

Jade Hochschule Oldenburg

Fachbereich: Bauwesen Geoinformation Gesundheitstechnologie

Studiengang: Geoinformatik



Bachelorarbeit

# **Untersuchung zur Eignung von automatisch berechneten Gebäudepasspunkten für die Homogenisierung der Liegenschaftsgrafik**

Investigation on the suitability of automatically  
calculated building control points for the  
homogenization of real-estate graphics

zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Science

3. März 2023

Eingereicht von: Christina Rathjen  
Matrikelnummer: 6032301  
Scharnhorststraße 57  
26131 Oldenburg  
christina.rathjen@student.jade-hs.de  
7.Semester

1. Prüfer: Prof. Dr. Thomas Brinkhoff  
Jade Hochschule Oldenburg

2. Prüfer: Dr. Marcel Ziems  
Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>III</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>IV</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen</b>	<b>2</b>
2.1 Geschichte der Liegenschaftsgrafik . . . . .	2
2.2 Netzgrundlage . . . . .	3
2.3 Digitalisierung der Liegenschaftsgrafik . . . . .	4
2.4 Qualitätsverbesserung der Liegenschaftsgrafik . . . . .	6
2.4.1 Punktorte und Punktaustausch . . . . .	9
2.4.2 Neuvermessung . . . . .	10
2.4.3 Neuberechnung . . . . .	11
2.4.4 Homogenisierung . . . . .	11
2.4.5 Homogenisierung Light . . . . .	14
<b>3 Homogenisierung der Liegenschaftsgrafik auf Basis von Gebäuden</b>	<b>15</b>
3.1 Ausgleichsrechnung und Passpunktwahl . . . . .	15
3.2 Gebäudepasspunkte . . . . .	19
3.3 Passpunkte auf Basis von automatisch berechneten Gebäuden . . . . .	20
3.3.1 Verfahren zur künstlichen Intelligenz im LGLN . . . . .	20
3.3.2 Ableitung von KI-Verschiebungsvektoren . . . . .	22
<b>4 Methodik der Genauigkeits- und Qualitätsuntersuchung</b>	<b>24</b>
4.1 Testszenarien und Testgebiete . . . . .	24
4.2 Untersuchungsmethoden . . . . .	26
4.2.1 Passpunkte aus Vermessungsunterlagen . . . . .	26
4.2.2 Gebäudepasspunkte aus automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren . . . . .	27
4.2.3 Untersuchungsablauf am Beispiel von Rohrstorf . . . . .	32
<b>5 Ergebnisse im Hinblick der geometrischen Genauigkeit und Robustheit</b>	<b>34</b>
5.1 Qualität der automatisch abgeleiteten Gebäudepasspunkte . . . . .	34
5.2 Qualität der gebäudebasierten Homogenisierung . . . . .	43
5.3 Einfluss der Passpunktanzahl . . . . .	53
5.4 Einfluss der Passpunktverteilung . . . . .	56
5.5 Bewertung der Ergebnisse . . . . .	58
<b>6 Fazit</b>	<b>59</b>
<b>7 Ausblick</b>	<b>60</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>62</b>

**Anhang**

**64**

**Eidesstattliche Erklärung**

**71**

# Abbildungsverzeichnis

1	Identität zwischen der Liegenschaftsgrafik und gerechneten Punktorten (Quelle: Eigene Darstellung nach Kruij, 2023) . . . . .	6
2	Heterogene geometrische Genauigkeit (Ausschnitt aus TerraCAD) . . . . .	7
3	Beispiel eines Nachbarschaftsbruches (Auszug aus dem LGLN-Viewer) . . . . .	8
4	Exemplarische Darstellung einer Verzerrung nach einer 1:1-Fortführung (Quelle: Eigene Darstellung) . . . . .	8
5	Prinzip des Punktaustausches (Niedersächsische Vermessungs- und Katasterverwaltung, 2011, S. 12) . . . . .	9
6	Passpunktzuordnung (Quelle: Eigene Darstellung) . . . . .	12
7	Nachbarschaftstreue Anpassung (Quelle: Eigene Darstellung nach LGLN, 2020, S. 13) .	13
8	Beispiel eines Homogenisierungsergebnisses . . . . .	13
9	Beispiel einer homogenen Gebietsstruktur (Quelle: Eigene Darstellung) . . . . .	16
10	Beispiel einer inhomogenen Gebietsstruktur (Quelle: Eigene Darstellung) . . . . .	16
11	Passpunktanordnungen (Benning, 1996, S. 78) . . . . .	16
12	Ergebnisse der multiquadratischen Interpolation (Benning, 1996, S. 79) . . . . .	17
13	Ausgleichungsverfahren mit Systra (Quelle: Eigene Darstellung) . . . . .	18
14	Abweichung zwischen der Liegenschaftsgrafik und dem digitalen Orthophoto . . . . .	20
15	Iterative Lösung für die Aktualisierung und Verbesserung der Liegenschaftsgrafik (Quelle: Eigene Darstellung nach Schmidt et al., 2022b, S. 4) . . . . .	21
16	Deep Learning-basierte Methode zur Verbesserung der geometrischen Genauigkeit der Liegenschaftsgrafik . . . . .	21
17	Ablauf zur Ermittlung der Verschiebungsvektoren (Quelle: Schmidt et al., 2022b, S. 12) .	22
18	KI-gestützte Aktualisierung und Homogenisierung der Geobasisdaten (Quelle: Eigene Darstellung nach Schmidt et al., 2022b, S. 7) . . . . .	23
19	Bestimmung von Passpunkten in passpunktfreien Bereichen im Untersuchungsgebiet Collinghorstmoor . . . . .	27
20	Passpunkte aus automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren . . . . .	28
21	Differenz des verschobenen ALKIS-Gebäudes zum berechneten Gebäude (in Metern) . .	29
22	Auswirkungen von Drehungen an Gebäuden . . . . .	30
23	Bestimmung des Drehwinkels an Gebäuden . . . . .	31
24	Schema des Untersuchungsablaufes (Quelle: Eigene Darstellung) . . . . .	32
25	Ausschnitt des Untersuchungsgebiet Rohrstorf in TerraCAD . . . . .	33
26	Verteilung der automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren im Untersuchungsgebiet Rohrstorf . . . . .	37
27	Verteilung der manuell generierten Verschiebungsvektoren im Untersuchungsgebiet Rohrstorf . . . . .	38
28	Verteilung der automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren im Untersuchungsgebiet Collinghorstermoor . . . . .	39
29	Positiv-Beispiel Moorausmoor . . . . .	40
30	Negativ-Beispiel Moorausmoor . . . . .	40
31	Rotationsrichtung der Gebäude im Untersuchungsgebiet Marienhafte . . . . .	41
32	Verschiebungsrichtung ALKIS-Basishomogenisierung . . . . .	45

33	Verschiebungsrichtung Gebäudebasierte Homogenisierung-Basishomogenisierung . . . .	45
34	Verschiebungsbetrag ALKIS-Basishomogenisierung . . . . .	46
35	Differenzen zwischen der gebäudebasierten Homogenisierung (Testfall 2) und der Basis- homogenisierung . . . . .	46
36	Differenzen zwischen der gebäudebasierten Homogenisierung und der Basishomogeni- sierung bei Nachbarschaftsbrüchen . . . . .	47
37	Boxplot-Diagramm der KI-gestützten Homogenisierung mit einer geringen Passpunk- tanzahl (Testfall 3) . . . . .	49
38	Ergebnis des kombinierten Ansatzes mit automatisch abgeleiteten Gebäudepasspunkten im Untersuchungsgebiet Marienhaf e . . . . .	51
39	Boxplot-Diagramm des kombinierten Ansatzes mit wenigen automatisch abgeleiteten Passpunkten . . . . .	52
40	Ergebnis des kombinierten Ansatzes mit manuell generierten Gebäudepasspunkten aus einer KI-gestützten Segmentierung im Untersuchungsgebiet Marienhaf e (Testfall 9) . . .	52
41	Boxplot-Diagramm des kombinierten Ansatzes mit vielen automatisch abgeleiteten Pass- punkten . . . . .	53
42	Abweichungen der KI-gestützten Homogenisierung mit einer hohen Passpunktanzahl ge- genüber der Basishomogenisierung in Metern . . . . .	55
43	Position der Gebäude im Flurstück . . . . .	56
44	Formveränderung im Untersuchungsgebiet Marienhaf e . . . . .	57

## Tabellenverzeichnis

1	Charakteristika der Untersuchungsgebiete . . . . .	26
2	Anzahl der KI-Verschiebungsvektoren pro Untersuchungsgebiet . . . . .	36
3	Auswertung der KI-Verschiebungsvektoren mithilfe von statistischen Größen . . . . .	39
4	Abweichung an den Gebäudeecken in Abhängigkeit von dem Rotationswinkel und der Entfernung vom Flächenschwerpunkt in Metern . . . . .	41
5	Statistische Auswertung der gebäudebasierten Homogenisierung (Testfall 2) . . . . .	44
6	Statistische Auswertung der KI-gestützten Homogenisierung im Untersuchungsgebiet Rohrstorf . . . . .	48
7	Statistische Auswertung der KI-gestützten Homogenisierung im Untersuchungsgebiet Kaierde . . . . .	49
8	Statistische Auswertung des kombinierten Ansatzes . . . . .	50
9	Übersicht der Passpunktanzahl in den verschiedenen Testszenarien . . . . .	54

## Abkürzungsverzeichnis

AAA	AFIS-ALKIS-ATKIS
AdV	Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland
AFIS	Amtliches Festpunktinformationssystem
ALB	Automatisiertes Liegenschaftsbuch
ALK	Automatisierte Liegenschaftsgrafik
ALKIS	Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem
ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
DH	Datenerhebung
DHK	Datenhaltungskomponente
DOP	Digitales Orthophoto
EQK	Erhebungs- und Qualifizierungskomponente
ETRS89/UTM	Europäisches terrestrisches Referenzsystem 1989/ Universale transversale Mercatorprojektion
GIS	Geographisches Informationssystem
HITL	Human-in-the-loop
IoU	Intersection over Union
KI	Künstliche Intelligenz
LGLN	Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen
LiegKatErlass	Erlass zur Führung des Liegenschaftskatasters
LiegVermErlass	Erlass zur Erhebung von Geobasisdaten durch Liegenschaftsvermessungen
NV	Normierte Verbesserung
rFD	relative Flächendifferenz
VKV	Niedersächsische Vermessungs- und Katasterverwaltung
VW	Vertrauenswürdigkeit

# 1 Einleitung

Im Zuge des gesellschaftlichen Wandels entstehen wachsende Anforderungen an das Kataster. Der Fortschritt in der Digitalisierung und Vernetzung sowie der Anspruch an OpenData nimmt immer weiter zu. Um diesem Anspruch Folge zu leisten, müssen große, flächenhafte Ungenauigkeiten im Kataster bereinigt werden. Die Interoperabilität und Verknüpfung verschiedenster Datensätze ist eine Grundvoraussetzung, um eine homogene und eindeutige Datenbasis zu schaffen, die den heutigen Anforderungen gerecht wird. Dabei müssen Daten aus verschiedenen Quellen, Jahrzehnten oder aus verschiedenen Datenbanken und mit unterschiedlichen Aufnahmesystemen und Genauigkeiten in Einklang gebracht werden. Dies ist eine hoheitliche Aufgabe, die es erfordert, die Qualität des Liegenschaftskatasters stetig zu verbessern und den Anforderungen eines zeitgemäßen öffentlich-rechtlichen Geobasisinformationssystems zu entsprechen (Ministerium für Inneres und Sport, 2020b, S. 13). Dieser Prozess erfordert erhebliche finanzielle und personelle Ressourcen. Deshalb arbeiten diverse Länder an Lösungen zur Homogenisierung der Katasterkarten mithilfe einer Teilautomatisierung durch Verfahren der künstlichen Intelligenz (KI). Vorreiter in diesem Bereich ist z. B. die Niederlande. Zur Verbesserung der geometrischen Genauigkeit der Liegenschaftsgrafik wird dort ein KI-basierter Ansatz verfolgt, indem Vermessungsunterlagen automatisiert eingelesen und verarbeitet werden (Franken et al., 2021, S.1). Auch das Bayerische Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung erfasst mittels Deep Learning-basierter Methoden automatisiert Gebäudeveränderungen gegenüber dem amtlichen Liegenschaftskataster aus Luftbildern, die katastertechnisch noch nicht eingemessen worden sind (Roschlaub et al., 2022, S. 181). Das Ziel ist eine transparente und qualitativ hochwertige Katasterkarte, die den Bürgern einen OpenData-Datenbestand zur Verfügung stellt, der keine Missverständnisse durch die Verknüpfung mit anderen Datenbeständen oder durch das Zoomen in größere Maßstäbe zulässt (Franken et al., 2021, S.1). Fragestellungen zur Position, Form und Größe der Objekte sollten ohne große Abweichungen zur Position in der realen Welt beantwortbar sein. Auch das Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN) arbeitet seit 2020 an einer Lösung zur Homogenisierung der Liegenschaftsgrafik mittels Verfahren der künstlichen Intelligenz und zur automatischen Erkennung von Gebäudegrundrissen in Orthophotos. Ziel dieses Verfahrens ist es, KI-Gebäudegrundrisse und Daten aus dem amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS) als Passpunkte zu verwenden, um mittels automatisch abgeleiteter Verschiebungsvektoren die Liegenschaftsgrafik zu korrigieren. Durch die Verwendung eines teilautomatisierten Verfahrens werden personelle Ressourcen gespart, die aufgrund des demographischen Wandels und der Zunahme des Fachkräftemangels nicht zur Verfügung stehen.

Im Hinblick auf das Zukunftskonzept der niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung (VKV) 2025 und den damit verbundenen personellen und zeitlichen Ressourcen wurde im Rahmen einer Projektgruppe das Ziel einer landesweiten Abweichung der Punktkoordinaten der Liegenschaftsgrafik zu den örtlichen Lagen von maximal einem Meter festgelegt. Rembold zeigte in seinem Verfahren zur Neuberechnung des Katasterzahlenwerkes, dass photogrammetrisch bestimmte Gebäudepasspunkte als Referenzpunkte für die Homogenisierung genutzt werden können, um eine ausreichende Verbesserung der amtlichen Liegenschaftsgrafik in Nordrhein-Westfalen zu erzielen (Rembold, 2022, S. 103). Im Rahmen dieser Bachelorarbeit soll gezeigt werden, ob Gebäudepasspunkte für die Homogenisierung genutzt werden können, um eine erforderliche geometrische Genauigkeit von einem Meter zu erreichen und den wachsenden Anforderungen an das Kataster gerecht zu werden. Aufgrund der rasanten Entwicklungen der Digitalisierung werden die amtlichen Daten immer häufiger als Grundlage für Planungen und räumliche Fragestellungen genutzt. Der Ansatz soll helfen, insbesondere im Hinblick auf die Verschneidung

der amtlichen Daten mit photogrammetrischen Aufnahmen, Diskrepanzen zwischen den Datensätzen zu beseitigen. Um den steigenden Anforderungen der Nutzer und Nutzerinnen gerecht zu werden, ist es wichtig, die Diskrepanzen zwischen den in Luftbildern gut sichtbaren Objekten und deren Positionen im ALKIS-Datenbestand zu minimieren. Eine Qualitätsverbesserung auf Basis von Gebäuden bietet großes Potenzial, um die Übereinstimmung zwischen den photogrammetrischen Gebäudepositionen und den amtlichen Gebäudekoordinaten zu erhöhen. Zusätzlich wird untersucht, ob diese Zielerreichung durch die Verwendung von KI-gestützten Gebäudepasspunkten erreichbar ist, um das aktuelle Verfahren der Qualitätsverbesserung zu vereinfachen und zu beschleunigen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden dazu Experimente in unterschiedlichen Regionen in Niedersachsen zur Qualität dieser automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren durchgeführt. Anhand der Ergebnisse werden Aussagen zur geometrischen Genauigkeit und zur Robustheit des Ansatzes getroffen. Darüber hinaus wird die Eignung dieses Ansatzes für die Homogenisierung durch Experimente zur manuellen Homogenisierung auf Basis von Gebäuden als zusätzliche Passpunkte beurteilt.

## **2 Grundlagen**

Um ein besseres Verständnis für die Qualitätsverbesserung der Liegenschaftsgrafik zu gewinnen, werden im folgenden Kapitel zunächst die wesentlichen theoretischen Grundlagen vorgestellt. Das folgende Kapitel dient dazu, die historische Entwicklung der amtlichen Liegenschaftsgrafik und die Netzgrundlage besser zu verstehen. Weiterhin wird dabei die daraus entstandene heterogene Qualität in Bezug auf die geometrische Genauigkeit erläutert. Im Anschluss werden aktuelle Lösungsansätze zur Verbesserung der Qualität der Liegenschaftskarte beschrieben.

### **2.1 Geschichte der Liegenschaftsgrafik**

Seit der Gründung im Jahr 1948 verfügt Niedersachsen über ein flächendeckendes und aktuell geführtes Liegenschaftskataster. Die Wurzeln des Katasters in Niedersachsen reichen bis in die erste Hälfte des 19. Jahrhundert zurück, als es in verschiedenen Teilen des Landes unterschiedliche Kataster gab (Kertscher und Liebig, 2012, S. 306). Teilungs- und Verkopplungskarten sowie das zugehörige Zahlenmaterial bildeten die Grundlage für die verschiedenen Urkataster. In einigen Bereichen erfolgten dazu zusätzlich Neuvermessungen. In den Neuvermessungsgebieten erfolgte die Kartierung der Katasterurkarten flurweise als Inselkarten in den Maßstäben 1:500 bis 1:4000 (v. d. Weiden, 1955, S. 159). Die Urkataster wurden nach dem zweiten Weltkrieg in Form von Inselkarten weitestgehend vereinheitlicht. Als Folge von zahlreichen Reformen hat das Liegenschaftskataster seit der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts viele Veränderungen erfahren, um den wachsenden Anforderungen von Technik und Gesellschaft standhalten zu können. Dazu gehörten verschiedene Zielsetzungen vom Grundsteuerkataster über das Eigentums- und Mehrzweckkataster zum Basisinformationssystem und Neuerungen in den technischen Möglichkeiten (LGLN, 2020, S. 10). Die neuen Technologien und Zielsetzungen sowie unterschiedliche Organisationen und Vorgehensweisen führten zu einem inhomogenen Nachweis der Liegenschaften (Kummer, 1992, S. 2). Aufgrund der ehemals isolierten Führung der Liegenschaftskarte und der Erhebung nach jeweils geltenden Vorschriften in den Epochen und Neuvermessungen ist die geometrische Genauigkeit der Liegenschaftskarte heterogen (LGLN, 2020, S. 5). Die Qualität reicht von komplett heterogenen Bereichen bis zu komplett neu berechneten Ortslagen. Die geometrische Genauigkeit hängt maßgeblich von der Mess- und Kartiergenauigkeit ab, welche wiederum vom jeweiligen Entstehungszeitpunkt bestimmt ist.

Je nach Entstehungszeit wurden unterschiedliche Messverfahren, Netzgrundlagen und Genauigkeitsanforderungen angewandt. Grundsätzlich unterscheidet man die Erhebung in grafische Nachweise in Form von Verkopplungskarten, ältere Vermessungen im Zuge des Grundsteuerkatasters, kontrollierte Vermessungen vor 1986 nach dem Fortführungserlass II und in Vermessungen seit 1986 (LGLN, 2020, S. 10). Letztere entsprechen den heutigen Genauigkeitsanforderungen des Erlasses zur Erhebung von Geobasisdaten durch Liegenschaftsvermessungen (LiegVermErlaß) mit einer Messgenauigkeit von etwa  $\pm 4$  cm (Ministerium für Inneres und Sport, 2020a, S. 1307). Seit den 50er-Jahren wurden zusätzlich Rahmenkarten in Niedersachsen eingesetzt, um das Zusammenfügen von Karten insbesondere für Planungszwecke zu erleichtern (Kertscher und Liebig, 2012, S. 306). Diese haben einen Regelmaßstab von 1:1000 und liegen nicht flächendeckend für Niedersachsen vor. Laut LiegVermErlaß können Vermessungen nach älteren Vorschriften in Abhängigkeit vom Maßstab und der Strecke der orthogonalen Messung Abweichungen von bis zu 2,2 m zulassen (Ministerium für Inneres und Sport, 2020a, S. 1307). Zudem wurden damals unterschiedliche Messeinheiten, wie z. B. Ruten angewandt.

Des Weiteren spielt die Kartiergenauigkeit eine große Rolle für die Qualität der Liegenschaftsgrafik. Die manuelle Kartiergenauigkeit beträgt  $\pm 0,2$  mm. Die automatisierte Kartiergenauigkeit entspricht  $\pm 0,1$  mm (Tegeler, 1991, S. 35). Die resultierende zulässige Abweichung ist abhängig vom Maßstab des zugrundeliegenden Kartenwerkes. Da die analogen Karten aus unterschiedlichen Epochen stammen und verschiedene Maßstäbe aufweisen, variiert die Kartiergenauigkeit stark. Je kleiner der Kartenmaßstab ist, desto ungenauer ist der grafische Kartenpunkt und die geometrische Genauigkeit. Weiterhin wurde das Material der Zeichenträger bis zur Digitalisierung bis in die 1990er Jahren mehrfach überarbeitet, um die Haltbarkeit, Maßhaltigkeit, Vervielfältigung und Umweltverträglichkeit zu verbessern (Kertscher und Liebig, 2012, S. 309). Der Wechsel der Kartenträger mit verschiedenen Medien und die Eintragung neuer Fortführungen bis zur 1:1-Digitalisierung führten immer wieder zu systematischen Verzerrungen und Trägerverzug. Die resultierenden Abweichungen zur maßgebenden Koordinate können wenige Zentimeter bis zu mehrere Meter betragen. Weiterhin hat kein Abgleich der Karten stattgefunden. Dies führte bei der Digitalisierung zu Randproblemen bei den Übergängen zwischen digitalisierten Karteneinheiten. Insbesondere in Bereichen der Inselflurkarten in unterschiedlichen Maßstäben sind deshalb größere, flächenhafte Differenzen an benachbarten Kartenrändern zu erwarten (Creuzer, 1996, S.104). Infolgedessen sind Verzerrungen und Deformationen entstanden. Insgesamt ist für das analoge Kartenwerk als Grundlage für die 1:1-Digitalisierung keine einheitliche flächendeckende geometrische Genauigkeit anzunehmen. Vielmehr handelt es sich dabei um einen inhomogenen Datenbestand mit unterschiedlichen Genauigkeiten aufgrund von zufälligen, groben und systematischen Abweichungen und unterschiedlichen Maßstäben in den verschiedenen analogen Kartenwerken.

## **2.2 Netzgrundlage**

Vor der Digitalisierung mussten die analogen Karten in ein einheitliches Landeskoordinatensystem transformiert werden. Die Inselflurkarten hatten meist einen kleineren Maßstab und unterschiedliche Netzgrundlagen. Ca. 50% der Karten beruhten auf einem Sondernetz wie dem Hannoverschen Partialsystem. 40% der Karten hatten gar kein Netz und einige Karten lagen dem Soldnernetz zugrunde (Tegeler, 1991, S. 37). Rahmenkarten wurden dagegen bereits auf Grundlage des sogenannten Gauß-Krüger-Koordinatensystems hergestellt (LGLN, 2020, S. 11).

Die Einpassung erfolgte mit wenigen identischen Passpunkten und einer Affin-Transformation. Verbleibende Restklaffen wurden abstandsgewichtet verteilt. Die Dichte und Anzahl der Passpunkte einer Trans-

formationseinheit richtete sich nach der Homogenität des Gebietes. Homogene Gebiete erfordern weniger Passpunkte als heterogene Gebiete. Teilweise erfolgte die Transformation auch kleinräumig oder blockweise. Als Passpunkte wurden Gitterkreuze, Blattecken oder Punkte mit dem Lagestatus 100 verwendet. Der Lagestatus 100 hat als Grundlage das Deutsche Hauptdreiecksnetz und eine Gauß-Krüger-Abbildung. Lagen Passpunkte im Lagestatus 200 vor, wurde diese mit einer Helmert-Transformation in den Lagestatus 100 transformiert (Niedersächsische Vermessungs- und Katasterverwaltung, 1994, Anlage 10). In einigen Bereichen Niedersachsens war auch der Einsatz vom vermessungstechnischen Außendienst erforderlich, um Passpunkte zu generieren. In der Regel wurden 6 bis 15 Passpunkte pro Inselfurkarte verwendet. Bei Rahmenkarten reichten weniger Passpunkte (Tegeler, 1991, S. 38).

Die Genauigkeitsanforderungen für Passpunkte wurden aus der Kartiergenauigkeit abgeleitet. Passpunkte aus Inselfurkarten hatten dabei eine geringere Genauigkeit als Passpunkte aus Rahmenkarten (Niedersächsische Vermessungs- und Katasterverwaltung, 1994, S. 19). Die Qualität ist dabei abhängig von der absoluten geometrischen Genauigkeit und der Netzgrundlage der analogen Karte. Bei der geometrischen Genauigkeit wird zwischen der absoluten und relativen Lagegenauigkeit unterschieden (Kampshoff, 2005, S. 80f.). Die absolute Genauigkeit meint die Lage der Objektpunkte bezüglich des Koordinatensystems. Die relative Genauigkeit beschreibt die topologische Lage zu benachbarten Objekten.

Bei der notwendigen Transformation der verschiedenen Netzgrundlagen für eine vollständige Georeferenzierung entstanden größere Inhomogenitäten. Systematische Abweichungen bei der Einpassung sind auf Probleme mit ungenügenden Passpunktanordnungen zurückzuführen. Durch die geringe Passpunktanzahl und die teilweise schlechte Passpunktwahl können bei der Einpassung in das Landeskoordinatensystem systematische Verzerrungen auftreten, die eine der Hauptursachen für große flächenhafte Abweichungen von mehreren Metern darstellen. Passpunkte aus neueren Messungen, die 1:1 in die Liegenschaftskarte übernommen wurden, entsprachen zwar dem Lagestatus 100, passten aber nicht zur alten analogen Karte. Weiterhin erfolgte 2011 eine Umstellung des Koordinatensystems. Die alten „Gauß-Krüger“-Koordinaten wurden zu einheitlichen „ETRS89/UTM“-Koordinaten transformiert. Im Zuge der heutigen Homogenisierung liegt der Fokus primär auf der Beseitigung dieser flächenhaften, systematischen Verzerrungen von mehreren Metern, die vorwiegend aus der Georeferenzierung und Randanpassung hervorgehen. Dies betrifft vor allem Verschiebungen zum Bezugssystem und Transformationsungenauigkeiten durch die Passpunktwahl und -anzahl.

### **2.3 Digitalisierung der Liegenschaftsgrafik**

Im Anschluss an die Transformation der Liegenschaftskarten in ein einheitliches Bezugssystem folgte die Umstellung der analogen Karte in eine digitale Form. Dabei entstand 1975 bereits das Sollkonzept „Automatisiertes Liegenschaftskataster als Basis der Grundstücksdatenbank“ Band 2 „Automatisierte Liegenschaftskarte“ (ALK) (Sellge, 1991, S. 19). Die ALK besteht aus der Liegenschaftsgrafik in Form einer Grundrissdatei und dem Koordinatenkataster in Form der Punktdaten. Mit dem Kabinettsbeschluss zum Vorhaben „Digitale Karte“ wurde 1990 entschieden, eine Digitalisierung der analogen Liegenschaftskarten vorzunehmen (Knoop, 1991, S. 9). Die Richtlinie für die Einrichtung der Automatisierten Liegenschaftskarte von 1992 spezifiziert, dass die Digitalisierung in einem zweistufigen Verfahren vollzogen wird (Niedersächsische Vermessungs- und Katasterverwaltung, 1994, S. 5).

In der ersten Realisierungsstufe wurden niedersachsenweit 200.000 analog geführte Liegenschaftskarten im Verhältnis 1:1 digitalisiert (Niedersächsische Vermessungs- und Katasterverwaltung, 1994, S. 5).

Die Gründe für die Digitalisierung waren vielfältig. Digitale Datenbestände ermöglichen komplexe Analysen und Auswertungen. Qualitätseinbußen durch manuelle und reprotochnische Arbeitsgänge bei jeder Fortführung werden vermieden. Das Arbeitsverfahren wird insgesamt umweltfreundlicher. Weiterhin bringt ein digitaler Datenbestand eine Verbesserung bei der Aktualität und Geometrie (Knoop, 1991, S. 7). Da der Bedarf an digitalen Daten in der Wirtschaft, privaten Stellen, Bundes- und Landesbehörden sowie den Kommunen stetig wuchs, wurde sich für die Prioritätensetzung „schnell, aktuell, genau“ entschieden (Sellge, 1991, S. 25). Vorhandene koordinierte Punkte aus den Punktnachweisen wurden aus Zeitgründen nicht berücksichtigt. Dadurch ging die Identität zwischen nummerierten Objektpunkten (Koordinatenkataster) und der durch Abdigitalisierung entstandenen grafischen Koordinate verloren (Kertscher und Liebig, 2012, S. 309). Geometrische Bedingungen, wie z. B. Parallelitäten, rechte Winkel oder Geradheitsbedingungen entfallen laut der Richtlinie für die Einrichtung der Automatisierten Liegenschaftskarte ebenfalls (Niedersächsische Vermessungs- und Katasterverwaltung, 1994, S. 20). Als Kartengrundlage für die 1:1-Digitalisierung dienten Inselfurkarten, Rahmenkarten und digitale Datenbestände in unterschiedlichen Maßstäben. Digitale Datenbestände umfassten z. B. Grafiksammelaufträge, Punktdatenkoordinaten oder digitale Daten des Bodenkatasters. Die Reihenfolge der Digitalisierung richtete sich nach den Kartenmaßstäben. Es wurde in aufsteigender Reihenfolge digitalisiert. Rahmenkarten mit dem Maßstab 1:1000 wurden somit vor Inselfurkarten mit kleineren Maßstäben digitalisiert (Niedersächsische Vermessungs- und Katasterverwaltung, 1994, Anlage 11). Dabei wurden alle folgenden Karten in den Randbereichen an die erste Karte angepasst wurden.

Aufgrund des Zeit- und Kapazitätsmangels wurde die Digitalisierung zum Teil an externe Stellen vergeben. Der Ablauf der 1:1-Digitalisierung untergliederte sich in mehrere Schritte. Zunächst wurden vorbereitende Arbeiten wie die Aktualisierung und Bereinigung der Liegenschaftskarte vorgenommen. Im Anschluss erfolgte die Erstellung von Digitalisiervorlagen und die Aufbereitung geeigneter digitaler Datenbestände. Im vierten Schritt erfolgte die elementweise Digitalisierung (Niedersächsische Vermessungs- und Katasterverwaltung, 1994, S. 10ff.). Diese erfolgte auf zwei Wegen. Zum einen wurden analoge Liegenschaftskarten am Digitalisierisch abdigitalisiert. Zum anderen wurden Karten mit großen Maßstäben gescannt und am Bildschirm digitalisiert (Barrmeyer, 2005, S. 129). Das Scannen hat den Vorteil, dass der Ablauf halb automatisiert erfolgt und eine Mustererkennung einige manuelle Prozessschritte erleichtert. Außerdem wird die Kartiergenauigkeit durch „heranzoomen“ gesteigert. Diese Möglichkeit entstand allerdings erst nach Beginn der 1:1-Digitalisierung und wurde nur bedingt genutzt. Neben möglichen Fehlern beim Scannen brachte das halbautomatisierte Verfahren auch einen großen Nachbearbeitungsaufwand mit sich (Barrmeyer, 2005, S. 130). Aufgrund dessen wurde das Verfahren nur für großmaßstäbige Karten eingesetzt. Grundsätzlich wird jeder Punkt nur einmal digitalisiert. Die Gebietsgröße richtete sich nach größeren, eindeutig abgrenzbaren Gebieten. Das Gebiet kann eine ganze Karte oder Teile davon umfassen. Die Gebiete werden durch Flurstücksgrenzen begrenzt und beinhalten nur vollständige Objekte. Im Anschluss wurde die Objektbildung sowie die Übernahme in die Grundrissdatei und Bodenschätzung vorgenommen. Der gesamte Inhalt der Liegenschaftskarten wurde in einzelne Punkt-, Linien- oder Flächenobjekte geteilt. Gleiche oder ähnliche Inhalte wurden in Folien zusammengefasst. Abschließend erfolgte eine Schlussprüfung der Vollständigkeit und der geometrischen Richtigkeit durch den visuellen Vergleich mit der analogen Liegenschaftskarte (Niedersächsische Vermessungs- und Katasterverwaltung, 1994, S. 10). Das Ergebnis der ersten Realisierungsstufe ist eine maßstabslose und digitale Grundrissdatei.

Zufällige Digitalisierungsungenauigkeiten aufgrund der Kartiergenauigkeit waren bei der 1:1-Digitalisierung

unvermeidlich. Durch den Verzicht auf geometrische Bedingungen wird jeder Kartenpunkt frei digitalisiert. In der Vergrößerung werden daraus entstehende Mängel, wie krumme Linien oder nicht rechtwinklige Gebäude sichtbar (Barmeyer, 2005, S. 130). Diese Ungenauigkeiten sind abhängig vom Kartenmaßstab und der Kartiergenauigkeit. Bei der Digitalisierung selbst kam es außerdem zu groben Fehlern durch das Auswählen eines falschen Punktes kommen.

Seit 1984 gibt es außerdem landesweit das automatisierte Liegenschaftsbuch (ALB), der beschreibende Teil der Liegenschaften. In diesem werden die Flurstücke aus den handgeschriebenen Flurbüchern als Register geführt. Die heutige Liegenschaftsgrafik ist gleichzeitig aus der Zusammenführung der Datenbanken der ALK, des ALB sowie dem Punktnachweis, dem vermessungstechnischen Bestandteil, zum amtlichen Liegenschaftskataster-Informationssystem (ALKIS) im Jahr 2011 entstanden (Kertscher und Liebig, 2012, S. 310). ALKIS entspricht dem anwendungsneutralen AFIS-ALKIS-ATKIS-Datenmodell (AAA-Modell) der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) für einheitliche Geodaten auf Basis von international geltenden Normen und Standards. Es beinhaltet alle Geobasisdaten zur Beschreibung der Liegenschaften. Dazu gehören Flurstücke, Gebäude, Eigentumsangaben sowie Hinweise auf öffentlich-rechtliche Festlegungen und Ergebnisse der Bodenschätzung (Ministerium für Inneres und Sport, 2020b, S. 12).

## 2.4 Qualitätsverbesserung der Liegenschaftsgrafik

In der zweiten Realisierungsstufe der Richtlinie für die Einrichtung der Automatisierten Liegenschaftskarte soll die integrierte Führung von Punktdatei und Grundrissdatei hergestellt werden. Darüber hinaus soll landesweit ein Mindeststandard für die geometrische Genauigkeit erreicht werden. Dazu müssen die Abweichungen zwischen den grafischen Koordinaten und den koordinierten Objektpunkten korrigiert werden. Die Differenz zwischen diesen Punkten beträgt niedersachsenweit bis zu mehreren Metern (LGLN, 2020, S. 5). In Abbildung 1 ist zu sehen, dass die Identität zwischen der grafischen Koordinate und den koordinierten Objektpunkten aktuell (Stand Anfang 2023) noch nicht überall wiederhergestellt ist.

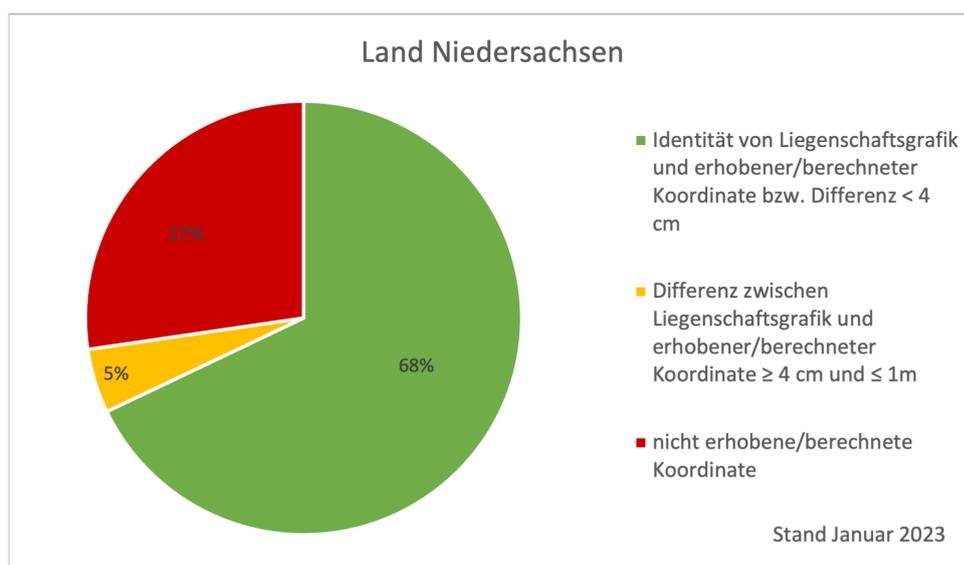


Abbildung 1: Identität zwischen der Liegenschaftsgrafik und gerechneten Punktorten (Quelle: Eigene Darstellung nach Kruij, 2023)

Aufgrund der Entstehungsgeschichte sind die Abweichungen zwischen grafischen und maßgebenden Koordinaten sehr heterogen. In Abbildung 2 wird die Heterogenität beispielhaft veranschaulicht. An der grünen Ellipse ist zu erkennen, dass die grafische Koordinate (grüner Kreis) von der berechneten Position aus der Punktdatei abweicht (rotes Viereck). Bei den blauen Ellipsen ist ebenfalls eine Abweichung von bis zu 2,5 m festzustellen. Daran wird deutlich, dass die Abweichungen in der Länge und Richtung zwischen der Punkt- und Grundrissdatei innerhalb eines lokalen Bereiches im Vergleich sehr unterschiedlich sein können. Die roten Ellipsen verstärken diese Heterogenität. Die Lage dieser Punkte ist bereits identisch mit den Koordinaten aus der Punktdatei, wodurch ein Nachbarschaftsbruch verursacht wird.

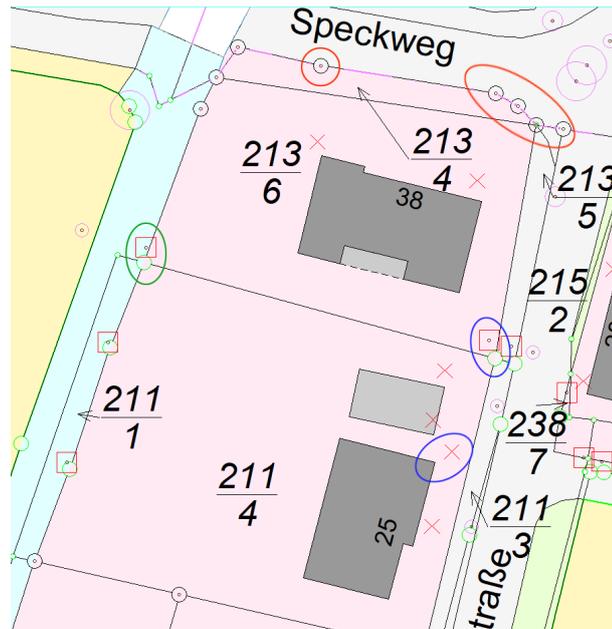


Abbildung 2: Heterogene geometrische Genauigkeit (Ausschnitt aus TerraCAD)

Die im Erlass zur Genauigkeitsverbesserung der Liegenschaftsgrafik von 2008 festgelegten Genauigkeitsanforderungen geben für Orts- und Ortsrandlagen eine Genauigkeit von  $\leq 0,20$  m vor. Für Feldlagen liegt die Genauigkeitsanforderung bei  $\leq 0,50$  m (Ministerium für Inneres, Sport und Integration, 2008, S. 1178). Die Genauigkeitsverbesserung von Orts- und Ortsrandlagen wird gegenüber der Bearbeitung von Feldlagen priorisiert. Außerdem werden Gebiete, die aus der Digitalisierung einer Inselfurkarte mit Maßstab  $\leq 1: 2.000$  stammen, als Vorranggebiete festgelegt. Die Geometrieverbesserung wird für Flächen mit den Nutzungsarten „Wald, Heide, Moor“ sowie für Küstengewässer zurückgestellt. Der Erlass gilt inhaltlich auch heute noch.

Die Verbesserung der geometrischen Genauigkeit der Liegenschaftskarte erfolgte anfangs jedoch nur partiell. Fortführungen wurden 1:1 übernommen, sodass nicht selten ein Bruch zwischen der hohen partiellen Genauigkeit der Fortführung und der Genauigkeit innerhalb der Nachbarschaft entstand (LGLN, 2020, S. 16). Die relative geometrische Genauigkeit zu benachbarten Objekten der Karte wurde dabei missachtet. In Folge sind Inhomogenitäten, die mehrere Meter betragen können, zu erwarten. In Abbildung 3 ist z. B. zu erkennen, dass ein Gebäude nachträglich, ohne Anpassung der Nachbarschaft, fortgeführt wurde. Die grünen Punkte zeigen, dass an dem Gebäude bereits die Identität von Zahl und Karte wiederhergestellt wurde, indem 2016 eine Fortführungsvermessung stattfand. Die violetten Grenzpunkte zeigen dagegen eine Abweichung von über einem Meter zwischen der grafischen Koordinate und der gemessenen Koordinate.



Abbildung 3: Beispiel eines Nachbarschaftsbruches (Auszug aus dem LGLN-Viewer)

Neben der Genauigkeitsdifferenz kommt es bei der Fortführung auch zu einer Größen- und Formänderung der Nachbarschaft. Durch die fehlende Einpassung entstand neben dem Nachbarschaftsbruch auch ein grober Kartierfehler, der die relative geometrische Genauigkeit zerschlägt. In Abbildung 4 wird exemplarisch die geometrische Lage von zwei benachbarten Flurstücken (graue Darstellung) gezeigt. Das linke Flurstück wird fortgeführt und in seiner geometrischen Lage korrigiert, indem es nach Nordwesten verschoben wird (grüne Darstellung). Im rechten Flurstück entsteht dadurch eine Verzerrung, da die rote Flurstücksgrenze des rechten Flurstücks nicht angepasst wurde.

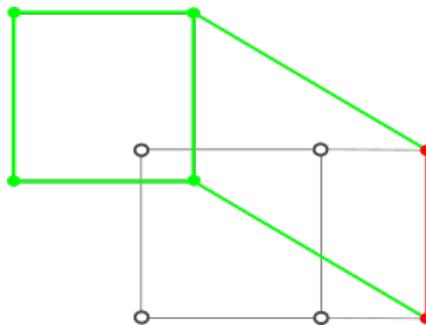


Abbildung 4: Exemplarische Darstellung einer Verzerrung nach einer 1:1-Fortführung (Quelle: Eigene Darstellung)

Aufgrund der wachsenden Anforderungen an das Kataster nach Verschneidung der amtlichen Daten mit anderen Datensätzen ist die Qualitätsverbesserung wieder mehr in den Vordergrund getreten. Aufgrund der zeitlichen, personellen und finanziellen Ressourcen wurde die Genauigkeitsanforderung allerdings immer weiter zurückgestuft und das Verfahren zur Qualitätsverbesserung angepasst. Nach einem Überblick über die verwendeten Punktorte und den Ablauf des Punktaustausches in der Qualitätsverbesserung werden im Folgenden die Maßnahmen zur Qualitätsverbesserung näher erläutert. Zunächst werden die Verfahren der Neuvermessung und Neuberechnung erläutert. Im Anschluss wird näher auf die Homogenisierung, das Verfahren Homogenisierung Light und den neuen Ansatz einer KI-gestützten Homogenisierung eingegangen.

## 2.4.1 Punktorte und Punktaustausch

Um die Identität zwischen Zahl und Karte wiederherzustellen, ist ein Verständnis für die Punktorte im niedersächsischen Liegenschaftskatasterinformationssystem wichtig. Nach der ISO 19111 definiert ein Punktort die räumliche Position, die ebene Lage oder die Höhe eines Objektes der Objektarten „Lagefestpunkt, Höhenfestpunkt, Schwerefestpunkt, Referenzstationspunkt, Grenzpunkt, Besonderer Gebäudepunkt, Aufnahmepunkt, Sicherungspunkt, sonstiger Vermessungspunkt, besonderer topographischer Punkt oder besonderer Bauwerkspunkt“ in einem Bezugssystem (Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland, 2008, S. 89). Im AAA-Basischema werden die drei Punktortvarianten „Punktort AG“, „Punktort AU“ und „Punktort TA“ unterschieden. Der Punktort TA führt zur Darstellung in der Liegenschaftskarte. Er liegt immer auf der Flurstücksgrenze und verortet einen Grenzpunkt. Bei Gebäuden wird vom Punktort AG gesprochen. Der Punktort muss zwingend mit einem Punkt der Geometrie entsprechend der Themendefinition z. B. eines Gebäude-, Bauteil- bzw. Bauwerkobjektes zusammenfallen. Der Punktort AU besitzt eine unabhängige Geometrie ohne Zugehörigkeit zu einem Geometriethema (Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland, 2008, S. 89ff.). Der Punktort TA bzw. AG steht im Zusammenhang der Qualitätsverbesserung dementsprechend für die grafische Position (siehe grüner Punkt in Abbildung 5). Der Punktort AU entspricht der örtlich gemessenen oder gerechneten Koordinate (siehe roter Punkt in Abbildung 5). Eine Abweichung zwischen dem Punktort AU und TA bzw. AG entsteht, weil die Grafik bei neu gemessenen oder gerechneten Punkten oft nicht angepasst wird. Das liegt daran, dass die flächenhaften Abweichungen in der lokalen Umgebung mit angepasst werden müssten, was teilweise sehr zeitaufwendig ist. Zur Verbesserung der Liegenschaftsgrafik wird daher ein Punktaustausch vorgenommen. Vorab findet dafür eine Zuordnung, die sogenannte „Kirschenbildung“ statt (Niedersächsische Vermessungs- und Katasterverwaltung, 2011, S. 3). Dieser Vorgang wird in Abbildung 5 dargestellt.

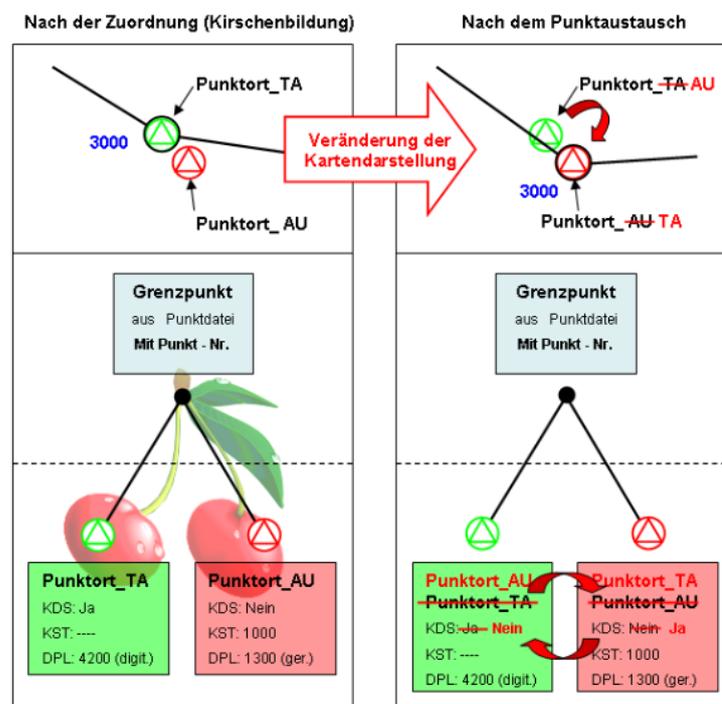


Abbildung 5: Prinzip des Punktaustausches (Niedersächsische Vermessungs- und Katasterverwaltung, 2011, S. 12)

Im Prinzip wird dabei ein nicht nummeriertes Punktobjekt, bestehend aus einem Punktort TA, einem nummerierten Punktobjekt AU zugeordnet, sodass aus zwei Grenzpunktobjekten ein Grenzpunkt resultiert. Der Grenzverlauf der Liegenschaftskarte wird dabei ebenfalls vom Punktort TA auf den Punktort AU geschoben. Abbildung 5 zeigt, dass bei dem Punktaustausch ein Punktort AU zu einem Punktort TA bzw. AG wird und umgekehrt (Niedersächsische Vermessungs- und Katasterverwaltung, 2011, S. 12). Durch den Punktaustausch können die Abweichungen behoben werden und der grafische Punkt entspricht der geführten Koordinate aus dem Koordinatenkataster. Punkte, für die kein koordinierter Objektpunkt vorliegt, können durch Angabe geometrischer Bedingungen von umliegenden Passpunkten oder durch Ausgleichs- und Interpolationsansätze (siehe Kapitel 3.1) verbessert werden (LGLN, 2020, S. 12).

Die Qualität der Punkte in ALKIS wird an ihrer Genauigkeit und Zuverlässigkeit gemessen. Diese Qualitätskriterien sollen allgemein akzeptiert, nachvollziehbar und objektiv sein (Niemeier, 2008, S. 270). Mit der Genauigkeit wird ausgedrückt, wie präzise die Koordinaten bestimmt sind. Die Punkte im ALKIS erhalten dafür einen Wert für die Datenerhebung (DH). Die Datenerhebung gibt Auskunft über die Datenherkunft und Erfassungsmethode in Lage und Höhe. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich im weiteren Verlauf auf die Lagegenauigkeit. Auf die Höhengenaugkeit wird nicht näher eingegangen. Die Datenerhebungsstufe mit dem Wert „1300“ steht beispielsweise für satellitengestützte Vermessungsverfahren oder eine Doppel-Polar-Aufnahme (Ministerium für Inneres und Sport, 2020a, S. 1305f.). Die Zuverlässigkeit beschreibt die Vertrauenswürdigkeit des Ergebnisses und wird im ALKIS über die Vertrauenswürdigkeitsstufe (VW) kategorisiert. Die Vertrauenswürdigkeit gibt an, wie zuverlässig die Lage und Höhe bestimmt wurde. Dies beinhaltet z. B. die VW „Ausgleichung“, „Berechnung“ oder „ohne Kontrolle“ (Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland, 2008, S. 97).

Grundsätzlich gibt es drei Ansätze, um die Qualitätsverbesserung durchzuführen. Die Neuvermessung, Neuberechnung und Homogenisierung werden im Nachfolgenden vorgestellt und nach fachlichen, finanziellen und zeitlichen Aspekten eingeordnet.

#### **2.4.2 Neuvermessung**

Bei der Neuvermessung wird der vermessungstechnische Außendienst eingesetzt, um eine Genauigkeit von  $\pm 4$  cm an den Objektpunkten zum landesweiten Koordinatenreferenzsystem herzustellen (Ministerium für Inneres und Sport, 2020a, S. 1307). Dazu werden Objektpunkte als Geobasisdaten des Liegenschaftskatasters mit dem heutigen Stand der Technik im Rahmen des LiegVermErlass mit einer sehr hohen absoluten Genauigkeit aufgenommen. Die Qualitätsverbesserung und -sicherung ist dabei als integrierter Bestandteil zur Aufgabenerfüllung im LiegVermErlass festgehalten (Ministerium für Inneres und Sport, 2020a, S. 1292). Die Grenz- und Gebäudepunkte werden z. B. mit dem satellitengestützten Vermessungsverfahren oder per Polaraufnahme mit dem Tachymeter aufgenommen. Gebäude können auch mit dem Orthogonalverfahren aufgemessen werden (Ministerium für Inneres und Sport, 2020a, S. 1305). Im Anschluss erfolgt der Punktaustausch in der Erhebungs- und Qualifizierungskomponente (EQK) und die Fortführung in die Datenhaltungskomponente (DHK). Mit den zur Verfügung stehenden personellen und finanziellen Ressourcen ist ein solches Vorhaben nicht umsetzbar und wurde bereits im Erlass zur Genauigkeitsverbesserung der Liegenschaftskarte 2008 auf ein Minimum beschränkt (Ministerium für Inneres, Sport und Integration, 2008, S. 1178). Örtliche Vermessungen werden nur getätigt, sofern die Katasterunterlagen zur Berechnung von identischen Punkten für ein Gebiet nicht ausreichend sind und

auf andere Weise nicht beschafft werden können oder Unstimmigkeiten festgestellt wurden. Weiterhin werden derartige qualitätsverbessernde Maßnahmen im Rahmen von Flurbereinigungsverfahren durchgeführt.

Insgesamt ist dieses Verfahren als am genauesten und sichersten zu betrachten, jedoch wie im Abschlussbericht der Arbeitsgruppe zur „Entwicklung neuer Lösungsansätze zur Verbesserung der geometrischen Genauigkeit der Liegenschaftsgrafik“ von 2018 beschrieben nicht realisierbar (LGLN, 2018, S. 6).

### **2.4.3 Neuberechnung**

Der Erlass zur Genauigkeitsverbesserung der Liegenschaftsgrafik sieht vor, dass identische Punkte mithilfe der Vermessungsunterlagen berechnet werden (Ministerium für Inneres, Sport und Integration, 2008, S. 1179). Die Grundlage für diese Berechnungen bilden die Punkt- und Grundrissinformationen, Präsentationen der Liegenschaftskarte, Festpunktfeldübersichten und Vermessungs- und Fortführungsrisse mit dem darin enthaltenden Vermessungszahlenwerk. Bei der Verwendung von Vermessungszahlen aus Urkarten oder aus Grundsteuerunterlagen ist teilweise eine Umrechnung notwendig, da die Vermessungszahlen in der Maßeinheit Ruten angegeben sind. Nach der Zusammenstellung der Vermessungsunterlagen erfolgt aktuell (Stand Ende 2022) mit der Software GeoPard die programmgestützte Berechnung von Liniennetz-, Grenz-, Gebäude- und Bauwerkspunkten. Berechnete Koordinaten erhalten eine endgültige Punktnummer und sind zu kontrollieren. Die Berechnung erfolgt punktweise und ergibt sich aus Bestimmungsmaßen der aufgestellten Messungslinien mit Abzissen und Ordinaten. Als Kontrollmaße werden Streben, Spannmaße und Steinbreiten verwendet. Festgestellte Unstimmigkeiten im Vermessungszahlenwerk sind durch den Außendienst zu klären. Alle aufgestellten Punkte werden mit ihrer Punktnummer in der Punktdatei aufgenommen. Außerdem erhält jeder bestimmte Punkt eine Lagegenauigkeit in Form der Datenerhebung und Vertrauenswürdigkeit (Ministerium für Inneres, Sport und Integration, 2008, S. 1179). Die Qualität der Vermessungszahlen ist dabei abhängig von der Entstehungszeit und den damals geltenden Vorschriften und Erlassen. Daraus ergibt sich die einzuhaltende zulässige Abweichung und die Ableitung der Fehlerklasse (Ministerium für Inneres und Sport, 2020a, S. 1307). Im Anschluss an die Berechnung erfolgt die Kirschenbildung und der Punktaustausch in der EQK. Bevor die Aktualisierung und Fortführung der Daten in der DHK erfolgt, sind auch die weiteren Folien des Datenbestandes, wie z. B. die tatsächliche Nutzung und die Bodenschätzung, anzupassen (Ministerium für Inneres, Sport und Integration, 2008, S. 1179). Vermessungsunterlagen zur Bestimmung aller Koordinaten erfordern viel Zeit und Fachkenntnisse. Je nach Größe und Entstehung des Bearbeitungsgebietes ist eine intensive Unterlagenvorbereitung notwendig. Die quantitative Abschätzung der Arbeitsgruppe zur „Entwicklung neuer Lösungsansätze zur Verbesserung der geometrischen Genauigkeit der Liegenschaftsgrafik“ von 2018 ergab, dass die durchschnittliche Bearbeitungsdauer mit dem Verfahren der Neuberechnung und Neuvermessung ungefähr 500 Stunden pro  $km^2$  beträgt und ca. 19 Millionen Arbeitsstunden umfasst (LGLN, 2018, S.11). Daher ist auch bei diesem Ansatz ein großer finanzieller und personeller Ressourcenaufwand zu erwarten, weshalb dieser für die flächendeckende Qualitätsverbesserung nicht tragbar ist (LGLN, 2018, S. 48).

### **2.4.4 Homogenisierung**

Eine weitere Möglichkeit zur Steigerung der geometrischen Genauigkeit ist die Homogenisierung. 1991 beschrieb Sellge bereits, dass die Qualität mittels Homogenisierung verbessert werden könne. Sollkoordinaten aus der Punktdatei und geometrische Bedingungen sollten dabei die digitalisierten Koordi-

naten auf ein Niveau der Zeichengenauigkeit bringen (Sellge, 1991, S. 24). Gleichzeitig sollten dabei Mehrfachnachweise in analoger und digitaler Form beseitigt werden. Später sprach sich auch die Arbeitsgruppe zur „Entwicklung neuer Lösungsansätze zur Verbesserung der geometrischen Genauigkeit der Liegenschaftsgrafik“ für die Anwendung des Verfahrens der Homogenisierung aus, wohl wissend, dass die bestehenden Nachbarschaftsbrüche damit nicht optimal gelöst werden können (LGLN, 2018, S. 37). Die Neuberechnung oder Neuerhebung wurden nicht verfolgt, da diese Verfahren zu zeit- und kostenintensiv sind (siehe Kapitel 2.4.2 und 2.4.3). Im Erlass zur Führung des Liegenschaftskatasters (LiegKatErlass) von 2020 ist dazu festgehalten, dass Zeichengenauigkeiten flächenhaft durch Homogenisierung bereinigt werden sollen (Ministerium für Inneres und Sport, 2020b, S. 16).

Der Begriff Homogenisierung meint eine nachbarschaftstreue Anpassung digitalisierter Grafikkoordinaten unter Verwendung von Passpunkten und Zwangsbedingungen (LGLN, 2019, S. 3). Der Homogenisierungsprozess stellt in Passpunkten die Identität zwischen der grafischen Koordinate und der maßgebenden Koordinate aus dem Koordinatenkataster wieder her. Die koordinierten Punkte aus der Punktdatei und geometrische Bedingungen aus Vermessungsunterlagen werden als Zwangsbedingungen angehalten, um die geforderte Genauigkeit von 0,2 m bzw. 0,5 m aus dem Erlass zur Genauigkeitsverbesserung der Liegenschaftskarte wiederherzustellen (Ministerium für Inneres, Sport und Integration, 2008, S. 1178). Dafür ist vorab eine Passpunktzuordnung notwendig. In Abbildung 6 ist die Passpunktzuordnung exemplarisch dargestellt. Die Passpunktzuordnung kann bei geringen Abweichungen automatisiert z. B. mit der „Nearest-Neighbour-Methode“ oder einem Korrelationskreis erfolgen, um für jede maßgebende Koordinate aus dem Koordinatenkataster (grüne Kreise) den zugehörigen grafischen Punktort (graue Kreise) auszuwählen. Fehlende und inkorrekte Zuordnungen sind zu korrigieren (LGLN, 2019, S. 6). Beim mittleren Grenzpunkt sind in Abbildung 6 beispielsweise zwei mögliche Kartenpunkte in direkter Umgebung. Der Algorithmus für die automatische Passpunktzuordnung hat in diesem Fall den oberen Punkt als zugehörigen Punkt identifiziert. Durch eine manuelle Zuweisung wird der untere Punkt als korrekte Zuordnung erkannt (roter Vektor) und die vorherige Zuordnung aufgelöst.

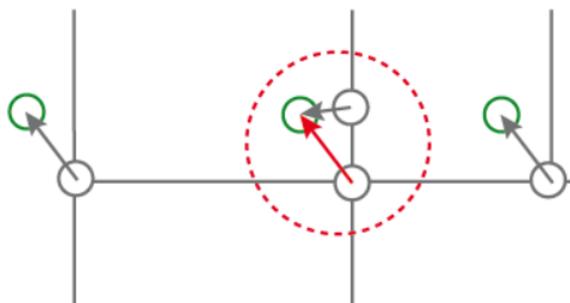


Abbildung 6: Passpunktzuordnung (Quelle: Eigene Darstellung)

Die Passpunktdichte und Passpunktwahl haben einen entscheidenden Einfluss auf das Homogenisierungsergebnis. Kriterien für eine geeignete Passpunktwahl werden in Kapitel 3.1 näher erläutert. Sofern die Passpunktanzahl für eine Ausgleichung nicht ausreichend ist, sind weitere Passpunkte zu bestimmen (LGLN, 2019, S.8). Geometrische Bedingungen, wie Rechtwinkligkeiten und Geradlinigkeiten, werden automatisiert ermittelt. Weitere Bedingungen können nach Sachverstand eingesetzt werden. Dazu zählen beispielsweise Messungslinien, Parallelitäten an Straßen und Gräben oder Durchfluchtungen für Grenzbebauungen. Mit den geometrischen Bedingungen, den digitalisierten Koordinaten und den zugehörigen Passpunktkoordinaten kann die nachbarschaftstreue Anpassung durchgeführt werden, die im

Kapitel 3.1 näher erläutert und in nachfolgender Abbildung 7 grafisch dargestellt ist. Sofern möglich werden die grafischen Koordinaten (graue Kreise) den zugehörigen maßgebenden Koordinaten (grüne Kreise) zugeordnet. Diese bilden die Passpunkte der Homogenisierung. Zusammen mit den rot dargestellten geometrischen Bedingungen (Geradlinigkeiten und Rechtwinkligkeiten) bilden sie den Rahmen für die Homogenisierung. Wenn kein zugehöriger Objektpunkt vorliegt, werden die Punkte bei der Ausgleichung nachbarschaftstreu angepasst (gestrichelte Pfeile). In diesen Punkten liegt abschließend keine absolute geometrische Genauigkeit vor, sondern lediglich eine Annäherung. Alle Bestandsdaten der Liegenschaftsgrafik, inklusive der Flurstücks- und Gebäudegeometrien, werden dann entsprechend der Verschiebungsinformationen angepasst und transformiert.

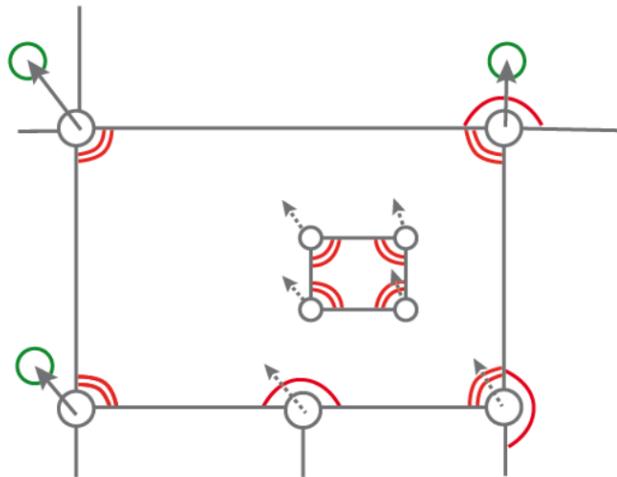


Abbildung 7: Nachbarschaftstreu Anpassung (Quelle: Eigene Darstellung nach LGLN, 2020, S. 13)

Im Anschluss an die nachbarschaftstreu Anpassung erfolgt der Punktaustausch und die Fortführung in die DHK. Die konkreten Arbeitsschritte bei der Homogenisierung, sowie notwendige vorbereitende Arbeiten werden in Kapitel 4.2.3 näher erläutert. In Abbildung 8 sieht man beispielhaft ein Ergebnis der Homogenisierung. In Grün ist die Lage der Flurstücksgrenzen und Gebäude nach der Homogenisierung zu sehen. In Schwarz ist die Lage vor der Homogenisierung dargestellt. Eine Verbesserung der geometrischen Genauigkeit ist durch das Luftbild im Hintergrund deutlich zu erkennen.



Abbildung 8: Beispiel eines Homogenisierungsergebnisses

## 2.4.5 Homogenisierung Light

Das Verfahren der Homogenisierung hat gegenüber der Neuerhebung und Neuberechnung den Vorteil, dass Nachbarschaftsverhältnisse und geometrische Anforderungen der Objekte berücksichtigt werden. Idealerweise liegt für jeden Punkt im Bearbeitungsgebiet ein zugehöriger, koordinierter Objektpunkt vor. Tatsächlich müssen für viele Bearbeitungsgebiete, vor allem in Feldlagen, vorab Passpunkte berechnet werden. Der Zeitvorteil der Homogenisierung ist daher abhängig von der Passpunktdichte und der historischen Entstehung des Bearbeitungsgebietes. Aufgrund der hohen erforderlichen personellen wie finanziellen Mittel ist das Ziel des Zukunftskonzeptes der VKV einer vollständigen absoluten Genauigkeit der Liegenschaftsgrafik mit diesem Ansatz bis 2025 nicht zu erreichen (LGLN, 2020, S. 6). Infolgedessen wurde mit dem Verfahren „Homogenisierung Light“ 2020 von der VKV2025-Projektgruppe „Verbesserung der geometrischen Genauigkeit der Liegenschaftsgrafik“ eine Handlungsempfehlung zur Verbesserung der Genauigkeit der Liegenschaftsgrafik entwickelt, in der das Verfahren der Homogenisierung beschleunigt wird (LGLN, 2020, S. 2). „Homogenisierung Light“ beschreibt eine vereinfachte Verfahrensausführung der Homogenisierung der Liegenschaftsgrafik. Die geforderte geometrische Genauigkeit wurde hierin zugunsten einer schnelleren Verbesserung der Liegenschaftsgrafik auf einen Meter zurückgestuft (LGLN, 2020, S. 6). Die Umsetzung erfolgt mit der Software „TerraCad/Systra“. Bei der Gebietsfestlegung ist die Prioritätensetzung des Erlasses zur Genauigkeitsverbesserung der Liegenschaftskarte von 2008 weiter zu beachten (Ministerium für Inneres, Sport und Integration, 2008, S. 1178). Vorranggebiete sind demnach zuerst zu behandeln. Die wesentlichen Grundsätze der „Homogenisierung Light“ sind (LGLN, 2019, S. 4):

1. Nutzung vorhandener Passpunkte:  
Alle vorhandenen Passpunkte werden verwendet. Nach sachkundiger Sichtung der vorhandenen Passpunkte werden ggf. weitere Passpunkte bestimmt. Alle übrigen Grenz- und Gebäudepunkte werden nachbarschaftstreu in den durch die Passpunkte festgelegten Rahmen eingepasst.
2. Automationsgestützte Detektion von geometrischen Bedingungen:  
Geometrische Bedingungen sind automationsgestützt zu erkennen. Dies umfasst Geradheitsbedingungen und Rechtwinkligkeitsbedingungen.
3. Verzicht auf das manuelle Hinzufügen von weiteren geometrischen Bedingungen:  
Auf das Hinzufügen weiterer manueller Bedingungen, wie z. B. Durchfluchtungen, Messungslinien und Parallelitäten, ist zu verzichten.
4. Verzicht auf zusätzliche Außendiensttätigkeit:  
Der Einsatz von örtlichen Vermessungen für die Bestimmung weiterer Passpunkte ist zu vermeiden.

Insgesamt wird die Identität zwischen Punktdatensatz und Grundrissdatensatz nur für die Passpunkte wiederhergestellt. Für alle übrigen Punkte entsteht eine Näherung. Damit ist das Ziel des Verfahrens „Homogenisierung Light“ keine absolute geometrische Genauigkeit, sondern eine Verbesserung der geometrischen Genauigkeit (LGLN, 2018, S. 37). Das bedeutet, dass nur systematische Abweichungen der 1:1-Digitalisierung auf unter einem Meter verringert werden, während zufällige Abweichungen erhalten bleiben. Das Verfahren „Homogenisierung Light“ greift außerdem nicht für Bearbeitungsgebiete mit groben Fehlern und Nachbarschaftsbrüchen. Weitere Verbesserungsarbeiten sind voraussichtlich in Zukunft

notwendig, aber es wird flächendeckend ein geringeres Fehlerniveau erreicht, wodurch die Geobasisdaten des Liegenschaftskatasters vermehrt den heutigen Nutzungsansprüchen gerecht werden.

### **3 Homogenisierung der Liegenschaftsgrafik auf Basis von Gebäuden**

Im Hinblick auf das Zieljahr 2025 und den verfügbaren personellen und finanziellen Ressourcen scheint auch das aktuelle Verfahren Homogenisierung Light nicht realistisch. Deshalb wird in dieser Bachelorarbeit ein KI-gestützter Ansatz zur Verbesserung der Liegenschaftsgrafik untersucht. Bei diesem Ansatz werden neben den koordinierten Punkten aus der Punktdatenfile automatisch abgeleitete Gebäudepasspunkte verwendet, um aufwendige Passpunktberechnungen zu minimieren und das Verfahren zu beschleunigen. Dabei rückt das Prinzip „Fit for Purpose“ immer mehr in den Vordergrund, um schnellstmöglich die Qualität der Liegenschaftsgrafik zu verbessern. In diesem Kapitel werden zunächst die grundlegenden Kriterien für die Passpunktwahl und die Durchführung der Ausgleichsrechnung vorgestellt. Danach wird ein besonderes Augenmerk auf die Verwendung von Gebäudepasspunkten gelegt. Anschließend wird die Anwendung künstlicher Intelligenz, einschließlich der Ableitung von KI-Verschiebungsvektoren zur Verbesserung der Qualität der amtlichen Liegenschaftsgrafik, erläutert.

#### **3.1 Ausgleichsrechnung und Passpunktwahl**

Die Durchführung der Homogenisierung erfordert unter anderem eine Koordinatentransformation der Punktorte TA und AU. Eine Koordinatentransformation ist ein Rechenverfahren, um Punkte eines Koordinatensystems in ein anderes Koordinatensystem zu überführen. Dazu werden die Punkte des Ausgangssystems so verschoben, gedreht und gedehnt, dass sie bestmöglich mit dem Zielsystem übereinstimmen (Niemeier, 2008, S. 116). Eine Transformation erfordert im Ausgangs- und Zielsystem eine bestimmte Anzahl vorhandener identischer Punkte. Im Ausgangssystem sind das bei der Homogenisierung die Punktorte TA. Das Zielsystem beinhaltet als identische Punkte die zugehörigen Punktorte AU. Im Zuge der Homogenisierung werden diese Punkte auch Passpunkte oder Referenzpunkte genannt. Für eine gute Nachbarschaftstreue und zur Kontrolle wird eine überbestimmte Passpunktanzahl empfohlen (LGLN, 2020, S. 13). Wird eine überbestimmte Anzahl an Passpunkten verwendet, so ist die Lage der Passpunkte nach der Koordinatentransformation optimal, aber i. d. R. nicht mehr exakt auf den identischen Punkten im Zielsystem. Die Differenz zwischen dem transformierten Punkt und dem gegebenen Punkt im Zielsystem wird Restklaffe genannt. Die Restklaffen werden durch eine Ausgleichung unter Berücksichtigung der Nachbarschaft auf nicht verknüpfte Punkte verteilt (Technet GmbH, 2010, S. 28).

Bei der Homogenisierung wird die Liegenschaftsgrafik so angepasst, dass die geometrische Lage der Passpunkte den vorliegenden Koordinaten entspricht und in allen anderen Punkten eine Annäherung vorliegt. Die Grundvoraussetzung ist, dass sowohl ein erhobener oder berechneter Punkt mit einem Punktort AU vorliegt und es einen zugehörigen, grafischen Punkt in der Liegenschaftsgrafik gibt. Anderenfalls ist keine Zuordnung und damit kein Punktaustausch möglich. Weiterhin beeinflussen die Anzahl und die Verteilung der Passpunkte die Qualität des Ergebnisses. Die Passpunktanzahl wird durch die Gebietsstruktur bestimmt. Es ist eine wohlüberlegte Passpunktwahl erforderlich, da die Passpunkte repräsentativ für das gesamte Bearbeitungsgebiet stehen. Die Passpunktwahl erfolgt beim LGLN nach den in Kapitel 2.4.4 vorgestellten Grundsätzen der Homogenisierung Light. Die Abgrenzung der Homogenisierungsgebiete muss deshalb eine Gleichartigkeit für die nachbarschaftstreue Anpassung gewährleisten (LGLN, 2020, S. 19). Bei homogenen Gebieten werden weniger Passpunkte benötigt als in inhomogenen Gebie-

ten (LGLN, 2019, S. 7). Zu inhomogenen Gebieten zählen solche, bei denen die Nachbarschaft durch Einpassung der Ergebnisse von Liegenschaftsvermessungen oder durch Zwangseinpassung von digitalisierten Inselflurkarten verloren gegangen ist. Außerdem stehen in Ortslagen potenziell mehr Passpunkte zur Verfügung als in Feldlagen. Nachfolgend sind Beispielausschnitte für eine homogene und inhomogene Gebietsstruktur dargestellt. Bei einer homogenen Gebietsstruktur (siehe Abbildung 9) steht der Verschiebungsvektor eines Passpunktes repräsentativ für die Vektoren der umliegenden Passpunkte. In Abbildung 10 gilt diese Annahme nicht. Um eine hohe geometrische Genauigkeit zu erzielen, müssen in diesem Bereich deutlich mehr Passpunkte verwendet werden, da es bei der Ausgleichung zu fehlerhaften Verschiebungen kommen würde.

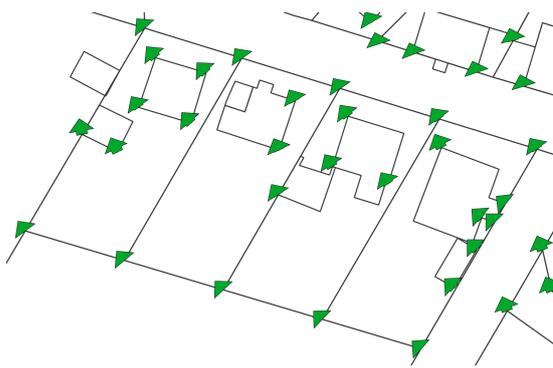


Abbildung 9: Beispiel einer homogenen Gebietsstruktur (Quelle: Eigene Darstellung)

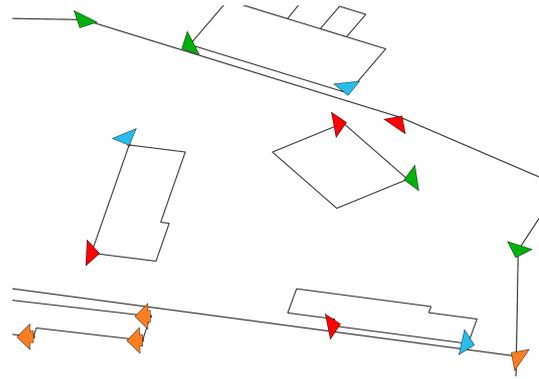


Abbildung 10: Beispiel einer inhomogenen Gebietsstruktur (Quelle: Eigene Darstellung)

Bei der Verteilung der Passpunkte ist es wichtig, dass diese gleichmäßig verteilt sind und auch Passpunkte am Rand des Gebietes vorliegen, um Extrapolationen zu vermeiden. In Abbildung 11 sind vier unterschiedliche Passpunktanordnungen abgebildet. Fall A zeigt eine ausgewogene Verteilung der Passpunkte am Rand. Innerhalb des Gitters liegen keine Passpunkte vor. Im Fall B wird eine fachlich ausreichende Passpunktverteilung dargestellt, die Passpunkte am Rand und innerhalb des Gitters zeigt. Fall C zeigt ein Szenario, in dem nur Passpunkte innerhalb des Verfahrensgebietes liegen. Dieser Fall steht exemplarisch für die Extrapolation. Im Fall D wird eine Passpunktverteilung am Rand mit einer lokalen Passpunkthäufung dargestellt (Benning, 1996, S. 78).

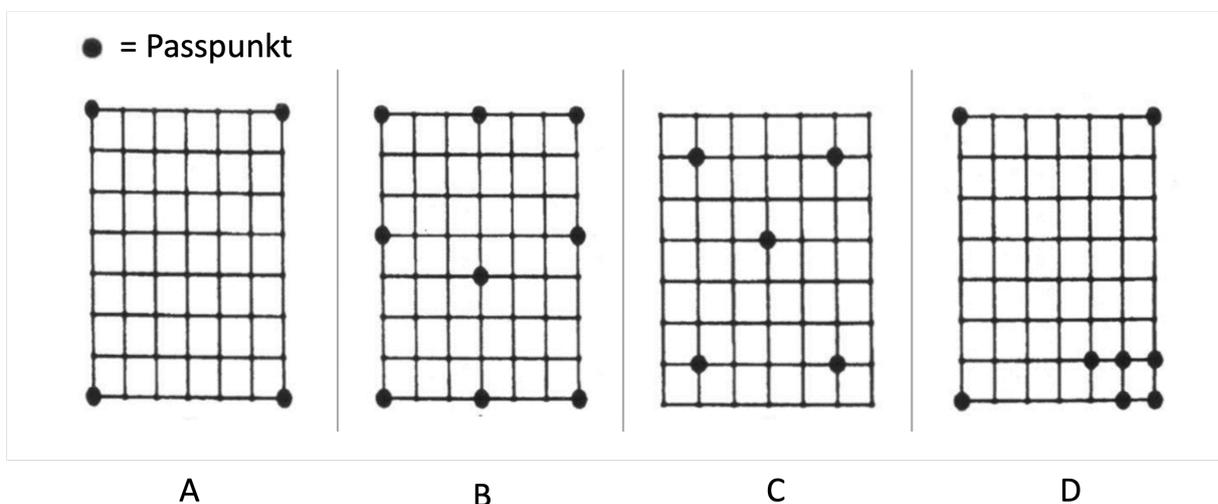


Abbildung 11: Passpunktanordnungen (Benning, 1996, S. 78)

Die Ergebnisse einer multiquadratischen Interpolation in Abbildung 12 zeigen, dass die maximalen Abweichungen in den Testfällen A und D innerhalb der Toleranz der von der VKV geforderten Genauigkeit von einem Meter liegen. Der Testfall B reproduziert nahezu eine exakte Solllage der zu interpolierenden Punkte. Nur der Testfall C führt aufgrund der Extrapolation zu maximalen Abweichungen von knapp drei Metern an den Rändern des Verfahrensgebietes. Laut Benning führt in diesem Fall eine streckengewichtete Interpolation zu besseren Ergebnissen (Benning, 1996, S. 79).

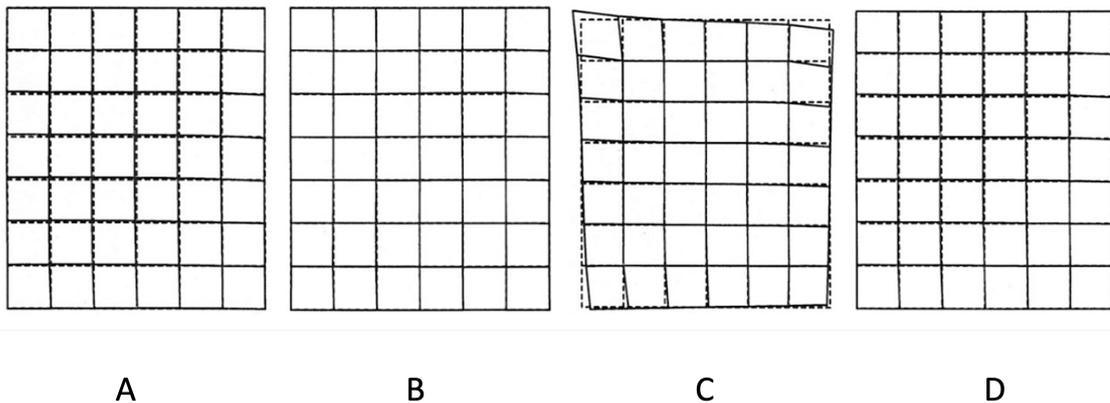


Abbildung 12: Ergebnisse der multiquadratischen Interpolation (Benning, 1996, S. 79)

Weiterhin sollte es vermieden werden, dass Passpunkte dicht beieinander liegen und nur einen kleinen Teil des Verfahrensgebietes abdecken. Je höher die Passpunktanzahl und je besser die räumliche Verteilung ist, desto eher können grobe Fehler im Gebiet aufgedeckt und eliminiert werden (Merk, 2017, o.S.). Als Passpunkte sind Punkte der Objektarten Grenzpunkt, besonderer Gebäudepunkt und besonderer Bauwerkspunkt zulässig (LGLN, 2019, S. 6). Die Genauigkeitsanforderungen an die Passpunkte von 0,02 m sind grundsätzlich an die Angaben im LiegVermErlass angehalten (Ministerium für Inneres und Sport, 2020a, S. 1305). Die Genauigkeit der Passpunkte bestimmt die absolute Genauigkeit des Homogenisierungsergebnisses. Die relative Genauigkeit wird durch die Ausgleichung verbessert. Sofern die Anzahl der Passpunkte für eine Homogenisierung zu gering sein sollte, können weitere Passpunkte bestimmt werden. Ausschlaggebend für die Auswahl zusätzlicher Passpunkte ist die Größe des passpunktfreien Bereichs und der Betrag und die Richtung der Verschiebungsvektoren von bisherigen Passpunkten (LGLN, 2019, S. 8). Die Bestimmung weiterer Passpunkte kann durch Neuberechnung oder durch Abgreifen von Laserscandaten, digitalen Orthophotos oder georeferenzierten Urkarten erfolgen. Letzteres wird vor allem zur Generierung von Passpunkten am Verfahrensrand genutzt, um Verschiebungsinformationen von bereits ausgetauschten Punkten erneut nutzen zu können. Diese Passpunkte erfüllen nicht die Anforderungen aus dem LiegVermErlass, können aber im Sinne der von der VKV geforderten Genauigkeit von einem Meter verwendet werden.

Für die Passpunkte gilt das Prinzip der Gleichrangigkeit. Alle Beobachtungen werden gleichrangig behandelt und fließen mit einem Gewicht in die Ausgleichung ein (Technet GmbH, 2010, S. 10). Die Gewichtung der Beobachtung ergibt sich aus den Standardabweichungen (Technet GmbH, 2010, S. 16). Neben den Passpunkten fließen bei einer Homogenisierung auch geometrische Bedingungen und Nachbarschaftsbeziehungen mit in die Ausgleichung ein.

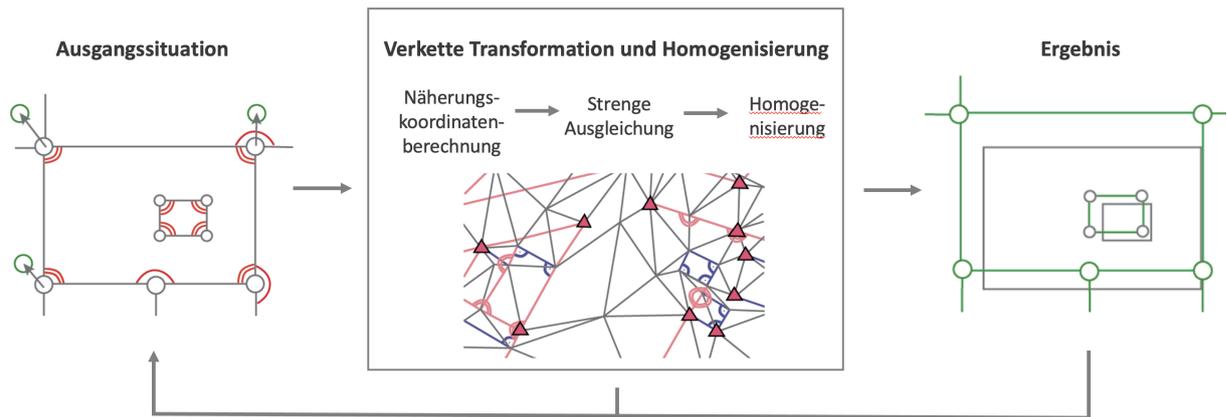


Abbildung 13: Ausgleichungsverfahren mit Systra (Quelle: Eigene Darstellung)

In Abbildung 13 ist im linken Bild die **Ausgangssituation** vor der Ausgleichungsrechnung zu sehen. Die grauen Pfeile zeigen die Passpunktzuordnung der Punktorte TA (graue Kreise) zu den entsprechenden Punktorten AU (grüne Kreise). Weiterhin sind in Rot die Rechtwinkligkeits- und Geradheitsbedingungen an den Flurstücksgrenzen und Gebäuden dargestellt.

Die Ausgleichung mit Systra transformiert Punkte eines Ausgangssystemes in ein Zielsystem auf Basis einer **verketteten Transformation** (siehe Abbildung 13 - mittlerer Abschnitt). Dies erfolgt nach dem Stufenkonzept der Siebkette. In jeder Stufe wird eine flächenhafte Ausgleichung durchgeführt. Die vorherige Stufe liefert der nächsten die notwendigen Näherungswerte. In der ersten Stufe werden mittels der Methode der konjugierten Gradienten **Näherungskoodinaten** ermittelt und sehr grobe Fehler eliminiert. In der zweiten Stufe erfolgt die **strenge Ausgleichung** mit der in Geodäsie und Geoinformation weit verbreiteten Gaußschen Kleinsten-Quadrate-Methode. Diese Stufe dient zur statistischen Analyse und Fehlerbehandlung. Die Einpassung systematischer Restfehler und **Homogenisierung** erfolgt in der dritten Stufe. Dabei wird eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen mit der Gaußschen Kleinsten-Quadrate-Methode und der Membranmethode durchgeführt (Technet GmbH, 2010, S. 11ff.). Neben den zufälligen Beobachtungsfehlern müssen auch systematische Verzerrungen der Kartengrundlage, Kartierfehler und Netzgrundlagen berücksichtigt werden. Auch die geometrischen Eigenschaften, wie die Rechtwinkligkeit von Gebäuden, und die Nachbarschaften müssen bei der flächenhaften Ausgleichung eingehalten werden. Um die geometrischen Bedingungen und Nachbarschaften zu berücksichtigen, hat sich die Delauney-Triangulation bewährt. Die Delauney-Triangulation erzeugt eine Dreiecksvermaschung, die darauf beruht, dass jeweils drei Punkte ein Dreieck bilden, in deren Umkreis kein weiterer Punkt liegt (Niemeier, 2008, S. 416). Dieser Schritt wird als nachbarschaftstreue Anpassung oder Homogenisierung bezeichnet (Technet GmbH, 2010, S. 27). Wichtig ist zu beachten, dass die Restklaffen in Abhängigkeit vom Abstand zu den identischen Punkten bzw. Verknüpfungspunkten auf die Neupunkte verteilt werden. Es wird davon ausgegangen, dass Punkte in der Umgebung eines solchen Repräsentanten in etwa die gleiche Systematik aufweisen. Weiterhin muss das Anpassungsmodell unabhängig von der Verteilung der identischen Punkte sein. Das heißt, das Hinzufügen oder Entfernen von Neupunkten und Punkthäufungen dürfen keinen Einfluss auf das Ergebnis haben (Technet GmbH, 2010, S. 29f.).

Die Ausführung der nächsten Stufe kann jeweils erst erfolgen, wenn in der aktuellen Stufe keine Fehler ausgegeben werden. Als Bewertungskriterium für die Detektion grober Fehler gilt der Wert der normierten Verbesserung (NV-Wert). Dieser entsteht aus der Verbesserung einer Beobachtung, geteilt durch deren Standardabweichung. Maßnahmen zur Fehlerbehebung der größten normierten Verbesserung sind

beispielsweise das Ändern oder Löschen von geometrischen Bedingungen, das Beobachtungsgewicht zu null setzen oder die Anpassung der Steuerparameter (Technet GmbH, 2010, S. 26).

Das Vorgehen bis zum Ergebnis ist ein iterativer Prozess. Oftmals ist es notwendig, die Eingangs- und Ausgleichungsparameter für ein optimales Ergebnis mehrfach anzupassen, die Fehler zu beheben und die Ausgleichung erneut anzustoßen. Das **Ergebnis** der Ausgleichung ist in der rechten Grafik in Abbildung 13 dargestellt. Schlussendlich werden die grafischen Koordinaten und die maßgebenden Koordinaten ausgetauscht und die Flurstücks- und Gebäudegeometrie wird entsprechend angepasst (grüne Darstellung).

Das vorgestellte Vorgehen der Ausgleichung beruht auf der Software Systra. Die nachfolgenden Untersuchungen wurden mit diesem Ausgleichungsansatz durchgeführt. Andere Ausgleichungsverfahren können ggf. andere Untersuchungsergebnisse erzielen. Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde dieser Umstand nicht weiter untersucht.

### 3.2 Gebäudepasspunkte

Nach dem LiegKatErlass sind Flurstücke und Gebäude flächendeckend, aktuell und zuverlässig vorzuhalten (Ministerium für Inneres und Sport, 2020b, S. 13). Aufgrund der historischen Entwicklung des Liegenschaftskatasters wird den Gebäuden bis heute eine untergeordnete Rolle zugeordnet (LGLN, 2018, S. 65). Aufgrund der geringeren Genauigkeit werden Gebäude- und Bauwerkspunkte bei Homogenisierungen nicht zusätzlich berechnet, sondern nachbarschaftstreu angepasst, um die Homogenität im Sinne des Nachbarschaftsprinzips weitgehend beizubehalten (LGLN, 2019, S.8). Zudem haben Gebäude oftmals andere Entstehungszeitpunkte und unterliegen im Laufe der Zeit einer höheren Veränderungsrate als die zugehörigen Flurstücke. Als Resultat entstehen innerhalb des Datenbestandes der Liegenschaften durch die Unterschiede in der geometrischen Genauigkeit unterschiedliche Abweichungen zur absoluten Lage von Grenz- und Gebäudepunkten. Dadurch kann der Betrag und die Richtung der Verschiebung mitunter voneinander abweichen. Es besteht allerdings kein Bezug der grafischen und gerechneten Koordinaten (ALK Einrichtungserlass) und damit auch kein verlässlicher Bezug zwischen Gebäude und Flurstücksgrenze (Niedersächsische Vermessungs- und Katasterverwaltung, 1994, S. 5). Dies kann insbesondere bei grenznahen Bebauungen durch den verlorenen Bezug zu fehlerhaften Ergebnissen führen, bei denen die Gebäude die Flurstücksgrenzen schneiden. Oftmals werden die Gebäude derzeit erst nachträglich berechnet oder korrigiert, eine kontrollierte Aufmessung vorausgesetzt. Dieses Vorgehen ist sehr zeit- und kostenintensiv. Die Berechnung von Gebäudepasspunkten ist zeitaufwendig und bedarf in einigen Fällen Klärung von Geometriefehlern bei der Aufstellung. Aufgrund der wachsenden Anforderungen an ein öffentlich-rechtliches Geobasisinformationssystem ist ein Umdenken erforderlich. Die Nutzung der Geobasisdaten für räumliche Analysen und Fragestellungen nimmt immer mehr zu. Umso wichtiger ist es, die geometrische Genauigkeit der Liegenschaftsgrafik schnellstmöglich zu verbessern (Schmidt et al., 2022a, S. 1). Um eine interoperable Nutzung zu gewährleisten, sind deshalb visuelle Diskrepanzen zwischen verschiedenen Datenquellen zu verhindern. Dies trifft insbesondere auch auf Gebäude zu, da diese im Gegensatz zu den meisten Flurstücksgrenzen in Luftbildern oder Laserscandaten gut erkennbar sind. Die Genauigkeit der Gebäudepunkte ist aufgrund der heutigen Aufnahmeverfahren und geltenden Genauigkeitsanforderungen deutlich gestiegen, sodass die geforderte Genauigkeit von einem Meter erreicht wird. Dass Gebäudepasspunkte durchaus für die Homogenisierung verwendet werden können, belegt Rembold mit seinem Artikel „Neuberechnung des Katasterzahlenwerks mit Anschluss an UAS-bestimmte Gebäudepunkte“ (Rembold, 2022, S. 103). Dabei dienen photogrammetrisch bestimmte

Gebäudepasspunkte als Referenzpunkte für die Homogenisierung in Nordrhein-Westfalen. Die Nutzung von Gebäuden als Anschlusspunkte für die Qualitätsverbesserung führte zum Ergebnis, dass die Geobasisdaten nunmehr den Anforderungen, die aufgrund der Zweckbestimmung und des Aktualitätsgebotes an sie gestellt werden, erfüllen (Rembold, 2022, S. 103). Die Idee eines automationsgestützten Verfahrens speziell für Gebäude wurde in der Projektgruppe „Entwicklung neuer Lösungsansätze zur Verbesserung der geometrischen Genauigkeit der Liegenschaftsgrafik“ im Jahr 2018 bereits diskutiert (LGLN, 2018, S. 65). Eine Möglichkeit, um die Bestimmung von Gebäudepasspunkten zu beschleunigen und die Genauigkeit der Liegenschaftsgrafik zu erhöhen, ist das automatisierte Verfahren, welches im Kapitel 3.3 näher erläutert wird.

### 3.3 Passpunkte auf Basis von automatisch berechneten Gebäuden

#### 3.3.1 Verfahren zur künstlichen Intelligenz im LGLN

Die Aufgabe des Landesamtes ist es, die Geobasisdaten des Liegenschaftskatasters flächendeckend, aktuell und zuverlässig vorzuhalten. Die Qualität des Liegenschaftskatasters soll stetig verbessert werden, um den Anforderungen an ein zeitgemäßes öffentlich-rechtliches Geobasisinformationssystem gerecht zu werden (Ministerium für Inneres und Sport, 2020b, S. 13). Aufgrund der Inhomogenitäten und stellenweisen geringen geometrischen Genauigkeit kann der Datensatz nicht für räumliche Analysen und Planungen verwendet werden. Bereits im Vergleich mit digitalen Orthophotos wird klar, dass die geometrische Genauigkeit der Liegenschaftsgrafik nicht ausreichend ist. Besonders an den Gebäuden sieht man deutliche Differenzen zwischen der Lage in der Liegenschaftsgrafik (gelbe Linien) und der Lage im Orthophoto (siehe Abbildung 14).

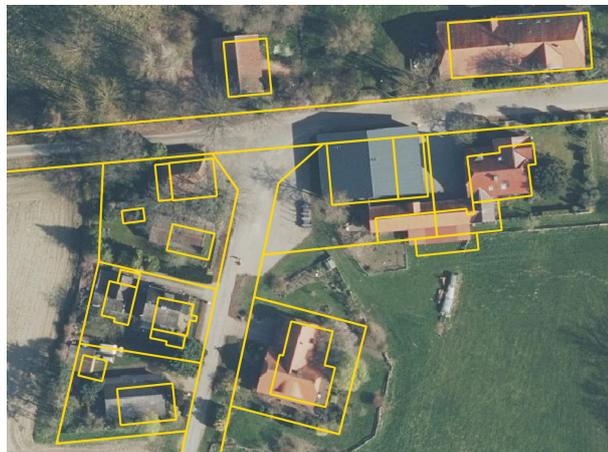


Abbildung 14: Abweichung zwischen der Liegenschaftsgrafik und dem digitalen Orthophoto

Es ist daher zwingend erforderlich, die geometrische Genauigkeit der Liegenschaftsgrafik zu verbessern. Dies soll im Hinblick auf die Zielvorstellung der VKV möglichst automationsgestützt erfolgen. Dafür wurde in den letzten Jahren vermehrt auf eine moderne, leistungsstarke IT-Infrastruktur (Informationstechnologie-Infrastruktur) gesetzt, die eine Verarbeitung von Geodaten mittels maschinellen Lernens ermöglicht (LGLN, 2022, o.S.). Vorreiter in diesem Bereich ist z. B. die Niederlande oder das Bayerische Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung. Ziel des niedersächsischen Ansatzes ist es, mithilfe eines Deep Learning-Ansatzes mit neuronalen Netzen Gebäude in digitalen Orthophotos (DOP) zu erkennen. Das Verfahren wird bereits für den Gebäudefeldvergleich angewandt, um Gebäude

zu detektieren, die noch nicht eingemessen wurden und somit nicht im ALKIS-Datenbestand vorliegen. Damit ersetzt es das manuelle und zeitaufwendige visuelle Durchmustern der digitalen Orthophotos.

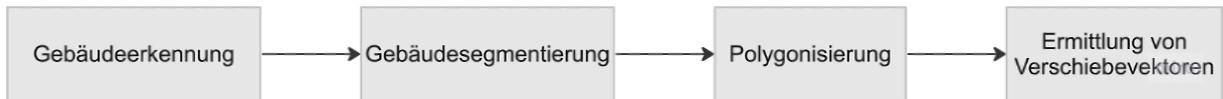


Abbildung 15: Iterative Lösung für die Aktualisierung und Verbesserung der Liegenschaftsgrafik (Quelle: Eigene Darstellung nach Schmidt et al., 2022b, S. 4)

Wie in Abbildung 15 zu sehen, werden im ersten Schritt Gebäudeinstanzen in DOP's und TrueDOP's extrahiert. Dafür werden künstliche neuronale Netze genutzt. Aus den resultierenden Bounding Boxes, die Gebäude in den Daten lokalisieren, werden gebäudezentrierte Patches zugeschnitten, die in ein vollständig gefaltetes semantisches Segmentierungsnetz eingespeist werden. Auf diese Weise wird die zu verarbeitende Datenmenge deutlich reduziert. Basierend auf dem Segmentierungsnetzwerk werden Polygone abgeleitet, die die Gebäudekonturen darstellen. In einem Matching-Analyseprozess werden anschließend Aktualisierungspotenziale sowie verschobene Gebäude im Quelldatensatz identifiziert. Das Ziel der Matching-Analyse ist die Unterscheidung zwischen Gebäuden im Quelldatensatz, die die tatsächliche Position von Gebäuden genau widerspiegeln, Veränderungen von Gebäuden, die auf eine Aktualisierung der Quelldaten hindeuten, und Gebäuden, deren Position in den amtlichen Daten korrigiert werden muss. Für die potenziell verschobenen Gebäude wird jeweils ein Verschiebungsvektor und ein Wert zur Zuverlässigkeit erzeugt (Schmidt et al., 2022b, S. 6). Ein Beispiel für das Resultat des Verfahrens sieht man in Abbildung 16. In Blau ist der extrahierte Gebäudeumring dargestellt. Durch das gelbe ALKIS-Polygon aus dem amtlichen Datenbestand und dem KI-Verschiebungsvektor wird deutlich, in welche Richtung das Gebäude verschoben ist.



Abbildung 16: Deep Learning-basierte Methode zur Verbesserung der geometrischen Genauigkeit der Liegenschaftsgrafik

Die Analysen ergaben, dass das Verfahren in der Lage ist, Verschiebungen größer als ein Meter zuverlässig zu identifizieren (Schmidt et al., 2022a, S. 2). Das Ziel ist, ein groß angelegtes Training aufzubauen, das es ermöglicht, das Problem der Genauigkeitsverbesserung von Katasterdaten in einem zweistufigen End-to-End-Deep-Learning-Framework mittels eines Human-in-the-loop-Ansatzes (HITL) zu lösen. Der

HITL-Ansatz verbessert die KI durch menschliche Interaktion und Feedback und schafft dadurch eine frühzeitige Einsetzbarkeit, einen größeren Trainingsdatensatz und dadurch eine größere Sicherheit (Wolfewicz, 2022, o.S.). Anschließend können die Positionen der Gebäude in den Quell- und Zieldatensätzen als Passpunkte in einem Anpassungsprozess, wie z. B. der Homogenisierung, zur Verbesserung der geometrischen Genauigkeit der Liegenschaftsgrafik genutzt werden (Schmidt et al., 2022a, S. 2).

### 3.3.2 Ableitung von KI-Verschiebungsvektoren

Um die geometrische Genauigkeit der Liegenschaftsgrafik zu verbessern, soll nachfolgend untersucht werden, ob die automatisiert abgeleiteten Verschiebungsinformationen des in Kapitel 3.3.1 vorgestellten Ansatzes für die Homogenisierung geeignet sind. Dafür wird in diesem Abschnitt die Generierung der automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren näher erläutert.

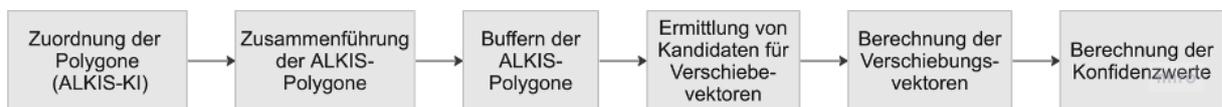


Abbildung 17: Ablauf zur Ermittlung der Verschiebungsvektoren (Quelle: Schmidt et al., 2022b, S. 12)

Die Ermittlung der Verschiebungsvektoren erfolgt regelbasiert und ist in Abbildung 17 dargestellt. Zuerst erfolgt durch räumliche Verschneidung (1:n) eine Zuweisung der ALKIS-Gebäude und der Segmentierungspolygone, die mit KI-basierten Objekterkennungsmethoden aus Luftbildern abgeleitet wurden. Eine Herausforderung beim Matching ist die 1:n-Kardinalität, die hauptsächlich durch die spezifische Generierungsmethode verursacht wird. Dadurch kann ein KI-Polygon zu mehreren ALKIS-Gebäuden zugeordnet werden. Bislang wurden nur Verschiebungsvektoren für eine Kardinalität von bis zu 1:3 bestimmt. Im Anschluss erfolgt die Mapping-Analyse, um Kandidaten für die Berechnung der Verschiebungen zu ermitteln. Neben den ermittelten Verschiebungen werden zusätzlich Konfidenzwerte für die berechneten Verschiebungen bestimmt (Schmidt et al., 2022b, S. 12). Der Konfidenzwert wird während der Matching-Analyse anhand mehrerer Indikatoren ermittelt. Dafür wird der Quelldatensatz der ALKIS-Gebäude gebuffert, da die abgeleiteten Polygone die Dachform und nicht den Gebäudegrundriss skizzieren. Um Dachüberstände einzukalkulieren, wird ein Buffer von 0,5 m angewandt. Zu den Indikatoren zählen neben der Kardinalität, die Intersection-over-Union (IoU), die relative Flächendifferenz (rFD) und die relative Umringsdifferenz (Schmidt et al., 2022b, S. 8). Die IoU ergibt sich dabei aus der überlappenden Fläche des ALKIS-Gebäudes mit der KI-Segmentierung geteilt durch die zusammengesetzte Gesamtfläche der beiden Polygone:

$$IoU = \frac{ueberlappendeFlaeche}{zusammengesetzteFlaeche}$$

Das Ergebnis ist ein Wert zwischen 0 und 1. Je höher der Wert ist, desto eher handelt es sich um eine gute Detektion. Die relative Flächendifferenz wird mit folgender Formel bestimmt (Schmidt et al., 2022b, S. 8):

$$rFD = \frac{|Flaeche_{ALKIS} - Flaeche_{KI}|}{Flaeche_{ALKIS}}$$

Mithilfe dieser Indikatoren ist es möglich zu unterscheiden, ob Gebäude verändert, erbaut, abgerissen oder verschoben sind oder es sich um eine fehlerhafte Detektion handelt. Für die Homogenisierung ist vor allem der Fall der Gebäudeverschiebung relevant. Die Kandidaten, die potenziell eine Gebäudeverschiebung darstellen, werden anhand von Schwellwerten für diese Indikatoren gefiltert. Wie in Abbildung 18 im unteren Zweig dargestellt, muss eine teilweise Überschneidung vorliegen und die Flächengröße annähernd gleich sein. Die Bewertung der Verschiebungsvektoren erfolgt konservativ. Das bedeutet, dass die Bestimmung der optimalen Werte für die Parameter der Mapping-Analyse (IoU, rFD) so erfolgt, dass die Anzahl falscher Verschiebungen minimiert und die Erkennung von echten Verschiebungen maximiert wird.

Der gesamte Prozessablauf zur Beurteilung der Verschiebeinformationen ist in Abbildung 18 zusammengefasst.

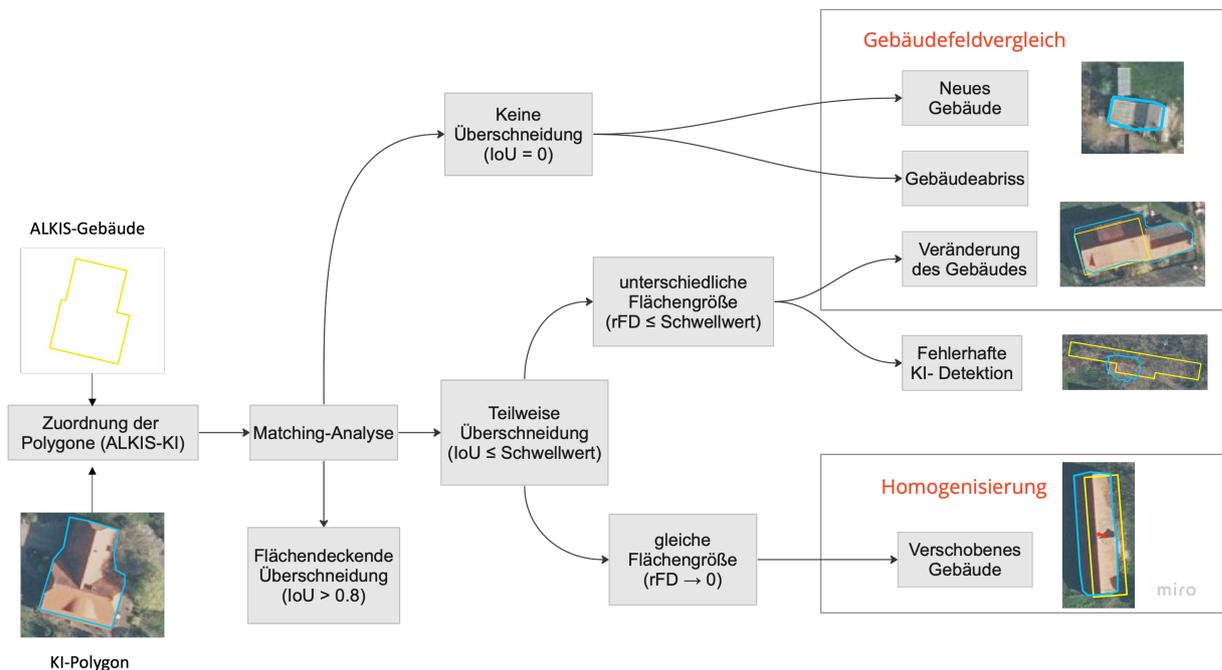


Abbildung 18: KI-gestützte Aktualisierung und Homogenisierung der Geobasisdaten (Quelle: Eigene Darstellung nach Schmidt et al., 2022b, S. 7)

Vektoren, die mit einer hohen Zuverlässigkeit eine Gebäudeverschiebung darstellen, werden aus der Verbindung der Schwerpunkte des ALKIS-Gebäudes und des abgeleiteten KI-Polygons erstellt. Bei einer Kardinalität von 1:n ist eine Zusammenführung der ALKIS-Gebäude vor der Schwerpunktberechnung notwendig. Diese Vektoren können im Anschluss als Passpunkte zur Verbesserung der geometrischen Genauigkeit der Liegenschaftsgrafik durch Homogenisierung verwendet werden. Bisher wurden nur Verschiebungsvektoren mit einer Kardinalität von 1:1 ermittelt. Im Laufe des Untersuchungszeitraumes konnte die Kardinalität auf bis zu 1:3 erhöht werden. Die nachfolgenden Untersuchungen unterliegen daher dem laufendem Prozess und beruhen jeweils auf dem aktuellen Stand der Verfügbarkeit an KI-Verschiebungsvektoren zum Zeitpunkt der Untersuchung.

## 4 Methodik der Genauigkeits- und Qualitätsuntersuchung

Da das Ziel der geometrischen Qualitätsverbesserung der Liegenschaftskarte aufgrund der enormen zeitlichen, finanziellen und personellen Ressourcen auf dem Wege der bisherigen Homogenisierung gefährdet scheint, erfolgt im Rahmen dieser Bachelorarbeit eine Untersuchung der Homogenisierung auf Basis von Gebäuden. Dazu wird neben der Eignung der KI-Verschiebungsvektoren auch die generelle Verwendung von Gebäudepasspunkten zur Korrektur der in Kapitel 2.2 vorgestellten systematischen Digitalisierungsfehler in der Liegenschaftsgrafik geprüft. Grobe Fehler werden in diesem Rahmen nicht berücksichtigt. Für den Vergleich der Ergebnisse wird eine manuelle Homogenisierung durchgeführt. Die Untersuchungen werden mit der bisher im Rahmen der Homogenisierung Light genutzten Software TerraCAD/Systra durchgeführt. Aus den Ergebnissen werden im Anschluss Aussagen zur geometrischen Genauigkeit und Robustheit abgeleitet. In diesem Kapitel wird die Herangehensweise der Genauigkeits- und Qualitätsuntersuchung näher erläutert. Im ersten Schritt werden die Testszenarios und Untersuchungsgebiete beschrieben. Im weiteren Verlauf wird auf vorbereitende Arbeiten und die Untersuchungsmethoden eingegangen sowie der gesamte Arbeitsablauf erläutert.

### 4.1 Testszenarios und Testgebiete

Zur Durchführung der Untersuchungen wurden Testszenarios entwickelt, um Aussagen zur geometrischen Genauigkeit und Robustheit ableiten zu können. Im Anhang in Abschnitt A sind die unterschiedlichen Testfälle tabellarisch aufgeführt. Zunächst wird für jedes Untersuchungsgebiet eine Basishomogenisierung durchgeführt (Testfall 1). Die Basishomogenisierung weist dabei jedoch eine deutlich überbestimmte Passpunktanzahl auf, da Gebäudepasspunkte nach der aktuellen Arbeitsweise nicht in demselben Umfang wie in diesen Untersuchungen für die Homogenisierung verwendet werden. Dennoch stellt die Basishomogenisierung keinen absolut genauen Referenzdatensatz dar. Das liegt daran, dass die Homogenisierung mit dem aktuellen Verfahren „Homogenisierung Light“ durchgeführt wurde und dementsprechend auf das Hinzufügen weiterer geometrischer Bedingungen zur Verbesserung des Ergebnisses verzichtet wurde. Die geometrische Genauigkeit des Ergebnisses wird maßgeblich von dem vorhandenen Vermessungszahlenwerk bestimmt. Außerdem beinhaltet die Homogenisierung nicht für alle grafischen Punkte einen Passpunkt, sodass bei Nicht-Passpunkten nicht davon ausgegangen werden kann, dass die geometrische Lage dieser Punkte immer einwandfrei ist, aber dennoch hinreichend, um einen Vergleich mit dem aktuellen Vorgehen zu erlauben. Vielmehr handelt es sich um einen bestmöglichen Vergleich, da keine aktuellen geometrischen Eigenschaften eines Modells oder einer Messung des realen Objektes vorliegen. Im Anschluss wird für selbiges Untersuchungsgebiet eine Homogenisierung durchgeführt, die lediglich auf berechneten Gebäudepasspunkten aus Vermessungsunterlagen beruht (Testfall 2). Als Nächstes erfolgten verschiedene Testfälle einer Homogenisierung mit ausschließlicher Verwendung der Passpunkte aus Verschiebungsvektoren. Um Aussagen zur Eignung dieses Ansatzes treffen zu können, wurde in diesem Szenario die Passpunktanzahl und -verteilung variiert (Testfall 3–7). Zuletzt wurde ein kombinierter Ansatz durchgeführt (Testfall 8–9). Die Testfälle entsprechen der Basishomogenisierung mit der zusätzlichen Einbindung von Passpunkten aus Verschiebungsvektoren. Dieser Ansatz wird zum einen mit den automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren durchgeführt (Testfall 8). Zum anderen werden alle manuell generierten Verschiebungsvektoren für zusätzliche Passpunkte verwendet (Testfall 9). Ziel dieser Kombination ist es, aufwendige Berechnungen zur Ermittlung von Passpunkten in passpunktfreien Bereichen zu vermindern. Aus diesem Grund wurden keine berechneten Passpunkte, sondern

nur vorhandene Passpunkte und Passpunkte, die aus automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren resultieren als Referenzpunkte eingesetzt.

Damit die Untersuchung auf einer breiten Basis aufgestellt ist und möglichst viele Gebietsstrukturen abdeckt, wurden die Untersuchungsgebiete kategorisiert. Die Kategorisierung richtet sich nach der von der Projektgruppe zur Verbesserung der geometrischen Genauigkeit der Liegenschaftsgrafik festgelegten Anzahl der Punktorte TA im 250m-Raster (LGLN, 2020, S. 3). Die Untersuchungen erfolgten somit für Orts-, Ortsrand- und Feldlagen. Im späteren Verlauf der Untersuchungen wurden die Testfälle für Orts- und Ortsrandlagen zusammengefasst. Der Grund für die Zusammenführung ist, dass die künstlich erhöhte Passpunktzahl durch die Verschiebungsvektoren nicht mehr zu der festgelegten Klassifizierung passte. Abschließend wurde für zwei Untersuchungsgebiete der Einfluss großer und kleiner Verschiebungen auf die Homogenisierung untersucht. Dabei wurde gerade im Hinblick des Gleichrangigkeitsprinzips der Ausgleichungssoftware Systra geprüft, ob sich größere Verschiebungen auf kleinere Verschiebungen auswirken.

Die Untersuchungsgebiete wurden nach der Größe der Verschiebung, dem Gebietstyp und der Verfügbarkeit von KI-Verschiebungsvektoren ausgewählt. In dem Untersuchungsgebiet sollten Abweichungen von über einem Meter auftreten. Außerdem wurde darauf geachtet, dass die Abweichungen auch an Gebäuden auftreten und im DOP zu sehen sind. Gebiete, in denen keine Gebäude vorhanden sind oder bereits die Identität zwischen der grafischen und maßgebenden Koordinate hergestellt ist, wurden nicht betrachtet, da der gebäudebasierte Ansatz nicht umsetzbar ist. Die Gebietstypen wurden nach dem jeweiligen Testszenario gewählt. Außerdem wurde darauf geachtet, dass die Untersuchungsgebiete möglichst unterschiedliche Charakteristika in Bezug auf die Homogenität, Qualität der Vermessungszahlen, Nachbarschaft und Passpunktanzahl aufweisen, um ein breites Spektrum an Anwendungsfällen abzudecken. Aufgrund der Anzahl verschiedenster Kriterien wurde das Kriterium der Kartengrundlage vernachlässigt und ist in allen Untersuchungsgebieten auf Inselfurkarten zurückzuführen. Der Grad der Inhomogenität aufgrund unterschiedlicher Verschiebungsrichtungen und -längen variiert in den Untersuchungsgebieten und es wurden auch Gebiete betrachtet, in denen partiell die Identität zwischen Zahl und Karte bereits wieder hergestellt wurde. Die Größe der Untersuchungsgebiete richtete sich nach den bisher üblichen Homogenisierungseinheiten. Aufgrund der großen Inhomogenitäten und der softwareseitigen begrenzten Datenmenge sind diese kleinräumig gewählt.

Insgesamt wurden die Untersuchungen in sechs Homogenisierungsgebieten durchgeführt, darunter drei Ortslagen, bzw. Ortsrandlagen, zwei Feldlagen und ein Gebiet mit kleineren Verschiebungen. Die Charakteristika dieser Untersuchungsgebiete sind in Tabelle 1 dargestellt. Der Wert der Homogenität ist dabei aus einer Klassifizierung der Länge und Richtung der Abweichungen zwischen den maßgebenden und grafischen Koordinaten bestimmt worden. Die Richtung bezeichnet dabei die Abweichung des Vektors zum Mittelwert aller Richtungswinkel. Zusätzlich wurden aufgrund der Untersuchungsergebnisse drei zusätzliche Untersuchungen durchgeführt. In diesen Gebieten war der Rand des Homogenisierungsgebietes bereits ausgetauscht oder es handelte sich um ein bereits abgeschlossenes Homogenisierungsgebiet mit fehlerhaften Gebäudepositionen. Auch die Teilung eines Homogenisierungsgebietes in kleinere, homogene Abschnitte wurde in diesem Zuge untersucht.

Tabelle 1: Charakteristika der Untersuchungsgebiete

<b>Gebietsname/ Charakteristika</b>	<b>Rohrstorf</b>	<b>Kaierde</b>	<b>Marien- hufe</b>	<b>Colling- horster- moor</b>	<b>Mooraus- moor</b>	<b>West- rhauder- fehn</b>
Kartengrundlage	Insel- flurkarte	Insel- flurkarte	Insel- flurkarte	Insel- flurkarte	Insel- flurkarte	Insel- flurkarte
maximale Passpunktanzahl	217	189	85	107	38	741
Homogenität [%]	21	69	43	30	34	49
Nachbarschafts- brüche durch Punktaustausch	keine	wenig	viel	wenig	keine	wenig
Gebietstyp	Ortslage	Ortslage	Ortslage	Feldlage	Feldlage	Ortslage
Gebietsgröße [ $m^2$ ]	91.996	26.034	25.267	179.792	98.234	161.890
Gebäudeanzahl	62	76	31	18	15	263
Anzahl Verschiebungs- vektoren	6	4	3	3	6	14
Größe der Abweichungen [m]	3,9	2,6	3,9	3,0	2,7	1,5

## 4.2 Untersuchungsmethoden

Die Untersuchung der Homogenisierung auf Basis von Gebäuden erfolgte in mehreren Schritten. Neben der in Kapitel 4.1 vorgestellten Auswahl der Untersuchungsgebiete erfolgten vorbereitende Arbeiten, bevor die Homogenisierung durchgeführt werden konnte. Zu den vorbereitenden Arbeiten zählen die Passpunktbereitstellung, die Bereinigung von Fehlern im Untersuchungsgebiet, die den technischen Ablauf der Homogenisierung blockieren sowie die Analyse der Ausgangssituation. Im Anschluss erfolgt die Durchführung der Homogenisierung. Die resultierenden Ergebnisse werden anhand von Differenzvektoren von Gebäude- und Grenzpunkten visuell und statistisch ausgewertet. Dieses Kapitel beschreibt nachfolgend die notwendigen vorbereitenden Arbeiten und den Ablauf der Untersuchung. Dabei wird vertieft auf die Bereitstellung der Passpunkte eingegangen.

### 4.2.1 Passpunkte aus Vermessungsunterlagen

Die Basishomogenisierung erfolgte nach geltenden Vorschriften des Verfahrens „Homogenisierung Light“. Demnach wurden im Vorfeld Grenzpunkte für passpunktfreie Bereiche mit GeoPard berechnet. Die Berechnung erfolgte nach dem in Kapitel 2.4.3 vorgestellten Verfahren mittels Vermessungsunterlagen. In Abbildung 19 sind die zusätzlich berechneten Passpunkte dargestellt. Die gelben Kreise zeigen neu berechnete Passpunkte. Die Berechnung neuer Passpunkte erfolgte an den Rändern des Untersuchungs-

gebietes, um Extrapolationen zu vermeiden und eine gleichmäßigere Passpunktverteilung zu erreichen. Die grauen Kreise markieren vorhandene Passpunkte und die grünen Kreise zeigen bereits ausgetauschte Grenz- und Gebäudepunkte.



Abbildung 19: Bestimmung von Passpunkten in passpunktfreien Bereichen im Untersuchungsgebiet Colinghorstmoor

Gemäß des Vorgehens im Verfahren „Homogenisierung Light“ werden zusätzlich keine Gebäudepasspunkte berechnet (LGLN, 2019, S. 8). In Abbildung 19 ist zu sehen, dass für die Gebäude keine Passpunkte vorliegen. Die bereits ausgetauschten Punkte sind ebenfalls nicht mehr als Referenzpunkte für die Homogenisierung nutzbar. Im Rahmen der Untersuchungen ist es für alle Testfälle erforderlich, Gebäudepasspunkte zu ermitteln. Sofern möglich wurden für die Untersuchungsgebiete alle Gebäudepasspunkte aus den Vermessungsunterlagen bestimmt. Aufgrund fehlerhafter oder fehlender Vermessungsunterlagen konnten einige wenige Gebäude nicht berechnet werden und fließen nicht in die Auswertung ein. Alle auf diesem Wege nachträglich berechneten Passpunkte wurden für den Testfall mit dem kombinierten Ansatz (Testfall 8–9) für ein möglichst hohes Maß an Automation nicht verwendet, um die Eignung des Ansatzes zu untersuchen.

#### 4.2.2 Gebäudepasspunkte aus automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren

Zur Passpunktbereitstellung zählt außerdem die Generierung von Passpunkten mittels automatisch abgeleiteter Verschiebungsvektoren. Dies untergliedert sich in mehrere Arbeitsschritte zur Ableitung und Nutzung von Passpunkten aus den KI-Verschiebungsvektoren und zur Generierung neuer Verschiebungsvektoren. Das lag zum einen daran, dass es notwendig war, weitere Verschiebungsvektoren zu generieren, um die Passpunktanzahl und -verteilung zu variieren und daraus Schlussfolgerungen ableiten zu können. Da die Anzahl der KI-Verschiebungsvektoren bisher sehr gering war, galt es, insbesondere für die laufende Entwicklung des KI-basierten Ansatzes, Empfehlungen zur Ableitung der Verschiebungsvektoren zu entwickeln. Zum anderen lag es daran, dass die Verschiebungsvektoren auf den Schwerpunkten der Gebäude beruhen und es mit der aktuellen Software TerraCAD/Systra nicht möglich ist, diese Zentroide

zu verarbeiten. Als Folge dessen wurden die Verschiebungsvektoren auf die Gebäudeecken projiziert. In diesem Kapitel wird die Generierung der Passpunkte aus automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren, die durchgeführt Qualitätskontrolle der Passpunkte und die Nutzung in TerraCAD/Systra näher erläutert.

### **Generierung der Passpunkte aus automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren**

Die Generierung von Passpunkten aus den Verschiebungsvektoren ist in Abbildung 20 dargestellt. Die Bestimmung von Passpunkten erfolgte mit der Software QGIS. Als Eingabedaten wurden dafür die KI-Segmentierungen und aus den ALKIS-Bestandsdaten die Gebäude und Bauwerke verwendet. Im ersten Schritt wurde eine Zuordnung der Bauwerke und Gebäude (grauer Umring) zu den KI-Segmentierungen (hellblauer Umring) durch räumliche Verschneidung vorgenommen. Vorab war in einigen Fällen eine Ausdünnung von doppelten KI-Segmentierungen notwendig. Gebäude und Bauwerke, die zur gleichen KI-Segmentierung gehören, wurden im Anschluss zusammengeführt. Bei dichter Bebauung kann eine Segmentierung durchaus mehrere Gebäude und zugehörige Bauwerke umfassen. Für jedes Feature des zusammengeführten Layers der ALKIS-Daten und der KI-Segmentierung wurden Zentroide (grauer und hellblauer Punkt) ermittelt. Die Berechnung der Zentroide erfolgte analog zu der Vorgehensweise des KI-basierten Ansatzes zur automatisierten Ableitung der Verschiebungsvektoren. Aus den berechneten Schwerpunkten konnten die Verschiebungsvektoren der Gebäude ermittelt werden (roter Pfeil). Anschließend wurde der Layer der zusammengeführten ALKIS-Gebäude dupliziert und verschoben. Die Verschiebung erfolgte featureweise. Die gesamte Geometrie des Features wurde dabei vom ursprünglichen Zentroid auf den berechneten Zentroid der KI-Segmentierung verschoben (dunkelblauer Umring). Abschließend wurden die verschobenen Multipart-ALKIS-Gebäude wieder in einzelne Gebäude geteilt. Aus den verschobenen Gebäude wurden die Stützpunkte extrahiert (dunkelblaue Punkte) und als maßgebende Koordinate für die Passpunktzuordnung bei der Homogenisierung verwendet. Die Geometrieform der ALKIS-Gebäude bleibt dabei erhalten, da nur eine Translation vorgenommen wird. Bisher werden Rotationen nicht in Betracht gezogen, jedoch wird die Bedeutung von Rotationen im folgenden genauer untersucht.

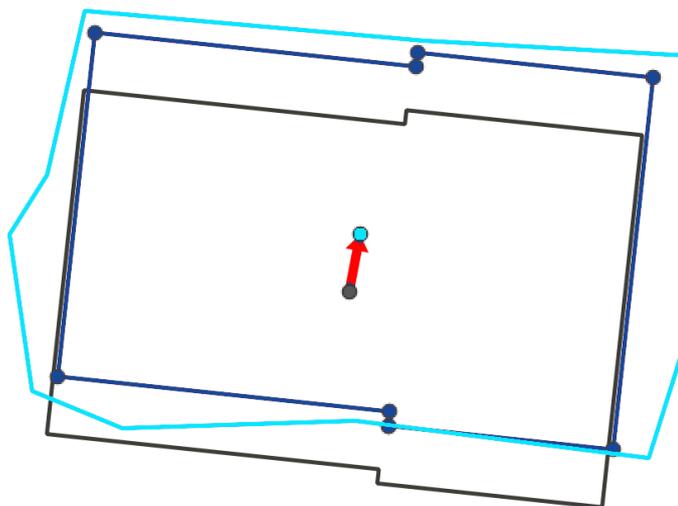


Abbildung 20: Passpunkte aus automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren

### Qualitätskontrolle der KI-Verschiebungsvektoren

Bevor die berechneten Verschiebungsvektoren für die Homogenisierung verwendet werden können, ist eine Qualitätskontrolle notwendig, um die Zielvorstellung einer Genauigkeit von einem Meter zu verifizieren. Bei der automatischen Ableitung wird dazu der Konfidenzwert bestimmt. In diesem Fall erfolgte die Qualitätskontrolle über einen Vergleichsdatensatz (siehe Abbildung 21). Da es keinen absoluten Referenzdatensatz gibt, wurden für den Vergleich Gebäude mit der Software GeoPard aufgestellt und berechnet. Die aus den Vermessungszahlen berechneten Gebäude entsprechen am ehesten der idealen geometrischen Position, vorausgesetzt die Unterlagen können als fehlerfrei angenommen werden. Beim Vergleich können Abweichungen zwischen der Position des berechneten Gebäudes (grüner Umring) und dem KI-basierten Gebäude (blauer Umring) aufgrund von Drehungen, Geometriefehlern oder ungenauen Gebäudesegmentierungen entstehen. Entstandene Geometriefehler und Drehungen der Gebäude werden während der Berechnung korrigiert, wodurch die Geometrie des Gebäudes womöglich von der Geometrie der im Nachweis enthaltenden ALKIS-Gebäude, und demnach auch von dem KI-basierten Gebäude, abweicht. Im ersten Schritt wurden daher nur die Zentroide der berechneten Gebäude mit den Zentroiden der KI-Segmentierungen verglichen. In Abbildung 21 ist zu sehen, dass aufgrund von Geometriefehlern in den einzelnen Gebäudeseiten oder Drehungen, Abweichungen an den Gebäudeecken deutlich größer sein können als an den Zentroiden. Die Zentroide weisen eine Differenz von 0,49 m auf. Die Gebäudeecken haben dagegen Abweichungen bis zu 0,76 m. Ein Vergleich über die Zentroide ist daher nicht ausreichend.

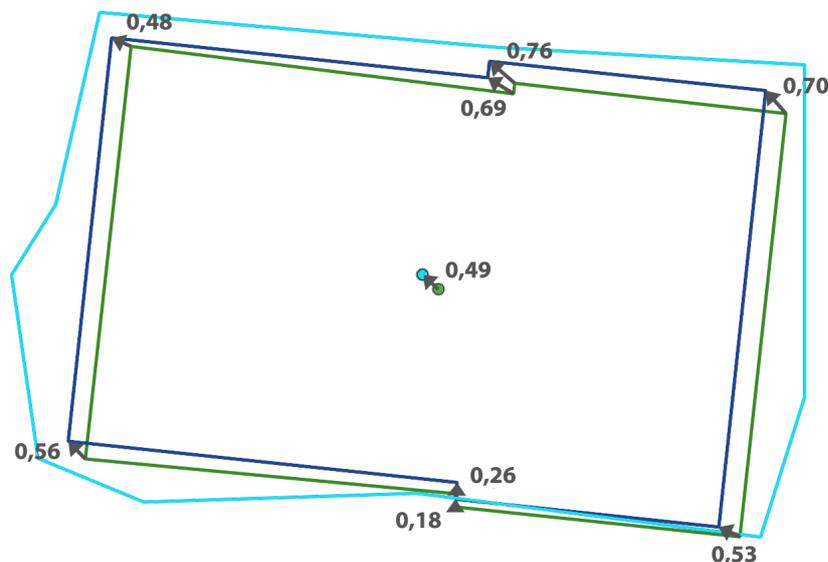


Abbildung 21: Differenz des verschobenen ALKIS-Gebäudes zum berechneten Gebäude (in Metern)

Als Folge wurde der Vergleich über die Gebäudeecken fortgeführt. Der Ansatz Homogenisierung Light und der Ansatz der automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren dienen nicht zur Bereinigung von Geometriefehlern. Solche Fehler benötigen eine anderweitige oder manuelle Berichtigung.

Deshalb wurden für die berechneten Gebäude ebenfalls Zentroide bestimmt und die ursprüngliche ALKIS-Geometrie auf den neu berechneten Zentroid verschoben. Somit hat jede Gebäudeecke denselben Verschiebungsbetrag. Die Qualität der KI-basierten Verschiebungsvektoren ist ausreichend, sofern die Abweichung der Gebäudeecken zwischen dem verschobenen berechneten Gebäude und dem verschobenen

KI-basierten Gebäude einen Meter nicht übersteigt. Mit diesem Vorgehen können Aussagen darüber getroffen werden, ob die abgeleiteten Vektoren eine ausreichende Qualität haben und wie viele Vektoren noch zusätzlich mit dem aktuellen Verfahren bestimmbar wären.

Neben Geometriefehlern kann es aufgrund von Gebäudedrehungen zu Abweichungen zwischen den berechneten und KI-basierten Gebäuden kommen. Drehungen werden im Ansatz für die automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren derzeit nicht berücksichtigt. In Abbildung 22 ist zu sehen, dass Drehungen durchaus Abweichungen erzeugen. Obwohl die Zentroide sehr dicht beieinander liegen, weichen die Gebäudeecken des berechneten Gebäudes (grüner Umring) und des KI-basierten Gebäudes (blauer Umring) bis zu 0,9 m voneinander ab. Wird das ALKIS-Gebäude auf den Zentroid des berechneten Gebäudes verschoben (rote Fläche), sind deutlich geringere Abweichungen zum Ergebnis des KI-basierten Gebäudes zu erkennen.

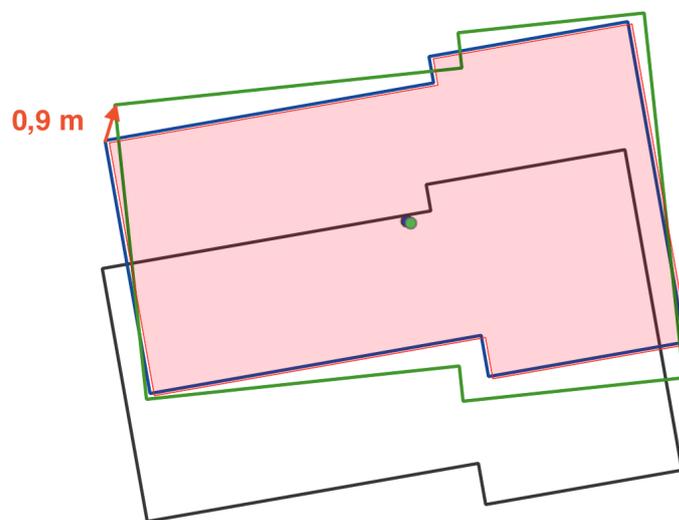


Abbildung 22: Auswirkungen von Drehungen an Gebäuden

Deshalb wurde der Aspekt der Drehung näher untersucht, wie in Abbildung 23 zu sehen. Um Geometriefehler auszuschließen, wurden als Vergleichsdatensatz nicht die berechneten Gebäude verwendet, sondern die Gebäude manuell anhand des Luftbildes eingepasst (orangener Umring). Dadurch kann die Abweichung beim Vergleich auf die Translation und Rotation eingeschränkt werden. Da bei Gebäuden grundsätzlich von einer Rechtwinkligkeit ausgegangen werden kann und die Gebäude um den Schwerpunkt gedreht werden, ist der Drehwinkel in jedem Punkt gleich. Für den Vergleich diente deshalb jeweils eine Gebäudeseite des Vergleichsdatensatzes (orangener Vektor) und die zugehörige Gebäudeseite im ALKIS-Nachweis (schwarzer Vektor) als Repräsentant für das gesamte Gebäude. Aus diesen Repräsentationsvektoren wurde der Winkel mit der folgenden Formel berechnet:

$$\varphi = \cos^{-1}\left(\frac{\vec{u} \circ \vec{v}}{|\vec{u}| \cdot |\vec{v}|}\right)$$

Zusätzlich wurden die Abweichungen zwischen den Gebäudeecken des Vergleichsdatensatzes und den zugehörigen Gebäudeecken im KI-basiereten Datensatz bestimmt. Um die Auswirkungen auf die Ab-

weichung zu ermitteln, wurden die KI-basierten Gebäude im Anschluss ebenfalls um den Drehwinkel des Vergleichsdatensatzes gedreht (rote Fläche). Dabei wurde sowohl ein Mittelwert der Drehungen als auch die individuelle Drehung jedes Gebäudes betrachtet. Somit konnten die Abweichungen mit und ohne Drehung für jede Gebäudeecke verglichen werden. Im Beispiel lag ohne Drehung eine Abweichung von 0,9 m vor. Durch eine Drehung des Gebäudes konnte diese auf 0,6 m verringert werden. Die Drehung wurde in drei der Untersuchungsgebiete näher analysiert. Weiterhin wurde ein theoretischer Wert der möglichen Abweichungen über die Berechnung der Sehne bestimmt:

$$s = 2 \cdot r \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

Dabei stellt  $r$  den Abstand der Gebäudeecke zum Zentroid dar und  $\alpha$  den Drehwinkel.

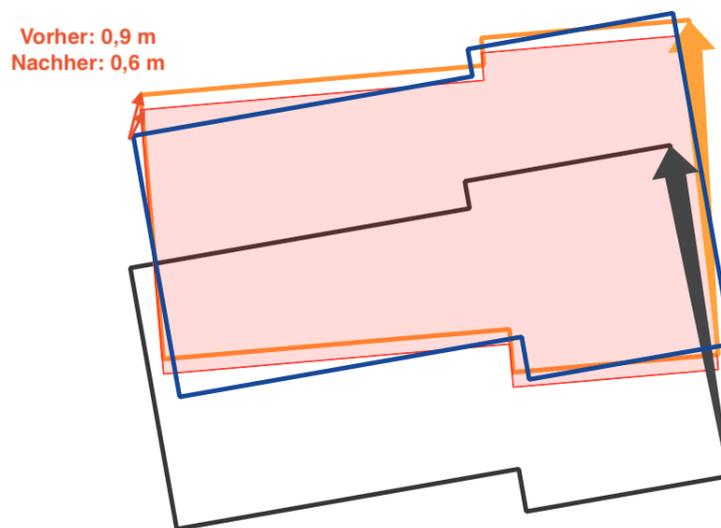


Abbildung 23: Bestimmung des Drehwinkels an Gebäuden

### Nutzung der KI-Verschiebungsvektoren in Terra

Zentroide können technisch mit der Software TerraCAD/Systra nicht verarbeitet werden, da es nicht möglich ist, ganze Objekte anhand eines Punktes zu verschieben oder zu ändern. Deshalb war es notwendig, die berechneten KI-Verschiebungsvektoren auf die Gebäudeecken zu projizieren. Weiterhin war der Import der resultierenden Gebäudeecken nicht ohne Weiteres möglich. Infolgedessen musste der Dateityp, der Geometrietyp und das Koordinatensystem angepasst werden. Da die Verarbeitung von Punktgeometrien in Terra zu Schwierigkeiten führte, wurden die verschobenen ALKIS-Gebäude als Polygon-Geometrie in Form einer Shape-Datei in TerraCAD/Systra eingeführt. Vorab war dafür eine Transformation des Koordinatensystems notwendig. Die Gebäudeecken konnten im Anschluss einzeln als Punktort AU mit dem Fangwerkzeug in Terra digitalisiert werden. Eine Alternative wäre ein Import über GeoPard, der allerdings noch mehr Medienbrüche und Dateiumwandlungen benötigt hätte. Damit die Geometrie des Gebäudes im Homogenisierungsprozess im Sinne der Rechtwinkligkeit und Geradlinigkeit verbessert werden kann und keine Widersprüche entstehen, wurden nicht alle Gebäudeecken verwendet. Pro Gebäude wurden analog zum Vorgehen bei der Neuvermessung zwei bis drei Gebäudeecken als Passpunkte angehalten. Bei komplexeren Gebäuden wurde die Passpunktanzahl erhöht. Für die digitalisierten

Punktorte AU war außerdem eine Qualitätsangabe notwendig. Da keine passende Klassifizierungsstufe in der Software TerraCAD/Systra vorlag, wurde sich für die letzte Klasse „DH1500/1400 - Gemäß älterer Vorschriften ermittelt“ entschieden. Diese Angabe sollte im Nachgang in der EQK mit der passenden Qualitätsangabe korrigiert werden.

### 4.2.3 Untersuchungsablauf am Beispiel von Rohrstorf

In diesem Kapitel wird der gesamte Ablauf der Untersuchung für das Untersuchungsgebiet Rohrstorf erläutert. Abbildung 24 zeigt den schematischen Ablauf der Untersuchungen.

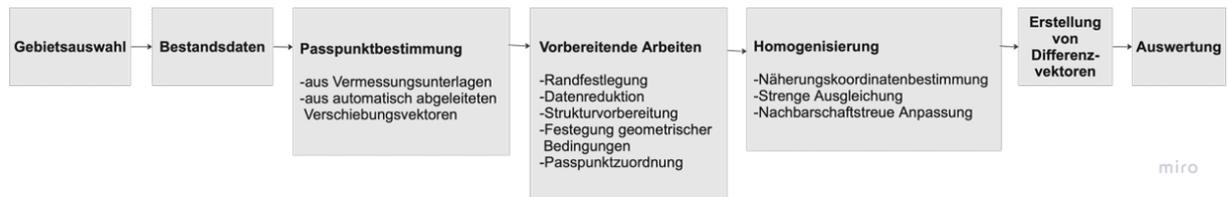


Abbildung 24: Schema des Untersuchungsablaufes (Quelle: Eigene Darstellung)

Zunächst erfolgte die **Gebietsauswahl** mithilfe des LGLN Viewers. Die Auswahl des Untersuchungsgebietes richtete sich nach den in Kapitel 4.1 vorgestellten Kriterien. So waren im Luftbild bereits deutlich Abweichungen jenseits von einem Meter zu den Daten aus der Liegenschaftsgrafik zu erkennen. Die verschiedenen Qualitätsstufen der Vermessungszahlen und Verschiebungsrichtungen deuteten auf ein inhomogenes Gebiet hin. Aufgrund der hohen Passpunkt- und Gebäudeanzahl ist das Gebiet sehr gut für die Untersuchungen geeignet. Die Verfügbarkeit von KI-Verschiebungsvektoren wurde mittels des neuen Prototyps für den Gebäudefeldvergleich überprüft.

Mit der EQK wurden die **Bestandsdaten** zur Darstellung der Liegenschaftsgrafik angefordert und als Bestandsdatendatei exportiert. Im Anschluss erfolgte die **Passpunktbestimmung**. Für das Untersuchungsgebiet Rohrstorf lagen bereits viele Passpunkte vor, sodass eine zusätzliche Berechnung von Grenzpunkten nicht notwendig war. Sofern möglich wurden für die unkoordinierten Gebäude Passpunkte aus den Vermessungsunterlagen bestimmt, wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben. Da nur für sechs Gebäude Verschiebungsvektoren vorlagen, wurden weitere Verschiebungsvektoren generiert und die Qualität der Verschiebungsvektoren untersucht (siehe Kapitel 4.2.2). Im nächsten Schritt konnte die Homogenisierung für die einzelnen Testszenarien in TerraCAD/Systra durchgeführt werden. Zunächst wurden **vorbereitende Arbeiten** durchgeführt. Dazu zählt die Randfestlegung, Datenreduktion, Strukturvorbereitung, Festlegung geometrischer Bedingungen und die Passpunktzuordnung. Die Randfestlegung sollte möglichst entlang von Straßenzügen oder Flurstücksgrenzen laufen und keine Gebäude schneiden, um Nachbarschaftsbrüche zu vermeiden. Bereits ausgetauschte Flächen sind auszusparen. Daraus resultierte der äußere violette Umring in Abbildung 25. Im Anschluss wurden die Projektdaten reduziert. Dabei wurden Gebäude aus den Flurstücksgrenzen gelöst und vollständig außerhalb liegende Objekte gelöscht. Außerdem wurden Datenfehler bereinigt. Dazu zählten z. B. Shortlines und Überschneidungen. Im Untersuchungsgebiet Rohrstorf mussten außerdem neue Stützpunkte in die grafischen Daten eingefügt werden, um eine Passpunktzuordnung durchführen zu können. Bei der Strukturvorbereitung erhalten alle Kartenpunkte, die noch nicht ausgetauscht sind, eine temporäre und interne Punktnummer (blaue Punkte in Abbildung 25). Zu den Kartenpunkten zählen sämtliche Punktorte TA, Gebäudepunkte, Stützpunkte von Präsentationsobjekten und anderen ALK-Folien. Die interne Nummerierung ist für die Passpunktzuordnung und für die spätere Transformation über Systra notwendig. Sofern das Bearbeitungsgebiet bereits ausgetauschte Objekte

beinhaltet, werden diese fixiert, sodass sie durch die anschließende Ausgleichung nicht verändert werden. Im Untersuchungsgebiet Rohrstorf war dies nicht notwendig.

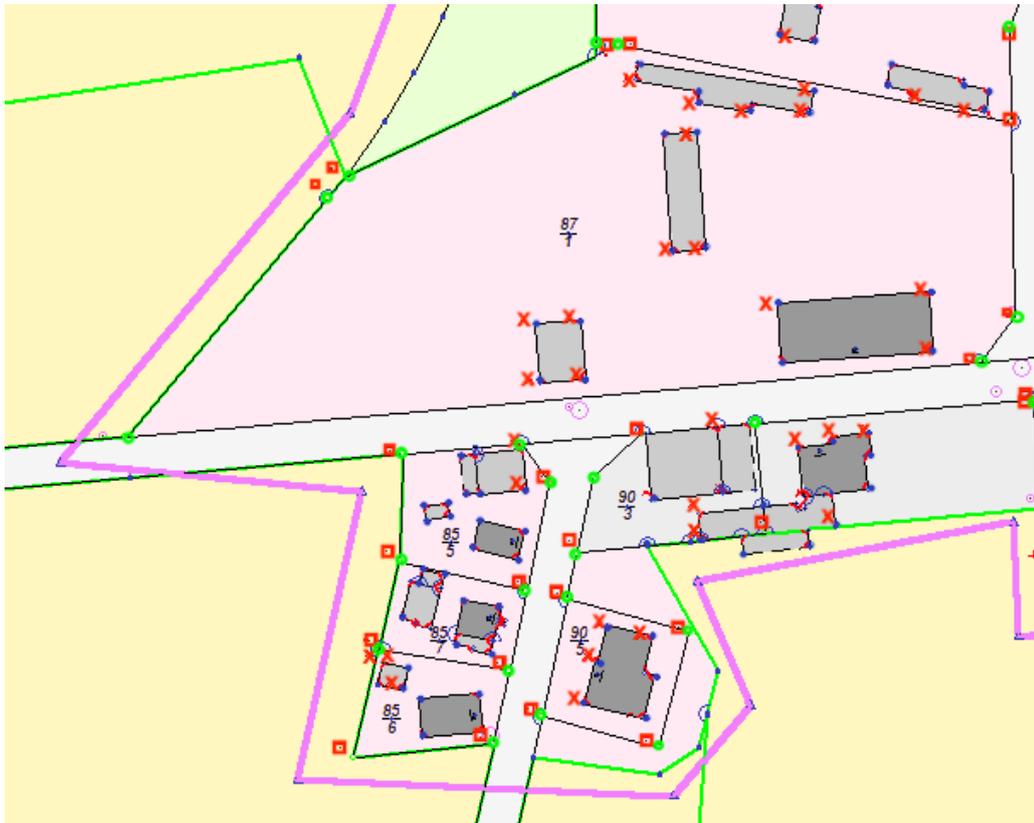


Abbildung 25: Ausschnitt des Untersuchungsgebiet Rohrstorf in TerraCAD

Weiterhin erfolgte die Detektion von geometrischen Bedingungen über automatische Suchalgorithmen. Vor der Systra-Ausgleichung wurden automatisiert die Geradlinigkeits- und Rechtwinkligkeitsbedingungen an den Flurstücksgrenzen und den Gebäuden erzeugt. Als letzter Schritt vor der Ausgleichung erfolgte die Passpunktzuordnung. Die Passpunktdichte und Passpunktwahl hat einen entscheidenden Einfluss auf das Homogenisierungsergebnis. Kriterien für eine geeignete Passpunktwahl sind in Kapitel 3.1 näher erläutert. Die Zuordnung der identischen Punkte erfolgt mit der Systra-Exportschnittstelle. Dabei werden grafische Kartenpunkte (grüne und blaue Kreise) den zugehörigen Objektpunkten (rote Kreuze und Vierecke) mittels der „Nearest-Neighbour-Methode“ zugeordnet. Mehrdeutige Zuordnungen und grafische Punkte, die aufgrund großer Abweichungen nicht zugeordnet werden konnten, benötigten eine manuelle Passpunktzuordnung.

Insgesamt werden für die **Homogenisierung** mit der Systra-Ausgleichung die geometrischen Bedingungen, die digitalisierten Koordinaten und die Passpunktkoordinaten zur Verfügung gestellt (Technet GmbH, 2010, S. 34ff.). In jeder der drei Stufen der Ausgleichung wird dabei eine flächenhafte Ausgleichung durchgeführt, die im Kapitel 3.1 näher beschrieben sind. Die Ausführung der nächsten Stufe konnte jeweils erst erfolgen, wenn in der aktuellen Stufe keine Fehlerwarnungen (NV-Warnung) ausgegeben wurden. Fehlermeldungen mussten kontrolliert und bearbeitet werden. Maßnahmen zur Fehlerbehebung sind beispielsweise das Ändern oder Löschen von geometrischen Bedingungen, das Beobachtungsgewicht zu null setzen oder die Anpassung der Steuerparameter (Technet GmbH, 2010, S. 26). Sobald in TerraCad/Systra Bedingungen hinzugefügt, gelöscht oder geändert werden, muss ein neuer Systra-Export erfolgen, damit die Schnittstellendateien geändert und die Bedingungen bei der Ausgleichung berück-

sichtigt werden. Aufgrund des hohen Grades an Inhomogenität im Untersuchungsgebiet Rohrstorf wurde die Ausgleichung mehrmals wiederholt, um ein ausreichendes Ergebnis zu erzielen.

Bei der Ergebnisübernahme wurden die Koordinatendateien für die transformierten Kartenpunkte übernommen und das Kartenbild in die Soll-Lage geschoben. Anschließend erfolgte eine Prüfung anhand von photogrammetrischen Daten und Laserscandaten. Ein Koordinatenaustausch hatte zu diesem Zeitpunkt noch nicht stattgefunden. Weiterhin wurde ein Flächenabgleich durchgeführt und ein Prüfplot erstellt. Im Anschluss erfolgte die Fortführung und der Punktaustausch. Dabei wird eine Erhebungsdatei erstellt, die in der EQK importiert werden kann. Sofern keine Fehlersituationen auftreten, kann das Projekt in die DHK fortgeführt werden und das Projekt wird abgeschlossen. Die durchgeführten Untersuchungen wurden nicht in die DHK fortgeführt. Anstelle des Exportes zur EQK wurden die Ergebnisse als Shape-Datei exportiert, um sie anschließend in QGIS auszuwerten.

Sobald alle Testfälle für das Untersuchungsgebiet abgeschlossen waren, wurden die Flurstücks- und Gebäudegeometrien mit ihren zugehörigen Punktorten in QGIS eingeladen. Der Import und die **Auswertung** erfolgte dabei größtenteils automatisiert mithilfe eines Python-Skriptes. Beim Import wurde den Layern direkt das Koordinatensystem und eine passende Symbologie zugewiesen. Im Anschluss erfolgte ein Matching der Gebäude- und Grenzpunkte zu den entsprechenden Punkten im Referenzdatensatz mittels der „Nearest-Neighbour-Methode“. Anschließend konnten mithilfe der QGIS-Funktion „Hublines“ **Differenzvektoren** zwischen den einzelnen Testfällen und der Basishomogenisierung ermittelt werden. Sofern eine Zuordnung mehrdeutig oder fehlerhaft war, wurde eine manuelle Korrektur vorgenommen. Mit dem Python-Skript wurde bei der Erstellung der Differenzvektoren direkt die Abweichungslänge bestimmt. Anhand der Richtung und Länge konnten Rückschlüsse auf die Homogenität, Ausreißeranalysen und Passpunktcluster erstellt werden. Zum Abschluss wurden alle Abweichungen zu den Passpunkten aus der Basishomogenisierung automatisiert in einer tabellarischen Form gespeichert. Die Tabelle dient zur statistischen Auswertung der Daten. Neben dem mittleren Wert der Abweichungen, werden die Standardabweichung, der Median, minimale und maximale Abweichungen sowie die Prozentzahl der Abweichungen über einen Meter bestimmt.

## 5 Ergebnisse im Hinblick der geometrischen Genauigkeit und Robustheit

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Untersuchungen im Hinblick auf die geometrische Genauigkeit und Robustheit präsentiert. Dafür werden die ermittelten Daten klassifiziert und visuell dargestellt. Zunächst wird auf die Qualität der automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren eingegangen und der aktuelle Entwicklungsstand der KI-basierten Gebäude beurteilt. Insbesondere werden im Anschluss die Ergebnisse der Homogenisierung und der Einfluss der Passpunktanzahl und -verteilung untersucht. Der Fokus liegt darauf, ob eine Verbesserung der Liegenschaftsgrafik auf Basis von Gebäuden zur Erreichung einer flächendeckenden geometrischen Genauigkeit von einem Meter möglich und sinnvoll ist. Die Ergebnisse werden anhand von grafischen Darstellungen und statistischen Analysen veranschaulicht.

### 5.1 Qualität der automatisch abgeleiteten Gebäudepasspunkte

Um Aussagen zur geometrischen Genauigkeit und Robustheit der automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren und den daraus resultierenden Gebäudepasspunkten ableiten zu können, wird im Folgenden die Abweichung der Zentroide der Gebäude zu denen aus Vermessungsunterlagen berechneten Gebäuden beleuchtet. Da kein absoluter Referenzdatensatz existiert, kann kein Vergleich zu den geome-

trischen Eigenschaften eines Modells oder einer Messung mit den tatsächlichen Eigenschaften des realen Objektes durchgeführt werden. Stattdessen bezieht sich die geometrische Genauigkeit in diesem Zusammenhang auf die Übereinstimmung der geometrischen Eigenschaften mit den berechneten Gebäuden auf Grundlage der Vermessungsunterlagen. Die geometrische Genauigkeit ist dadurch abhängig von der Genauigkeit des zugrundeliegenden Vermessungszahlenwerkes. Weiterhin beinhaltet die Berechnung der Gebäude aus Vermessungsunterlagen neben der Translation eine Korrektur von Geometriefehlern und Rotationen. Da der KI-basierte Ansatz lediglich eine flächenhafte Verbesserung anstrebt, ohne individuelle geometrische Fehler zu korrigieren, wurden die Zentroide der berechneten Gebäude ermittelt. Im Zuge der Neuberechnung der Zentroide wurden die ursprünglichen ALKIS-Gebäude verschoben. Vorhandene Geometriefehler und Drehungen im ALKIS-Datenbestand bleiben somit unberücksichtigt. Einzelne Gebäudepunkte können somit eine höhere geometrische Abweichung zwischen dem berechneten Modell und den KI-basierten-Gebäudedaten aufweisen. Gebäude mit signifikanten Änderungen verändern den Schwerpunkt so stark, dass ein Vergleich mit der KI-Position nicht zielführend wäre und werden deshalb nicht berücksichtigt. Mit diesem Vergleichsverfahren wird primär der Translationsbetrag der KI-Vektoren im Hinblick auf die geforderte Genauigkeit von einem Meter überprüft. Dabei wird zwischen den automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren und den aus den Segmentierungsergebnissen manuell generierten Vektoren differenziert. Die Ergebnisse der Untersuchung zur Rotation von Gebäuden werden ebenfalls miteinbezogen.

Die geometrische Genauigkeit der automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren wird durch eine Vielzahl an Faktoren beeinflusst. Dazu zählt die Qualität der digitalen Orthophotos, die Genauigkeit der zugrundeliegenden Erfassungsmethodik und Segmentierung, Umfang und Qualität des Trainingsdatensatzes sowie die gewählten Parameter zur Berechnung des Konfidenzwertes und Filterung der Verschiebungsvektoren. Weiterhin ist das Ergebnis abhängig von der Art der Gebäude und der Qualität der Referenzpunkte, weshalb die geometrische Genauigkeit von Fall zu Fall variieren kann. Dies ist insbesondere auch auf den Dachüberstand zurückzuführen. Dieser kann für jedes Gebäude individuell sein und wird im Deep Learning Framework generell mit 0,5 m angenommen. Im Vergleichsdatensatz dagegen handelt es sich um Grundrissdateien, die keinen Dachüberstand beinhalten. Das Ziel ist es, eine geometrische Genauigkeit von einem Meter nicht zu überschreiten. Weiterhin sollte das Ergebnis robust sein. In diesem Zusammenhang bedeutet das unter anderem, dass Verschiebungsvektoren für verschiedene Arten und Formen von Gebäuden erkannt werden können. Zudem sollte der KI-basierte Ansatz mit verschiedenen Qualitäten der digitalen Orthophotos zurechtkommen. Konkret meint das z. B. die Erkennung und Segmentierung von Gebäuden in DOP's und TrueDOP's. Die Parameter zur Bestimmung des Konfidenzwertes sollten so gewählt sein, dass sie für verschiedenste Gebietstypen optimale Ergebnisse liefern.

Die Qualität der digitalen Orthophotos hängt maßgeblich von der Auflösung ab. Die DOP's in Niedersachsen weisen eine Bodenauflösung von 20 cm auf. Das entspricht einer Standardabweichung  $\sigma_{xy}$  der georeferenzierten Lagekoordinaten von 0,4 m (Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland, 2020, S. 4). Dabei ist zu beachten, dass im verwendeten Datenbestand der niedersächsischen Orthophotos, die die Grundlage des Deep Learning Frameworks bilden, sowohl DOP's als auch TrueDOP's vorhanden sind. Die Qualität der Orthophotos als auch der resultierenden Segmentierungen und Verschiebungsvektoren ist dementsprechend heterogen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Erkennung von Gebäuden in TrueDOP's präziser erfolgt als bei herkömm-

lichen DOP's. Das Ziel des LGLN ist eine grundsätzliche Genauigkeit von unter 2 Pixeln für die Lage von Gebäuden. Derzeit wird von einem Stand von ungefähr 3 Pixeln ausgegangen, was ungefähr einer Abweichung von 0,5 m entspricht (Schmidt et al., 2022b, S. 6). Derzeit werden die automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren aufgrund von Änderungen im Datenbestand der digitalen Orthophotos aktualisiert. Um eine effektive Nutzung zu garantieren, ist es notwendig, in Zukunft auch Änderungen im ALKIS-Datenbestand zu berücksichtigen und den Aktualisierungszyklus der Verschiebungsvektoren entsprechend anzupassen.

Um die geometrische Genauigkeit der automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren zu ermitteln, wurde die Anzahl und Verteilung der Vektoren innerhalb der Untersuchungsgebiete sowie die Abweichung der Zentroide betrachtet. In Tabelle 2 wird die Anzahl der ermittelten Verschiebungsvektoren in den einzelnen Untersuchungsgebieten dargestellt. Zusätzlich zur Anzahl der Vektoren wird in der Tabelle in eckigen Klammern die Gesamtanzahl der Vektoren aufgezeigt, die durch den KI-basierten Ansatz erkannt wurden. Die Differenz der Zahlen entspricht der Anzahl der KI-Vektoren, die nicht die erforderliche Genauigkeit erreichen. Aus der nachfolgenden Tabelle wird deutlich, dass in den Gebieten nur eine geringe Anzahl an automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren für die Gebäude zur Verfügung steht (siehe dritte Zeile in Tabelle 2). Die geringe Anzahl resultiert vorwiegend aus unzureichenden Segmentierungen, der Parameterwahl und der Kardinalität. Bisher werden nur Verschiebungsvektoren mit einer Kardinalität bis 1:3 ermittelt. Die Parameterwahl zur Bestimmung des Konfidenzwertes hat einen entscheidenden Einfluss auf die Anzahl und die Qualität der ermittelten Verschiebungsvektoren. Dabei wird ein konservativer Ansatz verfolgt, um die Anzahl fehlerhafter Verschiebungen zu minimieren und eine bessere Qualität zu gewährleisten. Daraus folgt eine geringe Gesamtanzahl der zur Verfügung stehenden KI-Verschiebungsvektoren. Um optimale Ergebnisse zu erzielen, wäre allerdings für jedes Gebiet eine individuelle Parametrisierung notwendig. Im Durchschnitt liegen für 13,7 % der Gebäude in den Untersuchungsgebieten ein KI-Verschiebungsvektor vor.

Tabelle 2: Anzahl der KI-Verschiebungsvektoren pro Untersuchungsgebiet

Charakteristika	Rohrstorf	Kaierde	Marien- hufe	Colling- horster- moor	Mooraus- moor	West- rhauder- fehn
Anzahl Vektoren	5/[6]	4	3	3	4/[6]	13/[14]
Anzahl Gebäude	76	76	34	22	17	330
Gebäude mit automatischem Verschiebungs- vektor [%]	6,58	6,58	14,71	18,18	29,41	6,97
Gebäude mit manuellem Verschiebungs- vektor [%]	44,74	32,89	55,88	50,00	70,59	40,91

Betrachtet man zusätzlich alle manuell generierten Verschiebungsvektoren, kann die Anzahl der Gebäude mit Verschiebungsvektoren durchschnittlich um das Vierfache steigen (siehe vierte Zeile in Tabelle 2). Das bedeutet im Mittel ein Zuwachs von rund 35%. Tabelle 2 zeigt, dass es mit dem bisherigen Stand des Deep Learning Frameworks möglich ist, für bis zu 71% der Gebäude in den Untersuchungsgebieten Passpunkte zu generieren.

Eine geringe Anzahl an KI-Vektoren führt dazu, dass es nicht genügend Passpunkte gibt, um eine gute räumliche Verteilung bei der Homogenisierung zu gewährleisten. Dies kann dazu führen, dass bestimmte Bereiche nicht ausreichend abgedeckt werden und zu ungenauen Ergebnissen führen. Nähere Einzelheiten zum Einfluss der Passpunktanzahl sind in Kapitel 5.3 zu finden. Abbildung 26 zeigt die Verteilung der Vektoren im Untersuchungsgebiet Rohrstorf. Die rot markierten Gebäude zeigen die Gebäude, für die ein automatisch abgeleiteter Verschiebungsvektor vorliegt. Dabei wird deutlich, dass nur im südwestlichen Bereich KI-Verschiebungsvektoren vorliegen und somit keine optimale Verteilung erreicht wird.



Abbildung 26: Verteilung der automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren im Untersuchungsgebiet Rohrstorf

Mit der höheren Anzahl an Verschiebungsvektoren durch die manuelle Erzeugung verbessert sich insbesondere in den Ortslagen die räumliche Verteilung der Passpunkte aus Verschiebungsvektoren erheblich. Außerdem steigt damit die Wahrscheinlichkeit, dass Verschiebungsvektoren in passpunktfreien Bereichen vorliegen und als zusätzliche Passpunkte für die Homogenisierung genutzt werden können. Abbildung 27 zeigt in Rot die Gebäude, die als Passpunkte für die Homogenisierung genutzt werden können und die dadurch verbesserte räumliche Verteilung der Passpunkte.



Abbildung 27: Verteilung der manuell generierten Verschiebungsvektoren im Untersuchungsgebiet Rohrstorf

In den Feldlagen werden Gebäude oftmals gut erkannt, da sie alleinstehend sind und sich gut von der Umgebung abheben. Das zeigt auch die hohe Prozentzahl der Gebäude mit Verschiebungsvektoren im Untersuchungsgebiet Moorausmoor (siehe Tabelle 2). Allerdings sind in Feldlagen insgesamt weniger Gebäude vorhanden und diese sind häufig an Straßenachsen ausgerichtet, weshalb die räumliche Verteilung der Gebäudepositionen nicht ausgewogen ist und den Festlegungen des Verfahrens Homogenisierung Light nicht genügt. Weiterführende Erläuterungen sind in Kapitel 5.4 aufgeführt. In Abbildung 28 wird deutlich, dass die Gebäude im Untersuchungsgebiet Collinghorstermoor nur im nördlichen Bereich entlang der Straße zu finden sind. Für das Gebäude im südwestlichen Bereich des Untersuchungsgebietes wurde kein automatisch abgeleiteter Verschiebungsvektor generiert. Verschiebungsvektoren liegen nur für die rot gefüllten Gebäudeumringe vor. Dabei ist positiv festzuhalten, dass selbst bei einer geringen Anzahl an Gebäuden, wie es in Feldlagen der Fall ist, oftmals automatisiert Verschiebungsvektoren erkannt werden können. Eine gute räumliche Verteilung ist jedoch nur erreichbar, wenn die Gebietsgrößen so groß gewählt werden würden, dass das Vorhandensein von Gebäuden gewährleistet werden kann und für alle Gebäude jeweils ein entsprechender Verschiebungsvektor vorliegen würde. Dies ist mit dem jetzigen Stand der Technik nicht möglich.



Abbildung 28: Verteilung der automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren im Untersuchungsgebiet Collinghorstermoor

Insgesamt ist mit dem Vergleichsverfahren zu berechneten Gebäudepositionen eine durchschnittliche geometrische Genauigkeit von 0,65 m festzustellen. Rund 13% der automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren erreichen nicht die erforderliche Genauigkeit von einem Meter. Der Grund dafür liegt bei den betroffenen Verschiebungsvektoren an einer unzureichenden Segmentierung der Gebäude in den digitalen Orthophotos. Einige der KI-Verschiebungsvektoren weichen deshalb erheblich von der erwarteten Genauigkeit ab. Trotz dieser Ausreißer, ist die Mehrheit der KI-Verschiebungsvektoren jedoch sehr genau und liegen unter 0,5 m. Die geringste Abweichung beträgt sogar nur 0,03 m. Die nachfolgende Tabelle liefert einen Überblick über die statistischen Ergebnisse der automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren.

Tabelle 3: Auswertung der KI-Verschiebungsvektoren mithilfe von statistischen Größen

	Mittelwert [m]	Standardabweichung [m]	Median [m]	Minimum [m]	Maximum [m]
Rohrstorf	0,48	0,48	0,29	0,11	1,51
Westrhauderfehn	0,49	0,45	0,39	0,06	1,94
Moorausmoor	1,59	2,06	0,49	0,03	5,59
Collinghorstermoor	0,47	0,31	0,27	0,24	0,91
Kaierde	0,60	0,28	0,75	0,12	0,79
Marienhaf	0,25	0,13	0,25	0,12	0,38
Gesamt	0,65	0,97	0,38	0,03	5,59

Die geometrische Genauigkeit der manuell generierten Verschiebungsvektoren liegt im Schnitt bei 0,44 m. Dabei erreichen etwa 63% der Vektoren eine Genauigkeit von 0,5 m. Nachfolgend wird entsprechend ein Positiv- und ein Negativbeispiel für die Erkennung von Verschiebungsvektoren aus den Segmentierungsergebnissen gezeigt. Abbildung 29 zeigt, dass die berechnete Gebäudeposition (roter Umring) und der KI-basierte Gebäudeumring (blauer Umring) im Untersuchungsgebiet Moorausmoor nahezu identisch sind. In Abbildung 30 erkennt man anhand der hellblauen KI-Segmentierung, dass die Gebäudeform im selben Untersuchungsgebiet nicht richtig erkannt wurde. Die Abweichungen des berechneten Gebäudes und des KI-basierten Gebäudes überschreiten die Toleranz von einem Meter. Weitere Beispiele zu allen Untersuchungsgebieten sind im Anhang im Abschnitt B zu finden.

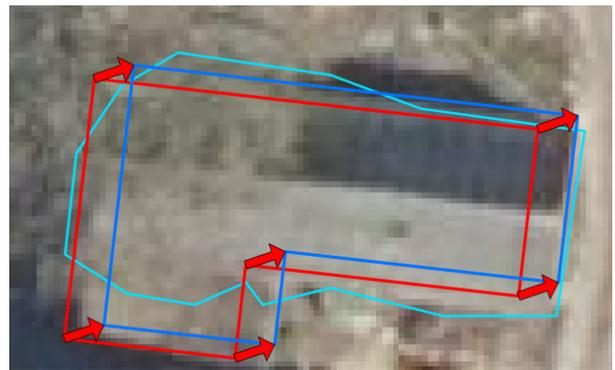


Abbildung 29: Positiv-Beispiel Moorausmoor

Abbildung 30: Negativ-Beispiel Moorausmoor

Alle verwendeten Verschiebungsvektoren beschreiben zum jetzigen Entwicklungsstand nur eine Translation von Gebäuden. Rotationen werden nicht berücksichtigt. Um die Rotation des Gebäudes zu bestimmen, werden weitere Informationen benötigt, wie zum Beispiel die Verwendung von Referenzgeometrien oder die Verwendung von mehreren Sichtweisen des Gebäudes. Dazu eignen sich weitere Luftbilder, Schrägluftbilder oder auch Laserscandaten. Auch die Verwendung von verschiedenen Methoden wie der Bestimmung von Euler-Winkeln, die Berechnung von Drehwinkel gemäß des Wolf-Bursa-Modells oder der Berechnung von Rotationsmatrizen kann helfen, die Rotation zu bestimmen (Niemeier, 2008, S. 349). Während der Untersuchungen fiel auf, dass immer wieder einzelne Gebäude gedreht vorlagen. Sowohl im digitalen Orthophoto, als auch im berechneten Gebäudemodell aus den Vermessungsunterlagen war eine Rotation gegenüber dem ALKIS-Datenbestand zu erkennen. Im Rahmen der Untersuchung wurde die Rotation der Gebäude für drei Untersuchungsgebiete genauer betrachtet, um Aussagen über die Rotation der Gebäude zu gewinnen und die Notwendigkeit der Berücksichtigung von Rotationen bei der Implementierung von KI-Verschiebungsvektoren zu evaluieren. Um individuelle Geometriefehler zu vermeiden, wurde anstelle des berechneten Vergleichsmodells eine eigene Positionierung anhand des digitalen Orthophotos vorgenommen, um die Rotation zu beurteilen. Insgesamt wurden Rotationen von Gebäuden bis zu fünf Grad festgestellt. Die Rotationsrichtung innerhalb der Untersuchungsgebiete war dabei überwiegend inhomogen. Gebäude konnten sowohl nach links- als auch nach rechts gedreht vorliegen, wie Abbildung 31 zeigt. Blaue Gebäudeumringe zeigen eine Rotation nach links an und rote Gebäudeumringe eine Rotation nach rechts. Die gelben Gebäudeumringe zeigen Gebäude, die nicht rotiert sind.



Abbildung 31: Rotationsrichtung der Gebäude im Untersuchungsgebiet Marienhaf

Die resultierende Abweichung aufgrund der Rotation wird durch den Drehwinkel und der Größe des Gebäudes beeinflusst. Die nachfolgende Tabelle zeigt die theoretisch resultierende Sehnenlänge in Abhängigkeit des Drehwinkels und der Entfernung zum Flächenschwerpunkt. Dabei wird deutlich, dass bei kleinen Gebäuden geringere Abweichungen zu erwarten sind. Der Mittelwert der Rotationen lag in allen Untersuchungsgebieten zwischen  $1^\circ$  und  $2^\circ$ . Bei einer angenommenen mittleren Entfernung von 10 m bis 15 m beträgt die theoretische, durchschnittliche Abweichung zwischen 0,2 m und 0,5 m (rote Zellen). Die Abweichung bezieht sich dabei auf das Gebäude an sich und nicht auf die geometrische Lage gegenüber der Referenz. In den Untersuchungen wurde anhand einer Stichprobe eine durchschnittliche Abweichung von 0,32 m an den Gebäudeecken festgestellt.

Tabelle 4: Abweichung an den Gebäudeecken in Abhängigkeit von dem Rotationswinkel und der Entfernung vom Flächenschwerpunkt in Metern

<b>Entfernung [m]</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>30</b>
$1^\circ$	0,09	0,17	0,26	0,35	0,52
$2^\circ$	0,17	0,35	0,52	0,70	1,05
$3^\circ$	0,26	0,52	0,79	1,05	1,57
$4^\circ$	0,35	0,70	1,05	1,40	2,09
$5^\circ$	0,44	0,87	1,31	1,74	2,62

Folglich hat die Rotation einen Einfluss auf die geometrische Genauigkeit der Verschiebungsvektoren, da sie die Position und Orientierung des Gebäudes ändern kann, was Auswirkungen auf die Berechnungen von Verschiebungen haben kann. Bezüglich ihrer Anwendbarkeit für die Homogenisierung, konnte festgestellt werden, dass bei einer Anforderung an eine Genauigkeit von einem Meter, die Rotation einen geringeren Einfluss auf die Genauigkeit hat als die Translation. Somit verursacht die Rotationen in der Regel kleinere Änderungen in der Position und Orientierung des Gebäudes im Vergleich zu Translationen. Durch die Drehung der Gebäude konnten bei einer Genauigkeitsanforderung von einem Meter dieselben Gebäude diese Anforderungen erfüllen wie bei einer Betrachtung ohne Drehung. Lediglich im Untersuchungsgebiet Rohrstorf konnte aufgrund der Drehung ein Gebäude mehr für die Passpunkterzeugung verwendet werden. In den anderen Untersuchungsgebieten war die Anzahl der Gebäude gleich. Bei einer Genauigkeitsbetrachtung von 0,5 m dagegen, spielte die Drehung eine maßgebliche Rolle. Im Untersuchungsgebiet Moorausmoor erreichten anstelle von zwei Gebäuden nach einer Drehung fünf Gebäude die Genauigkeit von 0,5 m. Im Untersuchungsgebiet Rohrstorf waren es sogar rund 20% mehr Gebäude.

Zusammenfassend kann für eine große Mehrheit das Ziel einer geometrischen Genauigkeit von einem Meter erreicht werden. Aufgrund einiger Ausreißer wird die erforderliche geometrische Genauigkeit jedoch nicht vollständig erreicht. Folglich kann die Nutzung der automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren zur Zielerreichung nicht gewährleistet werden und deshalb ist es unerlässlich, diese noch zu verbessern. Auch die Rotation beeinflusst die geometrische Genauigkeit der Verschiebungsvektoren. Durch die Berücksichtigung von Rotationen kann diese weiter verbessert werden. Die Verbesserung wirkt sich bei einer Genauigkeitsanforderung von einem Meter weniger auf die Anzahl der Verschiebungsvektoren als auf die geometrische Genauigkeit selbst aus. Allerdings kann die Berücksichtigung von Rotationen in Einzelfällen relevant werden.

Die Robustheit des KI-basierten Ansatzes ist durch die Segmentierung der Gebäude und die Parametrisierung des Konfidenzwertes stark limitiert. Besonders bei Gebäuden mit einem unregelmäßigen Dachüberstand und bei dichten Bebauungen führt die KI-basierte Segmentierung oftmals zu ungenauen und fehlerhaften Ergebnissen. Größere Abweichungen entstehen außerdem bei zusammenhängenden Gebäudekomplexen (1:n-Kardinalität) und bei KI-Segmentierungen, die nur eine geringe Übereinstimmung mit der Form der ALKIS-Gebäude aufweisen. Der Ansatz ist robust gegenüber der Datengrundlage der Orthophotos. Eine Differenz in der geometrischen Genauigkeit zwischen Gebieten, deren Datengrundlage auf True-Orthophotos beruht, zu Gebieten mit DOP's ist nicht zu erkennen. Auch verschiedene Gebäudetypen, Dachformen und -farben wirken sich nicht signifikant auf die Generierung der automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren aus.

Insgesamt wird nur eine geringe Anzahl an Verschiebungsvektoren in den Untersuchungsgebieten ermittelt. Dennoch ist das Potenzial der KI-basierten Erkennung von verschobenen Gebäuden unverkennbar. Durch einen angepassten Ableitungsprozess kann die Anzahl der automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren noch deutlich gesteigert werden. Dies wurde vor allem durch die höhere Anzahl der Vektoren durch die manuelle Generierung aus den Segmentierungsergebnissen deutlich. Mit einer angepassten Parametrisierung oder einer verbesserten Segmentierung kann die Anzahl der Verschiebungsvektoren deutlich erhöht werden und bietet die Chance, für eine große Menge von Gebäuden in Niedersachsen Passpunkte zur Verfügung zu stellen. Dies leistet einen großen Beitrag zur Zielerreichung einer flächenhaften Genauigkeit von einem Meter.

## 5.2 Qualität der gebäudebasierten Homogenisierung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der gebäudebasierten Homogenisierung der amtlichen Liegenschaftsgrafik präsentiert. Im Einzelnen werden die verwendeten Auswertemethoden beschrieben, die erzielten Ergebnisse anhand von Beispielen veranschaulicht und die Anwendbarkeit der Ergebnisse für die weitere Verwendung diskutiert.

Um Aussagen zur Eignung der gebäudebasierten Homogenisierung und der Verwendung von automatisch abgeleiteten Gebäudepasspunkten für die Homogenisierung treffen zu können, wird im Folgenden die Abweichung der in Kapitel 4.1 vorgestellten Testszenarien zur Basishomogenisierung betrachtet. Wie in Kapitel 4.1 bereits erwähnt, kann die Basishomogenisierung nicht als fehlerfreier Referenzdatensatz angenommen werden. Aufgrund des Verzichtes auf weitere geometrische Bedingungen und Passpunkte ist die geometrische Genauigkeit nur in den Passpunkten der Untersuchungsgebiete einwandfrei. Nicht-Passpunkte werden deshalb nur im visuellen Vergleich zur Basishomogenisierung betrachtet, während sie in der statistischen Betrachtung unberücksichtigt bleiben, da keine Gewissheit über die wirkliche Lage des Punktes besteht. Der Vergleich der verschiedenen Testszenarien wird im Folgenden in drei Abschnitte untergliedert. Zunächst wird der Vergleich der Basishomogenisierung zu der gebäudebasierten Homogenisierung auf Grundlage von Vermessungsunterlagen behandelt (Testfall 2). Im Anschluss folgt der Vergleich zur KI-gestützten Homogenisierung (Testfall 3–7) und zum kombinierten Ansatz (Testfall 8–9), der KI-gestützte Gebäudepasspunkte als zusätzliche Passpunkte beinhaltet. Innerhalb der Abschnitte wird zwischen Orts- und Feldlagen sowie zwischen Gebäude- und Grenzpunkten differenziert und eine Gesamtübersicht erstellt. Um die geometrische Genauigkeit und Robustheit der erhaltenen Daten zu bewerten und eventuelle Mängel oder Unsicherheiten zu identifizieren, erfolgt eine visuelle und statistische Analyse der Ergebnisse. Zudem werden Aussagen zur Passpunktanzahl und -verteilung getroffen sowie Herausforderungen und Grenzen der jeweiligen Testszenarien herausgearbeitet.

### Vergleich Basishomogenisierung – gebäudebasierte Homogenisierung

Zunächst werden die Ergebnisse der gebäudebasierten Homogenisierung mit berechneten Gebäudepasspunkten aus Vermessungsunterlagen (Testfall 2) im Vergleich zur Basishomogenisierung betrachtet. Ohne die Verwendung von Grenzpunkten bei der Homogenisierung vermindert sich die Anzahl der Passpunkte um etwa die Hälfte. Der Einfluss der Passpunktanzahl und -verteilung wird in Kapitel 5.3 und 5.4 näher betrachtet.

Insgesamt erreichen im Durchschnitt aller Untersuchungsgebiete ca. 90% der Passpunkte eine geometrische Genauigkeit von einem Meter. In Tabelle 5 wird deutlich, dass die Anzahl der Passpunkte, die eine geometrische Genauigkeit von einem Meter nicht erreichen, von Untersuchungsgebiet zu Untersuchungsgebiet stark variiert. Die Spannweite liegt in den Untersuchungsgebieten zwischen 1% und 19%. Der Gesamtdurchschnitt von 90% sollte deshalb auf jeden Fall durch weitere Untersuchungen validiert werden. Generell ist diese Angabe stark abhängig von der Passpunktanzahl, der Verschiebungsbeträge und dem Verhältnis von Grenz- und Gebäudepunkten innerhalb des Untersuchungsgebietes. Bei den Passpunkten, die die erforderliche Genauigkeit nicht erreichen, handelt es sich ausschließlich um Grenzpunkte. Nichtsdestotrotz wird für eine große Mehrheit der Punkte eine Genauigkeit von einem Meter erreicht. Mit einem Gesamt-Mittelwert von 0,31 m und einer mittleren Standardabweichung von 0,44 m ist die Abweichung in großen Teilen sogar unter 0,5 m.

Tabelle 5: Statistische Auswertung der gebäudebasierten Homogenisierung (Testfall 2)

	Mittelwert [m]	Standard- abweichung [m]	Gesamtzahl der Passpunkte	Anzahl der Passpunkte mit Abweichungen über 1 m [%]
Rohrstorf	0,31	0,66	217	11,06
Kaierde	0,12	0,23	189	1,59
Marienhafe	0,48	0,59	85	18,82
Collinghorstermoor	0,43	0,41	106	9,43
Moorausmoor	0,35	0,51	68	13,24
Westrhauderfehn	0,16	0,23	739	0,68
Gesamt	0,31	0,44	1404	9,14

Dabei ist zu beachten, dass besonders in Ortslagen die Anzahl der Gebäudepasspunkte die Anzahl der Grenzpunkte signifikant übersteigt. Die Statistik wird dadurch maßgeblich beeinflusst, da natürlich keine Abweichungen an Gebäuden mit Passpunkten auftreten. Betrachtet man nur die Abweichungen an den Grenzpunkten, beträgt die mittlere Abweichung rund 0,7 m. Die Anzahl der Punkte mit Abweichungen über einem Meter zwischen der gebäudebasierten Homogenisierung (Testfall 2) und der Basishomogenisierung liegt dann bei 20% (siehe Anhang Abschnitt C). Die Spannweite reicht in diesem Fall sogar von 1% bis 39%. Bei der Differenzierung von Orts- und Feldlagen sind keine signifikanten Unterschiede festzustellen. Tendenziell haben die Feldlagen eine etwas höhere Abweichung als die Ortslagen. Grundsätzlich hängt die Robustheit des Ergebnisses aber primär von der Homogenität des Untersuchungsgebietes und der Anzahl lokaler Ausreißer ab. Das wird vor allem im Vergleich der Untersuchungsgebiete Kaierde und Rohrstorf deutlich. Das Untersuchungsgebiet Kaierde ist ein recht homogenes Gebiet und führt zu einer Prozentzahl von 3,8%, während das Untersuchungsgebiet Rohrstorf von vielen Inhomogenitäten geprägt ist und 39% der Punkte keine Abweichungen unter einem Meter gewährleisten (siehe Anhang Abschnitt C).

Gründe für die hohe Abweichung zum Referenzpunkt sind oftmals, dass diese Punkte in eine andere Richtung oder um einen anderen Betrag verändert wurden als die umliegenden Gebäudepositionen. Dies wird am Beispiel des Untersuchungsgebiets Rohrstorf verdeutlicht. Abbildung 32 zeigt, dass die Gebäude (hellgrün) von der ursprünglichen Position (grau) nach Westen verschoben wurden, während die Grenzpunkte (dunkelgrün) nach Osten verschoben sind. Die roten Pfeile zeigen die Verschiebungsrichtungen an.

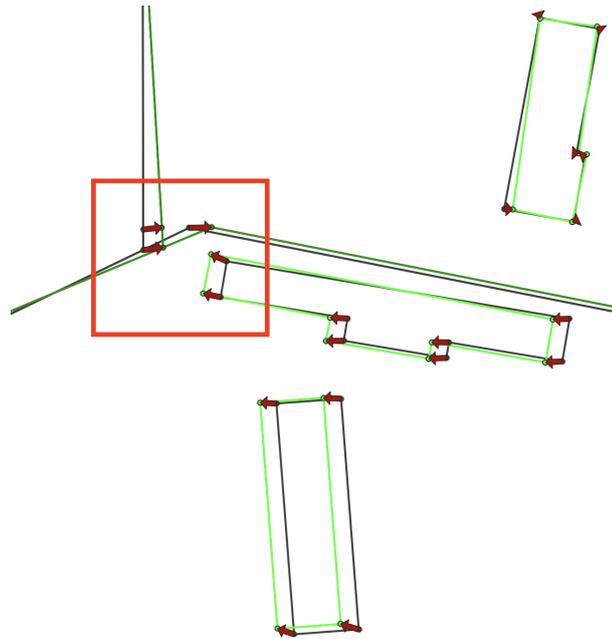


Abbildung 32: Verschiebungsrichtung ALKIS-Basishomogenisierung

Das Resultat einer gebäudebasierten Homogenisierung nach Testfall 2 ist in Abbildung 33 dargestellt. Während die Gebäude an die richtige Position geschoben wurden, wurde die Flurstücksgrenze analog zu den Gebäuden nach Westen geschoben (rote Linien). Die Abweichung zum Referenzpunkt (rote Pfeile) ist bei diesen Grenzpunkten nach der Homogenisierung signifikant größer als vor der Homogenisierung (graue Linien).

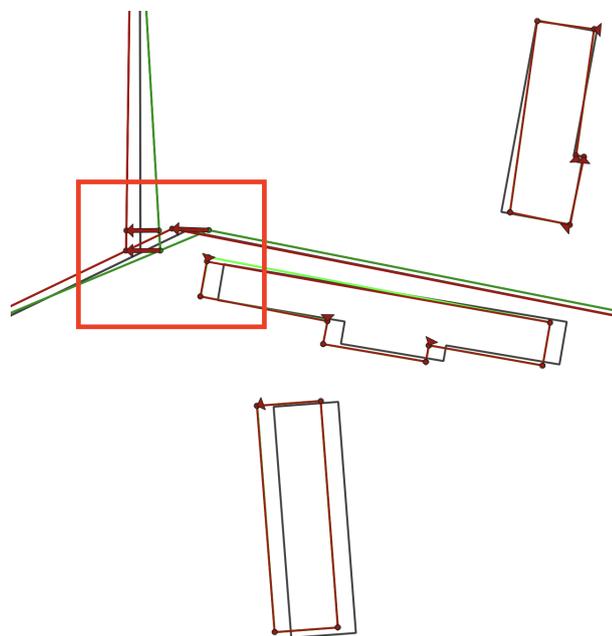


Abbildung 33: Verschiebungsrichtung Gebäudebasierte Homogenisierung-Basishomogenisierung

Auch Veränderungen um einen anderen Betrag führen zu größeren Abweichungen, wie am Beispiel vom Untersuchungsgebiet Collinghorstermoor zu sehen ist. Die roten Vektoren in Abbildung 34 zeigen Verschiebungen zwischen der ursprünglichen, grafischen Position (graue Linien) und der geometrischen Lage nach der Basishomogenisierung (grüne Linien) von über 2 m. Dazu gehören vor allem die Gebäu-

devektoren im oberen Bildbereich und der linke Grenzpunkt im unteren Bildbereich. Der rosane Vektor im unteren Bildbereich zeigt eine Verschiebung an den Grenzpunkten zwischen 1,5 und zwei Metern und der graue Vektor zeigt eine Verschiebung unter 1,5 m. Der Verschiebungsbetrag variiert dementsprechend lokal über einen Meter. Das hat beim Testfall 2 (siehe Abbildung 35) zur Folge, dass die Flurstücksgrenzen zu weit nach Osten verschoben werden. Bei den rechten Grenzpunkten im unteren Bildbereich entstehen dadurch Abweichungen von über einem Meter zwischen dem Ergebnis der gebäudebasierten Homogenisierung (rote Linien) und der Basishomogenisierung (grüne Linien). Diese sind in Abbildung 35 durch den roten Vektor gekennzeichnet.

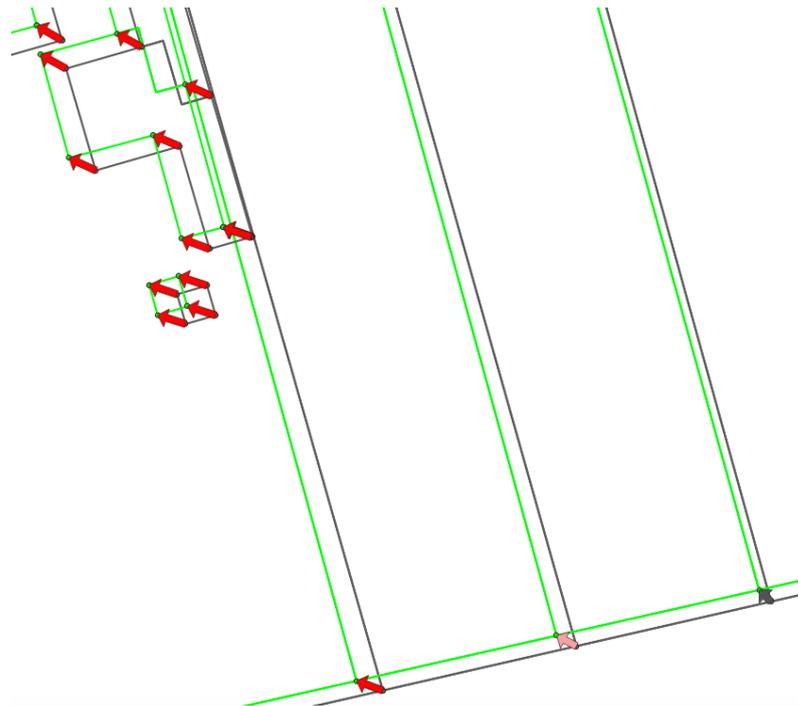


Abbildung 34: Verschiebungsbetrag ALKIS-Basishomogenisierung

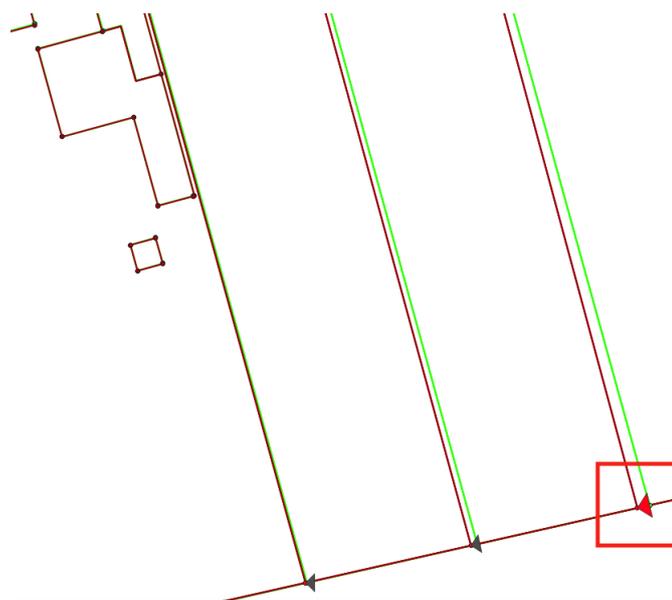


Abbildung 35: Differenzen zwischen der gebäudebasierten Homogenisierung (Testfall 2) und der Basishomogenisierung

Diese Problematik tritt auch vermehrt bei Nachbarschaftsbrüchen auf. Das nachfolgende Beispiel in Abbildung 36 im Untersuchungsgebiet Marienhafen zeigt, dass die Gebäude bereits weitestgehend ausgetauscht sind und an der korrekten Position liegen oder nur noch geringe Abweichungen auftreten. Die Geometrien der gebäudebasierten Homogenisierung (rote Linien), der Basishomogenisierung (grüne Linien) und der ALKIS-Daten (graue Linien) überlagern sich. Die umliegenden Flurstücksgrenzen sind noch nicht ausgetauscht. Eine gebäudebasierte Homogenisierung nach Testfall 2 ist in diesen Situationen nicht zielführend. Die Abweichungen zwischen Testfall 2 und der Basishomogenisierung sind dann oftmals größer als ein Meter (rote Vektoren).

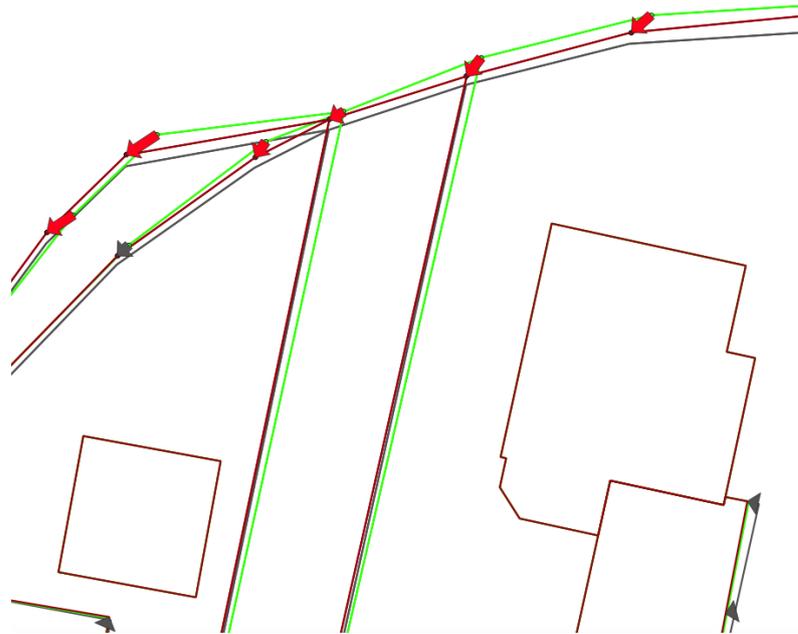


Abbildung 36: Differenzen zwischen der gebäudebasierten Homogenisierung und der Basishomogenisierung bei Nachbarschaftsbrüchen

### Vergleich Basishomogenisierung – KI-gestützte Homogenisierung

Bei der KI-gestützten Homogenisierung wurden ausschließlich Passpunkte aus Verschiebungsvektoren verwendet. Für die Bewertung wurden ebenfalls einige Testszenarien zusammengefasst. Da in allen Untersuchungsgebieten nur wenige automatisch abgeleitete Verschiebungsvektoren zur Verfügung standen, entspricht dies jeweils dem Testfall mit einer geringen Anzahl (Testfall 3). Insbesondere in Feldlagen konnte die Passpunktanzahl und Verteilung kaum variiert werden. Dementsprechend konnten nicht alle Testszenarien in allen Untersuchungsgebieten durchgeführt werden. Die Testszenarien mit einer variierten Passpunktverteilung wurden jeweils mit einer mittleren Anzahl an Passpunkten durchgeführt (Testfall 6–8). Der Testfall mit einer mittleren Anzahl entspricht gleichzeitig dem Testszenario mit einer guten räumlichen Verteilung (Testfall 4 = Testfall 6). In den Feldlagen konnte die Passpunktverteilung und eine mittlere Passpunktanzahl nicht untersucht werden. Die Ergebnisse beziehen sich daher nur auf die untersuchten Ortslagen.

Da die Ergebnisse der KI-gestützten Homogenisierung sehr große Spannweiten und Differenzen aufweisen, ist eine Betrachtung der Gesamtergebnisse nicht aussagekräftig. Im Folgenden werden die Ergebnisse deshalb an einem positiven und negativem Beispiel von Ortslagen erläutert. Weiterhin wird ein Ergebnis in Feldlagen näher betrachtet. Für Einzelheiten sind die Ergebnisse aller Untersuchungsgebiete im Anhang im Abschnitt D zusammengeführt. Die Werte entsprechen dabei dem Mittel aus allen Pass-

punkten, sofern dieser Testfall dort durchgeführt wurde. Insgesamt ist die Anzahl der Passpunkte, die eine Abweichung über einem Meter zur Basishomogenisierung aufweisen, höher als bei Testfall 2. Besonders bei einer geringen Anzahl oder einer schlechten räumlichen Verteilung der Passpunkte sinkt die Qualität des Homogenisierungsergebnisses. Bei einer geringen Passpunktanzahl übersteigt der Mittelwert in zwei von sechs Fällen die 1m-Toleranz und führt zu Abweichungen von über sieben Meter zwischen Testfall 3 und der Basishomogenisierung (siehe Tabelle 6). Im Vergleich der Maximalwerte der KI-gestützten Homogenisierung bei einer geringen Passpunktanzahl mit der maximalen Abweichung vor der Homogenisierung, fällt auf, dass die Abweichung in einigen Fällen deutlich steigt. Im Untersuchungsgebiet Rohrstorf gab es vor der Homogenisierung maximale Abweichungen von knapp vier Metern. Nach der Homogenisierung mit den automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren traten Abweichungen von bis zu sieben Metern auf (siehe Tabelle 6). In diesem Untersuchungsgebiet ist die Anzahl der Passpunkte mit einer Abweichung von über einem Meter bei 79%.

Tabelle 6: Statistische Auswertung der KI-gestützten Homogenisierung im Untersuchungsgebiet Rohrstorf

	geringe Anzahl	mittlere Anzahl/ gute räumliche Verteilung	hohe Anzahl	schlechte räumliche Verteilung
Mittelwert [m]	2,63	0,71	0,73	1,03
Standardabweichung [m]	1,62	0,60	0,61	0,85
Minimum [m]	0,05	0,02	0,01	0,01
Maximum [m]	7,24	4,10	4,11	4,41
Median [m]	2,64	0,52	0,56	0,74
durchschnittliche Anzahl über 1m [%]	78,80	18,89	22,12	39,63

Im Untersuchungsgebiet Kaierde liegt die Prozentzahl der Passpunkte mit einer Abweichung von über einem Meter im gleichen Testszenario gerade mal bei 5% (siehe Tabelle 7). Die großen Schwankungen werden auch anhand des folgenden Boxplot-Diagrammes in Abbildung 37 deutlich. Insbesondere das Untersuchungsgebiet Rohrstorf weist hohe Schwankungen bei den Abweichungen zu den Referenzpunkten auf. Positiv festzuhalten ist, dass in den untersuchten Feldlagen (grüne Darstellungen) trotz einer geringen Passpunktanzahl gute Ergebnisse erzielt wurden. Ein möglicher Grund dafür ist, dass Feldlagen nicht so vielen Veränderungen unterliegen wie Ortslagen. In Ortslagen finden gerade in Bezug auf Bebauung i. d. R. mehr Vermessungen statt. Dadurch resultieren unterschiedliche Entstehungs- und Veränderungszeitpunkte, die im Endeffekt zu Inhomogenitäten führen.

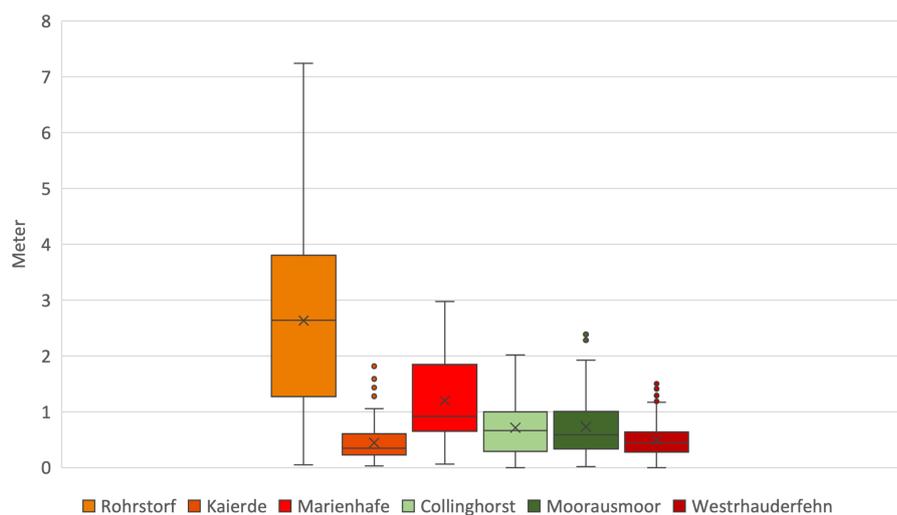


Abbildung 37: Boxplot-Diagramm der KI-gestützten Homogenisierung mit einer geringen Passpunkanzahl (Testfall 3)

Bei einer mittleren Passpunkanzahl und einer guten räumlichen Verteilung (Testfall 4) erhöht sich die Qualität des Ergebnisses und mehr Passpunkte erreichen die geometrische Genauigkeit von einem Meter. Das Testszenario mit einer hohen Passpunkanzahl (Testfall 5) führt zu keiner Verbesserung gegenüber der mittleren Anzahl. Die Spannweite reicht in beiden Testszenarien von etwa 5% (siehe Tabelle 7) bis 22% (siehe Tabelle 6).

Tabelle 7: Statistische Auswertung der KI-gestützten Homogenisierung im Untersuchungsgebiet Kaierde

	geringe Anzahl	mittlere Anzahl/ gute räumliche Verteilung	hohe Anzahl	schlechte räumliche Verteilung
Mittelwert [m]	0,44	0,42	0,56	0,50
Standardabweichung [m]	0,32	0,31	0,31	0,37
Minimum [m]	0,03	0,05	0,05	0,05
Maximum [m]	1,81	1,75	1,78	1,84
Median [m]	0,34	0,33	0,52	0,39
durchschnittliche Anzahl über 1m [%]	5,29	4,76	5,29	11,11

In Feldlagen weisen die Statistiken ähnliche Ergebnisse auf. Im Untersuchungsgebiet Collinghorstermoor wird noch einmal mehr deutlich, dass eine höhere Anzahl nicht zwangsläufig zu einem besseren Ergebnis führt (siehe Anhang Abschnitt D Tabelle 12). Bei einer geringen Passpunkanzahl (Testfall 3) erreichen 24% der Punkte nicht die erforderliche geometrische Genauigkeit von einem Meter. Bei einer hohen Passpunkanzahl (Testfall 5) sind es sogar 30%. Mögliche Gründe für die höhere Anzahl an Passpunkten, die eine Abweichung von über einem Meter zur Basishomogenisierung aufweisen, können Extrapolationen und Inhomogenitäten sein. Die genutzten Passpunkte erreichen oftmals gerade die

erforderliche geometrische Genauigkeit von einem Meter. Ungenauigkeiten in diesen Passpunkten übertragen sich um ein Vielfaches auf die umliegenden Grenz- und Gebäudepunkte und das kann gerade im Hinblick auf die zahlreichen Inhomogenitäten zu größeren Abweichungen führen. Die Passpunkte sind dann repräsentativ genug, um eine flächenhafte geometrische Genauigkeit von einem Meter zu erzielen.

Insgesamt hängt die Genauigkeit der Ergebnisse stark von der Homogenität und der Anzahl und Verteilung der Gebäude in der Umgebung ab. Auch bei Verwendung von KI-gestützter Homogenisierung können Abweichungen durch Verschiebungen von Passpunkten in unterschiedliche Richtungen oder um unterschiedliche Beträge nicht vollständig vermieden werden. Dazu zählen vor allem auch Nachbarschaftsbrüche, die zu großen Abweichungen führen, da die Grenz- und Gebäudepunkte um unterschiedliche Beträge verschoben werden. Die Ergebnisse der KI-gestützten Homogenisierung sind insgesamt nicht so zuverlässig wie die der gebäudebasierten Homogenisierung, da die Unsicherheiten in den Passpunkten größer sind und die Passpunktanzahl insgesamt geringer ist. Es bestehen jedoch dieselben grundlegenden Einschränkungen und Herausforderungen.

### **Vergleich Basishomogenisierung – kombinierte Homogenisierung**

Der kombinierte Ansatz wurde in zwei Varianten unterschieden. Die Basishomogenisierung wurde zum einen ausschließlich mit den automatisch abgeleiteten Gebäudepasspunkten ergänzt (Testfall 8) und zum anderen mit allen Passpunkten, die manuell aus den Segmentierungsergebnissen erzeugt werden konnten (Testfall 9). Vorab berechnete Passpunkte aus Vermessungsunterlagen wurde in diesen Testfällen nicht verwendet. Andersherum wurden keine Verschiebungsvektoren genutzt, bei denen bereits maßgebende Koordinaten aus Berechnungen und Messungen existieren.

Das statistische Ergebnis des kombinierten Ansatzes zeigt, dass für eine große Mehrheit der Punkte eine geometrische Genauigkeit von einem Meter erreicht wird. Im Durchschnitt erreichen bei der zusätzlichen Verwendung der automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren rund 6,5% nicht die erforderliche geometrische Genauigkeit (siehe Tabelle 8). Bei einer höheren Passpunktanzahl in Testfall 9 sind es sogar nur rund 1%.

Tabelle 8: Statistische Auswertung des kombinierten Ansatzes

	kombiniert-geringe Anzahl	kombiniert - hohe Anzahl
Mittelwert [m]	0,246	0,158333333
Standardabweichung [m]	0,384	0,25
Minimum [m]	0	0
Maximum [m]	1,698	1,075
Median [m]	0,014	0,013333333
durchschnittliche Anzahl über 1m [%]	7	1
Gesamtzahl	1187	1404

Ein gutes Beispiel ist das Untersuchungsgebiet Marienhafen. In diesem Untersuchungsgebiet mussten vorab Passpunkte für einen relativ großen, passpunktfreien Bereich im Nordosten aus den Vermessungsunterlagen bestimmt werden. Mit der Verwendung von automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren steht für ein Gebäude in diesem Bereich ein Verschiebungsvektor zur Verfügung. Das Ergebnis der Homogenisierung nach Testfall 8 ist in Abbildung 38 dargestellt (blaue Linien). Nur in dem passpunktfreien Bereich (rotes Rechteck) treten Abweichungen von über einem Meter im Vergleich zur Basishomogenisierung (grüne Linien) auf. In diesem Untersuchungsgebiet entspricht das ca. 25% der Punkte. Diese sind mit roten Dreiecken markiert. Vor der Homogenisierung traten maximale Abweichungen von bis zu 4 m in diesem Bereich auf. Nach der Homogenisierung sind es noch 2,6 m. Dass insgesamt die geometrische Genauigkeit von einem Meter nicht erreicht wird, liegt vor allem daran, dass der Verschiebungsvektor nicht repräsentativ für den gesamten passpunktfreien Bereich ist. Das Gebäude mit dem Vektor ist deutlich gedreht und weist einen höheren Verschiebungsbetrag als die umliegenden Grenz- und Gebäudepunkte auf. Die zusätzlich verwendeten Passpunkte für diesen Bereich sind in Gelb dargestellt.



Abbildung 38: Ergebnis des kombinierten Ansatzes mit automatisch abgeleiteten Gebäudepasspunkten im Untersuchungsgebiet Marienhafen

Auch das Boxplot-Diagramm von Testfall 8 zeigt, dass für eine große Mehrheit der Grenz- und Gebäudepunkte in den Untersuchungsgebieten die erforderliche geometrische Genauigkeit erreicht wird. Die geringste geometrische Genauigkeit ist im Untersuchungsgebiet Marienhafen mit einer Streuung der Abweichungen zur Basishomogenisierung von bis zu 2,6 m zu erkennen (siehe Abbildung 39). In den anderen Untersuchungsgebieten erreichen lediglich einige Ausreißer die geometrische Genauigkeit von einem Meter nicht. Im Untersuchungsgebiet Rohrstorff konnte dieser Testfall nicht durchgeführt werden, da für die Gebäude mit automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren bereits koordinierte Gebäudepunkte vorlagen.

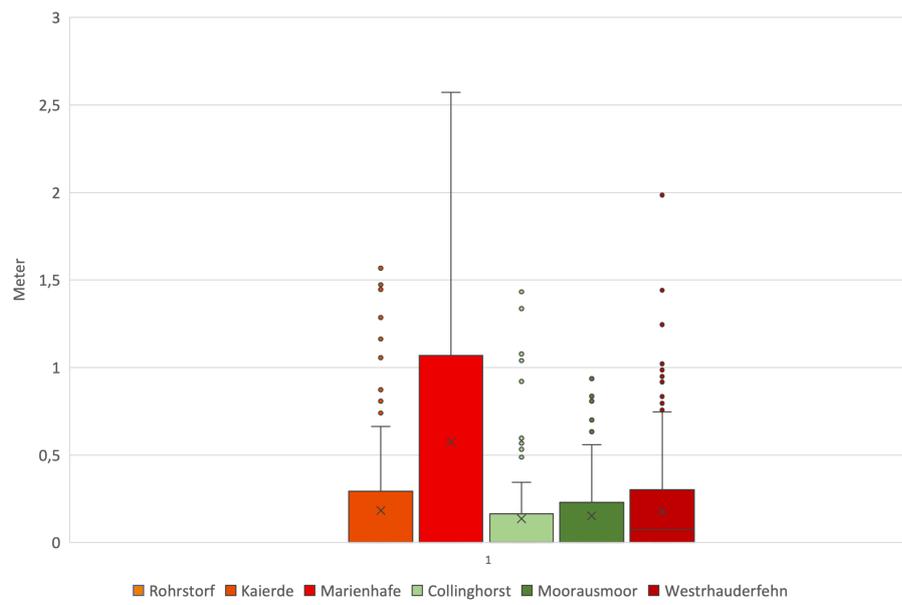


Abbildung 39: Boxplot-Diagramm des kombinierten Ansatzes mit wenigen automatisch abgeleiteten Passpunkten

Werden noch weitere Passpunkte aus den Segmentierungsergebnissen des Deep Learning Frameworks nach dem vorgestellten Verfahren in Kapitel 4.2.2 generiert, liegen noch weitere Passpunkte für den passpunktfreien Bereich in Nordosten vor. Durch die zusätzliche Nutzung dieser Passpunkte (gelbe Punkte) bei der Homogenisierung verbessert sich das Ergebnis signifikant. In Abbildung 40 ist das Ergebnis von Testfall 9 dargestellt. Lediglich zwei Punkte, gekennzeichnet durch rote Vektoren, erreichen nicht die geometrische Genauigkeit von einem Meter.



Abbildung 40: Ergebnis des kombinierten Ansatzes mit manuell generierten Gebäudepasspunkten aus einer KI-gestützten Segmentierung im Untersuchungsgebiet Marienhafe (Testfall 9)

Das Boxplot-Diagramm in Abbildung 41 zeigt die Streuung der Ergebnisse von Testfall 9 in den einzelnen Untersuchungsgebieten. Dabei wird deutlich, dass die Streuung in Marienhafe deutlich verringert wurde. In den anderen Untersuchungsgebieten werden ähnliche Ergebnisse erzielt wie zuvor. Das liegt

vor allem daran, dass es sich bei den verbleibenden Ausreißern um Inhomogenitäten handelt, die nicht mit den zusätzlichen Gebäudepasspunkten beseitigt werden können.

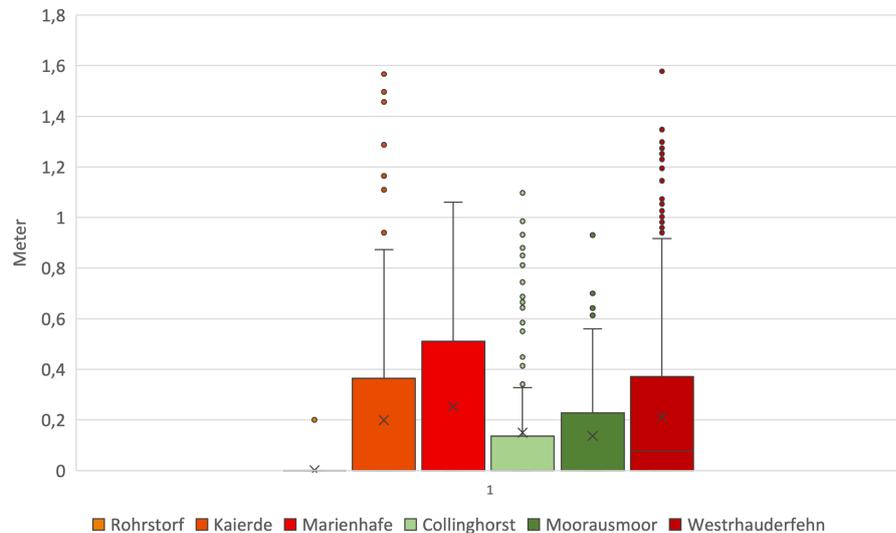


Abbildung 41: Boxplot-Diagramm des kombinierten Ansatzes mit vielen automatisch abgeleiteten Passpunkten

Insgesamt ist das Ergebnis abhängig von der Größe des passpunktfreien Bereichs und der Anzahl zur Verfügung stehender Verschiebungsvektoren in diesem Bereich. Es wurde in allen Untersuchungsgebieten ein positiver Einfluss der automatisch abgeleiteten Gebäudepasspunkte auf die Homogenisierung festgestellt, sofern diese die geometrische Genauigkeit von einem Meter erfüllen. Im Untersuchungsgebiet Collinghorstermoor kam es durch die Verwendung der zusätzlichen Gebäudepasspunkten beispielsweise nicht mehr zu Überschneidungen der Gebäude mit Flurstücksgrenzen. Dies war ohne die Verwendung von Gebäudepasspunkten und unter Einhaltung der Handlungsempfehlung Homogenisierung Light nicht erreichbar. Im Untersuchungsgebiet Rohrstorf wurden außerdem positive Effekte auf die Gebäudegeometrien festgestellt, bei denen keine Passpunkte vorlagen.

### 5.3 Einfluss der Passpunktanzahl

Ein zentraler Faktor bei der Homogenisierung ist die Passpunktanzahl. Die Passpunktanzahl der gebäudebasierten Homogenisierung (Testfall 2–8) ist insgesamt deutlich geringer als bei der Basishomogenisierung. Die Basishomogenisierung sollte dabei nicht als absolute Richtlinie gesehen werden, da die Anzahl der Passpunkte durch das zusätzliche Hinzufügen von Gebäudepasspunkte überhöht ist. Dennoch lässt sich eine grundsätzliche Tendenz daraus ableiten. Tabelle 9 zeigt die Anzahl der Passpunkte in den einzelnen Testszenarien für alle Untersuchungsgebiete. Die gebäudebasierte Homogenisierung nach Testfall 2 reduziert die Anzahl der verwendeten Punkte im Durchschnitt um die Hälfte, während die Passpunktanzahl bei der KI-gestützten Homogenisierung noch geringer ist. Bei Ortslagen ist die Passpunktanzahl in diesen Testszenarien meist höher als in Feldlagen. Grundsätzlich gilt, dass eine höhere Passpunktanzahl zu einer besseren geometrischen Form des Homogenisierungsgebietes führt. Da die Gebiete sehr inhomogen sind, wird für ein zuverlässiges Homogenisierungsergebnis eine ausreichend hohe Passpunktanzahl benötigt. Bei der KI-gestützten Homogenisierung (Testfall 3–5) fällt auf, dass eine höhere Anzahl oftmals keinen Mehrwert bringt und an einigen Stellen sogar noch höhere Abweichungen entstehen als bei einer mittleren oder geringen Passpunktanzahl. Dies ist auf ungenaue oder nicht re-

präsentative Vektoren zurückzuführen. Die geometrische Genauigkeit der Passpunkte erfüllte in diesen Fällen gerade die Toleranz von einem Meter. Das kann dazu führen, dass Nicht-Passpunkte die erforderliche geometrische Genauigkeit von einem Meter nicht erreichen. Die zulässige Unsicherheit ist in den Nicht-Passpunkten sehr gering, da die Abweichung in den Passpunkten bereits recht hoch ist und sie dadurch eine geringere Repräsentativität aufweisen.

Tabelle 9: Übersicht der Passpunktanzahl in den verschiedenen Testszenarien

	Rorhstorf	Kaierde	Marienhafe	Collinghorstermoor	Moorausmoor	Westrhauderfehn
Basis-homogenisierung (Testfall 1)	217	189	85	106	38	741
Testfall 2	155	109	34	34	25	391
Testfall 3	27	14	10	6	15	54
Testfall 4/ Testfall 6	82	36	19			137
Testfall 5	139	64	31	19	55	232
Testfall 7	81	35	18			113
Testfall 8		129	54	79	29	405
Testfall 9	242	138	68	92	45	586

Sofern Nicht-Passpunkte etwas andere Verschiebungsrichtungen oder Verschiebungslängen aufweisen, wird die geometrische Genauigkeit von einem Meter nicht mehr erreicht. Diese Situation wird exemplarisch in Abbildung 42 im Untersuchungsgebiet Collinghorstermoor gezeigt. Die Ausgangslage der ALKIS-Daten ist mit grauen Linien gekennzeichnet. Die Basishomogenisierung entspricht den grünen Linien und die KI-gestützte Homogenisierung nach Testfall 5 ist in Blau dargestellt. Im Zuge des Testfalls 5 wurden die Passpunkte des Gebäudes im unteren Bildbereich verwendet. Diese wiesen bereits eine Abweichung von rund 0,8 m zur Basishomogenisierung auf. In Folge der Homogenisierung wurde der Grenzpunkt im linken oberen Bildbereich um 2,88 m verschoben. Bei der Basishomogenisierung wurde dieser Punkt als Passpunkt angehalten, die korrekte Verschiebung beträgt demnach nur 1,85 m. Somit übersteigt die Abweichung in diesem Punkt die 1m-Toleranz. Bei einer geringen Passpunktanzahl bei der KI-gestützten Homogenisierung (Testfall 3) wurden die Gebäudepasspunkte im unteren Bildbereich nicht angehalten. Dabei betrug die Abweichung lediglich 0,3 m. Eine zu starke Reduzierung der Passpunktanzahl kann dazu führen, dass die geometrische Form der amtlichen Liegenschaftsgrafik nicht mehr genau dargestellt wird und somit keine zuverlässige Verbesserung der Gebäude- und Flurstücksgrenzen erzielt wird. Insbesondere in Feldlagen ist daher auf eine ausreichende Passpunktanzahl zu achten.

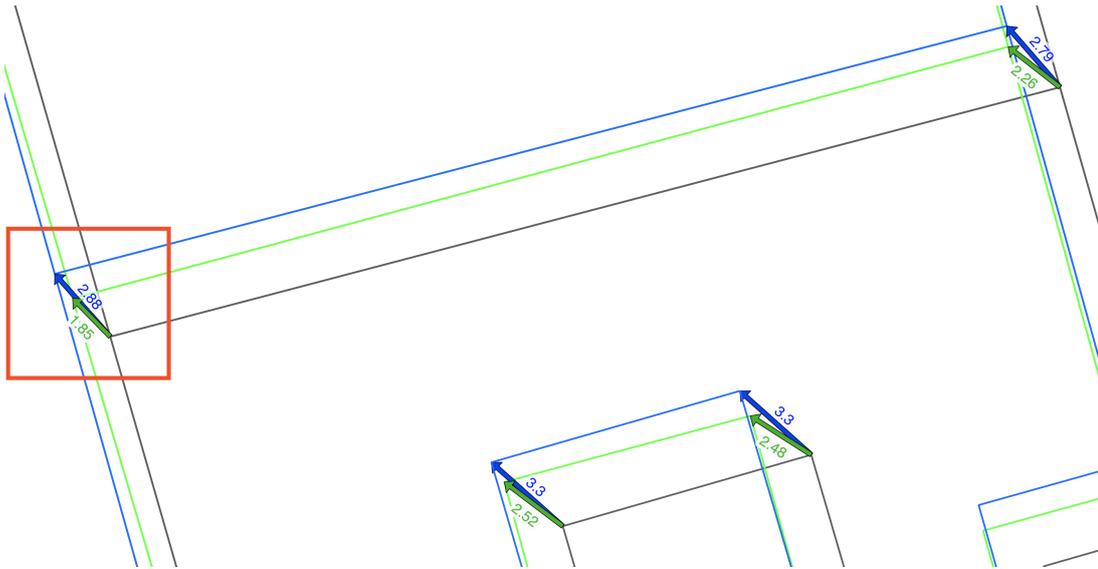


Abbildung 42: Abweichungen der KI-gestützten Homogenisierung mit einer hohen Passpunktanzahl gegenüber der Basishomogenisierung in Metern

Wie in Kapitel 3.1 vorgestellt, sollten Passpunkte repräsentativ für das zu homogenisierende Gebiet sein. Bei einer sehr geringen Anzahl und einer großen Inhomogenität kann diese Repräsentativität nicht gewährleistet werden und es kann zu fehlerhaften Verschiebungen kommen, wie in Kapitel 5.2 mit der Abbildung 33 dargestellt ist. Aus dieser Abbildung wird auch deutlich, dass die Repräsentativität der Gebäudepasspunkte aufgrund der Entstehungsgeschichte der Gebäude gegenüber der Historie der Flurstücksgrenzen nicht immer gegeben ist. Die in Kapitel 3.1 genannte Überbestimmung der Passpunkte für gewissenhafte Homogenisierungsergebnisse wird insgesamt mit der gebäudebasierten Homogenisierung (Testfall 2–8) nicht gewährleistet. Dadurch fehlt eine ausreichende Kontrolle, um grobe Fehler und Inhomogenitäten zuverlässig zu erkennen und zu eliminieren. Die Qualität der Ergebnisse kann dadurch starke Schwankungen aufweisen, wie die Ergebnisse der Homogenisierung im Anhang im Abschnitt D zeigen.

Beim kombinierten Ansatz mit den automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren (Testfall 8) wird die Passpunktanzahl im Vergleich zur Basishomogenisierung im Mittel um 30% reduziert. Werden zusätzlich noch weitere Passpunkte aus den Segmentierungsergebnissen hinzugefügt, wird die Passpunktanzahl der Basishomogenisierung im Mittel dagegen leicht überstiegen (Testfall 9). Der kombinierte Ansatz führte insgesamt zu guten Ergebnissen und hat viele positive Einflüsse gezeigt. Da bei einer herkömmlichen Homogenisierung nach den Vorgaben für das Verfahren Homogenisierung Light von einer etwas geringeren Passpunktanzahl im Vergleich zu Basishomogenisierung ausgegangen werden kann, zeigt dieser Ansatz deutlich, dass die Passpunktanzahl ohne aufwendige Berechnungen erhöht werden kann. Mit einer hohen Passpunktanzahl können dadurch insbesondere Inhomogenitäten an den Gebäuden und grobe Fehler aufgedeckt und eliminiert werden.

Es ist wichtig zu beachten, dass die Homogenisierung mit einer ausschließlichen Verwendung von Gebäudepasspunkten nicht alle Inhomogenitäten von Grenzpunkten beseitigen kann. Außerdem ist die Anzahl der Passpunkte durch die Anzahl und Verteilung der Gebäude stark limitiert und die Repräsentativität für zuverlässige Ergebnisse für das zu homogenisierende Gebiet kann nicht vollständig sichergestellt werden.

## 5.4 Einfluss der Passpunktverteilung

Ein ganz entscheidender Faktor bei der Homogenisierung ist die Passpunktverteilung. Nach den Festlegungen im Rahmen Homogenisierung Light sollte stets eine gleichmäßige Verteilung der Passpunkte vorliegen (LGLN, 2019, S. 7). Wie in Kapitel 3.1 bereits erwähnt, sollten auch am Rand Passpunkte zur Verfügung stehen, um Extrapolationen zu vermeiden. Aufgrund der Anzahl und Verteilung von Gebäuden innerhalb eines Homogenisierungsgebietes ist es kaum zu vermeiden, dass bei gebäudebasierten Homogenisierungen Extrapolationen entstehen. Gebäude und Bauwerke befinden sich meist mittig im Flurstück. Außerdem liegen die Passpunkte dort zentriert als Punkthäufung vor und sind nicht über das Flurstück verteilt. Abbildung 43 visualisiert diese Passpunktsituation.

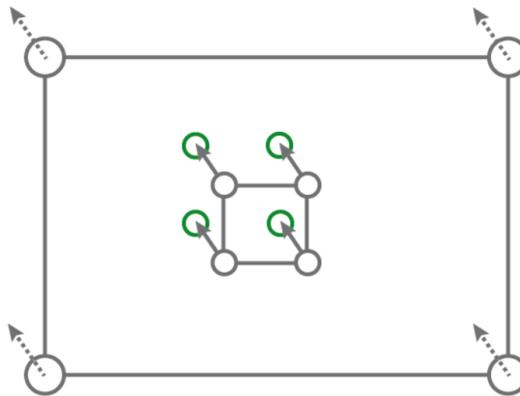


Abbildung 43: Position der Gebäude im Flurstück

Die Ausgleichung sollte laut den in Kapitel 3.1 genannten Forderungen robust gegenüber Passpunkthäufungen sein und keinen signifikanten Einfluss auf das Homogenisierungsergebnis haben. Im Zuge der Untersuchungen konnten dahingehend keine erheblichen Einflüsse festgestellt werden. Aufgrund der Tatsache, dass Gebäude innerhalb von Flurstücken liegen und die Gebietsgrenzen entlang von Straßenzügen oder Flurstücksgrenzen laufen, entspricht eine gebäudebasierte Homogenisierung nach Testfall 2–8 dem in im Kapitel 3.1 vorgestellten Testfall C, der am Rand des Gebietes zu Extrapolationen führt. Wie Benning bereits andeutete, kann eine streckengewichtete Interpolation bei Extrapolationen sinnvoll sein (Benning, 1996, S. 79). Im Zuge einer gebäudebasierten Homogenisierung ist es daher sinnvoll, andere Ausgleichsansätze in Betracht zu ziehen und näher zu untersuchen. Die Software *Homage* bietet beispielsweise die Möglichkeit, eine abstandsgewichtete oder multiquadratische Interpolation durchzuführen (Grit-graphische Informationstechnik-Beratungsgesellschaft mbH, 2020, S. 20). Bei ersten Experimenten wurde im visuellen Vergleich eine ähnliche geometrische Genauigkeit zu den Ergebnissen der Software *TerraCAD/Systra* festgestellt. Es bleibt zu prüfen, ob wirklich flächendeckend für verschiedene Gebietstypen eine gleichwertige oder bessere geometrische Genauigkeit aufgrund des Interpolationsansatzes erreicht werden kann. Abbildung 44 zeigt eine Formveränderung der Flurstücksgeometrie (blaue Linien) gegenüber der Basishomogenisierung (grüne Linien), die möglicherweise auf eine ungünstige Passpunktverteilung und Extrapolation zurückzuführen wäre. Allerdings sind ansonsten keine unerwartet steilen Anstiege und Abfälle bei den Abweichungen zur Basishomogenisierung oder gegenüber ALKIS auszumachen. Es sind visuell somit keine signifikanten Extrapolationen zu erkennen, die für Abweichungen über einem Meter sorgen. Vielmehr handelte es sich bei größeren Abweichungen an den Rändern um Inhomogenitäten, bei denen die Passpunkte um einen anderen Betrag oder in eine

andere Richtung verschoben wurden. Die in Abbildung 44 dargestellte Formveränderung ist nach einer ausgiebigen Analyse somit eher auf das Fehlen geometrischer Bedingungen zurückzuführen. Weder an den verzerrten Punkten noch in der näheren Nachbarschaft sind Referenzpunkte oder geometrische Bedingungen angehalten. In der Software Systra ist ein sogenannter Extrapolationsrahmen definiert, durch den Extrapolationseffekte an den Rändern der Gebiete gedämpft werden (Technet GmbH, 2010, S. 114). Aufgrund dieses Extrapolationsrahmens scheinen Extrapolationen im Rahmen der gebäudebasierten Homogenisierung einen geringeren Einfluss auf die geometrische Genauigkeit des Ergebnisses zu haben. Da die durchgeführten Untersuchungen jedoch nicht repräsentativ für das gesamte Land Niedersachsen sein können, sollten mögliche Extrapolationen dennoch nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

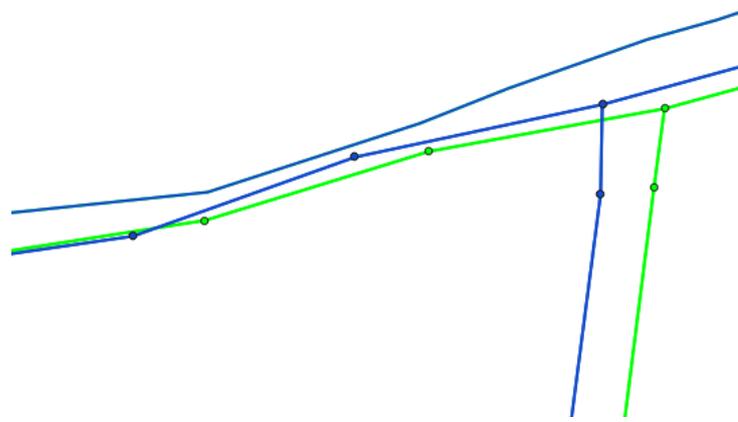


Abbildung 44: Formveränderung im Untersuchungsgebiet Marienhaf

Bei den Ergebnissen der gebäudebasierten Homogenisierung nach Testfall 2–8 kann davon ausgegangen werden, dass das Gebiet nicht ausreichend kontrolliert ist. Dicht beieinander liegende und nur einen kleinen Teil des Verfahrensgebietes abdeckende Passpunkte führen zu einer ungünstigen Passpunktverteilung. Dadurch ist es kaum möglich, grobe Fehler aufzudecken und zu eliminieren. Innerhalb dieser kleinen, lokalen Gebiete, die Passpunkte besitzen, ist eine gute lokale Genauigkeit zu erkennen, sofern keine Inhomogenitäten bestehen. Neben groben Fehlern im Verfahrensgebiet ist es weiterhin schwer, Fehler in Passpunkten zu lokalisieren. Die Verwendung der automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren ohne weitere Prüfung ist deshalb nicht empfehlenswert. Fehlerhafte Vektoren und Vektoren, die keine geometrische Genauigkeit von einem Meter erfüllen, führen zu ungenauen oder gar grob fehlerhaften Ergebnissen von Gebäudepositionen und Flurstücksgrenzen. Sollte der gebäudebasierte Ansatz näher verfolgt werden, muss zuverlässig gewährleistet werden, dass die Gebäudepasspunkte eine ausreichende geometrische Genauigkeit besitzen.

Beim kombinierten Ansatz kann die Passpunktverteilung aufgrund der zusätzlichen Passpunkte verbessert werden. Auch in Feldlagen sind dadurch bessere Ergebnisse zu erzielen. Neben groben Fehlern können auch deutlich mehr Inhomogenitäten an Gebäuden erkannt und eliminiert werden. In Feldlagen bringt dieser Ansatz eine gute Möglichkeit, Gebäudepasspunkte zu liefern, da dort oftmals keine Gebäude berechnet vorliegen. Allerdings sollte bei einer ungünstigen Verteilung der Gebäude und bei großen passpunktfreien Bereichen nicht auf die Verwendung von Grenzpunkten verzichtet werden.

## 5.5 Bewertung der Ergebnisse

Aufgrund des gesellschaftlichen Wandels und den wachsenden Anforderungen an das Kataster muss eine homogene und eindeutige Datenbasis geschaffen werden, die den heutigen Anforderungen gerecht wird. Um eine Interoperabilität und Verknüpfung verschiedenster Datensätze zu ermöglichen, ist das übergeordnete Ziel eine flächendeckende geometrische Genauigkeit von einem Meter zu erzielen. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass ein hohes Potenzial in der Nutzung von Passpunkten aus automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren liegt. Der KI-basierte Ansatz bietet eine Chance, um zukünftig ohne aufwendige Berechnungen die Passpunktanzahl zu erhöhen. Dafür ist es notwendig, die Anzahl und Aktualität der Verschiebungsvektoren zu steigern und einen Workaround zu entwickeln, der es ermöglicht, die Verschiebungsinformationen automatisiert auf Gebäudeecken zu projizieren und Passpunkte daraus zu generieren. Für eine effektive Nutzung und zur Einhaltung der Forderungen der Handlungsempfehlung zum Verfahren Homogenisierung Light sollten in diesem Zusammenhang manuelle Vorbereitungen verringert und die notwendigen Schnittstellen angepasst werden. Die derzeitige Anzahl der Verschiebungsvektoren in Niedersachsen ist recht gering. Aufgrund der geringen Vektorenanzahl und den kleinräumigen Bearbeitungsgebieten ist es fragwürdig, ob in allen Homogenisierungsgebieten überhaupt Vektoren zur Verfügung stehen. Die verwendeten Untersuchungsgebiete wurden nach dem Vorhandensein von Verschiebungsvektoren ausgewählt. Es bleibt zu prüfen, wie hoch die Anzahl der Vektoren in Niedersachsen sein muss, damit für möglichst viele Homogenisierungsgebiete ein entsprechender Mehrwert entsteht.

Die Qualität der automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren ist nicht zuverlässig unterhalb der Toleranz von einem Meter. Auf Grundlage des derzeit verwendeten KI-Modells ist es unerlässlich, die Verschiebungsvektoren vor der Verwendung automatisch zu verifizieren. Die Anzahl der KI-Verschiebungsvektoren hängt maßgeblich von der Segmentierung der Gebäude in den digitalen Orthophotos ab. Bei der Qualitätsprüfung konnte bereits eine große Steigung der Anzahl der Verschiebungsvektoren durch manuelle Generierung festgestellt werden. Eine bessere Segmentierung würde zu einer höheren Vertrauenswürdigkeit und damit einhergehend einer höheren Anzahl an KI-Verschiebungsvektoren führen. Aktuell wird ein neuer Segmentierungsansatz getestet, um mithilfe von Frame Fields Fehlausrichtungen und abgerundete Ecken bei der Segmentierung zu minimieren und das Segmentierungsergebnis insgesamt zu verbessern (Girard et al., 2021, S. 1). Dies bekräftigt, dass die Erstellung von Verschiebungsvektoren ein ständiger Optimierungsprozess ist und es daher von großer Bedeutung ist, die Analysen regelmäßig unter Berücksichtigung der aktuellen Anpassungen zu wiederholen. Weiterhin sollte zukünftig ein Aktualisierungszyklus bei der Generierung der KI-Verschiebungsvektoren eingeführt werden, um die automatisch abgeleiteten Vektoren mit aktualisierten ALKIS-Daten abgleichen zu können.

Der gebäudebasierte Ansatz führte statistisch zu guten Ergebnissen. Für einen großen Bereich des Homogenisierungsgebietes wird die geometrische Genauigkeit von einem Meter erreicht. Insgesamt ist der gebäudebasierte Ansatz nicht so robust, da er abhängig von der Gebäudeanzahl und -verteilung ist. Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, sollte die zu homogenisierenden Punkte lokal die gleiche Systematik aufweisen. Aufgrund der in Kapitel 2.1 vorgestellten Inhomogenitäten und den in Kapitel 2.4 beschriebenen Nachbarschaftsbrüchen ist diese Systematik nicht sicher gegeben. Durch diese Inhomogenität ist ein gebäudebasierter Ansatz stark limitiert. Zusätzlich weisen Gebäude oftmals eine andere Entstehungsgeschichte und eine höhere Veränderungsdynamik im Vergleich zu den Flurstücksgrenzen auf. Auf der anderen Seite werden Gebäude immer häufiger mit steigender geometrischer Genauigkeit durch Fernerkundungssensoren erfasst.

Eine Homogenisierung auf Basis von Gebäuden ist laut den Untersuchungsergebnissen in Testfall 2–7 oft ausreichend, um systematische Fehler zu eliminieren. Das derzeitige Ziel der Homogenisierung Light ist es, eben diese flächenhaften systematischen Fehler zu korrigieren. Grobe Fehler, wie Nachbarschaftsbrüche, können nicht behoben werden. Diese werden auch mit dem aktuellen Verfahren der Homogenisierung nicht korrigiert, sofern diese individuellen Fehler nicht durch Passpunkte berücksichtigt werden. Um weitere Inhomogenitäten zu beseitigen, muss ein geeigneterer Ansatz verwendet werden. Eine flächenhafte geometrische Genauigkeit von einem Meter ist allein auf Grundlage der gebäudebasierten Homogenisierung nicht möglich. Infolge der aktuell noch vorliegenden Schwächen des KI-Modells und der damit verbundenen Unsicherheiten kann aktuell noch keine gebäudebasierte Homogenisierung präferiert werden. Stattdessen eignet sich ein kombinierter Ansatz deutlich besser. Durch die zusätzliche Nutzung von Verschiebungsvektoren stehen viele Passpunkte zur Verfügung, die es ermöglichen, mehr Fehler zu identifizieren und zu korrigieren. Bei der Nutzung der Verschiebungsvektoren für passpunktfreie Bereiche sollte allerdings darauf geachtet werden, dass der Bereich, der durch einen Vektor repräsentiert wird, nicht zu groß ist. Aufgrund der geringen Anzahl an Verschiebungsvektoren sind derzeit nicht immer zuverlässig Vektoren für passpunktfreie Bereiche verfügbar.

Außerdem ist es zukünftig sinnvoll, die Vektoren noch weiter zu filtern. Verschiebungsvektoren sind aufgrund ihrer meist höheren Unsicherheit nicht für bereits koordinierte Gebäude notwendig. Da keine Garantie besteht, dass ein Gebäudepasspunkt aus automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren repräsentativ ist, sollte möglichst eine Kombination aus Gebäude- und Grenzpunkten gewählt werden. Bei der Nutzung von Verschiebungsvektoren für passpunktfreie Bereiche ist weiterhin darauf zu achten, dass ausreichend geometrische Bedingungen in der Nachbarschaft verwendet werden. Dennoch müssen insgesamt in diesen passpunktfreien Bereichen weniger Passpunkte vorab berechnet werden.

Es ist wichtig zu beachten, dass es eine Vielzahl von verschiedenen Arten von Gebieten und Eigenschaften gibt, was es schwierig macht, zu beurteilen, ob die erzielten Ergebnisse repräsentativ sind. Aus diesem Grund ist es erforderlich, weitere Untersuchungen durchzuführen, um die Validität der Ergebnisse zu überprüfen und sicherzustellen, dass sie tatsächlich auf eine Vielzahl von Gebietstypen und Eigenschaften anwendbar sind.

## **6 Fazit**

Im Hinblick auf das Zukunftskonzept 2025 ist es unerlässlich, einen Kompromiss zwischen Schnelligkeit und Genauigkeit bei der Verbesserung der amtlichen Liegenschaftsgrafik zu finden. Aufgrund wachsender Anforderungen an das Kataster ist eine möglichst schnelle Verbesserung der Liegenschaftsgrafik zu erzielen, die dabei trotzdem eine flächendeckende geometrische Genauigkeit von einem Meter erreicht. Eine große Hürde stellen die unterschiedlichen geometrischen Genauigkeiten und Inhomogenitäten der Ausgangsdaten dar, die aus Ungenauigkeiten der 1:1-Digitalisierung, Vernachlässigung des Nachbarschaftsprinzips, unterschiedlichen Kartiermethoden, unterschiedlichen Maßstäben oder durch zufällige, menschliche Fehler resultieren können.

Zusammenfassend wird mit der Homogenisierung auf Basis von Gebäuden eine Verbesserung der amtlichen Liegenschaftsgrafik erreicht. Sowohl bei der ausschließlichen Nutzung von berechneten Gebäudepasspunkten als auch bei Verwendung von automatisch abgeleiteten Gebäudepasspunkten der KI für die Homogenisierung konnte eine mehrheitliche Korrektur der flächenhaften, systematischen Abweichungen festgestellt werden. Die Qualität der KI-gestützten Homogenisierung mit automatisch abgeleiteten

Gebäudepasspunkten ist dabei etwas geringer als die Homogenisierung auf Basis von berechneten Gebäuden. Allerdings sollte bei einer gebäudebasierten Homogenisierung generell auf eine geeignete, interaktive Auswahl der Gebäudepasspunkte geachtet werden. Dies ist vor allem aufgrund der Anzahl und Verteilung der Gebäude sowie der Unsicherheiten in den Passpunkten und die Vielzahl an Inhomogenitäten in den Homogenisierungsgebieten von besonderer Bedeutung.

Ein KI-gestützter Ansatz mit automatisch abgeleiteten Gebäudepasspunkten erreicht zwar geometrisch in vielen Bereichen knapp eine Genauigkeit von einem Meter, aufgrund der geringen Anzahl und größeren Unsicherheiten, die aus den Segmentierungsergebnissen resultieren, sollte der KI-Ansatz jedoch noch weiter verbessert werden. Aufgrund der kleinräumigen Projektgebiete kann flächendeckend nicht gewährleistet werden, dass innerhalb jedes Projektgebietes Gebäude vorhanden sind. Zusätzlich besitzen aktuell nur relativ wenige Gebäude einen Verschiebungsvektor, weshalb in vielen Gebieten der Ansatz keinen Mehrwert hat. Für einen zeitlichen Mehrwert der KI-gestützten Homogenisierung gegenüber des Verfahrens Homogenisierung Light sind daher weitere Verschiebungsvektoren notwendig. Im Hinblick auf die Robustheit des Ansatzes der automatisch abgeleiteten Gebäudepasspunkte gilt die Empfehlung, die Anzahl und Vertrauenswürdigkeit der Vektoren zu steigern, um einen zuverlässigen und niedersachsenweiten Einsatz der Vektoren zu gewährleisten. Die Nutzung von automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren für die Homogenisierung ist nur sinnvoll, wenn eine zuverlässige Verwendung und eine einfachere Handhabung ohne manuelle Aufbereitung garantiert werden kann. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen eine überwiegend ausreichende geometrische Qualität der automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren. Aufgrund des laufenden Prozesses sind weitere Optimierungen vorzunehmen und die Ergebnisse mit erneuten Untersuchungen zu validieren. Im Zuge der Anpassung des Segmentierungsnetzes und im Sinne des konservativen Ansatzes sollte demnach eine höhere Robustheit bei der Detektion und eine höhere Anzahl an Verschiebungsvektoren angestrebt werden. Für einen zuverlässigen Einsatz der Verschiebungsvektoren sollte zukünftig auch ein Aktualisierungszyklus zum Abgleich der ALKIS-Daten für die Generierung der automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren eingeführt werden.

Um eine möglichst hohe geometrische Genauigkeit und Zuverlässigkeit der amtlichen Liegenschaftsgrafik zu erzielen, empfiehlt sich ein kombinierter Ansatz mit möglichst vielen Grenz- und Gebäudepasspunkten. Mithilfe einer Teilautomatisierung ist es theoretisch relativ einfach möglich, die Passpunktanzahl zu erhöhen und flächendeckende, systematische Abweichungen zu korrigieren und schlussendlich die Geschwindigkeit zu erhöhen. Die Ergebnisse hängen stark vom Gebietstyp und der Homogenität ab. Passpunktcluster und Ausreißeranalysen können zukünftig helfen, die Homogenität von Gebieten zu beschreiben sowie grobe Abweichungen aufzudecken und zu korrigieren. Für eine Repräsentativität des Ergebnisses sind die Untersuchungen mit weiteren Testgebieten zu validieren. Zusätzlich ist auch die Untersuchung der geometrischen Genauigkeit mit anderen Interpolationsansätzen sinnvoll.

## **7 Ausblick**

Die Verwendbarkeit der automatisch abgeleiteten Verschiebungsvektoren bietet sich auch bei der Priorisierung von Homogenisierungsgebieten an. Mithilfe der Verschiebungsvektoren ist es möglich, Gebiete mit Verschiebungen über einem Meter leicht auffindig zu machen. Bisher werden Vorranggebiete mittels einer Klassifizierung nach der Größe der Abweichungen zwischen den grafischen Punkten und der maßgebenden Koordinaten innerhalb eines 250 m × 250 m Raster gekennzeichnet. Vorranggebiete be-

stehen primär aus Abweichungen über einem Meter. Zusätzlich sind Gebiete, die die Kriterien gemäß Kapitel 2.4 erfüllen, Teil dieser Vorranggebiete. Analog dazu könnten die Verschiebungsvektoren für die Klassifizierung der Rasterzellen genutzt werden, sodass auch vertrauenswürdige Verschiebungsvektoren mit einer Länge von über einem Meter zur Kennzeichnung von Vorranggebieten genutzt werden, um insbesondere in passpunktfreien, bebauten Bereichen zusätzliche Vorranggebiete zu identifizieren und schnellstmöglich eine flächendeckende geometrische Genauigkeit von einem Meter zu erreichen.

Weiterhin ist es unumgänglich, die Ausgangslage im Hinblick auf Inhomogenitäten besser zu verstehen und potenzielle Probleme in den vorliegenden Daten zu erkennen und zu korrigieren, um das Ziel einer flächendeckenden geometrischen Genauigkeit von einem Meter zu erreichen. Dies kann dazu beitragen, die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Karte zu erhöhen und sicherzustellen, dass die enthaltenen Informationen präzise und aktuell sind und die Ergebnisse der Homogenisierung der tatsächlichen Ausgangslage entsprechen. Gerade bei einer großen Anzahl automatisch bestimmter Passpunkte kann die Detektion von potenziellen Ausreißern und der Identifizierung von Passpunktgruppen nützlich sein. Dies kann helfen, die Ausgangslage besser zu verstehen und zu visualisieren. Passpunktcluster sind eine Möglichkeit, um visuell Passpunktgruppen aufzuzeigen. Dazu können die Passpunktzuordnungen mithilfe von Vektoren dargestellt und anhand der Verschiebungsrichtung und des Verschiebungsbetrages klassifiziert werden. Dadurch ist es möglich, die Grenzen der Homogenisierungsgebiete in homogenere Abschnitte zu unterteilen, um ein genaueres Ergebnis zu erzielen. Weiterhin ist es möglich, aus Abweichungsmuster repräsentative Passpunkte für das Homogenisierungsgebiet zu identifizieren. Ein weiterer Vorteil ist, dass dadurch auch Ausreißer, die sich von den übrigen Punkten deutlich unterscheiden, leichter erkannt werden können. Auch Geographische Informationssysteme (GIS) bieten viele Möglichkeiten und Funktionen, Ausreißer in Datensätzen mittels statistischer Tests zu erkennen. Dazu zählen z. B. Hot-Spot-Analysen und Outlier-Detektionen. Eine Grundvoraussetzung für diese GIS-basierten Analysen ist die Angabe eines gewichteten Attributes. Um Ausreißer in Passpunktconstellation zu finden, kann ein Gewichtsparameter aus einer Metrik der Verschiebungsrichtung und des Verschiebungsbetrages generiert werden. Es ist wichtig, diese Ergebnisse in Bezug auf ihre Leistungsfähigkeit zu evaluieren, um zu sehen, ob sie für verschiedenste Gebietstypen der Homogenisierung geeignet sind. Außerdem ist zu beachten, dass die Analysen nur auf bekannten Passpunktinformationen beruhen können.

## Literaturverzeichnis

- Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland. (2008). Dokumentation zur Modellierung der Geoinformationen des amtlichen Vermessungswesens (Geo-InfoDok). *ALKIS-Objektartenkatalog DLKM. Version 6.0.*
- Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland. (2020). Produkt- und Qualitätsstandard für Digitale Orthophotos. *Version 4.1.*
- Barrmeyer, J. (2005). Wie genau ist die ALK? Betrachtungen zur Herstellung und Fortführung digitaler Katasterkarten. In: *Der Vermessungsingenieur*, 02/2005, S. 128–134.
- Benning, W. (1996). Zur Homogenisierung und Fortführung von grossmassstäblichen Karten. In: *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural, Band 94, Heft 2*, S. 75–80.
- Creuzer, P. (1996). Randanpassung bei Liegenschaftskarten im Zuge der 1:1-Digitalisierung für die ALK. In: *Nachrichten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung*, 46. Jg. S. 104–113.
- Franken, J., Florijn, W., Hoekstra, M., & Hagemans, E. (2021). Rebuilding the Cadastral Map of The Netherlands: The Artificial Intelligence Solution. *FIG e-Working Week 2021. In: Smart Surveyors for Land and Water Management – Challenges in a New Reality.*
- Girard, N., Smirnov, D., Solomon, J., & Tarabalka, Y. (2021). Polygonal Building Extraction by Frame Field Learning.
- Grit-graphische Informationstechnik-Beratungsgesellschaft mbH. (2020). *OpenHOMAGE-Handbuch. Werne.*
- Kampshoff, S. (2005). Integration heterogener raumbezogener Objekte aus fragmentierten Geodatenbeständen.
- Kertscher, K., & Liebig, S. (2012). Meilensteine im Liegenschaftskataster in Niedersachsen. In: *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 137. Jg. S. 306–312.
- Knoop, H. (1991). Vorhaben »Digitale Karte« der Vermessungs- und Katasterverwaltung. In: *Nachrichten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung*, 41. Jg. S. 2–10.
- Kruip, J. (2023). Anzahl der Grenzpunkte-Identität zwischen Liegenschaftsgrafik und gerechneten Punkforten. *Internes Dokument*, o.S.
- Kummer, K. (1992). Modellentwicklung für die digitale Führung des Zahlen- und Kartenwerkes im Liegenschaftskataster. *Dissertation Hannover.*
- LGLN. (2018). Entwicklung neuer Lösungsansätze zur Verbesserung der geometrischen Genauigkeit der Liegenschaftsgrafik. *Abschlussbericht der Projektgruppe „Entwicklung neuer Lösungsansätze zur Verbesserung der geometrischen Genauigkeit der Liegenschaftsgrafik“, Internes Dokument.*
- LGLN. (2019). Handlungsempfehlung zur Anwendung des Verfahrens „Homogenisierung light“. *Bericht der VKV2025-Projektgruppe „Verbesserung der geometrischen Genauigkeit der Liegenschaftsgrafik“, Internes Dokument.*
- LGLN. (2020). Verbesserung der geometrischen Genauigkeit der Liegenschaftsgrafik. *Abschlussbericht der Projektgruppe Verbesserung der geometrischen Genauigkeit der Liegenschaftsgrafik, Internes Dokument.*
- LGLN. (2022). KI-Plattform. <https://docs.lgln.niedersachsen.dev/produkte/ki-plattform.html> (Abgerufen am: 23.12.2022).

- Merk, M. (2017). Landkarten scannen und georeferenzieren – für die Verwendung in GPS-Navigationsprogrammen. [https://www.merkartor.de/tipps\\_wissen/tipps\\_wissen.php](https://www.merkartor.de/tipps_wissen/tipps_wissen.php) (Abgerufen am: 20.12.2022).
- Ministerium für Inneres, Sport und Integration. (2008). Genauigkeitsverbesserung der Liegenschaftsgrafik. *Niedersächsisches Ministerialblatt RdErl. d. MI .v 10.11.2008 - 34-23422/14 - - VORIS 21160*, S. 1178–1181.
- Ministerium für Inneres und Sport. (2020a). Erhebung von Geobasisdaten durch Liegenschaftsvermessungen (LiegVermErlass). *Niedersächsisches Ministerialblatt RdErl. d. MI v. 10. 11. 2020 — 44–23410/100 — VORIS 21160*, S. 1292–1327.
- Ministerium für Inneres und Sport. (2020b). Führung des Liegenschaftskatasters Niedersachsen (LiegKatErlass). *Niedersächsisches Ministerialblatt RdErl. d. MI v. 6. 1. 2020 — 15-23401/004 — VORIS 21160*, S. 12–21.
- Niedersächsische Vermessungs- und Katasterverwaltung. (1994). Richtlinien für die Einrichtung der automatisierten Liegenschaftskarte (ALK-Einrichtungsrichtlinien). *Niedersächsisches Ministerialblatt RdErl. d. MI .v 15. 6. 1994 - 66-23422/11 - - VORIS 21160 0100 35 034 -*.
- Niedersächsische Vermessungs- und Katasterverwaltung. (2011). Integrierte Punkt- und Grundrissbearbeitung (IPG). *V 6.0.8 Hotfix6 - Internes Dokument*.
- Niemeier, W. (2008). Ausgleichsrechnung – Statistische Auswertemethoden. *Walter de Gruyter Verlag, 2. Auflage, Berlin*.
- Rembold, M. (2022). Neuberechnung des Katasterzahlenwerks mit Anschluss an UAS-bestimmte Gebäudepunkte. *In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, 147. Jg. S. 97–103*.
- Roschlaub, R., Glock, C., Möst, K., Hümmer, F., Li, Q., Auer, S., Kruspe, A., & Zhu, X. (2022). Implementierung einer KI-Infrastruktur zur automatisierten Erkennung von landesweiten Gebäudeveränderungen aus Luftbildern. *In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, 147. Jg. S. 181–193*.
- Schmidt, V., Ziems, M., & Creuzer, P. (2022a). Deep Learning-Based Method for the Update and geometric accuracy enhancement of graphical Cadastre. *Internes Dokument*.
- Schmidt, V., Ziems, M., & Creuzer, P. (2022b). Deep Learning-Based Method for the Update and Geometric Accuracy Enhancement of Graphical Cadastre. *Präsentation zur internen Verwendung*.
- Sellge, H. (1991). Digitale Karte–ALK (Stand und Planungen). *In: Nachrichten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung, 41. Jg. S. 19–29*.
- Technet GmbH. (2010). Programmbeschreibung Systra Release 7 - Systra, das Ausgleichsprogramm. *Berlin*.
- Tegeler, W. (1991). Das Lagebezugssystem für die 1:1-digitalisierte Liegenschaftskarte (ALK/1). *In: Nachrichten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung, 41. Jg. S. 35–39*.
- v. d. Weiden, A. (1955). Die Urkataster und die Entwicklung sowie Neugestaltung der katasteramtlichen Messungs- und Kartenwerke in Niedersachsen. *In: Niedersächsische Vermessungs- und Katasterverwaltung (Hrsg.): C. F. Gauss und die Landesvermessung in Niedersachsen, S. 155–184*.
- Wolfewicz, A. (2022). Human-in-the-Loop in Machine Learning: What is it and How Does it Work? <https://levity.ai/blog/human-in-the-loop> (Abgerufen am: 23.12.2022).

# Anhang

## A Übersicht der Testszenarien

Tabelle 10: Übersicht der Testszenarien

Homogenisierungsart	Passpunkte	Ortslage	Ortsrand	Feldlage	große Verschiebungen	kleine Verschiebungen
Basishomogenisierung (Testfall 1)						
Homogenisierung mit berechneten Gebäude- passpunkten (Testfall 2)						
Homogenisierung mit KI-Verschiebungsvektoren	geringe Anzahl (Testfall 3)					
	mittlere Anzahl (Testfall 4)					
	hohe Anzahl (Testfall 5)					
	gute räumliche Verteilung (Testfall 6)					
	schlechte räumliche Verteilung (Testfall 7)					
Kombinierte Homogenisierung	+ geringe Anzahl (Testfall 8)					
	+ hohe Anzahl (Testfall 9)					

## B Positiv- und Negativbeispiele für die Qualität der Passpunkte aus Verschiebungsvektoren

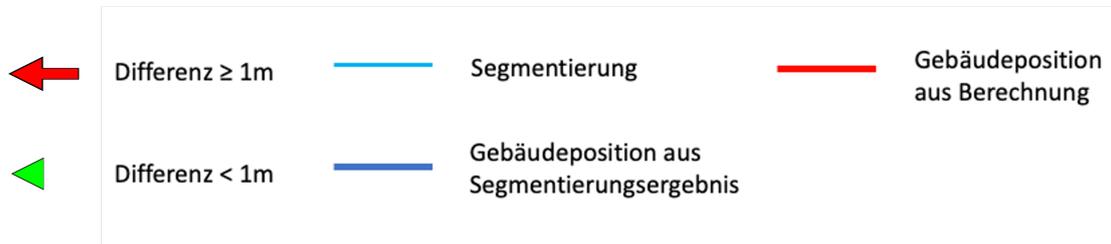


Abbildung 45: Positiv-Beispiel Collinghorstermoor



Abbildung 46: Negativ-Beispiel Collinghorstermoor



Abbildung 47: Positiv-Beispiel Kaierde



Abbildung 48: Negativ-Beispiel Kaierde



Abbildung 49: Positiv-Beispiel Marienhafe

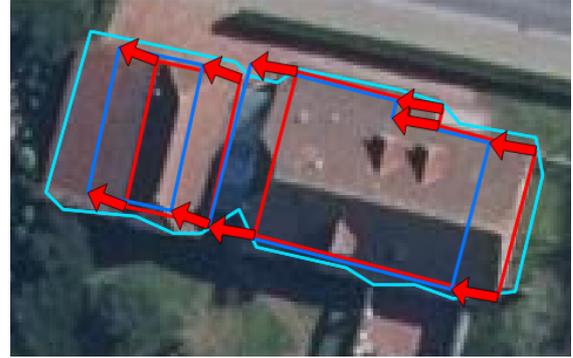


Abbildung 50: Negativ-Beispiel Marienhafe



Abbildung 51: Positiv-Beispiel Moorausmoor



Abbildung 52: Negativ-Beispiel Moorausmoor



Abbildung 53: Positiv-Beispiel Rohrstorf



Abbildung 54: Negativ-Beispiel Rohrstorf



Abbildung 55: Positiv-Beispiel Westrhauderfehn



Abbildung 56: Negativ-Beispiel Westrhauderfehn

## C Statistische Auswertung der Grenzpunkte bei einer gebäudebasierten Homogenisierung (Testfall 2)

Tabelle 11: Statistische Auswertung der Grenzpunkte bei einer gebäudebasierten Homogenisierung

	Rorhstorf	Kaierde	Marien- hufe	Colling- horstermoor	Moor- ausmoor	West- rhauderfehn	Gesamt
Mittelwert	1,07	0,29	0,81	0,61	0,85	0,35	0,66
Standard- abweichung	0,84	0,27	0,57	0,36	0,44	0,22	0,45
Anzahl	62	79	51	75	28	348	643
Anzahl mit Abweichungen über 1 m [%]	38,71	3,80	31,37	13,33	13,24	1,44	20,13

## D Statistische Auswertung der Homogenisierungsergebnisse

Tabelle 12: Statistische Auswertung Collinghorstermoor

	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum	Median	Anzahl	Anzahl über 1m [%]
ALKIS	1,22	0,78	0,00	2,97	0,94	106,00	47,17
gebäudebasierte Homogenisierung	0,43	0,41	0,00	1,86	0,40	106,00	9,43
geringe Anzahl	0,71	0,48	0,00	2,02	0,66	106,00	24,53
mittlere Anzahl	-	-	-	-	-	-	-
hohe Anzahl	0,73	0,43	0,00	1,84	0,72	106,00	30,19
schlechte räumliche Verteilung	-	-	-	-	-	-	-
kombiniert - geringe Anzahl	0,14	0,29	0,00	1,43	0,00	106,00	3,77
kombiniert - Hohe Anzahl	0,15	0,29	0,00	1,10	0,00	106,00	0,94

Tabelle 13: Statistische Auswertung Kaierde

	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum	Median	Anzahl	Anzahl über 1m [%]
ALKIS	1,52	0,44	0,48	2,63	1,47	187,00	90,91
gebäudebasierte Homogenisierung	0,12	0,23	0,00	1,30	0,00	189,00	1,59
geringe Anzahl	0,44	0,32	0,03	1,81	0,34	189,00	5,29
mittlere Anzahl	0,42	0,31	0,05	1,75	0,33	189,00	4,76
hohe Anzahl	0,56	0,31	0,05	1,78	0,52	189,00	5,29
schlechte räumliche Verteilung	0,50	0,37	0,05	1,84	0,39	189,00	11,11
kombiniert - Geringe Anzahl	0,18	0,32	0,00	1,57	0,00	189,00	3,70
kombiniert - Hohe Anzahl	0,20	0,33	0,00	1,57	0,00	189,00	3,70

Tabelle 14: Statistische Auswertung Marienhäfe

	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum	Median	Anzahl	Anzahl über 1m [%]
ALKIS	1,13	0,72	0,01	3,94	1,09	85,00	60,00
gebäudebasierte Homogenisierung	0,48	0,59	0,00	3,33	0,28	85,00	18,82
geringe Anzahl	1,20	0,72	0,06	2,97	0,92	85,00	45,88
mittlere Anzahl	0,85	0,55	0,07	2,97	0,85	85,00	25,88
hohe Anzahl	0,80	0,53	0,09	2,97	0,73	85,00	-
schlechte räumliche Verteilung	0,95	0,58	0,09	2,83	0,89	85,00	40,00
kombiniert - Geringe Anzahl	0,58	0,80	0,00	2,57	0,00	85,00	24,71
kombiniert - Hohe Anzahl	0,25	0,33	0,00	1,06	0,00	85,00	1,18

Tabelle 15: Statistische Auswertung Moorausmoor

	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum	Median	Anzahl	Anzahl über 1m [%]
ALKIS	1,27	0,61	0,00	2,33	1,33	68,00	70,59
gebäudebasierte Homogenisierung	0,35	0,51	0,00	1,80	0,00	68,00	13,24
geringe Anzahl	0,73	0,53	0,02	2,38	0,58	68,00	26,47
mittlere Anzahl	-	-	-	-	-	-	-
hohe Anzahl	0,55	0,33	0,01	1,52	0,52	68,00	8,82
schlechte räumliche Verteilung	-	-	-	-	-	-	-
kombiniert - Geringe Anzahl	0,15	0,27	0,00	0,94	0,00	68,00	0,00
kombiniert - Hohe Anzahl	0,14	0,25	0,00	0,94	0,00	68,00	0,00

Tabelle 16: Statistische Auswertung Rohrstorf

	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum	Median	Anzahl	Anzahl über 1m [%]
ALKIS	1,50	0,87	0,08	3,88	1,21	214,00	66,36
gebäudebasierte Homogenisierung	0,31	0,66	0,00	4,22	0,00	217,00	11,06
geringe Anzahl	2,63	1,62	0,05	7,24	2,64	217,00	78,80
mittlere Anzahl	0,71	0,60	0,02	4,10	0,52	217,00	18,89
hohe Anzahl	0,73	0,61	0,01	4,11	0,56	217,00	22,12
schlechte räumliche Verteilung	1,03	0,85	0,01	4,41	0,74	217,00	39,63
kombiniert - Geringe Anzahl	-	-	-	-	-	-	-
kombiniert - Hohe Anzahl	0,00	0,01	0,00	0,20	0,00	217,00	0,00

Tabelle 17: Statistische Auswertung Westrhauderfehn

	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum	Median	Anzahl	Anzahl über 1m [%]
ALKIS	0,79	0,38	0,00	1,94	0,76	739,00	30,58
gebäudebasierte Homogenisierung	0,16	0,23	0,00	1,32	0,00	739,00	0,68
geringe Anzahl	0,51	0,30	0,00	1,98	0,44	739,00	6,63
mittlere Anzahl	0,50	0,29	0,00	1,63	0,46	739,00	5,95
hohe Anzahl	0,51	0,29	0,00	1,65	0,47	739,00	6,09
schlechte räumliche Verteilung	0,48	0,29	0,00	1,63	0,43	739,00	6,63
kombiniert - Geringe Anzahl	0,18	0,24	0,00	1,98	0,07	739,00	0,68
kombiniert - Hohe Anzahl	0,21	0,29	0,00	1,58	0,08	739,00	2,57

## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle Ausführungen, die anderen veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften wörtlich oder sinngemäß entnommen wurden, habe ich kenntlich gemacht.

Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Fassung noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

---

Datum, Ort

Unterschrift