

# Vorstudie zu wertbeeinflussenden Parametern hinsichtlich der Klimaeffizienz von Wohngebäuden

## Preliminary Study on Value-influencing Parameters with Regard to the Climate Efficiency of Residential Buildings

Matthias Soot, Ulrike Dingerdissen, Anette Eltner, Holger Flatt, Harry Fast, Sören Loges, Stefan Ostrau, Jens-André Paffenholz, Alexandra Weitkamp

Der Immobiliensektor trägt maßgeblich zur Treibhausgasemission bei und muss daher in den kommenden Jahren wesentlich verändert werden, um die notwendigen Einsparungen zu erzielen. Im Rahmen dieses Beitrags werden erste Untersuchungen dargestellt, den Wohnimmobilienmarkt mittels verschiedener Geosensoren zu erfassen, um aus den visuell erfassbaren Eigenschaften sowie geometrischen Informationen von Gebäuden Aussagen zu energetischen Zuständen von Immobilien zu tätigen. Dazu ist im Zuge eines Kooperationsprojekts der TU Dresden, der TU Clausthal, dem Fraunhofer IOSB-INA sowie der Geoinformationsbehörde des Kreises Lippe und dem Gutachterausschuss für Grundstückswerte im Kreis Lippe und in der Stadt Detmold eine Messkampagne durchgeführt worden. Im Rahmen dieser Messkampagne wurde eine Begehung durch Immobilienexperten sowie eine terrestrische und drohnenbasierte Erfassung mit RGB-Bildern, Laserscanning und Wärmebildern eines Quartiers durchgeführt. Die erfassten Eigenschaften von Immobilien werden in diesem Beitrag qualitativ diskutiert, um das mögliche Potenzial für eine automatisierte Bewertung des energetischen Zustands abzuschätzen. Durch empirische Untersuchungen sollen darüber hinaus die Werteinflüsse von energetischen Sanierungen auf die Verkehrswerte der Immobilien quantifiziert werden. Diese Information kann genutzt werden, um in etwaigen Förderprogrammen die Differenz zwischen den zu tätigen Investitionen und dem dadurch hervorgerufenen Wertzuwachs zu fördern. In der vorliegenden Untersuchung kann gezeigt werden, dass Einschätzungen von Immobilienexperten zur Qualität von Immobilien zu guten Ergebnissen führen. Die genutzten Sensoren sind geeignet, Qualitäten und Schwächen von Immobilien aufzudecken, jedoch müssen die zeitlichen Konfigurationen der Aufnahmen optimiert werden.

**Schlüsselwörter:** Klimaeffizienz, Gebäudesanierung, Immobilienbewertung, Geosensoren, Wärmeverluste, Überhitzung

*The real estate sector is a major contributor to greenhouse gas emissions and must therefore be significantly changed in the coming years in order to achieve the necessary savings. In the context of this contribution first investigations are to be represented to seize the housing market by means of different geosensors around from the visually seizable characteristics as well as geometrical information of buildings, statements to energetic conditions of real estates to make. In the course of a cooperation project of the TU Dresden, the TU Clausthal, the Fraunhofer IOSB-INA as well as the geoinformation authority of the district of Lippe and the expert committee for property values in the district of Lippe and in the city of*

*Detmold, a measurement campaign was carried out. Within the scope of this measurement campaign, a walk-through of real estate experts was carried out as well as a terrestrial and drone-based recording with RGB images, laser scanning and thermal images of the neighborhood. The captured properties of real estate are discussed qualitatively in this paper to assess the possible potential for an automated assessment of the energy condition. Empirical studies will also be conducted to quantify the value impact of energy retrofits on the market values of the properties. This information can be used to promote in possible subsidy programs only the difference between the investments to be made and the resulting increase in value. In the present study, it can be shown that assessments of the quality of real estate by real estate experts lead to good results. The sensors used are suitable for revealing the qualities and weaknesses of real estates. However, the temporal configurations of the recordings have to be optimized.*

**Keywords:** *Climate Efficiency, building renovations, real estate assessment, geosensors, heat loss, overheating*

## 1 MOTIVATION

Die wirtschaftliche Gesamtnutzungsdauer einer Wohnimmobilie liegt bei ordentlicher Bewirtschaftung in der Größenordnung von ca. 50–100 Jahren /Kleiber et al. 2014, S. 860 ff./ . Viele Gebäude im Bestand der Bundesrepublik Deutschland weisen ein Baujahr auf, bei dem Wärmeisolation noch nicht als bautechnischer Standard galt. Die ersten Gesetze, die eine Gebäudedämmung verlangten, wurden erst nach der Öl-Krise in den 1970er-Jahren erlassen. Heute kann festgestellt werden, dass viele dieser älteren Objekte keine wesentliche energetische Sanierung erfahren haben oder vor vielen Jahren eine heute nicht mehr zeitgemäße Dämmung durchgeführt wurde /Henger et al. 2017/. Um die Klimaziele zu erreichen, müssen diese Immobilien zeitnah saniert werden (ebd.). Hierzu sind Förderprogramme notwendig, um die Eigentümer der Immobilie zu einem schnellen Handeln zu motivieren. Die Förderhöhe sollte dabei jedoch nur die unrentablen Kosten decken, die nicht durch die Wertsteigerung der Immobilien abgedeckt sind. Die unrentablen Kosten ergeben sich aus den Kosten der Maßnahme selbst sowie der Kosten der Finanzierung der Maßnahme (anfallende Zinsen eines Darlehens über die Höhe der Kosten der Maßnahmen) abzüglich der Wertsteigerung der Immobilie. Hierzu ist es zunächst notwendig, mehr über die Auswirkung energetischer Sanierungen auf den Gebäudewert herauszufinden. Darüber hinaus sollten sich die Förderprogramme zunächst auf Quartiere fokussieren, die aufgrund des derzeitigen Gebäudebestands einen erhöhten Bedarf an Sanierungen haben. Diese Quartiere müssen mit geeigneten Methoden identifiziert werden.

gase dar. Allein für Beheizung, Warmwasser und Kühlung fallen 14 % der Energie an. Berücksichtigt man die Bereitstellung der Energie (z.B. Fernwärme und Strom), fällt rund ein Viertel der Emissionen in Deutschland für den täglichen Verbrauch dieser Immobilien an. Darüber hinaus gibt es bei der Konstruktion und dem Abriss der Immobilien einen nicht unerheblichen Anteil an Emissionen /BMUV 2019, S. 50/.

Der Gebäudesektor hat bereits seit dem Jahr 1990 eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen von 210 Mio. Tonnen auf rd. 120 Mio. Tonnen im Jahr 2021 erreicht. Allerdings ist seit 2014 keine wesentliche Abnahme der Emissionen zu erkennen. Zur Erreichung der Klimaschutzziele ist eine weitere Halbierung auf ca. 67 Mio. Tonnen bis in das Jahr 2030 notwendig /Hein et al. 2021/.

84 % der Wohngebäude wurden nach /BMW 2015, S. 31/ vor 1995 errichtet; es ist somit von einem großen Potenzial der Verbesserung der Klimaeffizienz auszugehen, da diese Bestände eine Endenergie zwischen 146 kWh/m<sup>2</sup>/a und 208 kWh/m<sup>2</sup>/a verbrauchen, während neuere Gebäude (ab 2010) mit 50 kWh/m<sup>2</sup>/a auskommen (Abb. 1). Somit ist ein Einsparpotenzial pro Gebäude im Maximum von 100 kWh/m<sup>2</sup>/a bis 150 kWh/m<sup>2</sup>/a für einen Großteil der Bestandsgebäude rechnerisch möglich. Gerade in Zeiten knapper werdender Energien und Lieferengpässen ist eine große Motivation zu erwarten. Eine konkrete Abschätzung der Potenziale in den jeweiligen Städten existiert in der Regel nicht und insbesondere nicht stadtweit.

## 2 KLIMAEFFIZIENZ VON WOHNGBÄUDEN

Im folgenden Abschnitt wird kurz die Bedeutung der Klimaeffizienz von Gebäuden sowie deren Einordnung über die Baualtersklassen und im Kontext der Sanierung und Wertermittlung diskutiert.

### 2.1 Bedeutung der Klimaeffizienz von Wohngebäuden

Der Gebäudesektor stellt mit 25 % der Gesamtemission an Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) einen der wesentlichen Emittenten der Treibhaus-

### 2.2 Zusammenhang von Baualtersklassen und Klimaeffizienz

Ein Zusammenhang von Baualtersklassen und dem Energiebedarf wird unter anderem von /Loga et al. 2015/ oder /Diefenbach et al. 2012/ im Rahmen der Projekte TABULA und EPISCOPE hergestellt. In der Literatur finden sich jedoch auch leicht abweichende Einteilungen der Baualtersklassen (z.B. /Mandl & König 2005/).

Grundsätzlich ist der energetische Standard von Neubauten durch die gesetzlichen Rahmenbedingungen in den letzten Jahrzehnten stetig gestiegen. Neben den gesetzlichen Vorgaben kommt es ebenfalls durch die Nutzung neuer Baustoffe zur Verringerung des

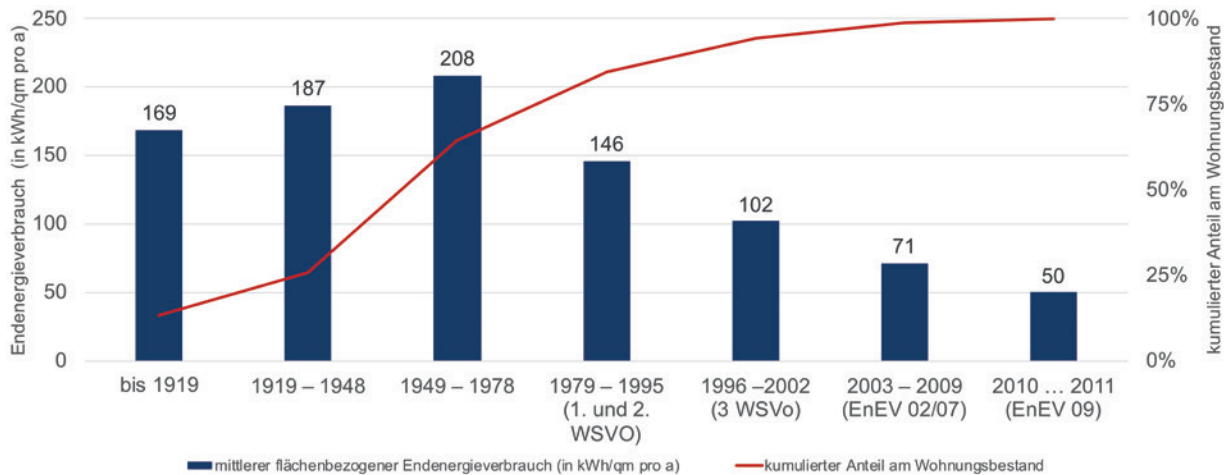


Abb. 1 | Endenergieverbrauch in Bezug auf den Gebäudebestand nach /BMWi 2015/

Energiebedarfs. Diese führen auch bei der Sanierung zu einem geringeren Energiebedarf.

Die erste gesetzliche Regelung lieferte das Gesetz zur Einsparung von Energie in Gebäuden von 1976, das bis 2020 regelmäßig novelliert wurde. In diesem Gesetz wurde die Grundlage für den Bundesgesetzgeber gelegt, weitere Gesetze zu erlassen, namentlich die Heizkostenverordnung (1981 bis heute), die Heizungsanlagenverordnung (von 1978 bis 2002) und die Wärmeschutzverordnung (von 1977 bis 2002 mit Novellierungen 1982 und 1995). Mit der Wärmeschutzverordnung wurde die Zweifachverglasung bei Neubauten zur Pflicht. Ab ca. 1995 wurden die Wärmedämmung durch die Nutzung von Beschichtungen und isolierenden Gasen nochmals deutlich verbessert.

Die beiden letztgenannten Verordnungen wurden im Jahr 2002 durch die Energieeinsparverordnung (EnEV) abgelöst. Diese wiederum wurde in das seit 2020 gültige Gebäudeenergiegesetz überführt. Novellierungen der EnEV fanden in den Jahren 2007, 2009 und 2013/2014 statt. Mit den jeweiligen Novellierungen wurden entsprechend striktere Wärmedurchgangskoeffizienten für Neubauten vorgeschrieben.

### 2.3 Informationsdefizit hinsichtlich der Sanierungsbedarfe und der Wirkung von Sanierungsaufwänden auf den Verkehrswert

Mit der Studie von /Loga et al. 2015/ existiert eine Gebäudetypologie, die einem Energiewert zugeordnet werden kann. Eine Abschätzung des Gebäudebestands im Kontext dieser Gebäudetypologie erfolgt auf Basis des Zensus. Diese Gebäudetypologie gibt jedoch nur sehr generalisierte Kategorien wieder, die mit dem Gebäudealter und dem Gebäudetyp verknüpft sind. Zudem erfolgt eine Abschätzung über die Wirkung von energetischen Sanierungen. Aussagen über den Umfang bereits durchgeführter energetischer Sanierungen und insbesondere der Verortung der sanierten Immobilien werden hier nicht durchgeführt.

In der Literatur finden sich bisher nur sehr wenige empirische Auswertungen zum Einfluss der Klimaeffizienz von Gebäuden auf deren Verkehrswert. Viele Studien fokussieren auf den angelsächsi-

schen Markt und dort insbesondere auf den Markt der Renditeobjekte (Überblick in /Fürst 2017/). Studien zum Markt des individuellen Wohnungsbaus (insbesondere Eigennutzung) auf dem deutschen Immobilienmarkt finden sich bisher nur für den Mietmarkt (z. B. /Steiniger et al. 2018/).

In der Methodik der Wertermittlung werden Sanierungen im Kontext der Verlängerung der Restnutzungsdauer einer Immobilie betrachtet. Hierzu werden verschiedene Maßnahmen im Anhang 2 der Immobilienwertermittlungsverordnung (ImmoWertV 2021) aufgelistet, die einen unterschiedlichen Umfang haben. Für jede Maßnahme werden Punkte vergeben. Anhand der vergebenen Punkte kann über einen funktionalen Zusammenhang die Verlängerung der Restnutzungsdauer der Immobilie abgeschätzt werden. Die maximal mögliche Punktzahl, die je Maßnahme vergeben wird, liegt zwischen 2 und 4. Als die beiden Gewerke mit der höchsten Punktzahl (4 Modernisierungspunkte) werden die

- Erneuerung inkl. Verbesserung der Wärmedämmung des Dachs sowie die
  - Wärmedämmung der Außenwände aufgeführt.
- Weitere Maßnahmen, die genannt werden (jeweils 2 Modernisierungspunkte) und im Zusammenhang einer energetischen Verbesserung des Gebäudes stehen, sind die
- Erneuerung der Leitungssysteme (Strom, Gas, Wasser, Abwasser) sowie die
  - Modernisierung der Fenster und Außentüren.

Die Verlängerung der Restnutzungsdauer führt im Sachwertverfahren zu einer Verringerung der Alterswertminderung und im Ertragswertverfahren zu einer längeren Kapitalisierung des Reinertrags des Gebäudes. Beispielhaft würde bei einer Immobilie mit einem Gebäudealter von 60 Jahren (bei einer Gesamtnutzungsdauer von 80 Jahren) die Fassaden- und Dacherneuerung (8 Modernisierungspunkte) dazu führen, dass die Restnutzungsdauer um 17 Jahre erhöht wird. Geht man von einem Gebäudesachwert von 500 000 € aus, wäre dieser ohne die Verlängerung der Restnutzungsdauer um 75 % abzuschreiben (alterswertgeminderter Sachwert des Gebäudes von 125 000 €). Nimmt man die Sanierungsmaßnahmen hinzu, wird die Abschreibung aufgrund der verlängerten Restnutzungsdauer

auf 54 % reduziert, was zu einem alterswertgeminderten Sachwert von 230 000 € führt.

Alternativ könnten eingesparte Energiebedarfe kapitalisiert als besondere objektspezifische Grundstücksmerkmale (boG) in den Verkehrswertermittlungsverfahren Berücksichtigung finden. Die wesentliche Problematik hierbei ist, dass i. d. R. keine Energiekennwerte der genutzten Referenzobjekte in den Verfahren zur Verfügung stehen.

Das Modell der Modernisierungspunkte der Anlage 2 der ImmoWertV 2021 ist ein theoretisches Modell, dass nicht durch empirische Untersuchungen gestützt wird (ebd.). Ursprünglich wurde es von der AGVGA:NRW entwickelt und mit der Sachwertrichtlinie 2012 erstmals für die bundesweite Nutzung veröffentlicht. Bisher fehlen empirische Untersuchungen, die die tatsächlichen Werteinflüsse der Modernisierung berücksichtigen.

### 3 STAND DER FORSCHUNG FÜR SENSOREN UND MESSMETHODEN

Die Thermographie ist ein Verfahren, das basierend auf bildgebenden Methoden die Anzeige von Oberflächentemperaturen erlaubt. Entsprechend eignet es sich zur Gebäudeinspektion, damit u. a. der Sanierungszustand im Hinblick auf Wärmeverlust beurteilt werden kann /Wild 2007/. Erste Anwendungen von thermischen Infrarot-(TIR-)Bildern in Kombination mit Mobile Mapping zur Erfassung von Fassaden erfolgten bereits Ende der 2010er-Jahre /Hoegner et al. 2007/. Die Methode hat sich seitdem stark weiterentwickelt. Es existieren inzwischen verschiedene Verfahren zur Erzeugung von thermischen Fassadenbildern, die terrestrisch aufgenommene 3D-Punktwolken und TIR-Bilder fusionieren (z. B. /Dlesk & Vach 2019/, /Hoegner et al. 2022/).

UAV-Plattformen zur Erfassung von thermischen Informationen nehmen ebenfalls an Bedeutung zu /Faye et al. 2022/. Im urbanen Raum werden sie bereits genutzt und ihre Anwendung umfasst Straßen- und Gebäudebegutachtung /Westfeld et al. 2015/, /Hoegner et al. 2016/, /Nooralishahi et al. 2021/ sowie die Erkennung von Wärmebrücken in Fassaden /Ficapal & Mutis 2019/.

Eine Herausforderung bleibt die automatische Zuordnung thermischer Bilder zu RGB-Bildern aufgrund der meist niedrigeren Auflösung der TIR-Kamera sowie niedrigerem Kontrast und geringer Textur in den TIR-Bildern. Jedoch zeigen künstliche-Intelligenz-(KI-)basierte Bildzuordnungsverfahren ein hohes Potenzial, dieses Problem zu lösen, denn sie werden bereits eingesetzt, um u. a. Tag- und Nachtszenen zuzuordnen /Dusmanu et al. 2019/.

Bei der Arbeit mit TIR-Bildern müssen zur genauen absoluten Temperaturmessung verschiedene Aspekte beachtet werden. Dazu zählen u. a. die Aufnahmegeometrie, die Emissivität der Oberfläche sowie die radiometrische Kalibrierung der Kamera /Vollmer & Möllman 2018/. In der Messkampagne werden Thermalkameras genutzt, die mit Mikrobolometern arbeiten. Daher müssen des Weiteren noch systematische Abweichungen aufgrund der Sensoreigenschaften korrigiert werden /Budzier & Gerlach 2015/. /Lin et al. 2018/ haben eine Methode vorgestellt, die 3D-Modelle mit TIR-Bildern kombiniert, damit die TIR-Daten basierend auf der Kameraperspektive und der Objektgeometrie für absolute Temperaturmessungen radiometrisch kalibriert werden können.

In /Goodwin et al. 2021/, /Kumar et al. 2007/ wird das Potenzial von Aerosol-Optical-Depth-(AOD-)Satellitenbildern zur Bewertung der Luftqualität aufgezeigt. Des Weiteren wird die ermittelte Luftqualität mit den Immobilienpreisen und dem Aerosolgehalt verglichen und ein Zusammenhang festgestellt. /Chanasit et al. 2021/ untersuchen anhand neuronaler Netze Merkmale, welche sich auf den Hauspreis auswirken und den Charakter eines bestimmten Gebiets widerspiegeln. In /Poursaeed et al. 2018/ werden Immobilienwerte anhand von Bildern im Außenbereich und Innenbereich untersucht. Es wird festgestellt, dass die Berücksichtigung der Inneneinrichtung die Schätzung des Immobilienwerts deutlich verbessert.

Zur hochauflösenden, geometrischen Beschreibung der Gebäudestruktur können 3D-Punktwolken mit dem Verfahren des Laserscannings effizient für die weitere Nutzung erzeugt werden. Es existieren verschiedene Möglichkeiten zur Erfassung von 3D-Punktwolken in Abhängigkeit des Sensors und dessen Nutzung z. B. auf einer Plattform, wie das statische terrestrische Laserscanning (TLS), das mobile Laserscanning (MLS) oder Mobile-Mapping-Systeme auf fahrenden Plattformen oder handgehaltene Systeme (PLS – Personal Laserscanning) (siehe z. B. /Holst et al. 2015/). Eine weitere Möglichkeit ist das UAV-Laserscanning (ULS). Die Wahl der Erfassungsweise bzw. Plattform orientiert sich am Messobjekt bzw. -gebiet. Hier ergibt insbesondere die Kombination der bodengebundenen, terrestrischen 3D-Punktwolke mit einer luftgestützt erfassten 3D-Punktwolke mittels ULS einen signifikanten Mehrwert in der vollständigen Abdeckung von Gebäuden hinsichtlich der Fassaden und Dächer (siehe u. a. /Luhmann et al. 2019/). PLS in Kombination mit SLAM-(Simultaneous-Location-and-Mapping-)Algorithmen erlauben die flexible Erfassung größerer Gebiete zu Fuß. Jedoch gibt es bisher nur wenige Studien, die PLS im urbanen Raum nutzen /Chio & Huo 2021/. Beim Einsatz von Laserscanning und SLAM muss bedacht werden, dass aufgrund von Drifterscheinungen der eingesetzten Navigationssensoren sowie potenziell unzureichendem Informationsgehalt in den 3D-Punktwolken für eine zuverlässige 3D-Punktwolkenregistrierung geringere Genauigkeiten möglich sind /Cadena et al. 2016/, insbesondere im Vergleich zum statischen TLS auf festen, ausgewählten Standpunkten. Andererseits erfordert die Erfassung mittels statischem TLS wesentlich längere Datenakquisitionszeiten.

### 4 FORSCHUNGSFRAGE UND FORSCHUNGSDESIGN DER VORSTUDIE

Das hier gewählte Forschungsdesign ist das der Fallstudienanalyse. Fallstudien charakterisieren sich durch eine geringe Anzahl von Fällen, die in reelle Zusammenhänge eingebunden sind, eine große Anzahl empirischer Beobachtungen pro Fallstudie, unterschiedliche und meist nichtstandardisierte Beobachtungen sowie eine intensive und in der Regel iterative Reflexion bezüglich des Verhältnisses konkreter Beobachtungen und abstrakter Konzepte und Theorien /Blatter et al. 2018, S. 174/.

Die Mehrzahl von Fallstudienanalysen betrachten einen bis vier Fälle /Blatter et al. 2018, S. 174/. Fallstudien Designs unterstützen das induktive Vorgehen zur Beantwortung von Forschungsfragen und stehen typischerweise am Beginn von Forschungsprogrammen.

Zunächst starten Forschungsfelder mit Einzelfallstudien, dann werden vergleichende Fallstudienanalysen durchgeführt, um dezidiert Hypothesen aufstellen zu können, die letztendlich deduktiv mit quantitativen Designs über statistische Analysen mit vielen Fällen überprüft werden /Blatter et al. 2018, S. 3/.

Da das hier untersuchte Forschungsfeld sehr explorativen Charakter hat und das Ziel verfolgt, die erstmalig formulierten Forschungsfragen zu beantworten, wird ein Einzelfallstudiendesign gewählt. Dieses zeichnet sich dadurch aus, dass eine Fallstudie einer detaillierten Analyse unterzogen wird /Lauth et al. 2015, S. 54/.

Aus den fünf Typen von Fallstudien (vgl. im Detail /Lauth et al. 2015, S. 54/) wird ein archetypisches Fallstudiendesign zugrunde gelegt. Dieses fokussiert ein theoretisches Potenzial. Hier begründen die Einzelfälle eine auf ihnen aufbauende Theorie, die dann für zukünftige Untersuchungen richtungweisend wird. Die für den Fall eruierten Zusammenhänge werden verallgemeinert und stellen den Bezugsrahmen für weitere (vergleichende) Fallstudien dar. Ziel sind das Generieren neuer Hypothesen und die Identifizierung von komplexen kausalen Erklärungsmustern. Grenzen dieser Methodik sind die begrenzte Fähigkeit der Verallgemeinerung der Ergebnisse sowie die Gefahr von Ad-hoc-Erklärungen und der hohe Forschungsaufwand /Lauth et al. 2015, S. 54 ff./.

Für die Einsparung von Energie ist der Gebäudesektors essenziell, der einen großen Beitrag leistet, die Klimaziele der Bundesregierung zu erreichen /Henger et al. 2017/. Unbekannt ist jedoch, welches konkrete Potenzial in den Bestandsquartieren liegt. Hier bedarf es Methoden, die dieses Potenzial bestenfalls automatisiert abschätzen lassen.

In einer ersten Einzelfallstudie soll die Fokussierung auf Quartiere gelegt werden, die einen alten und unsanierten Gebäudebestand aufweisen. Für das Vorhaben stellen sich zunächst folgende Forschungsfragen:

Lassen sich aus den Daten von Geosensoren Gebäude identifizieren, die einen erhöhten Sanierungsbedarf aufweisen?

1. Kann das Baualter bzw. die Baualtersklasse sowie der Sanierungsstand abgeleitet werden?
2. Lassen sich die Erkenntnisse auf Quartiere extrapolieren?
3. Lassen sich die Erkenntnisse auf andere Quartiere übertragen?

Die Forschungsfragen sollen dabei zunächst mit einer Fallstudie adressiert werden. Hierzu wird ein Quartier, das eine inhomogene Bebauungsstruktur aufweist, mit Geosensoren aufgenommen. Zudem werden die in der Kaufpreissammlung des örtlichen Gutachterausschusses abgelegten Transaktionen innerhalb dieses Gebiets untersucht und die Kaufpreishöhe mit den Erkenntnissen zum energetischen Zustand verglichen. Mit verschiedenen Methoden werden die Daten zunächst verglichen, um die Machbarkeit des Vorhabens abzuschätzen.

## 5 EMPIRISCHE ERHEBUNG DER WERTBEEINFLUSSENDEN PARAMETER HINSICHTLICH DER KLIMAEFFIZIENZ

Im folgenden Abschnitt werden die durchgeführte Fallstudie vorgestellt sowie die ersten Erkenntnisse diskutiert. Die Beobachtungen im

gewählten Quartier umfassen eine intersubjektive Einschätzung der Baualtersklassen und des Sanierungsstands, eine Kalibrierung dieser Erfassung durch vorhandene Gutachten (welche die erfassten Informationen enthalten) sowie die Erfassung mittels Geosensoren (TLS, UAV, SenseBoxen und Wärmeinformationen) und Satellitenbildern.

### 5.1 Untersuchungsgebiet in Lemgo

Die alte Hansestadt Lemgo ist mit ca. 41 000 Einwohnern eine von insgesamt 181 Mittelstädten in Nordrhein-Westfalen (NRW). Da ca. 45 % (7,6 Mio.) aller NRW-Bürger in Mittelstädten leben, ist die historisch gewachsene Stadt repräsentativ für eine Vielzahl vergleichbarer Städte in NRW und dem gesamten Bundesgebiet. Die Wahl fiel auf Lemgo, da die Stadt mit dem Reallabor Lemgo-Digital über eine Innovationsplattform für die digitale Transformation von Mittelstädten verfügt und sich aufgrund der verfügbaren Internet-of-Things-(IoT-)Infrastruktur im Stadtgebiet (z.B. LoRaWAN sowie Umweltsensoren) für die Durchführung von Forschungsvorhaben in Verbindung mit digitalen Technologien besonders auszeichnet. Zudem existiert ein digitaler Zwilling für das Stadtgebiet.

Basierend auf dem Ziel der Abschätzung von verschiedenen Baualtern und Sanierungsständen wurde ein Quartier gewählt, das sowohl sehr inhomogene Baujahre der Gebäude als auch Sanierungsstände aufweist. Als Beobachtungsgebiet wurde das

LEHREN - FORSCHEN - NEU ENTDECKEN

KOMMEN SIE AN DIE JADE HOCHSCHULE



Die Jade Hochschule in Wilhelmshaven, Oldenburg und Emsfleth zeichnet sich durch innovative Ansätze, kooperative Zusammenarbeit und eine zugewandte Haltung aus. In allen Bereichen fördert die Hochschule Kompetenz und Vielfalt.

**Fachbereich Bauwesen Geoinformation  
Gesundheitstechnologie in der Abteilung  
Geoinformation am Campus Oldenburg:**

**Professur (m/w/d) für das Gebiet  
Angewandte Geodäsie, insbesondere  
Ausgleichsrechnung**

Bes.-Gr. W2 | Kennziffer BGG 59-1

**Bewerbungsschluss: 13. Oktober 2022**

**BEWERBUNGEN AN**

jade-hs.de

JADE HOCHSCHULE  
Wilhelmshaven Oldenburg Emsfleth

E-Mail: [berufungen@jade-hs.de](mailto:berufungen@jade-hs.de)

Die Stellenausschreibung  
finden Sie unter [jade-hs.de/  
professuren](http://jade-hs.de/professuren)



Abb. 2 | Übersicht des Beobachtungsgebiets der Messkampagne am 10. März 2022 im Musikerviertel in Lemgo. Das Beobachtungsgebiet ist im Norden durch die Johann-Sebastian-Bach-Straße, im Osten durch den Steinmüllerweg, im Süden durch den Slavertrift und im Westen durch den Entruper Weg begrenzt. Die Kauffälle im Fokus der Erfassung sind nummeriert in Grau hervorgehoben.

Musikerviertel in Abb. 2 gewählt, das ein Baulter von den 1930er-Jahren bis heute aufweist. Ebenso finden sich in diesem Gebiet Einfamilienhäuser als freistehende Häuser sowie Reihenhäuser und Doppelhaushälften. Zudem stehen im Gebiet diverse Mehrfamilienhäuser. Das Gebiet hat eine Fläche von ca. 27 ha, was eine vollständige Begehung innerhalb eines Tags erlaubt.

Als Jahreszeit wurde der Winter gewählt, um bei möglichst niedrigen Temperaturen während der typischen Heizperiode messen zu können. Um eine erste Machbarkeit einer Superresolution auf andere Stadtquartiere abzuschätzen, wurde als weitere Voraussetzung für die Terminierung der Messkampagne der Überflug des Erdbeobachtungssatelliten Landsat 8 der NASA in Betracht gezogen. Der Erdbeobachtungssatellit Landsat 8 nimmt Bilddaten im optischen sowie im thermal-infraroten Spektralbereich auf; Letzterer ist von besonderem Interesse. Der Überflug von Landsat 8 (Path 195, Row 24) erfolgte am Beobachtungstag, dem 10. März, um 11:15 h (MEZ).

## 5.2 Intersubjektive Einschätzung

Zur Erfassung wird die Methode der Beobachtung adaptiert. Bei der Beobachtung handelt es sich um ein systematisches Vorgehen, dem die wissenschaftliche Beobachtung folgt. Das Interessierende wird schriftlich festgehalten. Gegenstand der Beobachtung sind in der Sozialforschung, dem Ursprung der Methode, Aspekte menschlichen Handelns /Schlipphak et al. 2020, S. 19/, die in der vorliegenden Studie auf Gebäudeparameter variiert werden. Dieses Vorgehen hat sich insbesondere in der Immobilienbewertung als Methodik eta-

bliert; so schätzen Sachverständige bestimmte Einflussgrößen durch ihren gutachterlichen Sachverstand ein, sofern keine Daten vorliegen.

Eine solche Einschätzung ist in der Regel fehlerbehaftet; insofern findet eine Einschätzung in einer Gruppe (in Anlehnung an ein Gruppendelphi, vgl. /Niederberger & Renn 2018/) statt. Vor dem Hintergrund sachverständiger Einschätzung gilt zu beachten, dass bei der Urteilsbildung unter Unsicherheit drei Heuristiken genutzt werden:

1. **Repräsentativität:** Wird für gewöhnlich angewendet, wenn Menschen die Wahrscheinlichkeit schätzen sollen; Objekte, die für eine gewisse Klasse repräsentativ erscheinen, werden auch mit einer zu hohen Wahrscheinlichkeit in diese Klasse eingeordnet /Tversky & Kahneman 1974/.
2. **Verfügbarkeit** (von Beispielen oder Szenarien): Wird oftmals benutzt, wenn Menschen die Häufigkeit einer Klasse oder die Plausibilität einer bestimmten Entwicklung beurteilen sollen; für die Entscheidung wird auf Beispiele (hervorstechende/saliente, dramatische oder persönliche Erfahrungen) zurückgegriffen; hierdurch können Muster erklärt werden /Tversky & Kahneman 1974/. Die Verfügbarkeit nimmt im Laufe der Zeit ab (s. in der Wertermittlung Kropp 2016 für Hochwasserereignisse)
3. **Anpassung an einen Anker:** Wird i. d. R. bei numerischen Vorhersagen angewandt, wenn ein relevanter Wert verfügbar ist; hier nutzen Entscheider unbewusst Vor-Informationen; strategisch sollten sich Entscheider im Vorfeld mögliche Anker bewusst machen /Tversky & Kahneman 1974/. Auch bei Einschätzungen im Kontext der Immobilienbewertung werden diese in Deutschland

und auch international oft beobachtet (u.a. /Jeschke et al. 2014/, /Diaz & Hansz 2006/).

Diese Heuristiken sind zwar ökonomisch und zumeist effektiv, führen aber zu systematischen (aber oft vorhersagbaren) Irrtümern. Ein besseres Verständnis dieser Heuristiken und den dadurch entstehenden Verzerrungen könnte Urteile und Entscheidungen unter Unsicherheit verbessern. Auch weitere kognitive Effekte, wie der Halo-Effekt (Schlussfolgerung von bekannten Eigenschaften auf unbekannte, die aber mit den bekannten nicht korrelieren), wirken auf Entscheidungen ein /Tversky & Kahneman 1974/.

Vor diesem theoretischen Hintergrund bedarf es einer Kalibrierung der Einschätzung, die durch die Gruppenentscheidung zwar objektiviert wurde, aber dennoch weiterhin den benannten Heuristiken unterliegt. Die Kalibrierung erfolgt mithilfe vorliegender Gutachten; durch deren Vergleich mit der Einschätzung werden Systematiken offengelegt.

### 5.2.1 Erfassungsparameter und Vorgehensweise

Im Rahmen der Fallstudie wird neben der Aufnahme durch die Geosensoren ebenfalls eine intersubjektive Einschätzung jedes Gebäudes hinsichtlich der

- Gebäudeart (Einfamilienhaus, Zweifamilienhaus, Reihenhaus Doppelhaushälfte),
- des Baujahres bzw. der Baualtersklasse,
- der Geschossigkeit (Anzahl Vollgeschosse, Keller, ausgebautes Dachgeschoss),
- der Dachform bzw. -isolierung,
- der Wandisolierung,
- des Alters der Fenster,
- der generellen Standardstufe gemäß Sachwertrichtlinie (NHK 2010) und

weiterer Besonderheiten (z. B. neuer Schornstein) durchgeführt. Auf Basis eines Erfassungsbogens wird die jeweilige Eigenschaft jedes Objekts nach einer internen Diskussion in einer Gruppe von drei Immobilienexperten erfasst. Die Erfassung erfolgt zeitlich parallel zu den Messungen.

### 5.2.2. Kalibrierung der Einschätzung durch Vergleich mit der Kaufpreissammlung

Insgesamt können 30 Kauffälle im Untersuchungsgebiet in der Kaufpreissammlung des örtlichen Gutachterausschusses selektiert werden. Dazu werden die Objekte der vergangenen sieben Jahre betrachtet.

Für 19 dieser Objekte ist eine Information über den allgemeinen Zustand der Immobilie (Standardstufe) in der Kaufpreissammlung erfasst. Für zwei Objekte wurde offensichtlich eine Sanierung nach der Erfassung in der Kaufpreissammlung durchgeführt (orange

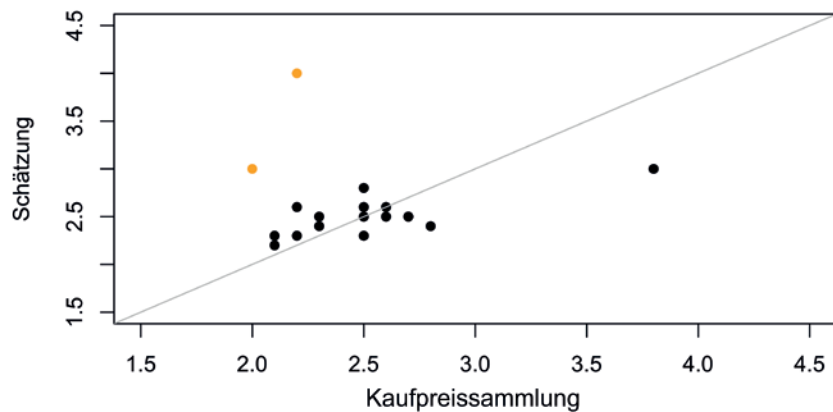


Abb. 3 | Gegenüberstellung der in der Kaufpreissammlung geführten Standardstufe und der durch die Experten im Feld eingeschätzte Standardstufe

abgebildete Fälle in Abb. 3). Aus diesem Grund passt die Schätzung in der Örtlichkeit nicht mit der Eintragung in der Kaufpreissammlung überein.

Grundsätzlich weichen die Einschätzungen symmetrisch ab und die Abweichungen liegen im Mittel bei 0. Die Streuung liegt in der Größenordnung von 0,3 Standardstufen (einfache Standardabweichung).

Es kann beobachtet werden, dass bei gehobener Standardstufe (3,8 in der Kaufpreissammlung) die Schätzung der Sachverständigen in der Örtlichkeit stark abweicht. Dies könnte auf Ankereffekte vorhergegangener Schätzungen zurückzuführen sein. Die Einstufungen sind aber auch mit der Repräsentativität erklärbar, da die vorher bewerteten Objekte alle eine andere Standardstufe hatten, die ggf. fälschlich als repräsentativ eingeschätzt wurde.

Im vorliegenden Fall liegen die Standardstufen im Straßenverlauf in der Größenordnung von 2,6 bis 2,7. Die zwei direkt vorher eingeschätzten Objekte weisen die Standardstufen 3,1 und 2,9 auf. Für diese Objekte sind keine Referenzen vorhanden. Es kann also sein, dass diese vorher bewerteten Objekte ebenfalls eine höhere Standardstufe aufweisen würden, sich die Experten aber an dieser Stelle nicht getraut haben, von den vorher vergebenen 2,6 bzw. 2,7 stark abzuweichen. Es ist also aus diesen ersten Beobachtungen zu vermuten, dass höhere Standardabweichungen systematisch wegen des Ankereffekts unterschätzt werden (s. oben). Erklärbar wäre diese zu geringe Einstufung auch mit der Tatsache, dass sich sehr hohe Standardstufen durch Sanierungen innerhalb der Immobilie ergeben (z.B. Erneuerung der Heizung), die von außen nicht einsehbar sind. Allerdings ist bei dieser Immobilie die Bemerkung Solaranlage (außergewöhnlich in diesem Baugebiet) ein Indiz für die höhere Standardstufe von außen sichtbar gewesen.

Eine Kalibrierung scheint hier mit einer relativen Gewichtung sinnvoll zu sein (je höher die Standardstufe eingeschätzt wird, desto mehr muss diese noch nach oben angepasst werden).

Weitere Beobachtungen, die auf Basis der kleinen Stichprobe festgestellt werden können, sind ein

- Einlaufverhalten sowie eine
- signifikante Verbesserung der Schätzungen nach einer Unterbrechung der Bewertung (rote Linie in Abb. 4).

Schließt man den vorgenannten Ausreißer am Nachmittag (gekreuzter Fall 9 in Abb. 4) aus, so liegt die Standardabweichung zunächst

bei rd. 0,35 Standardstufen; nach einer längeren zeitlichen Unterbrechung in der Mittagszeit sinkt die Standardabweichung auf rd. 0,15 Standardstufen. Ähnliche Verhalten, die mit einer Regeneration verknüpft sind, können auch bei anderen Einschätzungen z.B. von Richtern festgestellt werden /Danziger et al. 2011/.

Insofern kann die Hypothese abgeleitet werden, dass intersubjektive Schätzungen einer Trainingsphase (die ersten Objekte dienen dem Training und gehen nicht in eine Auswertung ein) bedürfen, die von der Testphase durch eine Regenerationspause getrennt ist. Die vorgenannten Beobachtungen benötigen weitere Untersuchungen auf Basis weiterer Stichproben, um die Hypothese zu verifizieren.

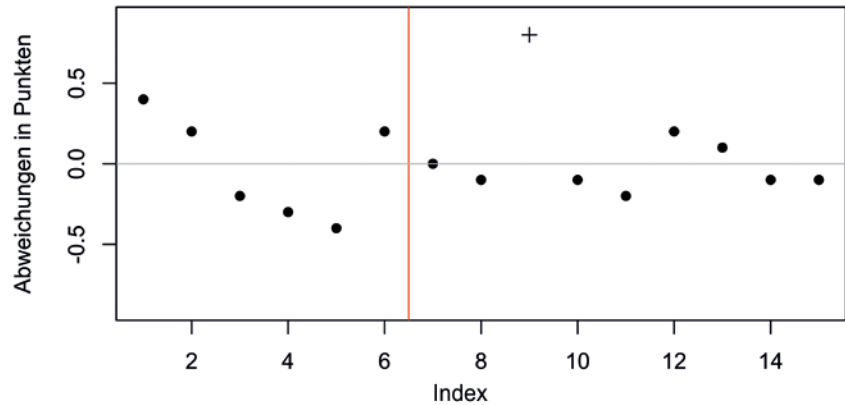


Abb. 4 | Darstellung der Abweichungen im zeitlichen Verlauf

### 5.3 Informationsgewinnung mit Sensoren

#### 5.3.1 Wärmebilder

Im Rahmen der Vorstudie wurden ca. 100 Objekte parallel mit einer video-optischen (GoPro) und einer TIR-Kamera (VarioCAM HDx head 610) aufgenommen. Die TIR ist in der Lage, Bilder mit einer Auflösung von 640 × 480 Pixeln (Pixelgröße: 17 µm) bei einer thermischen Auflösung von min. 30 mK zu erfassen. Entsprechend hochaufgelöst können Temperaturunterschiede gemessen werden. Die absolute Temperaturmessgenauigkeit ist jedoch wesentlich niedriger und liegt in der Größenordnung von ±2 °C. Die verwendete Brennweite betrug 10 mm. Die Bilder wurden in annähernd senkrechter Orientierung zu den Fassaden in Abständen zu den Gebäuden von etwa 10 m bis 25 m aufgenommen. Die resultierende Bodenauflösung der Pixel beträgt zwischen 17 mm und 43 mm. Die hohe Auflösung erlaubt ein sehr differenziertes Bild der Temperaturverteilung auf den Fassaden (Abb. 10) und Dächern (Abb. 11).

#### 5.3.2 Terrestrisches Laserscanning

Im Rahmen dieser Vorstudie wurden drei scannende Systeme eingesetzt: (1) der mobile, handgehaltene Laserscanner ZEB-Horizon der Firma GeoSLAM, (2) der mobile, getragene Sensor VLX 2.0 der Firma NavVis und (3) der statisch eingesetzte terrestrische Laserscanner Imager 5016 der Firma Zoller+Fröhlich (Z+F). Für die Georeferenzierung der 3D-Punktwolken sowie die Korrektur der Driften der mobilen, getragenen Sensorsysteme wurden im Vorfeld markierte Passpunkte genutzt, deren Koordinaten mit RTK-GNSS bestimmt wurden.

Der ZEB-Horizon erfasst Punkte mit einer Geschwindigkeit von 300 kHz und Genauigkeiten von 1 cm bis 3 cm (laut Hersteller). Insgesamt wurden vier Datensätze

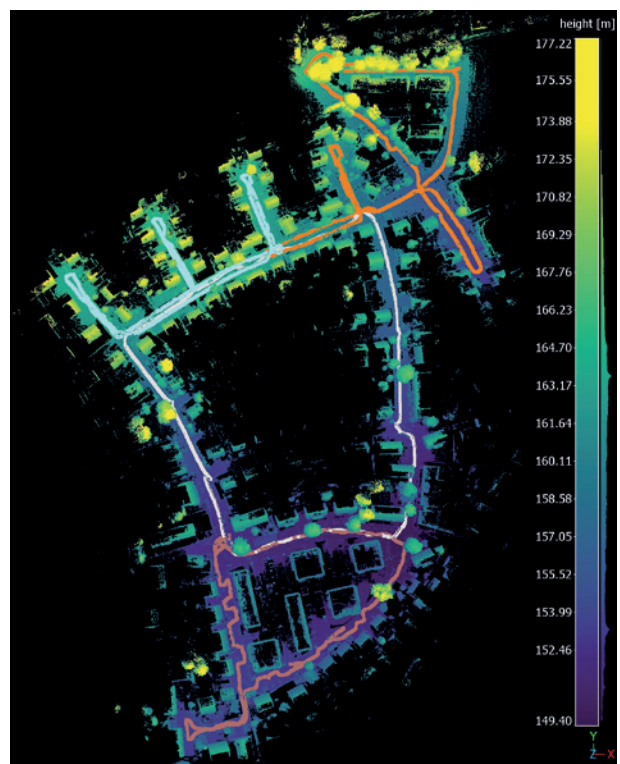


Abb. 5 | Ergebnis der Kartierung mittels PLS. Es wurden insgesamt vier Begehungen vorgenommen. Die Trajektorien des jeweiligen Scans besitzen eine einheitliche Farbe (Scan 1 blau, Scan 2 orange, Scan 3 braun, Scan 4 lila).

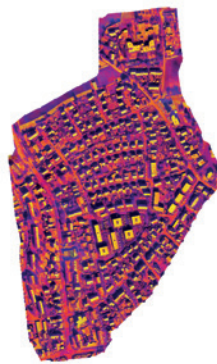


Abb. 6 | Ergebnisse der Befliegung: Thermalaufnahme (links), Punktwolke (rechts)



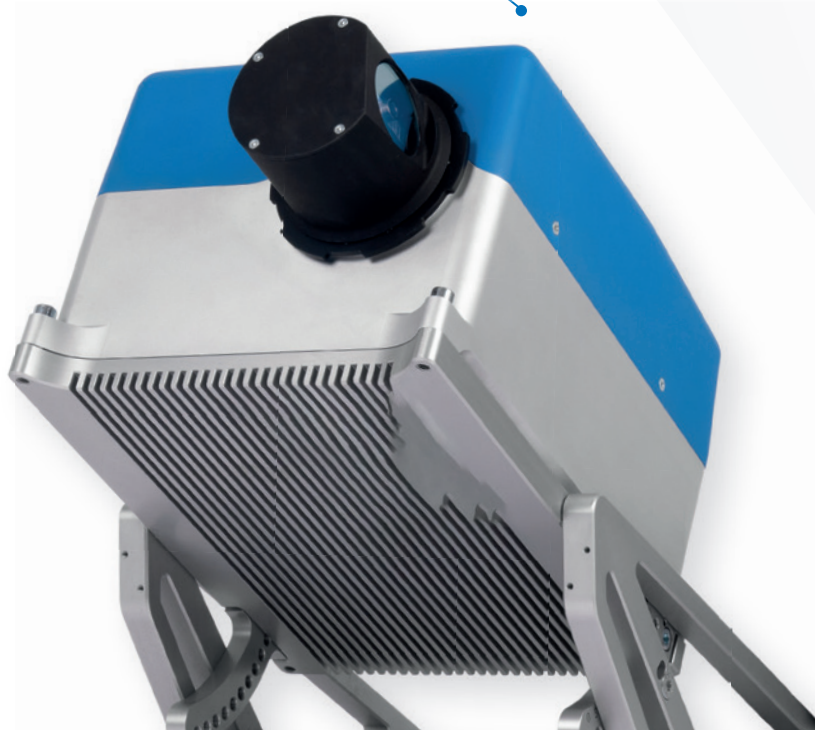
# The Z+F Laserscanner

[sales@zf-laser.com](mailto:sales@zf-laser.com) | [www.zf-laser.com](http://www.zf-laser.com)

Z+F IMAGER<sup>®</sup> 5016



Z+F PROFILER<sup>®</sup> 9020



Visit us at our  
booth  
Hall 3 / Booth 3.131  
INTERGEO 2022  
Oct. 18. - 20.  
Essen

aufgezeichnet. Die einzelnen Begehungszeiten betragen zwischen 16 min und 22 min. Es wurde auf Schleifenschlüsse geachtet, indem Start- und Zielpunkt zusammenfielen (Abb. 5). Die erzielten Genauigkeiten der Georeferenzierung betragen zwischen 4 cm und 11 cm. Mit dem NavVis VLX 2.0 wurde in fünf separaten Abschnitten das Messgebiet erfasst. Im Rahmen der Auswertung im Post-Processing mittels der Cloud-Lösung NavVis IVION wurde ein Simultaneous-Localization-and-Mapping (SLAM-)Ansatz genutzt und eine georeferenzierte, eingefärbte 3D-Punktwolke mit einer Auflösung von 5 mm am Objekt berechnet. Die Erfassung mit dem Z+F Imager 5016 wurde von 22 festen Standpunkten für den nördlichen Bereich des Messgebiets (Johann-Sebastian-Bach-Straße) und mit 22 festen Standpunkten für den südlichen Bereich des Messgebiets (Slavertrift) (vgl. Abb. 2) mit den Erfassungsparametern High und Quality+ durchgeführt. Die Georeferenzierung der 3D-Punktwolken erfolgte ebenfalls über die GNSS-Passpunkte und lieferte ein Ergebnis von 1 cm bis 2,4 cm und entspricht somit den Erwartungen bei mit RTK-GNSS bestimmten Passpunkten. Für Details zu den eingesetzten Sensoren bzw. Sensorsystemen wird auf die Datenblätter der jeweiligen Hersteller verwiesen.

### 5.3.3 UAV-Befliegung

Um neben der Erfassung von Fassaden auch detaillierte Informationen über Geometrie und Wärmeinformationen der oberen Gebäudestruktur zu erhalten, wurde das Untersuchungsgebiet mittels UAV befliegen. Unter Einsatz einer DJI Matrice 300 RTK ist das Gebiet mit zwei unterschiedlichen Sensorsystemen als Nutzlast befliegen worden (Abb. 6). Zur Erfassung einer detaillierten 3D-Punktwolke wurde als Nutzlast ein Zenmuse L1 mit einer Systemgenauigkeit von horizontal 10 cm bei 50 m und vertikal 5 cm bei 50 m Flughöhe eingesetzt. Die Erfassung der 3D-Punktwolke erfolgte im Vorfeld durch eine zweitägige Befliegung auf einer Flughöhe von 85 m. Die Befliegung erfolgte durch Schrägaufnahmen im 85°-Winkel, ausgeführt als Kreuzbefliegung in fünf Richtungen. Pro Richtung beträgt die Auflösung 166 Punkte pro m<sup>2</sup>.

Zusätzlich ist parallel zu den terrestrischen Erfassungsmethoden mit einem Multisensorsystem (DJI H20T) befliegen worden, welches unter anderem auch eine radiometrische Wärmebildkamera mit einer Auflösung von 640 × 512 Pixel umfasst. Hier wurde in zwei Flughöhen befliegen. Die Bodenaufklärung der Pixel beträgt 10,67 cm

bei einer Flughöhe von 120 m und 5,78 cm bei einer Flughöhe von 65 m. Die Ergebnisse der Befliegung sind Thermalaufnahmen mit einer thermischen Auflösung von min < 50 mk im JPEG-Format sowie berechnete Orthophotos.

### 5.3.4 Erfassung der Umgebungstemperaturen

Um bei der Messkampagne das Mikroklima im Quartier mit berücksichtigen zu können, wurden Klimamessungen mit vier Sensorsystemen mit Fokus auf Temperaturmessungen durchgeführt. Zum Einsatz gekommen ist hierbei die SenseBox, welche zur Klasse der „Low-Cost-Sensoren“ (LCS) zählt. LCS sind weniger präzise und deshalb auch nur für orientierende Messungen wie in dieser Vorstudie einsetzbar, dafür aber vergleichsweise kompakt und kostengünstig erhältlich /Peltier 2020/. Nach eigenen Untersuchungen ist ohne Bestrahlung des Temperatursensors eine Genauigkeit in der Größenordnung 0,3 °C möglich. Die SenseBoxen übertragen ihre gemessenen Klimadaten in einem 10-Minuten-Intervall über das Funknetz LoRaWAN an eine vom Fraunhofer IOSB-INA entwickelte Datenplattform, welche im Rahmen des Projekts BürgerWOLKE Soest zum Einsatz kommt /BürgerWOLKE 2022/. Hier wurden die Klimadaten im Rahmen der Vorstudie gespeichert und visualisiert. Abb. 7 zeigt einen Aufbau der SenseBox sowie im Rahmen der Vorstudie mit vier Sensoren gemessene Temperaturverläufe im Quartier. Die gemessenen Temperaturverläufe lagen primär in dem Bereich von 10 °C bis 20 °C. Während des Vormittags mit ansteigender Sonneneinstrahlung wurden überwiegend sehr ähnliche Temperaturen von allen SenseBoxen gemessen. Im Nachmittagsverlauf kam es zu größeren Abweichungen in der Größenordnung von ca. 2 °C bis 3 °C. Diese beruhen primär auf einer Eigenerwärmung des Strahlungsgehäuses bei hoher Sonneneinstrahlung.

## 5.4 Datenvergleich/-fusion

Im Rahmen der Messkampagne wurden thermische Informationen von zwei unterschiedlichen Perspektiven aufgenommen (terrestrisch und luftgestützt). Dies führt zu verschiedenen Aufnahmegeometrien der Fassaden und Dächer. Die terrestrischen Bilder besitzen aufgrund ihrer orthogonalen Ausrichtung gute thermische Beobachtungsbedingungen, da im Fall von Objekten mit hoher Emissivität



Abb. 7 | Mobile Senseboxen (links) mit gemessenen Temperaturverläufen während der Messkampagne (rechts)

kaum reflektierte Strahlung erfasst wird. Hinsichtlich der Dachflächen besitzen die luftgestützten UAV-Aufnahmen eine bessere Perspektive. Es muss jedoch aufgrund des großen Objektabstands von 120 m von einer niedrigeren Messgenauigkeit im Vergleich zu den terrestrischen Bildern ausgegangen werden, da der Einfluss der Atmosphäre sowie der Umgebungsstrahlung auf die Messung mit wachsendem Objektabstand zunimmt.

Es wurde ein Vergleich der bildbasierten Temperaturmessung zwischen UAV- und terrestrischen Bildern vorgenommen. Dazu wurden zwölf Gebäude gewählt, dessen Dächer in beiden Datenquellen sichtbar waren. Fassaden konnten nicht verglichen werden, da sie nicht in den UAV-Bildern sichtbar sind. Der zeitliche Abstand zwischen den terrestrischen und luftgestützten Aufnahmen war < 20 Minuten. Die Dachflächen wurden für den Vergleich maskiert. Dabei wurde darauf geachtet, dass homogene Dachoberflächen gewählt wurden. Für Pixel im terrestrischen TIR-Bild wurde die mittlere Temperatur berechnet, während für die UAV-Bilder mit dem DJI Thermal-Analysis-Tool drei Rechtecke in der gleichen Dachregion aufgezo- gen wurden, um ebenfalls den mittleren Temperaturwert der enthaltenen Pixel zu berechnen.

Der Vergleich zeigt, dass beide Perspektiven auf die Dächer einen ähnlichen Temperaturtrend abbilden (Abb. 8). Die UAV-Aufnahmen messen jedoch niedrigere Temperaturen im Vergleich zu den terrestrischen Aufnahmen. Der Unterschied beträgt etwa 7 °C. Des Weiteren zeigt sich, dass die Temperatur in den UAV-Bildern stärker zunimmt als in den terrestrischen Aufnahmen.

## 5.5 Aggregation im GIS – der Weg vom GIS zum digitalen Zwilling

Im Rahmen der Vorstudie sind die erfassten Daten in einem kommunalen Geoinformationssystem zusammengeführt worden. Kommunale Geoportale bilden die Grundlage für verwaltungsinterne

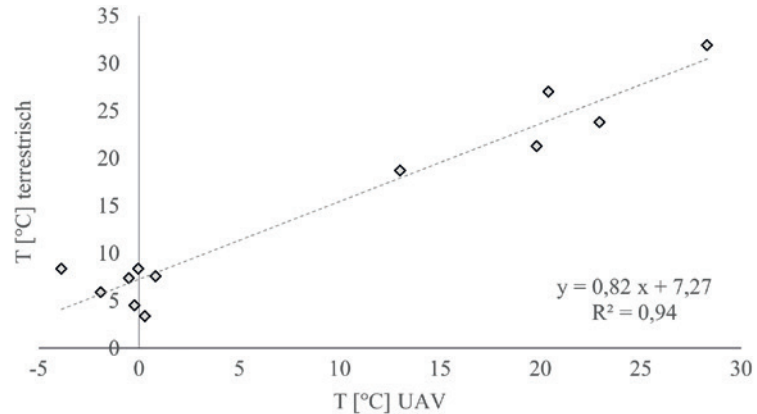


Abb. 8 | Vergleich der mittleren bildbasierten Temperaturmessung, die mittels terrestrischer TIR und UAV-TIR von zwölf ausgewählten Dachflächen erfolgte

Arbeitsabläufe und Entscheidungsfindungen für raumbezogene Fragestellungen. Sie bieten Fachexperten Zugriff auf Geodaten und versetzen sie in die Lage, tiefer mit den Daten zu interagieren, ohne zwingend Expertenwissen im Umgang mit Geoinformationssystemen (GIS) und Geodaten vorauszusetzen. Sie stellen den Bürgern Geobasisdaten und Geofachdaten bereit und bieten so ein Schaufenster für kommunale raumbezogene Themen. Moderne Portallösungen verlassen zunehmend eine reine Kartendarstellung und präsentieren Geodaten, welche in Form von 3D-Punktwolken, digitalen Gelände-(DGM) bzw. Oberflächenmodellen (DOM) oder bereits abgeleiteten Gebäudemodellen auf Basis von CityGML oder Industry Foundation Classes (IFC) vorliegen können. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, sowohl eine Szenerie aus unterschiedlichen Perspektiven zu betrachten als auch 3D-Analysen oder Simulationen zu realisieren. Das Ziel ist die Aggregation der erfassten Daten in einem GIS. In einer zweiten Stufe soll hieraus, zusammen mit möglichst vielen Fachdisziplinen, ein digitaler Zwilling aufgebaut werden. Die Umsetzung eines Monitorings im Sinne einer kommunalen Wärmeplanung ist in einer dritten Stufe vorgesehen:

1. Bestandsanalyse,
2. Potenzialanalyse,
3. Aufstellung Zielszenario,



Abb. 9 | Datenaggregation im GIS mit segmentierter Punktwolke (links), texturiertes Gebäudemodell (rechts)

#### 4. Wärmewendestrategie /Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 2020/.

Der Aufbau eines solchen digitalen Zwilling stellt große Anforderungen an das Geodatenmanagement. In der Vorstudie entstanden rund 46 GB 3D-Punktwolkenmaterial aus vier verschiedenen Datenquellen sowie 3,2 GB an Bildmaterial aus den Thermalaufnahmen. Hinzu kommen die aufgenommenen Daten der Umweltsensoren sowie Auswertungen der Kaufpreissammlung und weitere erfasste Informationen zu dem Erfassungsgebiet. Die Integration von Umweltinformationen in Echtzeit wird zudem in Zukunft eine wichtige Rolle für die fortlaufende Übereinstimmung von Realität und aufgebaute digitalen Zwilling spielen. Weitere Geo- und Umweltdaten können zudem über Geodatendienste integriert werden.

In *Abb. 9* ist die Aggregation der Daten im GIS dargestellt. Auf Grundlage der 3D-Punktwolke der UAV-Befliegung wurden die Teilpunktwolken der einzelnen Gebäude segmentiert. Die Geometrien der Gebäude sowie die weiteren auf Gebäude bezogenen Daten können mittels Gebäudemodellen zusammengeführt werden. Im Bereich der Geoinformationssysteme und der Bauinformatik ergeben sich hier das CityGML-Format und die semantischen intelligenten Bauwerksmodelle im IFC-Format. Beide Modellarten lassen sich in GIS einbinden, sodass beide auch flächenbasierte Analysen auf Straßenzug oder Quartierebene zulassen. Die Modellierung aus den aufgenommen 3D-Daten, Fotografien und weiteren semantischen Daten dient dazu, die entscheidungsrelevanten Merkmale bereits im Vorfeld anwendungsbezogen und bedarfsgerecht bereitzustellen. Auf der Grundlage eines Gebäudemodells (hier CityGML) sind die Thermalaufnahmen der Fassaden im GIS sichtbar abgebildet (*Abb. 9*).

Der digitale Zwilling bildet zukünftig die Grundlage für zwei GIS-Anwendungen auf unterschiedlichen Akteursebenen. Eine Anwendung wird Experten die Entscheidungsgrundlage liefern, in dem die behandelten Daten ausreichend aufbereitet dargelegt und innerhalb der Anwendungen weitere Analysen der Daten ermöglicht werden. Die zweite Akteursebene bezieht sich auf die Bürgerebene, sodass hier Informationen z. B. in Form eines interaktiven Storytellings präsentiert werden.

## 6 VERKNÜPFUNG DER INTERSUBJEKTIVEN EINSCHÄTZUNG MIT DEN ERFASSTEN INFORMATIONEN

### 6.1 Verknüpfung der intersubjektiven Einschätzung mit den Wärmebildern und Bildern

#### 6.1.1 Gebäude

Ein direkter Vergleich zwischen den Einschätzungen der Fassadentemperatur und der intersubjektiv eingeschätzten Wärmedämmung ist nicht möglich, da die Bilder im Tagesverlauf aufgenommen wurden und zunächst eine Kalibrierung hinsichtlich der Außentemperatur erfolgen müsste. Die direkte Sonneneinstrahlung auf die Fassade verhindert, dass Wärmebrücken erkennbar werden. Insofern sollten für weitere Untersuchungen sonnenfreie Tage bzw. die frühen Morgen- oder bestenfalls Nachtstunden genutzt werden.

Bei Untersuchungen der verschiedenen Bautypen werden verschiedene Aspekte durchgeführter oder vernachlässigter Sanierungen deutlich:

- Wärmeunterschiede in den Fensterflächen erkennbar; hier bedarf es weiterer Untersuchungen, ob dies Rückschlüsse auf die Erneuerung von Fenstern erlaubt (z. B. bei gleichem Material unter gleichem Blickwinkel) oder ob durch unterschiedliche Materialien lediglich unterschiedliche Emissivitäten festgestellt werden konnten (z. B. *Abb. 10*, Bilder oben).
- Übergang zum Dach, Geschossdecken, wodurch Modernisierungsbedarfe deutlich werden (z. B. *Abb. 10*, Bilder oben).
- Veränderungen in der Fassade, die optisch nicht ersichtlich sind, z. B. zugemauerte Fenster als Wärmebrücken (z. B. *Abb. 10*, Bilder mittig).
- Mangelhafte Dämmung der Fassade mit unterschiedlichem Dämmverhalten (z. B. *Abb. 10*, Bilder unten: hier ist deutlich erkennbar, dass das Reihenhaus Kältebrücken aufweist; das Endhaus rechts daneben wurde vermutlich aus diesem Grund neu gedämmt).
- An- und Umbauten mit unterschiedlicher Wärmedämmung.
- Lüftungen ohne Wärmerückgewinnung.
- Absätze in der Fassade.
- Wärmeverluste an Dachgauben.
- Unterschiedliche Wärmedämmung an den unterschiedlichen Seiten der Gebäude, die durch Wärmeabsätze am Rand der Fassade sichtbar werden.
- Nicht geheizte Zimmer.

Insofern ist ein Erkenntnisgewinn aus den TIR-Bildern abzuleiten, der Indizien für den Sanierungszustand der Gebäude erkennen lässt. Im Vordergrund stehen dabei die Bauteile Fassade, Fenster und Türen, die wiederum Rückschlüsse auf das Baujahr (Stand der Technik zum Baujahr) oder Sanierung (untypische Bauteile für das Baujahr) ziehen lassen. Parallel dazu sind auch Baumängel erkennbar (wie nicht fachmännisch ausgeführte Dämmungen). Die Aussagen lassen sich optimieren, indem nicht bei direkter Sonneneinstrahlung gemessen wird. Bei Sonneneinstrahlung erwärmen sich die Bauteile so stark von außen, dass sehr schnell keine Wärmeabstrahlung von innen trotz der Winterjahreszeit zu erkennen ist.

Im Rahmen der Vorstudie ist lediglich eine qualitative Aussage zu ausgewählten Objekten möglich. Zukünftig müssen die TIR-Aufnahmen durch eine Temperaturkorrektur basierend auf bekannter Aufnahmegeometrie, bekannten Materialeigenschaften und bekannter Kameraparameter durchgeführt werden, um quantitative Aussagen im Gesamtgebiet durchführen zu können.

#### 6.1.2 Quartier

*Abb. 11* lässt erkennen, dass die thermische Befliegung flächenhafte Erkenntnisse erlaubt. So sind unterschiedliche Bautypen (Gebäudearten, aber auch Baujahre) auch aus der Wärmeinformation erkennbar (vgl. 1 in *Abb. 11*). Diese stimmt überein mit der Einschätzung der Baualtersklassen aus intersubjektiven Bewertungen sowie mit den terrestrisch aufgenommenen TIR-Bildern.

Auch die Belüftung der Straßen ist aus der Wärmeinformation ableitbar (siehe 2 bis 4 in *Abb. 11*). Ebenfalls die Kühlungsfunktion von Freiflächen (s. nördlicher Rand des Gebietes, 5) ist erkennbar.

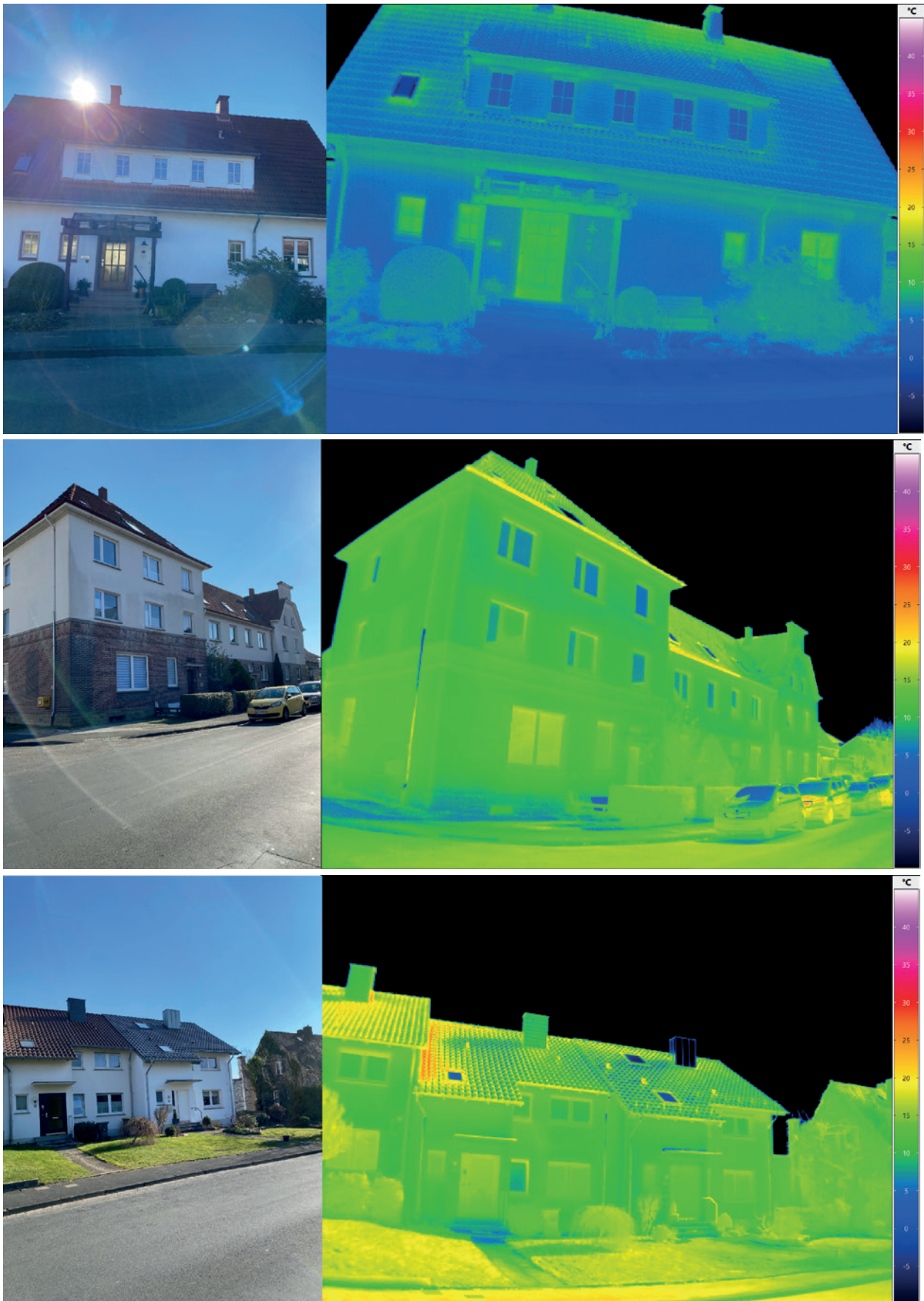


Abb. 10 | Erkenntnisgewinne aus den TIR-Bildern

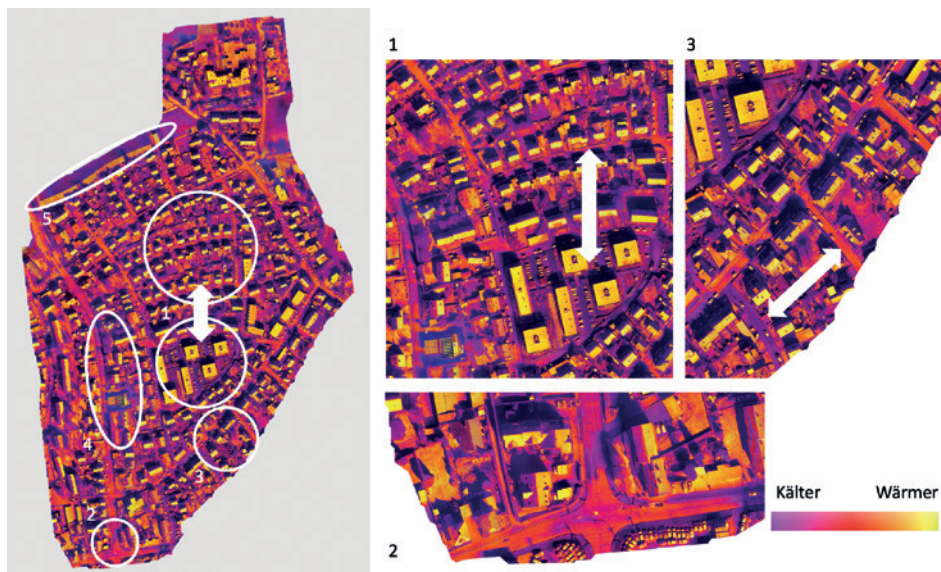


Abb. 11 | Wärmeinformation des Musikerviertels

Hier bedarf es jedoch weiterer Untersuchungen, ob die Temperaturunterschiede der Straßen ggf. auf andere Materialien oder Farbe der Straßen zurückgeführt werden können.

Um detailliertere Erkenntnisse gewinnen zu können, bedarf es insbesondere der Aufnahme unterschiedlicher Zeitschnitte am Tag, sodass über den Vergleich Erhitzungen und insbesondere Überhitzungen der Straßenflächen und Plätze ersichtlich werden. Hier bieten sich als Zeitschnitte nachts und mittags an. Je nach Umgebungs- und Objekttemperatur können im Tagesverlauf „thermal crossovers“ auftreten (meist morgens und abends), bei denen die Temperaturunterschiede am geringsten sind /Lillesand et al. 2015/. Diese Zeitpunkte sind für die Datenakquise zu vermeiden. Die unterschiedlichen thermischen Signaturen der Grünflächen gegenüber den asphaltierten Flächen (ersteres ist kühler, obwohl Vegetation und Asphalt ähnlich hohe Emissivität besitzen) werden ebenfalls in den Daten sichtbar.

Insgesamt bedarf es einer vertieften Auseinandersetzung bezüglich der unterschiedlichen Emissivität der Objekte bei Temperaturvergleichen und des Einflusses der Atmosphäre und der Umgebungsstrahlung bei absoluten Temperaturmessungen. Daneben muss zukünftig weiter untersucht werden, wie das UAV-TIR für ein Upscaling zu Satellitenbildern genutzt werden kann.

## 6.2 Verknüpfung der intersubjektiven Einschätzung mit TLS

Für die geometrische Beschreibung der Gebäudestruktur werden die erfassten 3D-Punktwolken der unterschiedlichen Sensoren und Sensorsysteme verwendet. Eine vergleichende Analyse der damit erfassten 3D-Punktwolken und insbeson-

dere der Mehrwert der Fusion der terrestrischen und luftgestützten 3D-Punktwolken ist in Vorbereitung und daher nicht im Fokus dieses Beitrags. Der Fokus liegt auf der Frage zur Ableitung u. a. der Wandstärke der Gebäude aus den 3D-Punktwolken und der Verknüpfung mit der intersubjektiven Einschätzung. Der schrägen Sicht der terrestrisch erfassten 3D-Punktwolken auf ein Fenster kommt hier eine große Bedeutung zu, sodass der Einfallswinkel der Laserstrahlen seitlich auf die Fensteröffnung fällt und sich hier ein Maß für die Wandstärke bzw. Fensterleibung ableiten lässt. Bei gut vergleichbaren Häusern, wie Reihenhäuser mit gleichem Baujahr (Abb. 12), lässt sich nahezu unmittelbar ableiten bzw. direkt messen, ob eine Dämmung auf die Fassade aufgebracht wurde. Bei anderen Gebäuden muss aufgrund der baujahrestypischen Mauerstärke darauf geschlossen werden, ob eine Dämmung aufgebracht wurde. Dies birgt jedoch Unsicherheiten, die es zukünftig abzuschätzen gilt. Ebenfalls muss in zukünftigen Untersuchungen beachtet werden, dass durch den Fensterrahmen der innere Teil der Fensteröffnung verdeckt wird.



Abb. 12 | Visuelle Erfassung der Fassadendämmung durch die unterschiedliche Wandstärke bei gut vergleichbaren Objekten

## FAZIT UND AUSBLICK

Als Schlussfolgerungen für die intersubjektive Einschätzung sollten die bekannten Heuristiken in das Design integriert werden. Vor der Einschätzung sollten die Experten sich etwaige Ankereffekte bewusst machen. Daneben sollte die Bewertung nicht straßenweise erfolgen, sondern die Gebäudetypen in einer zufälligen Reihenfolge bewertet werden, um auszuschließen, dass einzelne abweichende Bautypen in die repräsentative Gruppe eingeordnet werden. Es sollten möglichst nur Experten bewerten, die ausreichend Erfahrung in der Bewertung der vorliegenden Gebäude haben. Die intersubjektive Einschätzung sollte zunächst mit einer Trainingsphase starten, die von der Testphase als eigentlich Bewertung durch eine Regenerationspause getrennt ist.

Die terrestrischen TIR-Bilder lassen vielfältige Rückschlüsse auf die Baualterklasse und den Sanierungsstand zu. Dies ist aufgrund der Außensicht limitiert; innen vorgenommene Maßnahmen, wie die Erneuerung einer Heizungsanlage, können nicht erfasst werden.

Die erfassten 3D-Punktwolken stellen im Bereich ihrer Fusion zu einer homogenen 3D-Punktwolke aus den unterschiedlichen Erfassungssystemen verbunden mit unterschiedlichen Aufnahmegeometrien und Unsicherheiten einen Forschungsaspekt dar. Weiterhin wird ein Schwerpunkt der weiteren Analysen der 3D-Punktwolken in der Betrachtung der Rauigkeit und des Abstrahlverhaltens zur Informationsgewinnung über Unterschiede in den Baumaterialien liegen.

Die Luft-TIR-Bilder aus der UAV-Befliegung lassen unterschiedliche Temperaturzonen erkennen; diese spiegeln in den Baugebieten die Baualterklassen und den Sanierungsstand grundsätzlich wieder. Dies wird limitiert durch den kleinen Maßstab und der Aufnahme im Tagesverlauf ohne zeitliche Referenz; hier bedarf es zukünftig der Verknüpfung mit den SenseBoxen zum Vergleich mit der Lufttemperatur. Die SenseBoxen erlauben es, den Verlauf der Temperaturen im Tagesgang als Referenz einzubringen. Außerdem muss in weiteren Untersuchungen die eindeutige Zeitzuordnung der Einzelbilder einfließen. Insgesamt kann aus den ersichtlichen Wärmeunterschieden, die grundsätzlich mit der intersubjektiven Erfassung übereinstimmen, die Hypothese abgeleitet werden, dass die UAV-TIR-Bilder für ein Upscaling verwendet werden können, um daraus einen Sanierungsstand eines Quartiers ableiten zu können.

Es handelt sich bei der durchgeführten Studie um eine Einzelfallstudie, sodass generelle Übertragbarkeiten und vertiefte Aspekte in folgenden Studien geprüft und weiter analysiert werden müssen. Insbesondere muss die Erkenntnis zu den Aufnahmezeitpunkten einfließen. Es kann festgestellt werden, dass die Wärmeinformationen der Gebäude besser in frühen Morgenstunden oder nachts gewonnen werden sollten. Für die Detektion von Hitzeinseln im Tagesverlauf bedarf es mindestens zweier Aufnahmezeitpunkte (morgens und abends) oder mehr, um die Überhitzung bzw. die Durchlüftung besser feststellen zu können.

Zukünftige Untersuchungen sollen darauf ausgerichtet sein, Quartiere und deren Sanierungspotenzial zu identifizieren, um die Klimateffizienz von Quartieren erfassen zu können. Im Ergebnis soll ein Verfahren entwickelt werden, das durch Erfassung der Gebäudeinformationen mittels Geosensoren eine Einschätzung des Sanierungsaufwands erlaubt, wodurch wiederum Entscheidungsträger die Möglichkeit erhalten, ihre Fördermittel zielgerichtet auf bestimmte

Quartiere auszurichten. Mit Blick auf den Förderbedarf muss zudem abgeleitet werden, wie sich Maßnahmen zur energetischen Sanierung auf den Verkehrswert einer Immobilie auswirken, um zukünftig lediglich die für den Eigentümer unrentablen Kosten fördern zu müssen. Positive Wertentwicklungen der Immobilien, die durch die Sanierung erzielt werden, sollten bei der Förderung berücksichtigt und diese entsprechend verringert werden.

Um großflächige Aussagen zu machen, soll zukünftig ein möglichst automatisierter Prozess entwickelt werden. Zudem soll auch die Übertragbarkeit der Erkenntnisse eines Stadtquartiers auf andere Quartiere mittels schlechter aufgelöster Aufnahmen thermaler Satelliten (beispielsweise Sentinel-3) in Kombination mit Ansätzen der Super-Resolution geprüft werden.

## LITERATUR

Blatter, J.; Langer, P. C.; C. Wagemann (2018): *Qualitative Methoden in der Politikwissenschaft*. Springer Fachmedien, Wiesbaden.

BMUV – Bundesministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2019): *Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzes 2050*. Berlin.

BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2015): *Energieeffizienzstrategie Gebäude – Wege zu einem nahezu klimaneutralen Gebäudebestand*. Eigenverlag.

Budzier, H.; Gerlach, G. (2015): Calibration of uncooled thermal infrared cameras. In: *Journal of Sensors and Sensor Systems* 4(2015)1, 187–197. <https://doi.org/10.5194/jsss-4-187-2015>.

BürgerWOLKE Soest (2022): *Aktuelle Stadtklimadaten. Urbane Datenplattform*. <https://urbanedaten-soest.de>.

Cadena, C.; Carlone, L.; Carrillo, H.; Latif, Y.; Scaramuzza, D.; Neira, J.; Reid, I.; Leonard, J. J. (2016): Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Toward the robust-perception age. In: *IEEE Transactions on Robotics* 32(2016)6, 1309–1332. <https://doi.org/10.1109/TRO.2016.2624754>.

Chanasit, K.; Chuangsuwanich, E.; Suchato, A.; Punyabukkana, P. (2021): A Real Estate Valuation Model Using Boosted Feature Selection. In: *IEEE Access* 9(2021), 86938–86953. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3089198.

Chio, S. H.; Hou, K. W. (2021): Application of a hand-held lidar scanner for the urban cadastral detail survey in digitized cadastral area of taiwan urban city. In: *Remote Sensing* 13(2021)24. <https://doi.org/10.3390/rs13244981>.

Danziger, S.; Levav, J.; Avnaim-Pesso, L. (2011): Extraneous Factors in Judicial Decisions. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108(2011)17, 6889–6892. doi: 10.1073/pnas.1018033108.

Diaz III, J.; Hansz, J. A. (2006): A taxonomic field investigation into induced bias in residential real estate appraisals. In: *International Journal of Strategic Property Management* 14(2006)1, 3–17. DOI: 10.3846/ijspm.2010.02.

Diefenbach, N.; Loga, T.; Dascalaki, E. G.; Balaras, C. A.; Zavr1, M. S.; Rakušček, A.; Corrado, V.; Corgnati, S. P.; Ballarini, I.; Renders, N.; Vimmr, T.; Wittchen, K. B.; Kragh, J. V. (2012): Application of building typologies for modelling the energy balance of the residential building stock. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt.

Dlesk, A.; Vach, K. (2019): Point cloud generation of a building from close range thermal images. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives* 42(2019)5/W2, 29–33. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-W2-29-2019>.

Dusmanu, M.; Rocco, I.; Pajdla, T.; Pollefeys, M.; Sivic, J.; Torii, A.; Sattler, T. (2019): D2-Net: A Trainable CNN for Joint Description and Detection of Local Features. CVPR.

- Faye, E.; Jolivot, A.; Théau, J.; Regnard, J.-L.; Gómez-Candón, D. (2022): Thermal-infrared imaging. In: Eitner, A.; Karrasch, P.; Stöcker, C.; Klingbeil, L.; Hoffmeister, D.; Kaiser, A.; Rovere, A. (Hrsg.): UAVs in Environmental Sciences – Methods and Applications. WBG Academic, Darmstadt, 157–177.
- Ficapal, A.; Mutis, I. (2019): Framework for the detection, diagnosis, and evaluation of thermal bridges using infrared thermography and unmanned aerial vehicles. In: Buildings 9(2019)8. <https://doi.org/10.3390/buildings9080179>.
- Fürst, F. (2017): Klimaschutz in der Immobilienwirtschaft: Potenziale und Hindernisse. In: Rottke, N. B.; Voigtländer, M. (Hrsg.): Immobilienwirtschaftslehre – Ökonomie. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 559–577.
- Goodwin, M. B.; Fontenla, M.; Gonzalez, F. (2021): Estimating the impact of pollution on wages and housing prices using satellite imagery. In: Applied Economics Letters 28(2021)20, 1750–1753. DOI: 10.1080/13504851.2020.1853665.
- Hein, F.; Litz, P.; Grauchen, P. (2021): Abschätzung der Klimabilanz Deutschlands für das Jahr 2021. Agora Energiewende 227/04-A-2021/DE.
- Henger, R.; Runst, P.; Voigtländer, M. (2017): Energiewende im Gebäudesektor – Handlungsempfehlungen für mehr Investitionen in den Klimaschutz. 119.
- Hoegner, L.; Kumke, H.; Meng, L.; Stilla, U. (2007): Automatic extraction of textures from infrared image sequences and database integration for 3d building models. In: Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG) (2007)6, 459–468.
- Hoegner, L.; Tuttas, S.; Xu, Y.; Eder, K.; Stilla, U. (2016): Evaluation of methods for coregistration and fusion of RPAS-based 3D point clouds and thermal infrared images. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives 41(2016), 241–246. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B3-241-2016>.
- Hoegner, L.; Zhu, J.; Xu, Y.; Stilla, U. (2022): Generierung von thermischen Punktwolken von Gebäuden aus Infrarotbildsequenzen und MLS-Punktwolken. In: Luhmann, T.; Schumacher, C. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laser-scanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage. Wichmann, Berlin/Offenbach, 204–213.
- Holst, C.; Kuhlmann, H.; Paffenholz, J.-A.; Neumann, I. (2015): TLS im statischen, stop & go sowie kinematischen Einsatz. In: Schriftenreihe DWW, Band 81 (Terrestrisches Laserscanning 2015 – TLS 2015). Wißner, Augsburg, 9–26.
- Jeschke, A.; Krägenbring, R.; Steinbrecher, D. (2014): Zur Optimierung der Auswertung intersubjektiver Schätzungen. In: Flächenmanagement und Bodenordnung (fub) (2014)2, 83–89.
- Kleiber, W.; Simon, J.; Weyers, G. (2014): Verkehrswertermittlung von Grundstücken: Kommentar und Handbuch zur Ermittlung von Marktwerten (Verkehrswerten), Versicherungs- und Beleihungswerten unter Berücksichtigung der ImmoWertV. Bundesanzeiger, Köln.
- Kropp, S. A. (2016): Hochwasserrisiko und Immobilienwerte – Zum Einfluss der Lage in überschwemmungsgefährdeten Gebieten sowie zu den Folgen von Überschwemmungsereignissen auf den Verkehrswert von Wohnimmobilien. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- Kumar, N.; Chu, A.; Foster, A. (2007): An empirical relationship between PM(2.5) and aerosol optical depth in Delhi Metropolitan. In: Atmospheric Environment 41(1994)21, 4492–4503. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2007.01.046.
- Lauth, H.-J.; Pickel, G.; Pickel, S. (2015): Methoden der vergleichenden Politikwissenschaft. Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- Lillesand, T.; Kiefer, R.; Chipman, J. (2015): Remote sensing and image interpretation. 7th Edition. Wiley, Hoboken, NJ.
- Lin, D.; Maas, H.-G.; Westfeld, P.; Budzier, H.; Gerlach, G. (2018): An advanced radiometric calibration approach for uncooled thermal cameras. The Photogrammetric Record 33(2018)161, 30–48. <https://doi.org/10.1111/phor.12216>.
- Loga, T.; Stein, B.; Diefenbach, N.; Born, R. (2015): Deutsche Wohngebäude-typologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt. DOI: 10.13140/RG.2.2.11714.50881.
- Luhmann, T.; Chizhova, M.; Gorkovchuk, D.; Hastedt, H.; Chachava, N.; Lek-veishvili, N. (2019): Combination of terrestrial laserscanning, uav and close-range photogrammetry for 3d reconstruction of complex churches in Georgia. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (2019)XLII-2/W11, 753–761. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-753-2019.
- Mandl, W.; König, H. (2005): Baukosten-Atlas – Bauen im Bestand – Wohnungsbau. WEKA-Praxislösungen. WEKA, Kissing.
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2020): Kommunale Wärmeplanung – Handlungsleitfaden. Stuttgart.
- Niederberger, M.; Renn, O. (2018): Das Gruppendelphi-Verfahren. Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- Nooralishahi, P.; Ibarra-Castanedo, C.; Deane, S.; López, F.; Pant, S.; Genest, M.; Avdelidis, N. P.; Maldague, X. P. V. (2021): Drone-based non-destructive inspection of industrial sites: A review and case studies. In: Drones 5(2021)4. <https://doi.org/10.3390/drones5040106>.
- Peltier, R. E.; Castell, N.; Clements, A. L.; Dye, T.; Hüglin, C.; Kroll, J. H.; Lung, S.-C.-C.; Ning, Z.; Parsons, M.; Penza, M.; Reisen, F.; von Schneidmesser, E. (2021): An Update on Low-cost Sensors for the Measurement of Atmospheric Composition, December 2020. World Meteorological Organization (WMO), Geneva.
- Poursaeed, O.; Matera, T.; Belongie, S. (2018): Vision-based real estate price estimation. In: Machine Vision and Applications 29(2018)4, 667–676. DOI: 10.1007/s00138-018-0922-2.
- Schlipphack, B.; Treib, O.; Gehrau, V. (2020): Die Beobachtung als Methode in der Politikwissenschaft. UVK, München.
- Steiniger, B.; Nadler, C.; Franke, M.; Pommeranz, C. (2018): Wahrnehmung des Energieausweises in hypothetischen und realen Mietentscheidungen auf dem deutschen Wohnimmobilienmarkt. In: Zeitschrift für Immobilienökonomie 4(2018)1, 29–48. DOI: 10.1365/s41056-018-0023-3.
- Tversky, A.; Kahneman, D. (1974): Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases: Biases in judgments reveal some heuristics of thinking under uncertainty. In: Science 185(1974), 1124–1131.
- Vollmer, M.; Möllmann, K.-P. (2018): Infrared Thermal Imaging – Fundamentals, Research and Applications. 2nd Edition. Wiley, Hoboken, NJ.
- Westfeld, P.; Mader, D.; Maas, H.-G. (2015): Generation of TIR-attributed 3D Point Clouds from UAV-based Thermal Imagery. In: Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (2015)5, 381–393.
- Wild, W. (2007): Application of infrared thermography in civil engineering. In: Proceedings of the Estonian Academy of Sciences 13(2007)4, 436–444.

## Dr.-Ing. Matthias Soot

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN  
PROFESSUR FÜR LANDMANAGEMENT

Helmholtzstraße 10 | 01069 Dresden  
matthias.soot@tu-dresden.de



## Jun.-Prof. Dr.-Ing. Anette Eitner

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN  
PROFESSUR FÜR GEOSENSORSYSTEME

Helmholtzstraße 10 | 01069 Dresden  
anette.eitner@tu-dresden.de





**Dipl.-Ing. Ulrike Dingerdissen**

GUTACHTERAUSSCHUSS FÜR  
GRUNDSTÜCKSWERTE IM KREIS LIPPE  
UND IN DER STADT DETMOLD

Felix-Fechenbach-Str. 5 | 32756 Detmold  
U.Dingerdissen@kreis-lippe.de



**Dr.-Ing. Holger Flatt**

FRAUNHOFER IOSB-INA  
INSTITUTSTEIL FÜR INDUSTRIELLE  
AUTOMATION

Campusallee 1 | 32657 Lemgo  
holger.flatt@iosb-ina.fraunhofer.de



**M. Sc. Harry Fast**

FRAUNHOFER IOSB-INA  
INSTITUTSTEIL FÜR INDUSTRIELLE  
AUTOMATION

Campusallee 1 | 32657 Lemgo  
harry.fast@iosb-ina.fraunhofer.de



**M. Sc. Sören Loges**

KREIS LIPPE – FACHBEREICH  
GEOINFORMATION, KATASTER,  
IMMOBILIENBEWERTUNG

Felix-Fechenbach-Str. 5 | 32756 Detmold  
S.Loges@kreis-lippe.de



**Dr.-Ing. Stefan Ostrau**

KREIS LIPPE – FACHBEREICH  
GEOINFORMATION, KATASTER,  
IMMOBILIENBEWERTUNG

Felix-Fechenbach-Str. 5 | 32756 Detmold  
S.Ostrau@kreis-lippe.de



**Prof. Dr.-Ing. Jens-André Paffenholz**

TECHNISCHE UNIVERSITÄT CLAUSTHAL  
INSTITUTE OF GEO-ENGINEERING

Erzstraße 18 | 38678 Clausthal-Zellerfeld  
jens-andre.paffenholz@tu-clausthal.de



**Prof. Dr.-Ing. Alexandra Weitkamp**

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN  
PROFESSUR FÜR LANDMANAGEMENT

Helmholtzstraße 10 | 01069 Dresden  
alexandra.weitkamp@tu-dresden.de



Manuskript eingereicht: 22.08.2022 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet

