keys/introduction.html#workflow, zuletzt aktualisiert am 01.01.2025, zuletzt geprüft am 01.01.2025.

Blum, Andreas; Gruhler, Karin (Hg.) (2010): Typologien der gebauten Umwelt. Modellierung und Analyse der Siedlungsentwicklung mit dem Strukturtypenansatz. Leibniz-Institut für Ökologische Raumentwicklung. Aachen: Shaker.

Broady, Markus (2024): Geometry nodes, how to select nearest edges of mesh islands. Blender Stack Exchange. Online verfügbar unter https://blender.stackexchange.com/a/299042/200568.

Bundesministerium des Innern und für Heimat (BMI) (Hg.) (2023): Open Data. Online verfügbar unter https://www.bmi.bund.de/DE/themen/moderne-verwaltung/open-government/open-data/open-data-node.html, zuletzt aktualisiert am 02.11.2023, zuletzt geprüft am 04.08.2024.

Daten-Kompetenz für Städte & Regionen (Hg.) (2024): Digitaler urbaner Zwilling – Hype oder Helfer nachhaltiger Kommunen? – DKSR. Online verfügbar unter https://www.dksr.city/news/digitaler-urbaner-zwilling-hype-oder-helfer-nachhaltiger-kommunen/, zuletzt aktualisiert am 23.04.2024, zuletzt geprüft am 23.04.2024.

Deckert, Sabrina (2022): Welcher Haustyp ist für Sie geeignet? Hg. v. BurdaVerlag Publishing GmbH. DasHaus, zuletzt aktualisiert am 24.02.2022, zuletzt geprüft am 26.10.2024.

Digitales Wörterbuch der deutschen Sprache (DWDS) (Hg.) (2024): Bauform. Schreibung, Definition, Bedeutung, Synonyme, Beispiele. Online verfügbar unter https://www.dwds.de/wb/Bauform, zuletzt aktualisiert am 26.10.2024, zuletzt geprüft am 26.10.2024.

domlysz (2024): BlenderGIS: Blender addons to make the bridge between Blender and geographic data. Hg. v. GitHub. Online verfügbar unter https://github.com/domlysz/BlenderGIS, zuletzt aktualisiert am 06.03.2024, zuletzt geprüft am 01.01.2025.

Geofabrik GmbH (Hg.) (2018): Regierungsbezirk Arnsberg. Geofabrik GmbH, OpenStreetMap Contributors. Online verfügbar unter https://download.geofabrik.de/europe/germany/nordrhein-westfalen/arnsberg-regbez.html, zuletzt aktualisiert am 02.12.2024, zuletzt geprüft am 28.09.2024.

Glosbe (Hg.) (2024): Baustruktur. Deutsch Definition, Grammatik, Aussprache, Synonyme und Beispiele | Glosbe. Online verfügbar unter https://de.glosbe.com/de/de/Baustruktur, zuletzt aktualisiert am 26.10.2024, zuletzt geprüft am 26.10.2024.

Google (Hg.) (2024): Google Maps, zuletzt aktualisiert am 29.12.2024, zuletzt geprüft am 29.12.2024.

Grenzen der Statistischen Bezirke (2024): Stadt Dortmund. Shapefile. Online verfügbar unter https://opendata.dortmund.de/explore/dataset/fb62-statistischebezirke/export/?flg=de-de&disjunctive.statistischer_bezirk_nr&disjunctive.statistischer_bezirk, zuletzt geprüft am 29.09.2024.

Hombrucher Geschichtsverein e.V. (Hg.) (2020): Hombruch. Online verfügbar unter http://www.hombrucher-geschichtsverein.de/hombruch.htm, zuletzt aktualisiert am 17.02.2020, zuletzt geprüft am 08.12.2024.

Hudson-Smith, Andrew (2022): Incoming Metaverses: Digital Mirrors for Urban Planning 7 (2), S. 343–354.

Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) (Hg.) (2015): Institut Wohnen und Umwelt (IWU): TABULA. Online verfügbar unter https://www.iwu.de/index.php?id=205, zuletzt aktualisiert am 24.04.2024, zuletzt geprüft am 24.04.2024.

Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) (Hg.) (2016): IEE Project TABULA. Online verfügbar unter https://episcope.eu/iee-project/tabula/, zuletzt aktualisiert am 19.09.2024, zuletzt geprüft am 19.09.2024.

Kaplan, Frederic; Di Lenardo, Isabella (2020): The Advent of the 4D Mirror World. In: UP 5 (2), S. 307–310. DOI: 10.17645/up.v5i2.3133.

Land NRW (Hg.) (2024): GEOportal.NRW. Geodateninfrastruktur Nordrhein-Westfalen (GDI-NW). Ministerium des Innern des Landes Nordrhein-Westfalen. Online verfügbar unter https://www.geoportal.nrw/?activetab=map, zuletzt aktualisiert am 01.01.2024, zuletzt geprüft am 03.12.2024.

Lange, Norbert de (2020): Geoinformatik in Theorie und Praxis. Grundlagen von Geoinformationssystemen, Fernerkundung und digitaler Bildverarbeitung. 4., grundlegend überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum (Lehrbuch).

Leweux, Detlef (2020): Neue Mitte für Essen-Freisenbruch: Einkaufszentrum: Stadt legt Pläne vor - Essen-Steele. In: Lokalkompass, 07.01.2020. Online verfügbar unter https://www.lokalkompass.de/essen-steele/c-politik/einkaufszentrum-stadt-legt-plaene-vor_a1280622#gallery=null, zuletzt geprüft am 04.01.2025.

Olivia, Pavel (2022): Buildify 1.0. Hg. v. Gumroad. Online verfügbar unter https://paveloliva.gumroad.com/l/buildify?a=299264723, zuletzt aktualisiert am 17.12.2024, zuletzt geprüft am 17.12.2024.

OpenStreetMap (Hg.) (2024): OSM Buildings. Online verfügbar unter https://osmbuildings.org, zuletzt aktualisiert am 29.12.2024, zuletzt geprüft am 29.12.2024.

quellenform (2024): Geometry Nodes Straight Skeleton for Rooftops. Blender Stack Exchange. Online verfügbar unter https://blender.stackexchange.com/a/324191/200568.

Regionalverband Ruhr (RVR) (Hg.) (2024): Ruhrgebietsstädte kommem beim DUH-Hitze-Check gut weg. Online verfügbar unter https://www.rvr.ruhr/news/startseite-news/news/ruhrgebietsstaedte-kommem-beim-duh-hitze-check-gut-weg/, zuletzt aktualisiert am 29.12.2024, zuletzt geprüft am 29.12.2024.

Reicher, Christa (2017): Städtebauliches Entwerfen. 5. Aufl. 2017. Wiesbaden: Springer Vieweg (SpringerLink Bücher).

Reicher, Christa (2019): Grundlagen, Bausteine und Aufgaben des Städtebaus. Schnelleinstieg Für Architekten und Planer. Wiesbaden: Springer Vieweg. in Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH (Essentials Ser). Online verfügbar unter https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=5730812.

segu Geschichte (Hg.) (2021): Baustile. Online verfügbar unter https://segu-geschichte.de/baustile/, zuletzt aktualisiert am 03.11.2021, zuletzt geprüft am 26.10.2024.

Stadt Dortmund (Hg.) (2024): Stadtbezirk Hombruch. Online verfügbar unter https://www.dortmund.de/themen/stadtbezirke/hombruch/index-2.html, zuletzt aktualisiert am 08.12.2024, zuletzt geprüft am 08.12.2024.

Stadt Essen (Hg.) (2023): Steele. Online verfügbar unter https://www.essen.de/dasistessen/stadtteile/steele_2/steele_startseite.de.jsp, zuletzt aktualisiert am 04.01.2025, zuletzt geprüft am 04.01.2025.

Staib, Gerald; Dörrhöfer, Andreas; Rosenthal, Markus (2008): Elemente + Systeme. Modulares Bauen ; Entwurf, Konstruktion, neue Technologien. 1. Aufl. Basel, Berlin: Birkhäuser (Edition Detail).

Statistisches Bundesamt (2024): Zensus 2022. Gebäude- und Wohnungen. Online verfügbar unter https://www.zensus2022.de/DE/Aktuelles/Gebaeude_Wohnungen_VOE.html, zuletzt aktualisiert am 25.06.2024, zuletzt geprüft am 22.10.2024.

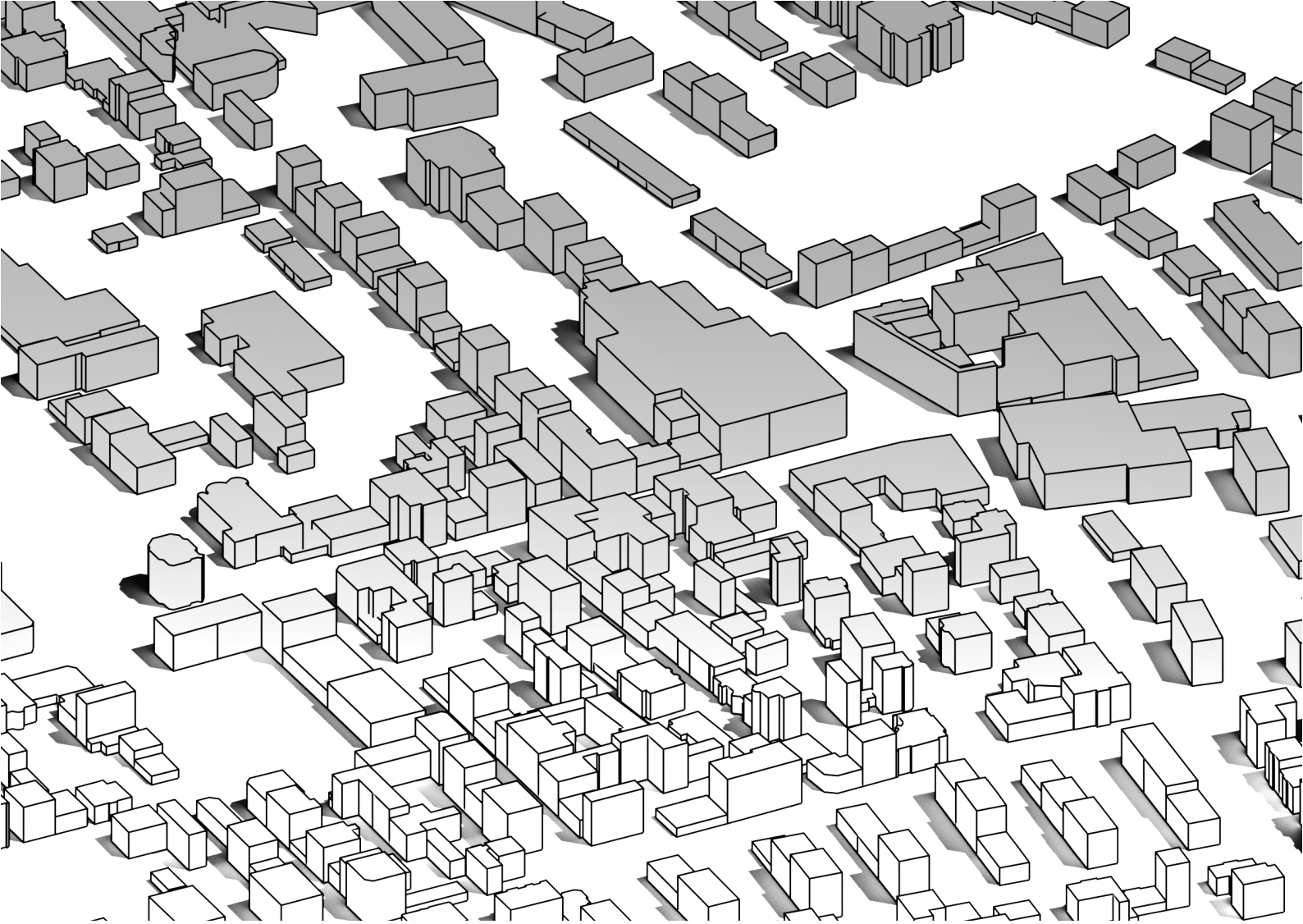
Steeler Archiv e.V. (Hg.) (2025): Steeler Chronik. Online verfügbar unter https://www.steeler-archiv.de/steeler-chronik.html, zuletzt aktualisiert am 02.01.2025, zuletzt geprüft am 04.01.2025.

Steffen Folz; Daniel Broschart; Peter Zeile (2016): Raumerfassung und Raumwahrnehmung – aktuelle Techniken und potenzielle Einsatzgebiete in der Raumplanung.

Weisstein, Eric W. (2024): Polygon. Hg. v. MathWorld. Wolfram|Alpha; Mathematica. Online verfügbar unter https://mathworld.wolfram.com/Polygon.html, zuletzt aktualisiert am 15.10.2024, zuletzt geprüft am 15.10.2024.

Wikipedia (Hg.) (2024a): Geometry instancing. Online verfügbar unter https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Geometry_instancing&oldid=1213426320, zuletzt aktualisiert am 13.03.2024, zuletzt geprüft am 02.01.2025.

Wikipedia (Hg.) (2024b): Polygon mesh. Online verfügbar unter https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Polygon_mesh&oldid=1248905442, zuletzt aktualisiert am 02.10.2024, zuletzt geprüft am 15.10.2024.



Anhang

Erhebung der Gebäudetypen Hombruch

Die Kategorisierung erfolgt nach dem Schema Identifikationsnummer_Typologie_Baualtersklasse im Sinne der Gebäudetypen und Baualtersklassen des IWU. Alle angegebenen Gebäude befinden sich in Dortmund Hombruch. Alle folgenden Fotoaufnahmen sind eigene Darstellungen. Erläuterung der Kürzel: EFH = Einfamilienhaus; RH = Reihenhaus; MFH = Mehrfamilienhaus; GMH = großes Mehrfamilienhaus; HH = Hochhaus.

Kategorisierung: H01_MFH_D

Vollgeschosse: II

Hausnummer: Heisterstraße 3

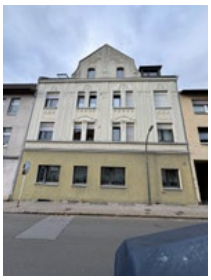
Kommentar: Wiederkehrendes Modell im Stadtteil, vergleiche Treppenhaus und Geländer

Kategorisierung: H02_MFH_B

Vollgeschosse: III

Hausnummer: Heisterstraße 11

Kommentar: Gründerzeitgebäude mit Stuckfassade

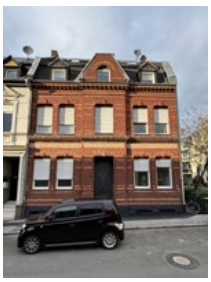


Kategorisierung: H03_MFH_B

Vollgeschosse: II

Hausnummer: Heisterstraße 19

Kommentar: Besondere Backsteinfassade mit Dekorationselementen



Kategorisierung: H04_MFH_D

Vollgeschosse: II

Hausnummer: Heisterstraße 48

Kommentar: Backstein und verputzte Außenwand unter der Plastikfassade

Kategorisierung: H05_MFH_F

Vollgeschosse: III

Hausnummer: Heisterstraße 27

Kommentar: Oberstes Geschoss mit Laubengang

Kategorisierung: H06_MFH_B

Vollgeschosse: III

Hausnummer: Heisterstraße 10

Kommentar: Gründerzeitgebäude mit Stuckfassade

Kategorisierung: W01_MFH_B

Vollgeschosse: III

Hausnummer: Harkortstraße 48

Kommentar: Geschäft im Erdgeschoss

Kategorisierung: W02_MFH_F

Vollgeschosse: III

Hausnummer: Wupperstraße 6

Kommentar: Besondere Betonfassadenelemente

Kategorisierung: W03_MFH_B

Vollgeschosse: II

Hausnummer: Wupperstraße

Kommentar: Besondere Ausgestaltung und Stuckfassade

Kategorisierung: W04_MFH_D

Vollgeschosse: III

Hausnummer: Wupperstraße 16

Kommentar: Baugleich zu H01, siehe Treppenhaus

Kategorisierung: W05_MFH_C

Vollgeschosse: III

Hausnummer: Wupperstraße 17

Kommentar: Gaststätte im Erdgeschoss

Kategorisierung: W06_MFH_C

Vollgeschosse: III

Hausnummer: Wupperstraße 13

Kommentar: nahezu keine erkennbaren Merkmale, Einordnung als Nachkriegsbau

Kategorisierung: W07_MFH_G

Vollgeschosse: III

Hausnummer: Wupperstraße 9

Kommentar: Besondere Erker mit Schieferverkleidung und Gaube

Kategorisierung: W08_MFH_D

Vollgeschosse: III

Hausnummer: Wupperstraße 5

Kommentar: Baugleich zu H01, siehe Treppenhaus

Kategorisierung: W09_MFH_C

Vollgeschosse: III

Hausnummer: Harkortstraße 50

Kommentar: Geschäft im Erdgeschoss

Kategorisierung: L01_MFH_J

Vollgeschosse: III

Hausnummer: Lütgenholthauser Straße 30

Kommentar: Modernes Mehrfamilienhaus mit Staffelgeschoss

Kategorisierung: L02_DH_C

Vollgeschosse: I

Hausnummer: Lütgenholthauser Straße 44

Kommentar:

Kategorisierung: L03_DH_C

Vollgeschosse: I

Hausnummer: Lütgenholthauser Straße 48b

Kommentar:

Kategorisierung: L04_EFH_C

Vollgeschosse: I

Hausnummer: Lütgenholthauser Straße 58

Kommentar: Besonderer Umbau

Kategorisierung: L05_EFH_E

Vollgeschosse: I

Hausnummer: Lütgenholthauser Straße 66/68

Kommentar:

Kategorisierung: L06_EFH_D

Vollgeschosse: II

Hausnummer: Lütgenholthauser Straße 74

Kommentar: Besonders großes Dach

Kategorisierung: L07_EFH_F

Vollgeschosse: I

Hausnummer: Rotkehlchenweg 1a

Kommentar: Innerhalb Bausiedlungen von Bungalows

Kategorisierung: L08_DH_F

Vollgeschosse: I

Hausnummer: Vor der Brügge 20

Kommentar:

Kategorisierung: L09_DH_F

Vollgeschosse: I

Hausnummer: Vor der Brügge 14

Kommentar:

Kategorisierung: L10_DH_F

Vollgeschosse: I

Hausnummer: Vor der Brügge 4

Kommentar:

Kategorisierung: L11_EFH_E

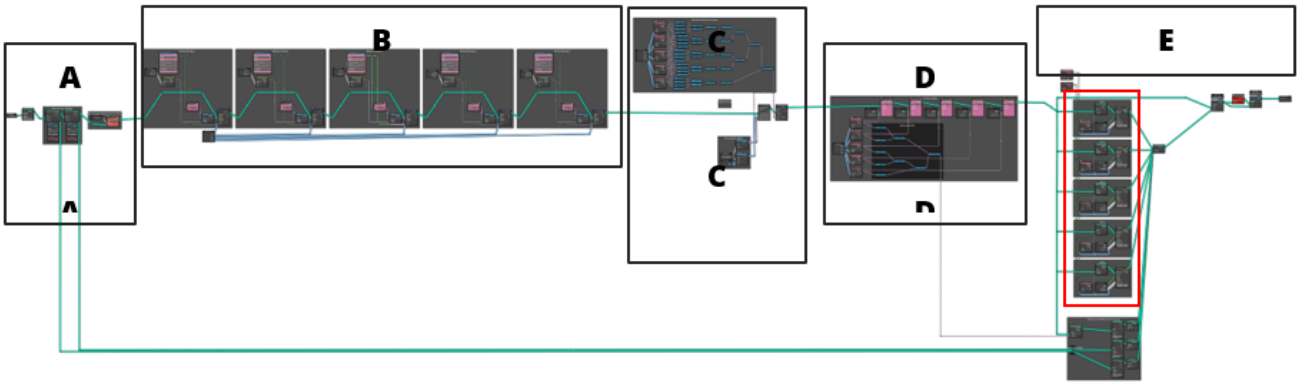
Vollgeschosse: II

Hausnummer: Am Hombruchsfeld 31

Kommentar:

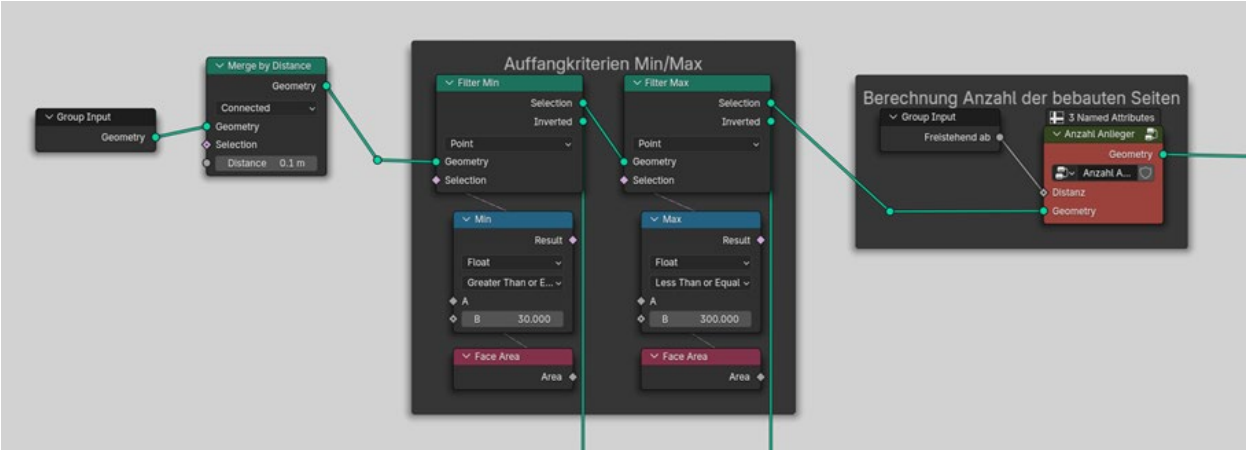
Blender Geometry Nodes

Sammlung von Abbildungen der eigens erstellten oder erweiterten Funktionen. Inwieweit vorgefertigte Elemente verwendet und modifiziert wurden, ist im Text erläutert und hier nochmals je Abbildung kurz

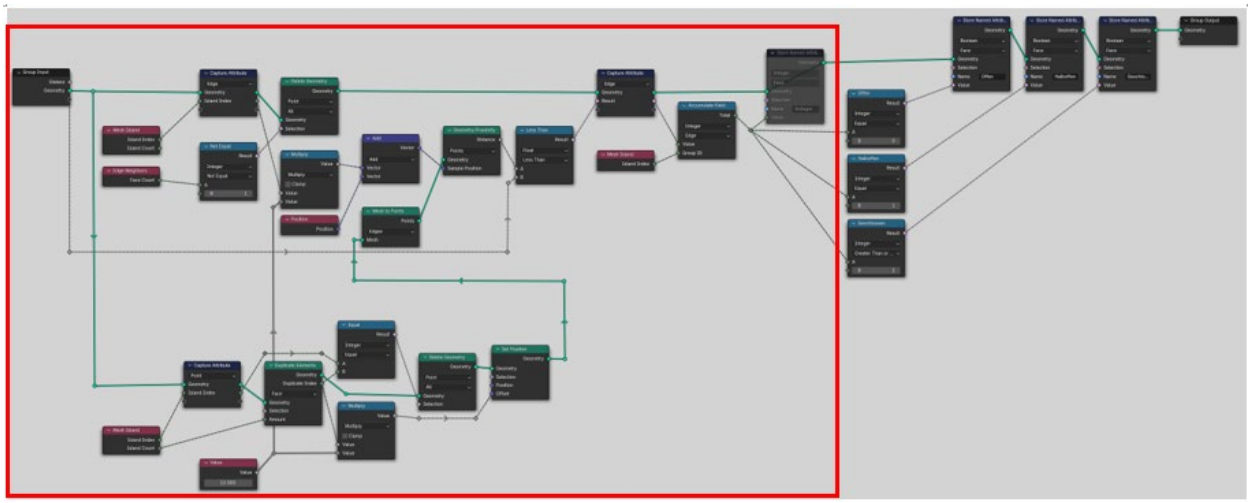


Gesamte Geometry Nodes Gruppe des in dieser Arbeit erstellten Generators. Am rechten Rand ist die fünfmalige Verwendung des modifizierten Buildify-Generators (verändert nach: Olivia 2022) für die jeweiligen Haustypen zu erkennen (rot markiert innerhalb Gruppe E). Weiterhin sind die Gruppen mit Buchstaben benannt, um sie leichter einzeln behandeln zu können.

Gruppe A

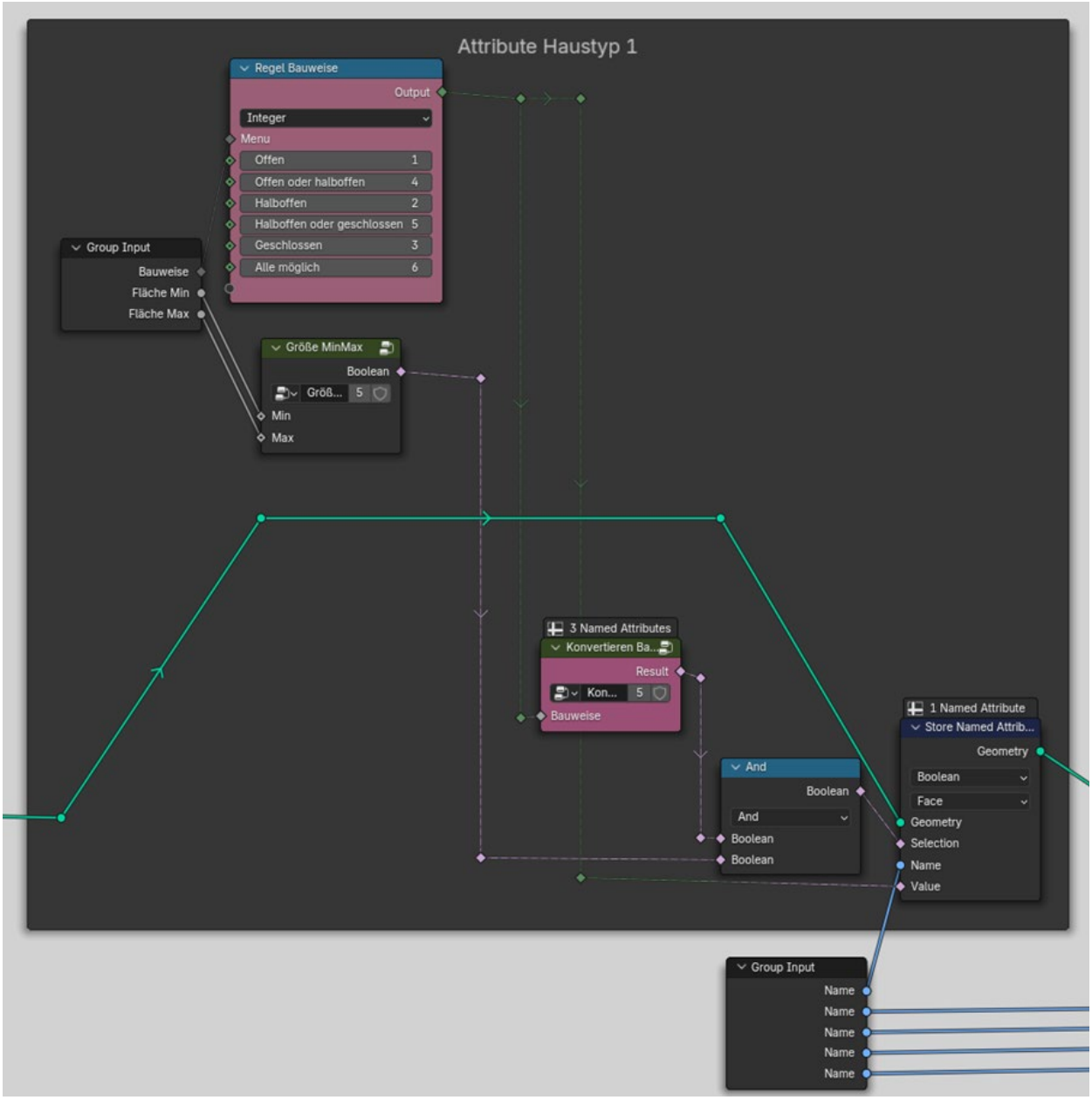


Inhalt der Gruppe „Anzahl Anlieger“:

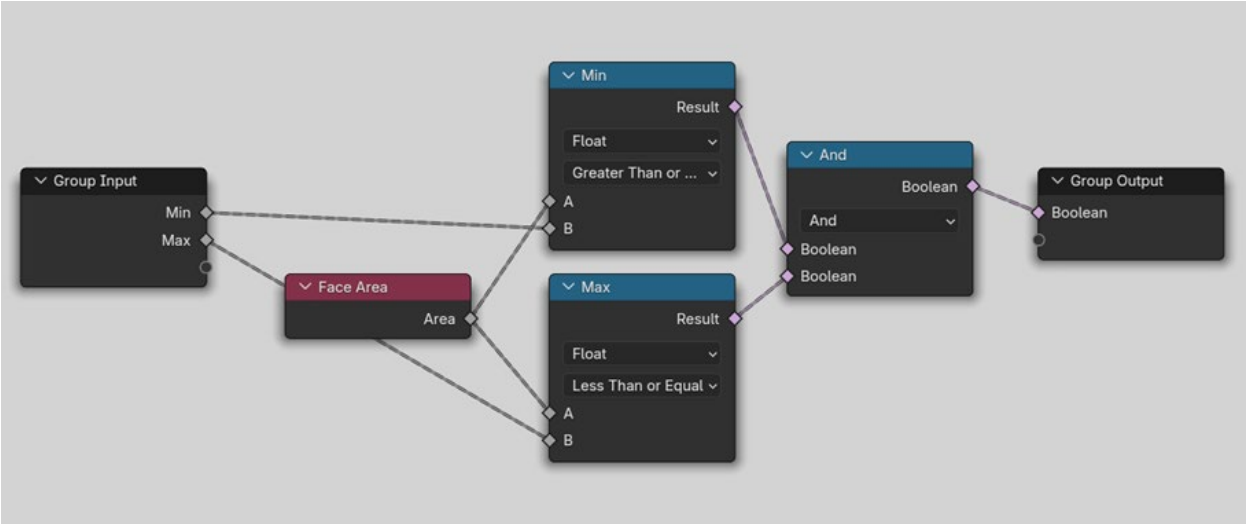


Rot markiert: Node-Gruppe zur Erkennung der Anzahl der Nachbar-Island-Edges in einem bestimmten Radius von der Mitte des Faces. (verändert nach: Alex 2024; Broady 2024)

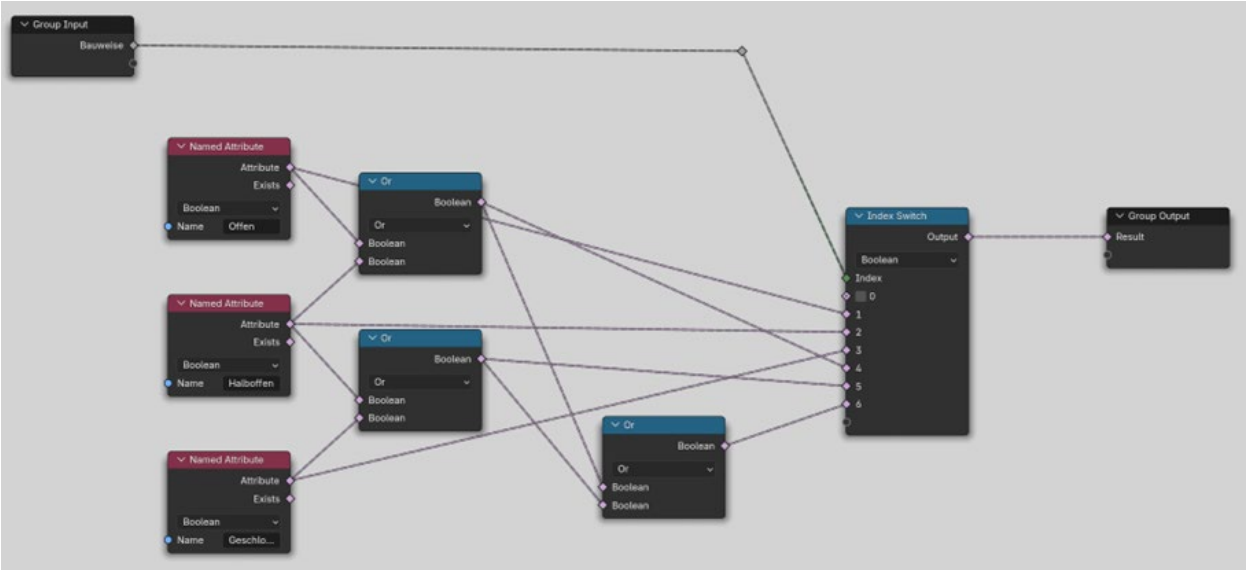
Gruppe B



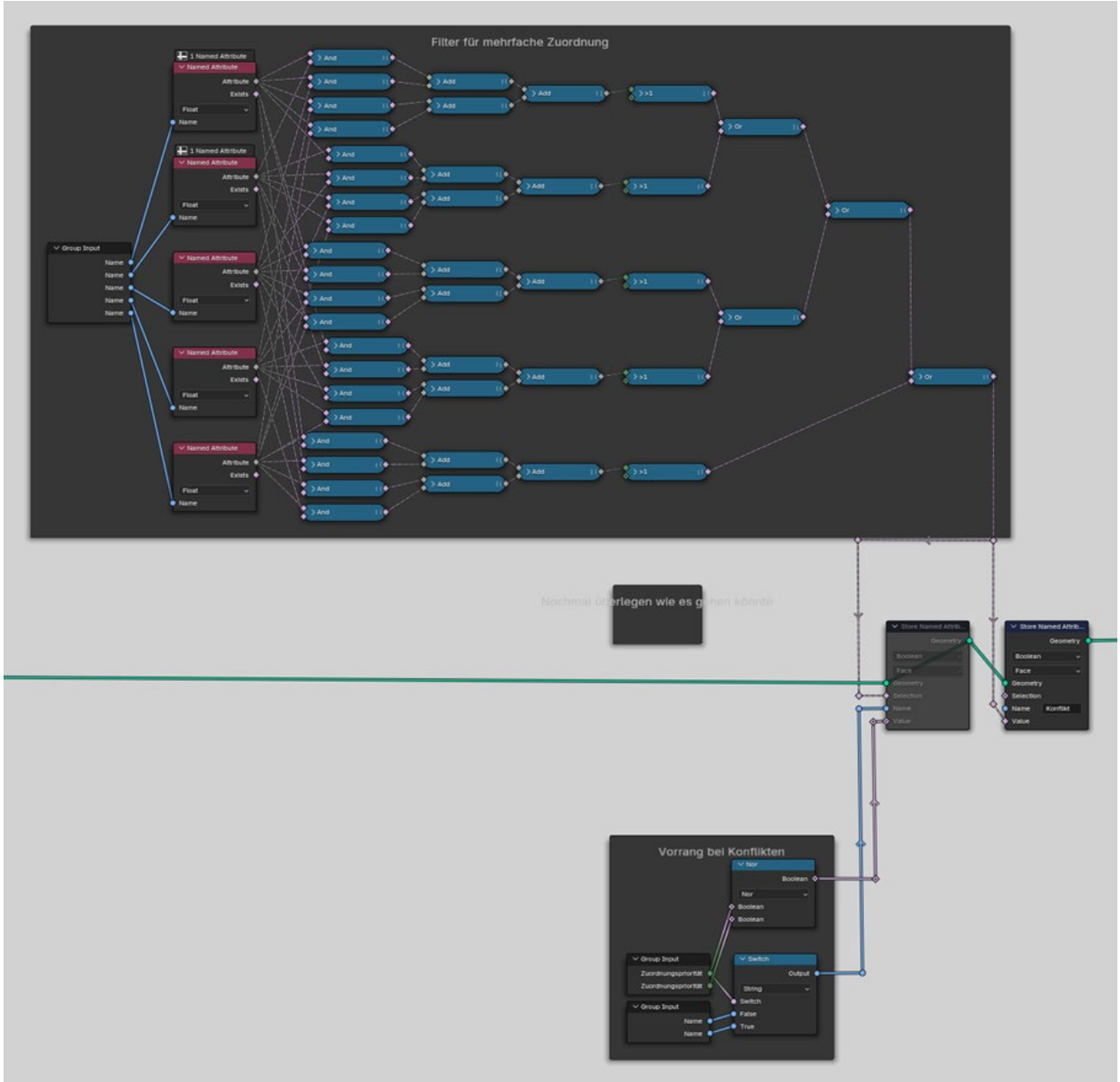
Inhalt der Gruppe „MinMax“:



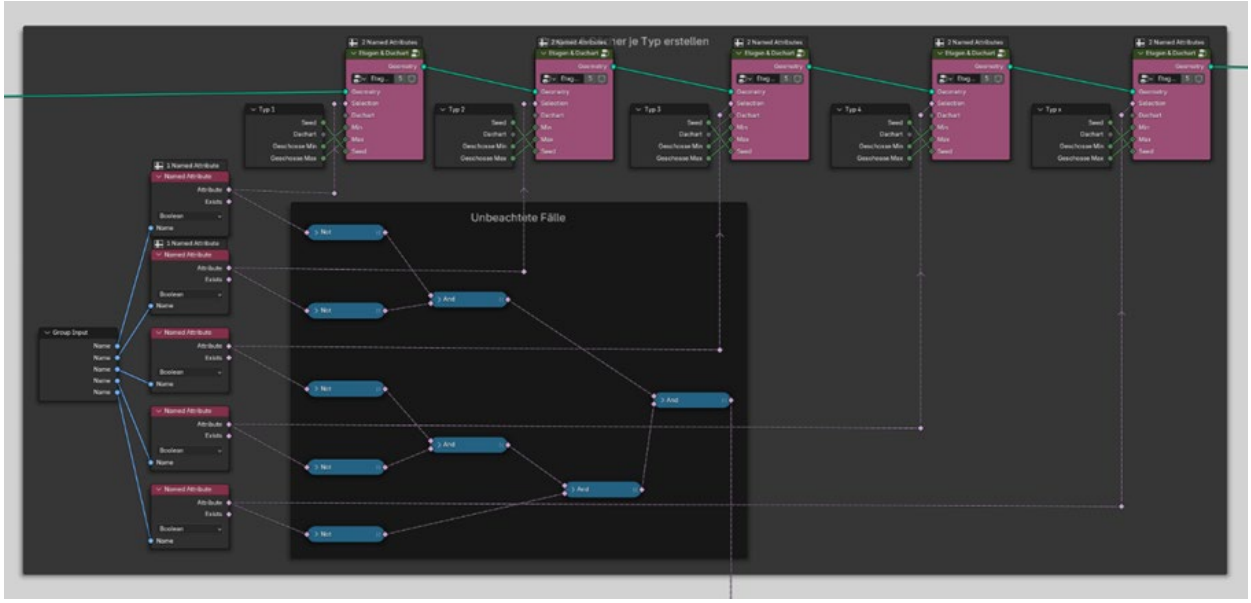
Inhalt der Gruppe „Bauweise konvertieren“:



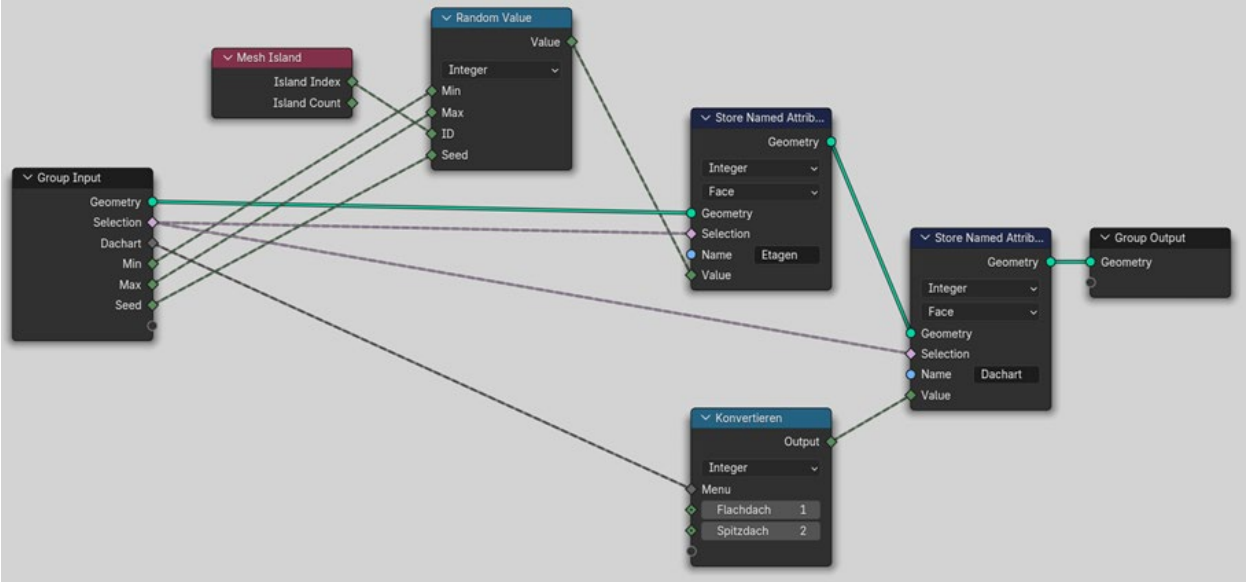
Gruppe C


Filter für mehrfache Zuordnung
Group Input
Named Attribute
And
Add
>1
Or
Nochmal überlegen wie es gehen könnte
Store Named Attrib...
Vorrang bei Konflikten
Nor
Switch
Zuordnungspriorität

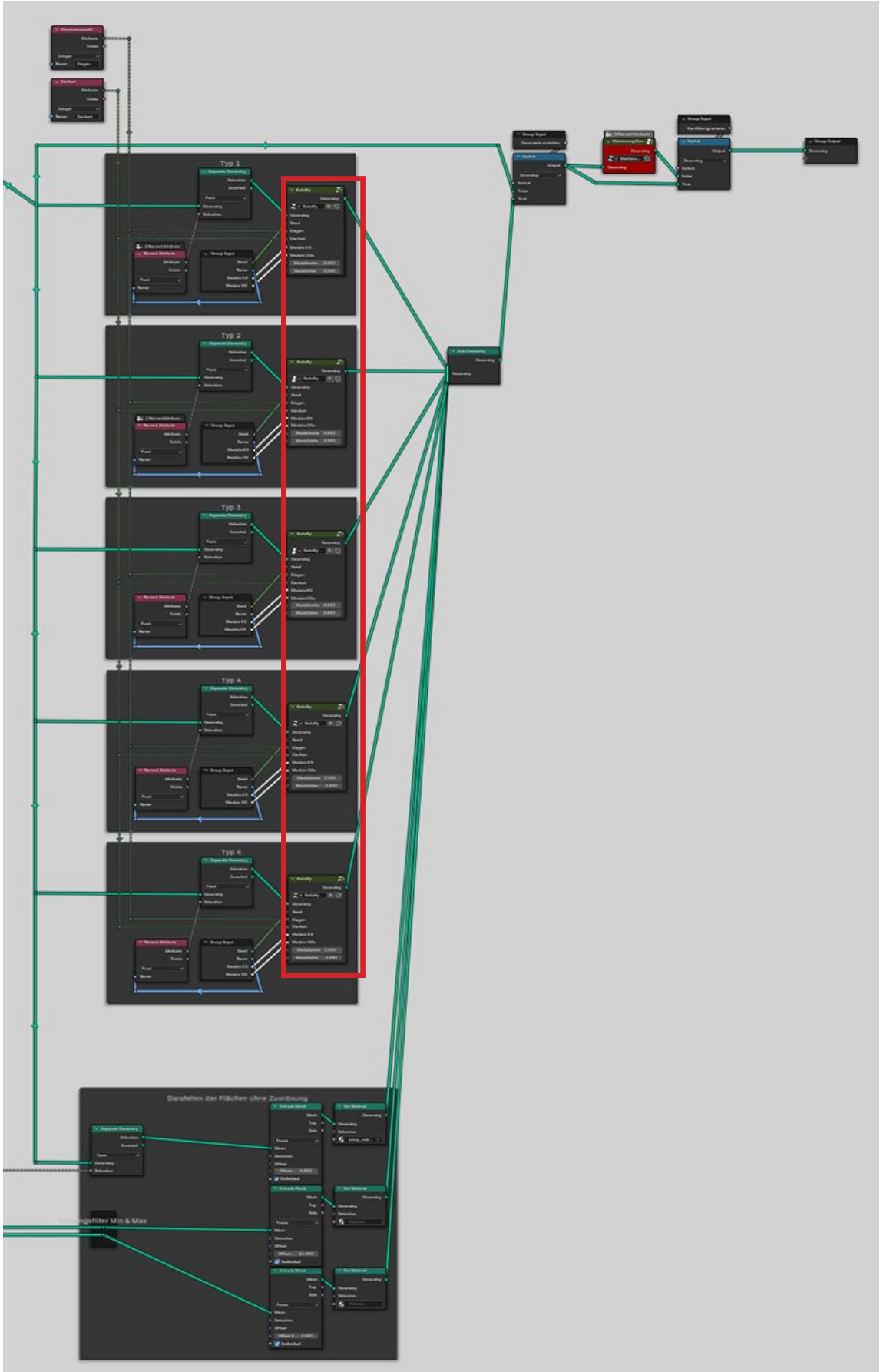
Gruppe D



Inhalt der Gruppe „Etagen und Dachart“:



Gruppe E


Typ 1
Typ 2
Typ 3
Typ 4
Typ 4
Darstellen der Flächen ohne Zuordnung

Rot markiert: modifizierter Buildify 1.0 Generator mit leicht veränderten Parametern, vollständig ausgetauschten Modulbauteilen sowie ergänzter Möglichkeit der Auswahl zwischen Flachdach und Sattel- beziehungsweise Spitzdach. (verändert nach: Olivia 2022)

Rot markiert: Erstellung der Sattel- beziehungsweise Spitzdächer aus der Ebenengeometrie durch Extrusion. (verändert nach: quellenform 2024)

Case Study Ergebnistabellen

Von Bedeutung für die Bewertung sind die Reihen „Erhobener_Typ“ und das Kreuz bei den Namen der Typen. Der Zahlenwert des erhobenen Typens schlüsselt sich auf als: EFH (1), DH (2), RH (3), MFH (4) und Sonderfall (5). angemerkt.

Probe 1

Case_Study > GeometryNodes > Viewer

	sharp_face	Erhobener_Typ	Etagen	Dachart	Erhoben	Offen	Halboffen	Geschlossen	EFH	DH	RH	MFH	Konflikt
0	☑	2	2	2	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑
1	☑	3	2	2	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑
2	☑	3	2	2	☑	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☐	☑
3	☑	2	3	2	☑	☐	☑	☐	☐	☐	☑	☐	☐
4	☑	4	2	2	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑
5	☑	5	2	2	☑	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☐	☑
6	☑	2	2	2	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☐	☐
7	☑	5	3	2	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☐	☐
8	☑	2	2	2	☑	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☐	☑
9	☑	2	2	2	☑	☐	☑	☐	☐	☐	☑	☐	☐
10	☑	5	2	2	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑
11	☑	2	2	2	☑	☐	☑	☐	☐	☐	☑	☐	☐
12	☑	4	3	2	☑	☐	☑	☐	☐	☐	☑	☑	☑
13	☑	3	3	2	☑	☐	☑	☐	☐	☐	☑	☑	☑
14	☑	4	3	2	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑
15	☑	4	2	2	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☐	☐
16	☑	3	2	2	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☐	☐
17	☑	4	3	2	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑
18	☑	3	2	2	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☐	☐
19	☑	3	3	2	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☐	☐
20	☑	2	2	2	☑	☐	☑	☐	☐	☐	☑	☑	☑
21	☑	1	2	2	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑
22	☑	4	2	2	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☐	☑	☐
23	☑	4	3	2	☑	☐	☑	☐	☐	☐	☑	☑	☑
24	☑	4	2	2	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☐	☐
25	☑	3	2	2	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☐	☐
26	☑	2	3	2	☑	☐	☑	☐	☐	☐	☑	☐	☐
27	☑	4	2	2	☑	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☐	☐
28	☑	4	3	2	☑	☐	☑	☐	☐	☐	☑	☑	☑
29	☑	5	3	2	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑
30	☑	2	2	2	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑
31	☑	4	3	2	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑
32	☑	2	3	2	☑	☐	☑	☐	☐	☐	☑	☐	☐
33	☑	4	2	2	☑	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☐	☐
34	☑	1	0	0	☑	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Probe 2

Case_Study > GeometryNodes > Viewer.001

	sharp_face	Erhobener_Typ	Erhoben	Etagen	Dachart	Offen	Halboffen	Geschlossen	EFH	DH	RH	MFH	Konflikt
0	☑	2	☑	2	2	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑
1	☑	3	☑	2	2	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑
2	☑	3	☑	2	2	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑	☑
3	☑	2	☑	3	2	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑	☑
4	☑	4	☑	2	2	☐	☐	☑	☐	☐	☐	☑	☐
5	☑	5	☑	2	2	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑	☑
6	☑	2	☑	2	2	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑
7	☑	5	☑	3	2	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑
8	☑	2	☑	2	2	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑	☑
9	☑	2	☑	2	2	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑	☑
10	☑	5	☑	2	2	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑
11	☑	2	☑	2	2	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑	☑
12	☑	4	☑	3	2	☐	☑	☐	☐	☐	☐	☑	☐
13	☑	3	☑	3	2	☐	☑	☐	☐	☐	☑	☑	☑
14	☑	4	☑	3	2	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑
15	☑	4	☑	2	2	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑
16	☑	3	☑	2	2	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑
17	☑	4	☑	3	2	☐	☐	☑	☐	☐	☐	☑	☐
18	☑	3	☑	2	2	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑
19	☑	3	☑	3	2	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑
20	☑	2	☑	2	2	☐	☑	☐	☐	☐	☑	☑	☑
21	☑	1	☑	2	2	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑
22	☑	4	☑	2	2	☐	☐	☑	☐	☐	☐	☑	☐
23	☑	4	☑	3	2	☐	☑	☐	☐	☐	☑	☑	☑
24	☑	4	☑	2	2	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑
25	☑	3	☑	2	2	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑
26	☑	2	☑	3	2	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑	☑
27	☑	4	☑	0	0	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
28	☑	4	☑	3	2	☐	☑	☐	☐	☐	☐	☑	☐
29	☑	5	☑	3	2	☐	☐	☑	☐	☐	☐	☑	☐
30	☑	2	☑	2	2	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑
31	☑	4	☑	3	2	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑
32	☑	2	☑	3	2	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑	☑
33	☑	4	☑	0	0	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
34	☑	1	☑	2	2	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☐	☐