

Master of Science FHNW in Virtual Design and Construction

# Gebäudezustand aus neuer Perspektive

Die Anwendung und Aussagekraft von  
luftgestützten, thermischen Schrägbildaufnahmen

**Version zur Veröffentlichung**

Autor:

**Samuel Ackermann****10. Januar 2025****Thesis Begleitung**

Prof. Nora Dainton

Studiengangsleiterin MSc FHNW VDC  
Fachhochschule Nordwestschweiz**Thesis Experte**

Oliver Schneider

Dozent für Digitales Bauen  
Fachhochschule Nordwestschweiz**Praxispartnerin**

Institut Geomatik

Hochschule für Architektur,  
Bau und Geomatik FHNW

## Eigenständigkeitserklärung

«Ich erkläre hiermit,

dass ich die vorliegende Master-Thesis mit dem Titel **«Gebäudezustand aus neuer Perspektive: Die Anwendung und Aussagekraft von luftgestützten, thermischen Schrägbildaufnahmen»** selbst und selbständig verfasst habe,

dass ich sämtliche nicht von mir selbst stammenden Textstellen bzw. Bestandteile eines Werkes (Bilder, Grafiken, Codes, etc.) gemäss gängigen wissenschaftlichen Zitierregeln korrekt zitiert und die verwendeten Quellen gut sichtbar erwähnt habe;

dass ich in einem Verzeichnis alle verwendeten Hilfsmittel (KI-Assistenzsysteme wie Chatbots [z.B. ChatGPT], Übersetzungs- [z.B. DeepL] Paraphrasier- [z.B. Quillbot]) oder Programmierapplikationen [z.B. GitHub Copilot] deklariert und ihre Art der Verwendung offengelegt und bei den entsprechenden Textstellen angegeben habe,

dass ich sämtliche immateriellen Rechte an von mir allfällig verwendeten Materialien wie Bilder oder Grafiken erworben habe oder dass diese Materialien von mir selbst erstellt wurden;

dass das Thema, die Arbeit oder Teile davon nicht bei einem Leistungsnachweis eines anderen Moduls verwendet wurden, sofern dies nicht ausdrücklich mit der Dozentin oder dem Dozenten im Voraus vereinbart wurde und in der Arbeit ausgewiesen wird;

dass ich mir bewusst bin, dass meine Arbeit auf Plagiate und auf Drittautorschaft menschlichen oder technischen Ursprungs (künstliche Intelligenz) überprüft werden kann;

dass ich mir bewusst bin, dass die Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik einen Verstoss gegen diese Eigenständigkeitserklärung bzw. die ihr zugrundeliegenden Studierendenpflichten der Studien- und Prüfungsordnung der Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik verfolgt und dass daraus disziplinarische Folgen (Verweis oder Ausschluss aus dem Studiengang) resultieren können.»

Samuel Ackermann

Luzern, 10. Januar 2025

## Kurzfassung

Um die Klimaziele bis 2050 zu erreichen, ist ein erheblicher Beitrag aus dem Gebäudesektor erforderlich, insbesondere durch die Reduktion von Wärmeverlusten bei älteren Bauten. Die vorliegende Masterarbeit untersucht in diesem Zusammenhang die Potenziale und Grenzen luftgestützter, niedrig aufgelöster thermischer Schrägaufnahmen von Fassaden, welche eine grossflächige Erfassung des energetischen Gebäudezustands ermöglichen sollen.

Zur Beantwortung dieser Frage wurde zunächst eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt, die relevante Studien und Verfahren zusammenfasst. Ergänzend fanden Expert/innen-Gespräche statt, um praktische Erfahrungen aus verschiedenen Fachbereichen einzubeziehen. Auf dieser Basis entstanden Anwendungskonzepte, die sich an den spezifischen Bedürfnissen unterschiedlicher Nutzergruppen orientieren. In einem anschliessenden Konzeptnachweis wurde zudem exemplarisch gezeigt, wie sich die entwickelten Konzepte in eine kommunale Plattform integrieren lassen.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass nicht allein die Messgenauigkeit, sondern vor allem auch die Zugänglichkeit und Verständlichkeit der Daten entscheidend sind. Während Fachleute detaillierte Korrekturschritte erwarten, ist für Städte und Gemeinden eine niederschwellige Darstellung wichtiger. Diese Erkenntnis spiegelt sich in zwei angepassten Konzepten für unterschiedliche Anspruchsgruppen wider.

Insgesamt trägt diese Arbeit dazu bei, die Analyse grosser Gebäudebestände weiterzuentwickeln und somit Sanierungsmassnahmen gezielter zu planen und zu priorisieren. Die vorgestellten Methoden können einen wichtigen Beitrag leisten, um thermische Schwachstellen grossflächig zu erkennen und dadurch die gesteckten Klimaziele wirksamer zu unterstützen.

### Schlagworte

Thermografie, luftgestützte thermische Schrägbildaufnahmen, energetische Sanierungsmassnahmen, thermische Gebäudezustandserfassung

## Vorwort

Diese Masterarbeit markiert den Abschluss meines Masterstudiums in Virtual Design and Construction (VDC) an der Fachhochschule Nordwestschweiz in Muttenz. Das primäre Ziel dieser Arbeit ist es, im Kontext von Architektur, Gebäudetechnik und VDC-Ansätzen das Potenzial von luftgestützten, gering aufgelösten thermischen Schrägbildaufnahmen von Fassaden für die Gebäudezustandsermittlung zu beleuchten.

In den letzten Jahren haben technologische Fortschritte die Möglichkeiten der Gebäudeanalyse erheblich erweitert. Insbesondere die Nutzung von Flugzeugen zur grossflächigen Erfassung thermischer Daten bietet neue Perspektiven und Anwendungen im Baubereich. Die Arbeit untersucht dabei das Potenzial dieser Technologie, um Fassaden von Gebäuden effizient zu analysieren und somit einen Beitrag zur energetischen Sanierung und zur Erreichung der Klimaziele der Schweiz zu leisten.

Die Erstellung dieser Thesis wäre ohne die Unterstützung und die Zusammenarbeit vieler Menschen und Institutionen nicht möglich gewesen. Mein besonderer Dank gilt meiner Betreuerin Prof. Nora Dainton, die mich durch die verschiedenen Phasen dieser Arbeit begleitet und stets wertvolle Hinweise und Anregungen gegeben hat. Ebenso danke ich meinem Fachexperten Oliver Schneider für seine fachliche Unterstützung und seinen praktischen Rat.

Ein herzlicher Dank gilt auch meinem Praxispartner, dem Institut Geomatik an der Fachhochschule Nordwestschweiz, das mich bei der Entwicklung der Fragestellungen unterstützt und mir Zugang zu notwendigen Daten und Ressourcen gewährt hat.

Ein besonderer Dank geht auch an alle Experten, die sich für Gespräche zur Verfügung gestellt haben und deren Einsichten und Erfahrungen diese Arbeit entscheidend bereichert haben. Ihre Bereitschaft, ihre Zeit und ihr Wissen zu teilen, hat massgeblich zur Tiefe und Qualität der Ergebnisse beigetragen.

Nicht zuletzt möchte ich meiner Familie, meinen Freunden und meinen Mitstudierenden danken, die mich während dieses anspruchsvollen Projekts unterstützt und mir immer wieder neue Energie gegeben haben.

Ich hoffe, dass die Leserinnen und Leser dieser Masterarbeit von den gewonnenen Erkenntnissen profitieren und dass die Ergebnisse dazu beitragen, das Thema der luftgestützten thermischen Gebäudeanalyse weiter voranzutreiben und in der Praxis anzuwenden.

# Inhaltsverzeichnis

EIGENSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG .....	II
KURZFASSUNG .....	III
VORWORT .....	IV
INHALTSVERZEICHNIS .....	V
GLOSSAR .....	VIII
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....	XI
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1 HINTERGRUND UND KONTEXT.....	1
1.2 ZIELE.....	2
1.3 FRAGESTELLUNGEN .....	3
1.4 ABGRENZUNG .....	4
1.5 VORGEHEN .....	4
1.6 RAHMENBEDINGUNGEN .....	5
<b>2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN .....</b>	<b>6</b>
2.1 GEBÄUDEZUSTANDSERFASSUNG .....	6
2.1.1 Vorgehen.....	7
2.1.2 Normative Grundlagen .....	7
2.1.3 Prüfmethode n .....	9
2.1.4 Thermografische Zustandserfassung.....	13
2.2 STAND DER FORSCHUNG .....	17
2.2.1 Vorgehen.....	17
2.2.2 Datenerhebung.....	18
2.2.3 Datenauswertung.....	21
2.2.4 Relevante Publikationen.....	24
2.3 ZUSAMMENFASSUNG.....	28
<b>3 EXPERT/INNEN-GESPRÄCHE .....</b>	<b>30</b>
3.1 VORGEHEN .....	31
3.1.1 Gesprächsmethoden.....	31
3.1.2 Gesprächspartner/innen.....	31
3.1.3 Informationsanforderungen .....	34
3.1.4 Thermografieaufnahmen.....	36
3.1.5 Gesprächs-Leitfäden .....	39
3.2 ERGEBNISSE EXPERT/INNEN-GESPRÄCHE .....	41
3.2.1 Relevante Aussagen der Expert/innen.....	41
3.2.2 Entstehung der zwei Nutzergruppen und deren Einteilung.....	42
3.2.3 Anspruchsgruppe "Experten" .....	43
3.2.4 Anspruchsgruppe "Kommunen" .....	43
3.3 ZUSAMMENFASSUNG EXPERT/INNEN-GESPRÄCHE .....	44

<b>4</b>	<b>METHODIK</b> .....	<b>45</b>
4.1	ENTWICKLUNG DER ANWENDUNGSKONZEPTE.....	45
4.2	ENTWICKLUNG DES KONZEPTNACHWEISES .....	47
<b>5</b>	<b>ERGEBNISSE</b> .....	<b>48</b>
5.1	ANWENDUNGSKONZEPT FÜR ANSPRUCHSGRUPPE "EXPERTEN" .....	48
5.2	ANWENDUNGSKONZEPT FÜR ANSPRUCHSGRUPPE "KOMMUNEN" .....	54
5.3	ZUSAMMENFASSUNG ANWENDUNGSKONZEPTE .....	55
5.4	KONZEPTNACHWEIS (POC).....	56
5.4.1	<i>Modelle</i> .....	57
5.4.2	<i>Webanwendung</i> .....	58
<b>6</b>	<b>DISKUSSION</b> .....	<b>61</b>
6.1	HAUPTFRAGESTELLUNG .....	61
6.2	1. TEILFRAGESTELLUNG .....	61
6.3	2. TEILFRAGESTELLUNG .....	62
6.4	3. TEILFRAGESTELLUNG .....	62
6.5	INTERPRETATION DIESER RESULTATE .....	62
6.6	BESCHRÄNKUNG DER FORSCHUNG .....	63
6.7	WEITERER FORSCHUNGSBEDARF .....	63
6.8	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	64
<b>7</b>	<b>FAZIT</b> .....	<b>65</b>
<b>8</b>	<b>PERSÖNLICHE REFLEXION</b> .....	<b>67</b>
<b>9</b>	<b>VERZEICHNISSE</b> .....	<b>69</b>
9.1	LITERATURVERZEICHNIS.....	69
9.2	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	74
9.3	TABELLENVERZEICHNIS.....	75
<b>10</b>	<b>ANHANG</b> .....	<b>76</b>
	ANHANG A: ANALYSE LITERATURVERZEICHNIS – STAND DER FORSCHUNG .....	77
	ANHANG B: SPSS-SAMMELN.....	82
	ANHANG C: SPSS-PRÜFEN & SORTIEREN.....	83
	ANHANG D: SPSS-SUBSUMMIEREN (GESPRÄCH-LEITFADEN) – PERSON 3.....	91
	ANHANG E: SPSS-SUBSUMMIEREN (GESPRÄCH-LEITFADEN) – PERSON 4.....	92
	ANHANG F: SPSS-SUBSUMMIEREN (GESPRÄCH-LEITFADEN) – PERSON 5.....	94
	ANHANG G: SPSS-SUBSUMMIEREN (GESPRÄCH-LEITFADEN) – PERSON 6.....	96
	ANHANG H: SPSS-SUBSUMMIEREN (GESPRÄCH-LEITFADEN) – PERSON 7 .....	98
	ANHANG I: KRITERIEN DER INFORMATIONSGUALITÄT .....	100
	ANHANG J: THERMALAUFNAHME 7CM/PIXEL .....	101
	ANHANG K: THERMALAUFNAHME 25CM/PIXEL .....	102
	ANHANG L: THERMALAUFNAHME 50CM/PIXEL .....	103
	ANHANG M: THERMALAUFNAHME 50CM/PIXEL AUS GROSSER HÖHE.....	104
	ANHANG N: AUSSCHNITT AUS DEM PHOTOGRAMMETRISCHEN MODELL 7 CM/PIXEL.....	105
	ANHANG O: AUSSCHNITT AUS DEM PHOTOGRAMMETRISCHEN MODELL 25CM/PIXEL.....	106

ANHANG P:	AUSSCHNITT AUS DEM PHOTOGRAMMETRISCHEN MODELL 50CM/PIXEL.....	107
ANHANG Q:	AUSSCHNITT AUS DEM PHOTOGRAMMETRISCHEN MODELL 50CM/PIXEL AUS GROSSER HÖHE ...	108
ANHANG R:	ZUSAMMENFASSUNGEN EXPERT/INNEN-GESPRÄCHE PERSON 3 (2024) .....	109
ANHANG S:	ZUSAMMENFASSUNGEN EXPERT/INNEN-GESPRÄCHE PERSON 4 (2024) .....	111
ANHANG T:	ZUSAMMENFASSUNGEN EXPERT/INNEN-GESPRÄCHE PERSON 5 (2024) .....	113
ANHANG U:	ZUSAMMENFASSUNGEN EXPERT/INNEN-GESPRÄCHE PERSON 6 (2024) .....	115
ANHANG V:	ZUSAMMENFASSUNGEN EXPERT/INNEN-GESPRÄCHE PERSON 7: (2024) .....	117
ANHANG W:	FLUSSDIAGRAMM ANSPRUCHSGRUPPE "EXPERTEN" .....	119
ANHANG X:	FLUSSDIAGRAMM ANSPRUCHSGRUPPE "KOMMUNEN" .....	120
ANHANG Y:	SWIMLANE-DIAGRAMM .....	121
ANHANG Z:	KLASSENDIAGRAMM.....	124
ANHANG AA:	VERWENDETE HILFSMITTEL .....	125

## Glossar

Begriff	Definition
<b>Analyse</b>	«genaue und sorgfältige Untersuchung der Bestandteile eines Systems, um das Ganze gründlich zu verstehen» (SIA, 2024).
<b>Anomalie</b>	«etwas, das abweicht von dem, das als Standard, normal oder zu erwarten gilt, und eine Unregelmässigkeit oder Abnormalität in einem System darstellt» (SIA, 2024).
<b>Bild der Ironbow-Palette</b>	«Bild mit einer Farbpalette, die von Schwarz über Blau, Magenta, Orange, Gelb bis hin zu Weiss reicht und den besten Kontrast erzeugt, insbesondere in Bezug auf Kanten und Formen» (SIA, 2024).
<b>Bodenauflösung</b>	Siehe Ground Sampling Distance (GSD)
<b>Bodengestützte Systeme</b>	Technologien, die vom Boden aus operieren. (Papineau & Rivers, 2022)
<b>dämpfende Medien</b>	«Schutzfenster, Filter, Atmosphäre, externe Optiken, Materialien oder andere Medien, die die Infrarotstrahlung dämpfen, die von einer Quelle emittiert wird» (SIA, 2024).
<b>diffuse Oberfläche</b>	«Oberfläche, von der Licht oder andere elektromagnetische Strahlung gestreut bzw. nicht gerichtet reflektiert wird» (SIA, 2024).
<b>Emissionsgrad</b>	«Verhältnis der Strahldichte einer Zielobjektoberfläche zur Strahldichte eines schwarzen Körpers bei gleicher Temperatur und über denselben Spektralbereich» (SIA, 2024).
<b>Energiestrategie 2050</b>	Ein Plan der Schweizer Regierung zur Reduktion des Energieverbrauchs und der Emissionen bis zum Jahr 2050. (BAFU, 2018)
<b>Gebäudeenergieausweis der Kantone (GEAK)</b>	Ein standardisiertes Instrument zur Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden. (GEAK, 2023a)
<b>Ground Sampling Distance (GSD)</b>	Auf Deutsch Bodenauflösung, bezeichnet den Abstand zwischen den Mittelpunkten benachbarter Pixel einer thermalen Luftaufnahme auf der Erdoberfläche und gibt an, wie detailliert die Aufnahme ist. (Rüdisser et al., 2021)
<b>Infrarot (IR)</b>	«Anteil des elektromagnetischen Spektrums, der von der Wellenlänge des sichtbaren Lichts im Rotbereich von 0,75 µm bis 1 mm reicht» (SIA, 2024).
<b>Infrarot-Thermografie Kamera IR-Kamera</b>	«Gerät, das die von einer Zielobjektoberfläche ausgehende infrarote Strahlungsenergie auffängt und daraus ein monochromes (schwarz-weisses) oder farbiges Bild erzeugt, wobei die Grau-

Begriff	Definition
	(monochromen) oder Farbtöne auf die scheinbare Temperatur der Zielobjektoberfläche bezogen sind» (SIA, 2024).
<b>Low Resolution, Low Res, L-Res</b>	Auf Deutsch als niedrige Auflösung bezeichnet, beschreibt dieser Begriff eine Bildqualität, bei der weniger Details sichtbar sind, da die Anzahl der Bildpunkte pro Fläche geringer ist.
<b>Nadir-Aufnahme</b>	Aufnahme mit nahezu lotrechter Aufnahmerichtung, das Ergebnis ist ein Senkrechtbild. Bei einer Senkrechtaufnahme ist die Nadirdistanz kleiner oder gleich 3°. (Papineau & Rivers, 2022)
<b>Norm Positionen Katalog NPK</b>	Der Normpositionen-Katalog NPK ist die Basis des Datenverbunds der schweizerischen Bauwirtschaft. Er bildet die Grundlage für standardisierte und rechtssichere Leistungsbeschreibungen. (CRB, 2024)
<b>Oblique-Aufnahmen</b>	Auf Deutsch als Schrägaufnahmen bezeichnet, die aus einer geneigten Perspektive erstellt werden, im Gegensatz zu senkrechten Aufnahmen. (IGEO, 2023)
<b>Parameter</b>	«Numerischer oder sonstiger messbarer Faktor in einer Gesamtheit von Faktoren, die die Bedingungen der Messungen festlegt oder das System und seinen Betrieb bestimmt» (SIA, 2024).
<b>Pariser Klimaabkommen</b>	Ein internationales Abkommen zur Bekämpfung des Klimawandels. (BAFU, 2018)
<b>qualitativ</b>	«Vergleichende Messung und/oder Bewertung, Vergleich des Zustandes bzw. der Beschaffenheit von etwas» (SIA, 2024).
<b>quantitativ</b>	«Messung und/oder Bewertung anhand konkreter Grössenbezüge» (SIA, 2024).
<b>quantitative Thermografische Untersuchung</b>	«Untersuchung von ganzen Gebäuden, Bauwerken oder Bauteilen mit Hilfe thermographischer Verfahren mit dem Ziel, ein quantitatives Ergebnis zu erhalten» (SIA, 2024).
<b>räumliche Messauflösung</b>	«Messpunktgrösse in Bezug auf den Arbeitsabstand» (SIA, 2024).
<b>Reflexionsgrad <math>\rho</math></b>	«Verhältnis der gesamten von einer Oberfläche reflektierten Energie zur gesamten auf diese Oberfläche einfallenden Energie» (SIA, 2024).
<b>scheinbare Strahlungstemperatur</b>	«Anhand der gemessenen Gesamtstrahlendichte bestimmte Temperatur» (SIA, 2024).
<b>Schrägaufnahme</b>	Siehe Oblique-Aufnahmen
<b>Senkrechtaufnahme</b>	Siehe Nadir-Aufnahmen

Begriff	Definition
<b>spiegelnde Oberfläche</b>	«Oberfläche, von der Licht oder andere elektromagnetische Strahlung eher gerichtet reflektiert als diffus gestreut wird» (SIA, 2024).
<b>System</b>	«Regelmässig miteinander zusammenwirkende oder wechselseitig voneinander abhängige Gruppe von miteinander verbundenen Entitäten (zum Beispiel Bauteile, Faktoren, Mitglieder, Teile), die ein Ganzes bildet und durch ihre räumlichen und zeitlichen Grenzen beschrieben wird» (SIA, 2024).
<b>Thermografie</b>	«Darstellung der Temperaturverteilung einer Oberfläche in einem Wärmebild» (SIA, 2024).
<b>Thermografische Analyse</b>	«Auswertung und Bestimmung der Kausalmechanismen, die zu Schwankungen und Unregelmässigkeiten im Wärmebild führen» (SIA, 2024).
<b>ThermoPlaner3D</b>	"Forschungsprojekt des Instituts für Geomatik der Fachhochschule Nordwestschweiz zum Thema thermografische Luftbildaufnahmen, deren Bearbeitung und Auswertung. (IGEO, 2023)
<b>Transmissionsgrad/ Remissionsgrad</b>	«Anteil der auf die Oberfläche eines Zielobjekts auftreffenden Infrarot-Strahlungsenergie eines beliebigen gegebenen Spektralbereichs, der vom Objekt durchgelassen wird» (SIA, 2024).
<b>Unregelmässigkeit</b>	«Zustand, der in signifikantem Masse vom betrieblichen Standard abweicht» (SIA, 2024).
<b>Wärmebild</b>	«Bild, das von einer Infrarot-Thermografie Kamera erzeugt wird und die Verteilung der scheinbaren Strahlungstemperatur über die Zielobjektoberflächen darstellt» (SIA, 2024).
<b>Wärmebrücken</b>	In der SIA 180:2014 wird eine Wärmebrücke als eine Stelle oder ein Bereich in der Gebäudehülle definiert, an der der Wärmestrom stärker konzentriert ist als in angrenzenden Bereichen. Dies führt zu erhöhten Wärmeverlusten und möglicherweise auch zu Problemen mit Tauwasser und Schimmelbildung aufgrund niedrigerer Oberflächentemperaturen. (SIA, 2014)
<b>Wiederholbarkeit</b>	«Fähigkeit eines Messgeräts, für eine festgelegte Objektoberfläche über einen kurzen oder langen Zeitraum immer wieder den gleichen Messwert zu erhalten» (SIA, 2024).
<b>Zielobjekt</b>	«Zu messende Oberfläche des Zielobjekts» (SIA, 2024).

## Abkürzungsverzeichnis

### C

CRB ..... Schweizerische Zentralstelle für Baurationalisierung

### D

DIN ..... Deutsches Institut für Normung

### G

GEAK ..... Gebäudeenergieausweis der Kantone

### I

IRT ..... Infrarot-Thermografie

### N

NPK ..... Normpositionen-Katalog

### P

PoC ..... Proof of Concept

PRISMA ..... Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses

### S

SIA ..... Schweizerischen Ingenieur- und Architekten-Vereins

### U

u.a. .... unter anderem

### V

VDC ..... Virtual Design and Construction

# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund und Kontext

Die globale Klimakrise erfordert nachhaltige Massnahmen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub>). Die Schweiz hat sich im Rahmen des Pariser Klimaabkommens ambitionierte Ziele gesetzt: Bis 2030 sollen die Emissionen im Vergleich zu 1990 um 50 Prozent reduziert und bis 2050 auf netto null gesenkt werden. (BAFU, 2018)

Gebäude sind in diesem Kontext besonders relevant, da sie in der Schweiz für 40 Prozent des Energieverbrauchs und 25 Prozent der landesweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich sind. (BFE, 2023) Der Grossteil dieser Emissionen stammt aus dem veralteten Gebäudebestand: Zwei Drittel der Gebäude wurden vor 1980 errichtet, und die Mehrheit der 1,7 Millionen Wohnungen ist unzureichend oder gar nicht gedämmt. (BFE, 2023; BAFU, 2020) Eine Analyse der Emissionsquellen zeigt, dass Fassaden und ihre Komponenten mit 35 bis 48 Prozent einen erheblichen Anteil an den Emissionen haben. (BFE, 2022)

Seit 2010 stehen staatliche Fördermassnahmen für energetische Sanierungen zur Verfügung. (BAFU, 2020) Dennoch liegt die Sanierungsrate aktuell nur bei einem Prozent und bleibt damit weit hinter den Erwartungen zurück, wie aus den Statistiken der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt hervorgeht. (EMPA, 2021) Um die Ziele der Energiestrategie 2050 zu erreichen, ist eine deutliche Steigerung der Sanierungsrate notwendig. Eine effiziente und detaillierte Beurteilung des Gebäudezustands hinsichtlich der Wärmeemissionen an Dächern und Fassaden spielt hierbei eine entscheidende Rolle. Ebenso wichtig ist die sorgfältige Aufbereitung der gewonnenen Daten sowie geeignete Möglichkeiten, Planern und anderen Stakeholdern diese Informationen zur Verfügung zu stellen, damit sie fundierte Entscheidungen über Sanierungspotenziale und strategische Massnahmen treffen können.

Zur Unterstützung dieser Entscheidungsprozesse wurde 2009 der Gebäudeenergieausweis der Kantone (GEAK, 2023b) eingeführt, der eine standardisierte Bewertung durch zertifizierte Expert/innen ermöglicht. Dieses Verfahren ist jedoch primär auf die Begutachtung von Einzelgebäuden ausgerichtet und eignet sich daher nur eingeschränkt für eine effiziente Analyse des gesamten Gebäudebestands ganzer Siedlungen.

Um dieses Defizit zu überwinden, existieren im Ausland bereits Projekte, die eine grossflächige, energetische Gebäudezustandserfassung auf Basis von Wärmebildaufnahmen aus dem Flugzeug anstreben, wie beispielsweise das kanadische Projekt «MyHeat». Diese Ansätze fokussieren sich jedoch hauptsächlich auf Senkrechtluftbilder (Nadir-Aufnahmen), die vorwiegend Informationen über Dachflächen liefern und nur begrenzte Rückschlüsse auf die energetische Beschaffenheit der Fassaden zulassen. Zur Ergänzung greifen diese Projekte auf bodengestützte Systeme zurück, die jedoch eine effiziente grossflächige Erfassung nur bedingt ermöglichen und zudem zeitaufwändig sind. (Papineau & Rivers, 2022)

Vor diesem Hintergrund entwickelt das Institut für Geomatik an der Fachhochschule Nordwestschweiz im Rahmen des Forschungsprojekts «ThermoPlaner3D» eine effizientere Methode zur energetischen Gebäudezustandserfassung mittels grossflächiger, luftgestützter Thermalaufnahmen. (IGEO, 2023) Ein Vermessungsflugzeug wird hierfür mit zwei bis drei verschiedenen ausgerichteten Thermalkameras ausgestattet, die sowohl Senkrechtaufnahmen als auch Schrägaufnahmen (Oblique-Aufnahmen) erzeugen. Dadurch können Dächer und Fassaden gleichzeitig erfasst werden. Ziel des Projekts ist es, eine fundierte, datenbasierte Grundlage für nachhaltige Entscheidungen über Sanierungspotenziale und strategische Massnahmen zu schaffen. Dieser innovative Ansatz könnte wesentlich dazu beitragen, die nationalen Klimaziele schneller und effizienter zu erreichen. (Bleisch, 2023)

## 1.2 Ziele

Angesichts der beschriebenen Herausforderungen und des Potenzials des Projekts «ThermoPlaner3D» zielt diese Masterarbeit darauf ab, die Entscheidungsgrundlagen für Planungs- und Sanierungsprozesse im Gebäudesektor zu verbessern. Im Mittelpunkt steht die Untersuchung, wie die grossflächige, luftgestützte Gebäudezustandserfassung mittels thermischer Schrägaufnahmen von Fassaden den Bedürfnissen verschiedener Akteure in der Bau- und Energiewirtschaft gerecht werden kann.

Unter Anwendung der Prinzipien des Virtual Design and Construction (VDC), dass die Bedürfnisse und Erfahrungen der Menschen in den Vordergrund stellt, werden die Möglichkeiten und Grenzen der luftgestützten, thermischen Gebäudezustandserfassung untersucht. Insbesondere wird erforscht, wie luftgestützte, niedrig aufgelöste thermische Schrägbildaufnahmen in digitale Planungsprozesse integriert werden können, um die Energieeffizienz von Gebäuden zu bewerten und Sanierungsmassnahmen zu planen. Dazu werden die Anforderungen der Nutzer identifiziert und darauf basierend Prozesse zur Aufbereitung und Darstellung der Daten entwickelt. Ziel ist es, Planern und anderen Akteuren leicht zugängliche Informationen bereitzustellen, die fundierte Entscheidungen unterstützen.

Ein zentraler Bestandteil der Arbeit ist die Entwicklung eines Proof of Concept (PoC). Anhand eines konkreten Beispiels wird gezeigt, wie die vorgeschlagenen Ansätze umgesetzt werden können und welche Vorteile sich daraus für die Praxis ergeben.

Durch die Untersuchungen sollen die Anwendungsmöglichkeiten grossflächiger thermischer Luftaufnahmen für die energetische Bewertung von Gebäuden besser verstanden werden. Die Arbeit zeigt auf, wie bestehende Prozesse der Gebäudezustandserfassung durch neue Technologien sinnvoll ergänzt und miteinander verknüpft werden können, um Planungs- und Sanierungsprozesse effizienter und zielgerichteter zu gestalten. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf der vertieften Berücksichtigung der spezifischen Bedürfnisse der verschiedenen Nutzergruppen, um eine hohe Akzeptanz und Nutzbarkeit der entwickelten Ansätze zu gewährleisten.

## Zielpublikum

Diese Masterarbeit richtet sich nicht nur an Fachleute, die sich mit der Aussagekraft luftgestützter thermischer Schrägbildaufnahmen beschäftigen, sondern auch an Anwender/innen der gewonnenen Daten. Zum Zielpublikum gehören Hauseigentümer/innen, Architekt/innen, Ingenieur/innen, Stadtplaner/innen, Energieberater/innen sowie Personen, die an Energieauswertungen von Gebäuden und Gemeinden interessiert sind, jedoch kein spezifisches Fachwissen in der Gebäudezustandserfassung besitzen. Ziel ist es, das Bewusstsein dieser Gruppen für das Potenzial einer verbesserten Gebäudezustandserfassung zu schärfen und den interdisziplinären Austausch zu fördern.

### **1.3 Fragestellungen**

Die Hauptfragestellung dieser Master-Thesis lautet:

Wo liegen die Potenziale und Grenzen von luftgestützten, gering aufgelösten thermischen Schrägbildaufnahmen von Fassaden in der Gebäudezustandsermittlung?

Basierend auf dieser Hauptfragestellung lässt sich ein wissenschaftlicher Dreisatz (bestehend aus Thema, Erkenntnisinteresse und Absicht) wie folgt formulieren:

*«Ich untersuche die Anwendbarkeit und Aussagekraft von luftgestützten, gering aufgelösten thermischen Schrägbildaufnahmen von Fassaden in der Gebäudezustandsermittlung. Mein Ziel ist es, herauszufinden, wo die Potenziale und Grenzen ihres Einsatzes liegen, um konkrete Umsetzungsmöglichkeiten aufzuzeigen».*

#### Teilfragestellungen

Zur Beantwortung der Hauptfragestellung stellen sich folgende Teilfragen:

1. Welche Informationen, die für die Ermittlung des Gebäudezustands relevant sind, können aus luftgestützten, gering aufgelösten, thermischen Fassaden-Schrägbildaufnahmen gewonnen werden?
2. Welche Elemente existierender Thermografie-basierter Methoden zur Fassadenanalyse können, auf die in dieser Arbeit untersuchten, luftgestützten, gering aufgelösten thermischen Fassaden-Schrägbildaufnahmen übertragen werden?
3. In welchen Produkten könnten die Informationen aus den in dieser Arbeit untersuchten, luftgestützten, gering aufgelösten thermischen Fassaden-Schrägbildaufnahmen bereitgestellt werden, um sie Planern und anderen relevanten Nutzern optimal zugänglich zu machen? Wie könnte eine konkrete Umsetzung eines solchen Produktes aussehen?

## 1.4 Abgrenzung

In dieser Arbeit werden keine neuen thermografischen Datensätze erstellt. Stattdessen liegt der Schwerpunkt auf der Analyse bereits bestehender Datensätze. Dadurch kann der Fokus auf die Auswertung und Anwendung der Daten gelegt werden, um die in Kapitel 1.3 beschriebenen Fragestellungen zu adressieren.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf den Fassaden, da sie, wie in Kapitel 1.1 beschrieben, erst durch den Einsatz grossflächiger, luftgestützter Schrägbildaufnahmen auch grossflächig analysiert werden können. Andere Gebäudeteile wie Dächer, die bereits mit den bestehenden thermalen Nadir-Aufnahmen grossflächig untersucht werden können, werden nicht betrachtet. Die gewonnenen Erkenntnisse könnten jedoch potenziell auf weitere Bereiche und Bauteile übertragen werden.

Diese Untersuchung analysiert den energetischen Zustand von Gebäuden und ist daher saisonal begrenzt. Sie basiert auf Daten, die im Winter erhoben wurden, da zu dieser Zeit ein ausreichender Temperaturunterschied zwischen der kalten Aussentemperatur und dem beheizten Gebäudeinneren besteht. Dieser Unterschied ermöglicht eine effektive Messung der thermischen Emissionen aus den Gebäuden. (SIA, 2024)

## 1.5 Vorgehen

Die vorliegende Masterarbeit verbindet verschiedene methodische Schritte, um Potenziale und Grenzen von luftgestützten, niedrig aufgelösten thermografischen Fassadenaufnahmen in der Gebäudezustandsermittlung zu erfassen. Ausgangspunkt war eine umfassende Literaturrecherche zu bestehenden Verfahren und Normen, gefolgt von Expert/innen-Gesprächen, die praxisnahe Einblicke lieferten. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden konkrete Anwendungskonzepte für verschiedene Anwendergruppen entwickelt. Eines dieser Konzepte wurde in einem Proof of Concept (PoC) praktisch umgesetzt, um zusätzliche Erkenntnisse zu Anwendungsszenarien und technischer Umsetzbarkeit zu gewinnen.

### Forschungsdesign

Im Kern basiert das Forschungsdesign auf einer Kombination von Literaturarbeit, Gespräche und anwendungsorientierter Konzeptentwicklung:

#### Literaturrecherche

Eine anfängliche Recherche diente der Erfassung konventioneller und innovativer Methoden der Gebäudezustandsanalyse – mit besonderem Augenmerk auf thermische Aufnahmetechniken. Daraus entstand ein Überblick über relevante Fachgrundlagen, Richtlinien und Forschungsarbeiten.

#### Expert/innen-Gespräche

Aufbauend auf den Rechercheergebnissen wurden teilstrukturierte Gespräche mit Fachleuten geführt. Ziel war einerseits die Einbindung praktischer Erfahrungen aus Thermografie, Bauphysik

oder öffentlichen Verwaltungen, andererseits das Ermitteln technischer und organisatorischer Anforderungen an thermische Schrägaufnahmen. Hieraus ergaben sich wertvolle Hinweise zur Eignung niedrig aufgelöster Luftbilder für die Gebäudebewertung.

### Anwendungsentwicklung

Die gewonnenen Erkenntnisse aus Literatur und Gesprächen bildeten die Grundlage für die Ausarbeitung mehrerer Anwendungskonzepte. Dabei flossen sowohl die identifizierten Anforderungen als auch technologische Möglichkeiten ein, um verschiedene Anspruchsgruppen bestmöglich zu adressieren.

### Proof of Concept (PoC)

Um die praktische Umsetzbarkeit weiter zu untersuchen, wurde eines dieser Konzepte als PoC erprobt. Dies ermöglichte, weitere Erkenntnisse zur Handhabung, Effektivität und möglichen Erweiterungen des Ansatzes zu sammeln.

## 1.6 Rahmenbedingungen

Diese Masterarbeit entstand in Zusammenarbeit mit dem Institut für Geomatik an der Fachhochschule Nordwestschweiz, das die Entwicklung der ursprünglichen Fragestellung unterstützte und freundlicherweise Thermalaufnahmen bereitstellte. Die weitere fachliche Betreuung erfolgte durch Oliver Schneider vom Institut für Digitales Bauen an derselben Hochschule.

Gemäss den Vorgaben des Masterstudiengangs MSc FHNW in Virtual Design and Construction wurde die Arbeit als Typ B2 durchgeführt (Dainton et al., 2023). Dies bedeutet, dass ein wesentlicher Teil auf Literaturrecherche und Datenanalyse beruht, gleichzeitig aber auch ein starker Praxisbezug durch die Entwicklung eines Proof of Concept (PoC) gewährleistet ist.

Typus	Praxis Entwurf, Umsetzung, Anwendung	Theorie / Reflexion Theoretische Auseinandersetzung, Reflexion	Präsentation mit Kolloquium Darlegung und Verteidigung
B2	25%	50%	25%

Tabelle 1: Typus der Masterthesis (eigene Darstellung in Anlehnung an (Dainton et al., 2023))

## 2 Theoretische Grundlagen

Um einen ersten umfassenden Überblick über traditionelle und innovative Methoden der Gebäudezustandserfassung zu erhalten, wurde eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt. Dabei lag der Schwerpunkt auf der Fassadenanalyse, wobei sowohl thermografische als auch nichtthermografische Verfahren betrachtet wurden. Diese Herangehensweise diente dazu, herauszufinden, welche Informationen für die Erfassung des Gebäudezustands relevant sind und in der Schweizer Praxis zur Anwendung kommen. Zu diesem Zweck wurden relevante Richtlinien, Normen sowie die wichtigsten Prüfverfahren identifiziert und vertieft untersucht.

Zu Beginn wurde eine breit angelegte Literaturrecherche durchgeführt, um einen fundierten Überblick über traditionelle und innovative Methoden der Gebäudezustandserfassung zu erhalten. Hierbei standen thermografische Verfahren im Mittelpunkt, insbesondere ihre Bedeutung für die Bewertung von Fassaden. Parallel dazu wurde der aktuelle Forschungsstand zu luftgestützten Thermografie-Ansätzen analysiert, um zu ermitteln, welche Technologien und Methoden bereits verfügbar sind und wie sie eingesetzt werden. Durch diesen zweistufigen Rechercheansatz (allgemeine Grundlagen und spezieller Fokus auf luftgestützte, thermische Schrägbildaufnahmen) entstanden erste Hypothesen zu Chancen und Grenzen der geringen Auflösung bei der Fassadenanalyse.

### 2.1 Gebäudezustandserfassung

Die Gebäudezustandserfassung, auch als Bestandsdokumentation oder Bestandsaufnahme bezeichnet, ist ein Verfahren zur Ermittlung aller relevanten Informationen über den baulichen und technischen Zustand eines Gebäudes zu einem bestimmten Zeitpunkt. Gemäss der SIA-Norm 469 wird sie als systematischer Prozess zur detaillierten Ermittlung, Dokumentation und Bewertung des Ist-Zustands eines Bauwerks definiert (SIA 469, 1997). In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Fassadenzustandserfassung, insbesondere unter Verwendung thermischer Fassadenschrägbildaufnahmen.

Die Betrachtung bestehender Verfahren zur Gebäudezustandserfassung ist essenziell, um die Auswirkungen der entsprechenden Normen und offiziellen Prüfverfahren auf praktische Umsetzungen zu verstehen. Daher werden die wesentlichen Prinzipien und Definitionen erläutert sowie die relevanten Normen und Richtlinien vorgestellt, die die Gebäudezustandserfassung regeln. Besonderes Augenmerk gilt den verschiedenen Prüfmethoden, die zur Beurteilung des baulichen Zustands von Gebäuden eingesetzt werden können.

Da die Fassadenzustandserfassung in der Fachliteratur häufig als Teil der Gesamtinspektion der Gebäudehülle betrachtet wird, werden beide Aspekte behandelt. Die energetische Bewertung von Gebäuden mittels thermografischer Zustandserfassung wird dabei besonders berücksichtigt. Deren theoretische Grundlagen, einschliesslich der Prinzipien der Thermografie und deren spezifischen Anwendungen im Bauwesen, werden detailliert erläutert.

### 2.1.1 Vorgehen

Als Ausgangsbasis für die Recherche wurden verschiedene Kataloge nach passender Literatur durchsucht. Hierzu zählten das Normenportal der Schweizerischen Normen-Vereinigung (SNV, 2024), die Bibliothekskataloge swisscovery (SLSP, 2024) und Google Scholar (Google, 2024). Ergänzend zur Schweizer Literatur wurden auch Ergebnisse aus dem benachbarten Ausland herangezogen, um bestimmte Begrifflichkeiten und Methoden zu vergleichen und zu präzisieren.

Um sicherzustellen, dass eine möglichst umfassende Abdeckung der relevanten Fachliteratur gewährleistet und alle wichtigen Richtlinien und Normen für das Forschungsthema ausgewertet werden, kam anschliessend das Schneeballprinzip zum Einsatz. Dabei werden von einer initialen Quelle ausgehend deren Literaturverzeichnisse genutzt, um weitere relevante Quellen zu identifizieren. Dieses Verfahren erlaubt es, systematisch ein Netzwerk von Fachliteratur aufzubauen und eine möglichst breite Sammlung an Informationen zusammenzustellen.

Die auf diese Weise zusammengestellten Informationen wurden konsolidiert und bildeten die Grundlage für die folgenden Expert/innen-Gespräche sowie die Ausarbeitung von Anwendungskonzepten in den verschiedenen Anspruchsgruppen. Sämtliche Ergebnisse dieser Recherche sind in den folgenden Kapiteln dokumentiert.

### 2.1.2 Normative Grundlagen

Die Einordnung neuer Verfahren zur Gebäudezustandserfassung erfordert eine gründliche Kenntnis der bestehenden Verfahren und Normen. Daher betrachtet dieser Abschnitt die allgemeinen Normen, Richtlinien, Standards und Nachweise, die aktuell bei der Zustandserfassung von Gebäuden Anwendung finden. Zunächst werden die nicht-thermografischen und anschliessend die thermografischen Verfahren vorgestellt und ihre Relevanz im Kontext dieser Arbeit beleuchtet.

#### SIA 469 - Erhaltung von Bauwerken

Die Norm SIA 469 (1997) des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins (SIA) geht von allen Schweizer Normen am detailliertesten auf den Prozess der Zustandserfassung von Gebäuden ein. Sie wurde bereits 1997 veröffentlicht und beschreibt eine systematische und umfassende Zustandsüberwachung von Bauwerken mit dem Ziel, deren langfristige Erhaltung sicherzustellen. Aufgrund ihres Alters deckt sie jedoch nicht die neuesten Entwicklungen ab, weshalb in diesem Kapitel weitere Normen beschrieben werden, die modernere Verfahren berücksichtigen. (SIA, 1997)

Die Überwachung des Gebäudezustandes gemäss SIA 469 besteht aus gezielten Beobachtungen, regelmässigen Inspektionen, periodischen Kontrollmessungen und Funktionskontrollen. Die Massnahmen der Beobachtung umfassen sowohl die gezielte Beobachtung des Bauwerks als auch Hinweise von Dritten. Die Inspektion erfolgt hauptsächlich visuell oder durch einfache Untersuchungen ohne zusätzliche Hilfsmittel. (SIA, 1997)

Die Kontrollmessungen erfolgen hingegen unter Einsatz von Hilfsmitteln und dienen dazu, Informationen über das Verhalten ausgewählter Kenngrößen oder über die Entwicklung von Schäden zu gewinnen. Die Norm spezifiziert jedoch keine konkreten Verfahren oder Methoden, sondern hält nur generell fest, dass die Kontrollmessungen ausgewählte Teile des Bauwerks oder seiner Umgebung betreffen können, einschliesslich der Erfassung des Energieverbrauchs, der Leistung von Teilen technischer Anlagen, des Raumklimas in Gebäuden sowie der Umweltbelastung durch Emissionen. (SIA, 1997)

Die SIA 469 stellt somit eine umfassende Basis für die Zustandsüberwachung von Bauwerken dar. Neuere Normen berücksichtigen moderne Verfahren und Technologien, die eine effektivere Zustandsüberwachung ermöglichen. Daher ist es von entscheidender Bedeutung, diese ergänzend zur SIA 469 heranzuziehen, um eine umfassende und aktuelle Bewertung des Gebäudezustandes zu gewährleisten.

### SIA 180 - Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden

Die Norm SIA 180 (2014) befasst sich grundlegend mit Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden. Ihr Ziel besteht darin, ein behagliches Raumklima zu gewährleisten und Bauschäden durch Feuchtigkeit und unzureichenden Wärmeschutz zu vermeiden. (SIA, 2014)

In den Kapiteln «Luftdichtheit der Hüllfläche» und «Wärmeschutz im Winter» werden detaillierte Messmethoden vorgestellt, die auch für die Gebäudezustandserfassung relevant sind. Die Messung der Luftdichtheit des Gebäudes nach SN EN ISO 9972 (SIA, 2024) wird dabei in Kapitel 2.1.3 ausführlich erläutert. Eine weitere für diese Arbeit entscheidende Methode ist der «Nachweis von Unregelmässigkeiten in der Wärmedämmung der Gebäudehülle» nach SIA 180.223 (2024), welcher in Kapitel 2.1.4 umfassend behandelt wird.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die SIA 180 zwar nicht primär auf die Gebäudezustandserfassung fokussiert ist, jedoch einige sehr relevante Methoden für deren Analyse enthält. Aufgrund dieser Methoden und ihrer zentralen Rolle im Normenwerk der SIA stellt sie einen wesentlichen Bestandteil der Übersicht über die Normen der Gebäudezustandserfassung dar. (SIA, 2014)

### SIA 269 - Erhaltung von Tragwerken

Die Norm SIA 269 (2011a) behandelt umfassend die Erhaltung von Tragwerken und bietet detaillierte Richtlinien zur Inspektion und Bewertung bestehender Bauteile. Die Analysen in SIA 269/2 (2011a), die sich mit der Erhaltung von Betontragwerken befassen, sowie in SIA 269/3 (2011b) die sich auf Stahltragwerke konzentrieren, fokussieren insbesondere auf Methoden zur Analyse des statischen Zustandes der Bauteile. Da die in diesen Abschnitten erwähnten Methoden teilweise auch in der Zustandserfassung von Gebäudehüllen Anwendung finden, wurden sie der Vollständigkeit halber in die Übersicht aufgenommen. Eine detaillierte Erläuterung der entsprechenden Massnahmen erfolgt in Kapitel 2.1.3.

## Gebäudeenergieausweis (GEAK)

Der Gebäudeenergieausweis der Kantone (GEAK, 2023b) ist ein zentrales Instrument der Energie- und Klimapolitik in der Schweiz und dient der Beurteilung des energetischen Zustands von Gebäuden. Seit 2009 wird er schweizweit einheitlich durch den Verein GEAK geregelt. Die Erstellung eines GEAK für ein bestehendes oder neu zu errichtendes Gebäude ist gemäss Energiegesetz freiwillig; die einzelnen Kantone können jedoch weitergehende Pflichten definieren und haben dies teilweise bereits getan. Das Kernprodukt des Vereins ist die offizielle Energieetikette der Kantone, welche die Gebäudehülle, die Gesamtenergiebilanz und die direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen in sieben Energieklassen von A bis G in einem vierseitigen Bericht bewertet. (GEAK, 2023a)

Zusätzlich zum GEAK wird der GEAK Plus angeboten, der neben der reinen Beurteilung des energetischen Gebäudezustands auch konkrete Vorschläge für energetische Sanierungsmassnahmen enthält. Der GEAK Plus bildet zudem die Grundlage für verschiedene nationale und kantonale Förderprogramme im Bereich der energetischen Verbesserung von Gebäuden. (GEAK, 2023a)

Die eigentliche Gebäudebeurteilung für den GEAK und den GEAK Plus sowie die Erarbeitung von Vorschlägen für energetische Sanierungsmassnahmen erfolgen durch einen zertifizierte GEAK-Expert/innen. Die dafür notwendige Zustandserfassung des Gebäudes und die damit verbundene energetische Beurteilung der Gebäudehülle basieren auf vorhandenen Plänen und Unterlagen sowie der Erfassung von Energieverbrauchswerten und weiteren Kennzahlen wie Energiebezugsflächen und Fassadenflächen. Firmen, die die Erstellung eines GEAK-Berichtes anbieten, bieten teilweise auch zusätzliche Verfahren wie die Durchführung eines Blower-Door-Tests oder Thermografieaufnahmen an, die in Kapitel 2.1.3 näher beschrieben werden. Diese sind jedoch als zusätzliche Dienstleistungen zu betrachten und stellen keinen verpflichtenden Bestandteil eines GEAK oder GEAK Plus dar. (GEAK, 2023a)

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der GEAK ein bereits etabliertes System zur energetischen Bewertung von Gebäuden darstellt, das jedoch aufgrund des hohen Personalaufwandes für die Erstellung eines Berichtes nicht für die grossflächige Zustandserfassung geeignet ist.

### **2.1.3 Prüfmethoden**

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Prüfmethoden zusammengefasst, die bei der Zustandsanalyse von Gebäuden zur Anwendung kommen. Die Methoden stammen sowohl aus den in Kapitel 2.1.2 erwähnten SIA- und DIN-Normen als auch aus dem Normpositionen-Katalog (NPK) der Schweizerische Zentralstelle für Baurationalisierung (CRB, 2024) und weiterer Fachliteratur zur Bauphysik sowie zum Gebäudeunterhalt. Ergänzend wurden Hinweise aus den Expert/innen-Gesprächen in Kapitel 3.2 aufgenommen, um die Liste zu vervollständigen.

Die Prüfmethoden werden in quantitative und qualitative Massnahmen eingeteilt. Quantitative Massnahmen liefern messbare und objektive Daten über den Zustand eines Gebäudes. Sie

basieren auf numerischen Werten und ermöglichen eine genaue Analyse und Vergleichbarkeit. Qualitative Verfahren hingegen beruhen auf subjektiven Bewertungen und Beobachtungen und bieten detaillierte Beschreibungen der baulichen Zustände, sind jedoch oft weniger präzise als quantitative Methoden. (SIA, 2024)

Im Folgenden werden ausschliesslich Prüfmethode betrachtet, die für die energetische Bewertung von Fassaden geeignet sind. Viele dieser Verfahren werden jedoch auch für andere Teile der Gebäudehülle und weitere Bauteile verwendet. Zudem können einige der hier vorgestellten Verfahren für Tragfähigkeitsuntersuchungen und statische Analysen von Gebäuden sowie für weitere Untersuchungen in und an Gebäuden eingesetzt werden. Es ist daher zu beachten, dass sich einige Quellen teilweise auf die Prüfung anderer Bauteile beziehen, wie beispielsweise auf die Prüfung von Betonbauteilen.

Prüfverfahren, die nicht auf Thermografie oder anderen elektronischen Prüfmethode wie Ultraschall oder Radar basieren, werden als sogenannte "konventionelle Verfahren" bezeichnet. Diese Unterscheidung zwischen konventionellen und nicht konventionellen Verfahren wurde in dieser Arbeit nicht übernommen.

In der Praxis kommt häufig eine Kombination verschiedener Methoden zum Einsatz, um ein umfassendes Bild vom Zustand der Gebäudehülle zu erhalten. Die Wahl der Methoden hängt von Faktoren wie Gebäudegrösse, Zugänglichkeit und spezifischen Anforderungen ab. Eine abschliessende Bewertung erfolgt in der Regel durch erfahrene Fachleute, die die Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungen auswerten und entsprechende Empfehlungen für Instandsetzungsmassnahmen geben.

#### Analyse bestehender Pläne und Unterlagen

Ein erster Schritt bei der Analyse des Gebäudezustands ist oft eine gründliche Untersuchung der vorhandenen Pläne, Bauunterlagen und Dokumentationen des Gebäudes. Auf diese Weise können detaillierte Informationen über Konstruktion, Materialien und Aufbau der Gebäudehülle gewonnen werden, die den weiteren Analyseprozess beschleunigen können. Die so gewonnenen Informationen sind hilfreich, um bereits im Vorfeld der ersten Messungen mögliche Schwachstellen oder kritische Bereiche zu identifizieren und die Untersuchungen gezielt darauf auszurichten. Diese qualitative Dokumentenanalyse wird jedoch in der Regel nicht allein, sondern in Kombination mit weiteren, meist quantitativen Methoden eingesetzt, um die Richtigkeit der Pläne sowie den tatsächlichen Zustand der Bauteile und Materialien zu verifizieren. Zudem ist die Einsichtnahme in die Pläne und die daraus resultierende Beurteilung der Konstruktion als zeitaufwendiges Verfahren einzustufen. (Schulz, 2006; Stahr, 2022)

#### Befragung der Nutzer/innen und Betreiber/innen

Ein weiterer Schritt, der vor Beginn der eigentlichen Messungen durchgeführt wird, ist die Befragung der Nutzer und Betreiber des zu untersuchenden Gebäudes. Diese qualitative Methode dient dazu, bereits im Vorfeld mögliche Schwachstellen oder kritische Bereiche zu identifizieren

und die Untersuchungen gezielt darauf auszurichten. Mögliche Fragestellungen können sich auf Beobachtungen von Feuchteschäden, Rissbildungen oder Undichtigkeiten beziehen, die dann bei den Untersuchungen berücksichtigt werden können. Auch diese Methode wird üblicherweise nicht isoliert angewendet, sondern ergänzt andere Untersuchungen. (Schulz, 2006; SIA, 1997)

#### Differenzdruckverfahren

Das Differenzdruckverfahren, auch als Blower-Door-Test bezeichnet, dient zur Messung der Luftdichtheit von Gebäuden. Dabei wird ein Unter- oder Überdruck erzeugt und über die sogenannte Luftwechselrate quantitativ ermittelt, wie viel Luft in einer bestimmten Zeit durch die Gebäudehülle strömt. Ziel dieser Messung ist es, Leckagen zu identifizieren, um die Energieeffizienz und den Wohnkomfort zu verbessern. Für die Durchführung dieser Tests werden entsprechend ausgebildete Fachkräfte vor Ort benötigt; zudem ist die Vorbereitung je nach Art und Grösse des Objekts sehr zeitintensiv. Das gesamte Vorgehen ist in der SIA 180.206 (2016) geregelt. Entsprechende Positionen mit Hinweisen zur Ausführung finden sich auch in den NPK-Positionen 760 bis 767(CRB, 2023a).

#### Endoskopische Untersuchungen

Endoskopische Untersuchungen sind eine minimalinvasive Methode der Bauwerksanalyse, mit der innere Strukturen und Zustände von Bauteilen untersucht werden können. Ähnlich wie in der Medizin wird ein flexibler oder starrer Schlauch mit Kamera und Beleuchtung in einen Hohlraum eingeführt, ohne dass grössere Eingriffe am Bauteil erforderlich sind. So können Hohlräume, Zwischenschichten oder andere schwer zugängliche Bereiche an Fassaden visuell untersucht und qualitativ beurteilt werden. Auch im NPK-Katalog 112.852 (CRB, 2023b) ist die endoskopische Untersuchung unter dem Kapitel "Bauwerksaufnahmen und Bauwerksuntersuchungen" aufgeführt. Die Untersuchung ganzer Fassaden mit dieser Technik ist jedoch aufgrund des Aufwands und des oft notwendigen Anbohrens der Fassadenbauteile in der Regel nicht praktikabel. (Maier, 2012; Stahr, 2022)

#### Feuchtigkeitmessungen

Feuchtemessungen werden eingesetzt, um den Feuchtegehalt von Baustoffen und damit beispielsweise deren Dämmfähigkeit zu bestimmen. Je höher die Feuchtigkeit in einem Bauteil ist, desto grösser ist die Gefahr, dass das Material durch Schimmel oder andere Zersetzungsprozesse abgebaut wird. Darüber hinaus leiten feuchte Materialien Wärme deutlich besser, was bei Dämmsystemen zu einer Verschlechterung der Dämmwirkung führen kann. Feuchtemessungen sind daher eine wichtige quantitative Methode zur Erfassung des Gebäudezustands. Sie können als einmalige Messungen vor Ort durchgeführt werden oder Teil eines Monitoringsystems sein, dass die Veränderungen der Gebäudehülle kontinuierlich aufzeichnet. Verschiedene Verfahren für die Feuchtemessung stehen zur Verfügung, die hier nicht näher betrachtet werden, jedoch in der Fachliteratur bei Maier oder Schulz sowie in der SIA 469 (1997) ausführlich diskutiert werden. (Maier, 2012; Schulz, 2006)

## Monitoring-Systeme

Mit der zunehmenden Verfügbarkeit kostengünstiger Sensoren und längerer Batterielaufzeiten werden vermehrt kontinuierliche Monitoringsysteme eingesetzt, die den Zustand der Gebäudehülle über einen längeren Zeitraum quantitativ beobachten. Dazu werden Sensoren in und an der Gebäudehülle angebracht, die Daten über Parameter wie Temperatur, Feuchte, Schwingungen oder Rissbildung erfassen. Diese Daten können frühzeitig auf Veränderungen oder Schäden hinweisen. Durch den einmaligen personellen Aufwand bei der Installation der Sensoren sind diese Systeme oft effizient zur Erfassung des Zustands einzelner Bauteile. Um jedoch den Zustand der gesamten Fassadenfläche eines einzelnen Gebäudes oder über mehrere Gebäude hinweg zu beurteilen, ist eine grosse Anzahl von Sensoren notwendig, was mit entsprechend hohen Kosten verbunden ist. Häufig werden Monitoringsysteme mit anderen Massnahmen kombiniert, um Momentaufnahmen vor Ort mit einer Zeitreihe von Daten zu ergänzen und so bereits aus den Veränderungen der Messwerte Rückschlüsse ziehen zu können. (Schulz, 2006) Auch die Norm SIA 469 (1997) erwähnt diese Massnahme im Kapitel "Kontrollmessungen" unter dem Begriff "Messtechnische Überwachung ausgewählter Kenngrössen".

## Probenahme und Labortests

In einigen Fällen ist es für eine detaillierte Analyse erforderlich, Proben von Bauteilen zu entnehmen und im Labor zu untersuchen. Laboruntersuchungen sind vor allem dann notwendig, wenn die genaue Qualität eines verwendeten Materials oder dessen Zustand mit anderen Methoden nicht abschliessend bestimmt werden kann. Aufgrund des hohen Probenahme- und Analyseaufwands eignet sich diese quantitative Methode jedoch nur für die Untersuchung einzelner, ausgewählter Elemente einer Gebäudehülle. Die Laboranalyse von Baustoffen ist ebenfalls Bestandteil der SIA 469 (1997). In der Fachliteratur von Sauer und Bauernhansl (2016) sowie Schulz (2006) werden die einzelnen Laboranalysen näher beschrieben.

## Ultraschall und Radar

Zerstörungsfreie Prüfverfahren wie Ultraschall und Radar, die bisher vor allem bei Betonbauteilen zum Einsatz kamen, werden auch bei anderen Bauteilen der Gebäudehülle eingesetzt, um Materialeigenschaften zu untersuchen, ohne die Gebäudehülle zu beschädigen. Auch Schäden können mit dieser Technik erfasst werden. Ultraschallverfahren nutzen Schallwellen, um Hohlräume, Risse und Materialfehler zu lokalisieren. Radarverfahren basieren auf der Nutzung elektromagnetischer Wellen im Mikrowellen- und Kurzwellenbereich, um Bewehrungen, Leitungen und Hohlräume aufzuspüren. So kann beispielsweise das Absacken von Dämmsystemen festgestellt werden, ohne dass die Gebäudehülle demontiert werden muss. Diese sowohl qualitativen als auch quantitativen Verfahren erfordern speziell geschulte Fachkräfte und werden meist in Kombination mit anderen Methoden angewandt. Aufgrund des hohen Zeitaufwands eignen sie sich jedoch nur bedingt für die grossflächige Analyse von Gebäudezuständen. (Maier, 2012)

## Visuelle Inspektionen

Die Position 112.850 (CRB, 2023b) des NPK beschreibt verschiedene Methoden, die unter den Begriff der visuellen Inspektion fallen: Fotoaufnahmen, Inspektion mit Lupe und Mikroskop sowie Massaufnahmen und Rissaufnahmen. Auch die Endoskopie, die bereits separat behandelt wurde, kann hierunter fallen. Dabei wird die Gebäudehülle vor Ort auf Schäden, Risse, Abplatzungen oder andere Auffälligkeiten untersucht und entsprechend dokumentiert, um eine qualitative Bewertung des Bauteils oder der gesamten Gebäudehülle zu ermöglichen. Diese qualitative Massnahme wird meist in Kombination mit quantitativen Methoden durchgeführt, um ein umfassenderes und genaueres Bild des Gebäudezustands zu erhalten. (Maier, 2012; Schulz, 2006; SIA, 1997)

Eine Unterkategorie der visuellen Inspektion, die in dieser Aufstellung nicht als eigenständige Methode ausgewiesen wird, jedoch in der Gebäudezustandserfassung zunehmend an Bedeutung gewinnt, ist der Einsatz von Drohnen als Hilfsmittel für die visuelle Inspektion der Gebäudehülle. Mithilfe von Drohnen können auch Bereiche des Gebäudes genauer betrachtet werden, die für Menschen nur schwer zugänglich sind. Die heute für diese Systeme verfügbaren hochauflösenden Kameras ermöglichen die Erstellung detaillierter Analysen von Bauteilen. (Maier, 2012; Stahr, 2022) Das Thema der luftgestützten Zustandserfassung wird in Kapitel 2.2.4 noch detaillierter erörtert.

### **2.1.4 Thermografische Zustandserfassung**

Um die verschiedenen Prüfmethode zur Gebäudezustandserfassung umfassend zu beleuchten, widmet sich dieses Kapitel eingehend der thermografischen Analyse von Gebäuden. Eine detaillierte Betrachtung dieses Verfahrens ist entscheidend, um eine der zentralen Fragestellungen dieser Forschungsarbeit zu beantworten: *«Welche Elemente existierender Thermografie basierter Fassadenanalysemethoden können auf die, in dieser Arbeit untersuchten, luftgestützten, gering aufgelösten, thermischen Schrägbildaufnahmen von Fassaden übertragen werden?»*

Aufgrund von Uneinigkeit in der Fachliteratur hinsichtlich bestimmter Aspekte der thermografischen Analyse legt dieses Kapitel besonderen Fokus auf die seit 2024 gültige Norm SIA 180.223 (2024). Diese Norm ergänzt die bestehende SIA 180 (2014) und dient als aktueller Leitfaden für die Durchführung thermografischer Untersuchungen, indem sie allgemeine Anforderungen und Verfahren festlegt. Durch die Berücksichtigung dieser aktualisierten Norm sollen bestehende Unklarheiten beseitigt und eine einheitliche Grundlage für die weitere Analyse geschaffen werden.

## Technische Grundlagen

Thermografische Aufnahmen mit Infrarotkameras, sogenannte Thermogramme, sind ein zentrales Instrument in der Gebäudezustandserfassung. Sie ermöglichen die Visualisierung der Oberflächentemperaturen der Gebäudehülle und machen thermische Anomalien wie Wärmebrücken, Luftundichtigkeiten und Feuchtigkeitsprobleme sichtbar. Diese Anomalien können in der Praxis auf Mängel in der Wärmedämmung, unerwünschte Luftbewegungen oder eindringende

Feuchtigkeit hinweisen und liefern somit wichtige Hinweise auf den energetischen Zustand eines Gebäudes. (SIA, 2024)

Das Thermografie-Verfahren basiert auf der Messung der Infrarotstrahlung, die von Objekten emittiert wird. Alle Körper mit Oberflächentemperaturen oberhalb des absoluten Nullpunkts ( $-273,15\text{ °C}$ ) senden Infrarotstrahlung aus, deren Intensität proportional zur Temperatur der Oberfläche ist. Infrarotkameras detektieren diese Strahlung und wandeln sie in elektrische Signale um, aus denen ein Bild erzeugt wird, das die Temperaturverteilung auf der Oberfläche darstellt. (SIA, 2024)

Um den praktischen Nutzen der Thermografie zu veranschaulichen, zeigen im Folgenden die Abbildungen 1 und 2 denselben Gebäudeteil, in diesem Fall eines Ofens, in unterschiedlichen Aufnahmeverfahren. Abbildung 1 präsentiert eine herkömmliche Echtfarbaufnahme, während Abbildung 2 die thermische Verteilung auf der Oberfläche des Gebäudeteils mittels einer thermografischen Falschfarbenaufnahme wiedergibt. Durch den Vergleich dieser Bilder wird deutlich, wie die Thermografie zusätzliche Informationen liefert, die mit blossem Auge nicht erkennbar sind.



**Abb. 1:** Echtfarbaufnahme eines beheizten Ofens (HSLU, 2022)



**Abb. 2:** Thermografische Falschfarbenaufnahme eines beheizten Ofens (HSLU, 2022)

Für die Beurteilung von Gebäuden anhand von thermografischen Aufnahmen stehen zwei verschiedene Verfahren zur Verfügung: Zum einen die qualitative und zum anderen die quantitative Thermografie. Beide Ansätze sind wichtige Werkzeuge in der modernen Gebäudezustandserfassung und werden je nach Einsatzbereich und Anforderungen gewählt. Während die qualitative Thermografie auf visuelle Inspektionen und den Vergleich von Wärmebildern setzt, ermöglicht die quantitative Thermografie eine exakte Ermittlung thermischer Kenngrößen. Im Folgenden werden beide Verfahren ausführlicher erläutert und deren Bedeutung für die Praxis dargestellt.

### Qualitative Thermografie

Die qualitative Thermografie konzentriert sich auf die visuelle Betrachtung und den Vergleich von Wärmebildern, um Anomalien in der Gebäudehülle zu erkennen. Sie ist besonders hilfreich, wenn genaue Messungen durch ungünstige Bedingungen wie wechselhaftes Wetter oder nur

geringe Temperaturdifferenzen zwischen Innen- und Aussenraum erschwert werden. Obwohl sie keine präzisen Temperaturwerte liefert, bietet die qualitative Thermografie dennoch wertvolle Hinweise auf potenzielle Problemstellen, beispielsweise Wärmebrücken, Luftundichtigkeiten oder Feuchteschäden. (SIA, 2024)

Für aussagekräftige Ergebnisse müssen jedoch mehrere Faktoren berücksichtigt werden: Schätzwerte für Emissionsgrad, Reflexionsgrad und Transmissionsgrad, die Hintergrundtemperatur und der Messabstand zum Objekt. Auch Wind, Sonneneinstrahlung, Temperatur- und Druckdifferenzen beeinflussen das Ergebnis massgeblich. Eine ausreichende Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Aussenraum sollte vorhanden sein, ohne dass kurzfristige Witterungseinflüsse, wie starke Sonneneinstrahlung oder Niederschlag, die Messung verfälschen. Da bei der qualitativen Thermografie keine absoluten Temperaturmessungen angestrebt werden, genügt es, auffällige Temperaturunterschiede sichtbar zu machen und diese als erste Diagnosegrundlage zu nutzen. (SIA, 2024)

### Quantitative Thermografie

Die quantitative Thermografie ermöglicht eine präzise Bewertung thermischer Eigenschaften von Gebäuden. Anders als die qualitative Methode, die sich auf auffällige Temperaturunterschiede konzentriert, können hier exakte Temperaturwerte und -differenzen bestimmt werden. Dies zeigt den Schweregrad bestimmter Mängel wie Wärmeverluste oder Luftundichtigkeiten genauer auf und ist besonders relevant für eine fundierte energetische Bewertung sowie die Planung gezielter Sanierungsmassnahmen.

Allerdings unterliegt auch die quantitative Thermografie ähnlichen Einschränkungen wie die qualitative Methode. Die Qualität der Messergebnisse hängt stark vom Fachwissen und der Erfahrung der Personen ab, die die Messungen durchführen und auswerten. Die bereits bei der qualitativen Thermografie genannten Umweltfaktoren sollten hier nicht nur geschätzt, sondern durch zusätzliche Messungen und Tests möglichst genau ermittelt werden, um verlässliche Resultate zu erhalten. Dafür sind entsprechend angepasste Messaufbauten und Auswertungsmethoden nötig. Bei sorgfältiger Durchführung liefert die quantitative Thermografie entscheidende Informationen zum Umfang und zur Dringlichkeit thermischer Anomalien. (SIA, 2024)

### Einschränkungen und ergänzende Verfahren

Unabhängig von der gewählten thermografischen Methode müssen weitere Einschränkungen beachtet werden, die alle Verfahren gleichermaßen betreffen. Bei jeder festgestellten Anomalie ist zu untersuchen, ob sie durch Schäden an der Gebäudehülle oder durch temporäre Störungen wie geöffnete Fenster oder lokale Wärmequellen hervorgerufen wurde. Für eine verlässliche Messung ist es erforderlich, umfassende Informationen über das Gebäude selbst zu sammeln. Dazu zählen das Baujahr, die Bauweise, die verwendeten Oberflächenmaterialien, die geografische Ausrichtung sowie die umgebende Vegetation und Bebauung. Ebenso wichtig ist der Betriebszustand der Heizung und anderer haustechnischer Systeme, da dieser die

Temperaturverteilung beeinflussen kann. Darüber hinaus müssen wetterspezifische Parameter wie Wind, Temperaturdifferenzen und Sonneneinstrahlung berücksichtigt werden. (SIA, 2024)

Die SIA-Norm 180.223 (2024) betont, dass aufgrund der Vielzahl an Einflussgrössen thermografische Aufnahmen häufig durch weitere Verfahren ergänzt und validiert werden müssen. Zu diesen ergänzenden Verfahren gehören unter anderem das Differenzdruckverfahren (Blower-Door-Test) zur Aufspürung von Luftundichtigkeiten sowie Feuchte- und Feuchtigkeitsmessungen, um Feuchtigkeitsprobleme genauer zu quantifizieren. (SIA, 2024)

In der Praxis tragen diese zusätzlichen Untersuchungen dazu bei eine umfassendere Diagnose des Gebäudezustandes zu ermöglichen. Durch die Kombination verschiedener diagnostischer Methoden können zuverlässigere Aussagen über den energetischen Zustand und potenzielle Mängel getroffen werden. Dies ist für Bauingenieur/innen, Energieberater/innen und Sanierungsplaner/innen von grosser Bedeutung, um fundierte Entscheidungen zu treffen und effektive Massnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz umzusetzen. (SIA, 2024)

### Zusammenfassung

Thermografische Verfahren sind essenzielle Werkzeuge in der modernen Gebäudezustandserfassung. Sie bieten sowohl qualitative als auch quantitative Möglichkeiten, um thermische Anomalien zu erkennen und zu bewerten. Trotz ihrer Leistungsfähigkeit müssen Anwender die methodischen Einschränkungen beachten und ergänzende Verfahren einsetzen, um genaue und verlässliche Ergebnisse zu erzielen. Die Beachtung aktueller Normen wie der SIA 180.223 (2024) stellt sicher, dass thermografische Untersuchungen nach einheitlichen Standards durchgeführt werden, was in der Praxis zu besseren Diagnosen und effektiveren Sanierungsstrategien führt.

## 2.2 Stand der Forschung

In einem nächsten Schritt wurde eine strukturierte Datenbankrecherche durchgeführt, um den aktuellen Stand der Forschung im Bereich der luftgestützten thermischen Schrägbildaufnahmen zu erfassen und auszuwerten. Ziel war es, einen Überblick über bestehende sowie in Entwicklung befindliche Ansätze und Technologien zu erhalten. Dabei wurden sowohl nationale als auch internationale Quellen ohne geografische Einschränkung berücksichtigt.

### 2.2.1 Vorgehen

Die durchgeführte Datenbanksuche erfolgte nach der Methode der „Systematischen Literaturrecherche“ nach Heil (2021), um eine Verzerrung durch selektive Literatursuche zu minimieren. Diese Methode gliedert sich in sieben Schritte, die hier zusammengefasst erläutert werden:

#### **Forschungsfrage und Rechercheziel**

Klare Formulierung der Forschungsfrage sowie Definition der Rechercheprinzipien und Benennung der Ziele der Recherche.

#### **Ein- und Ausschlusskriterien**

Festlegen der Kriterien, die bestimmen, welche Publikationen in die Auswertung einbezogen und welche ausgeschlossen werden.

#### **Datenbanken**

Auswahl geeigneter Datenbanken und Suchmaschinen für die Recherche.

#### **Suchkomponenten**

Definieren der Suchbegriffe sowie möglicher Synonyme und alternativer Schreibweisen. Erste Testsuche mit diesen Suchkomponenten, um deren Effektivität zu überprüfen und gegebenenfalls Synonyme zu ergänzen.

#### **Suchstrings**

Entwicklung der konkreten Suchstrings als Kombination der Suchkomponenten, einschliesslich datenbankspezifischer Operatoren.

#### **Durchführung der Recherche**

Umsetzung der Datenbankabfragen mit den definierten Suchstrings und gegebenenfalls Anpassung der verwendeten Suchstrings.

#### **Dokumentation**

Dokumentation und Export der Ergebnisse der Datenbankabfragen für die weitere Auswertung.

**Tabelle 2:** Vorgehen bei der systematischen Literaturrecherche (eigene Darstellung in Anlehnung an (Heil, 2021))

Im Anschluss an die Recherche wurden die Ergebnisse aufbereitet und bewertet. Diese Analyse, Bewertung und Sortierung orientierte sich an der PRISMA-Methode (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) nach Moher et al. (2010). Dazu wurden die Ergebnisse zunächst auf Dubletten geprüft und bereinigt. Danach erfolgte ein mehrstufiges Verfahren, in dem der Datenpool auf seine Eignung hin überprüft und sortiert wurde, sodass letztlich nur eine Auswahl an Quellen für die vertiefte Auswertung zur Verfügung stand. (Köhler, 2020)

## 2.2.2 Datenerhebung

In diesem Abschnitt wird der praktische Prozess der Recherche dokumentiert, bei dem die oben beschriebene Methode der systematischen Literaturrecherche konkret angewendet wurde. Dabei werden die einzelnen Arbeitsschritte von der Forschungsfrage bis zur Dokumentation im Detail erläutert.



Abb. 3: Durchführung der Recherche (eigene Darstellung)

### Schritt 1 – Forschungsfrage und Rechercheziel

Die Forschungsfrage leitet sich aus der in Kapitel 1.3 beschriebenen Hauptfragestellung dieser Masterarbeit ab. Das Forschungsziel wurde im Proposal als wissenschaftlicher Dreisatz formuliert:

*«Ich untersuche die Anwendbarkeit und Aussagekraft von luftgestützten, gering aufgelösten thermischen Schrägbildaufnahmen von Fassaden in der Gebäudezustandsermittlung. Mein Ziel ist es, herauszufinden, wo die Potenziale und Grenzen ihres Einsatzes liegen, um konkrete Umsetzungsmöglichkeiten aufzuzeigen».*

### Schritt 2 – Ein- und Ausschlusskriterien

Um aktuelle Entwicklungen im Bereich der luftgestützten thermografischen Gebäudezustandserfassung gezielt zu identifizieren, wurde die Recherche bewusst auf diesen spezifischen Anwendungsbereich fokussiert. Themengebiete, die zwar im Zusammenhang mit der Gebäudezustandserfassung und Thermografie stehen, jedoch nicht unmittelbar für die Fragestellung dieser Masterarbeit relevant sind, wurden ausgeschlossen. Dadurch erhöhte sich die Aussagekraft der Ergebnisse für die vorliegende Arbeit.

Die Datenbankrecherche konzentrierte sich daher auf luftgestützte Thermografieaufnahmen, das heisst Aufnahmen, die mithilfe von unbemannten Luftfahrzeugen (Drohnen) oder Flugzeugen erstellt werden. Um das breite Feld der Gebäudezustandserfassung weiter einzugrenzen, lag der Fokus auf der thermografischen Energie- und Wärmeverlustanalyse von Gebäuden. Die Einbeziehung von Schrägaufnahmen war hierbei unerlässlich, um spezifische Ergebnisse zu Fassadenaufnahmen zu erhalten.

Um die Qualität und Aktualität der Quellen sicherzustellen, wurde die Suche auf wissenschaftliche Forschungsartikel und Übersichtsartikel beschränkt, die innerhalb der letzten zehn Jahre veröffentlicht wurden. Publikationen in englischer oder deutscher Sprache wurden berücksichtigt, um eine möglichst breite Datenbasis zu erhalten.

Auf eine explizite Einschränkung hinsichtlich der „geringen Auflösung der thermografischen Daten“ wurde verzichtet. Erste Tests mit den Suchstrings hatten gezeigt, dass in verschiedenen Forschungsarbeiten unterschiedliche Begriffe wie „L-Res“ oder „Low Res“ verwendet werden und der Begriff der niedrigen Bodenauflösung nicht eindeutig definiert ist. Dies führte sowohl zu einer Abnahme der Qualität als auch der Anzahl der Suchergebnisse, weshalb bewusst auf die genannte Einschränkung verzichtet wurde.

Allerdings weisen thermografische Systeme aufgrund ihrer Funktionsweise generell eine niedrigere Auflösung auf als andere bildgebende Verfahren. Zusätzlich vergrößert sich bei luftgestütztem Einsatz die Distanz zum Objekt, was den Effekt weiter verstärkt. Daher wurde diese als „weiche“ Einschränkung in der Datenauswertung und weiteren Verwendung der Ergebnisse entsprechend berücksichtigt. Darüber hinaus wurde das Thema der niedrigen Auflösung in Expert/innen-Gesprächen ausführlich diskutiert, um mögliche Auswirkungen und Lösungsansätze genauer zu untersuchen.

### Schritt 3 – Datenbanken

Für die Literaturrecherche wurde die Datenbank ScienceDirect® genutzt, ein Angebot des Elsevier-Verlags mit Zugang zu einer umfangreichen Sammlung wissenschaftlicher Zeitschriften, Bücher und Referenzwerke. ScienceDirect® deckt vielfältige Fachgebiete ab, darunter Ingenieurwesen, Naturwissenschaften und Technologie, und enthält Volltextpublikationen renommierter Verlage und Fachgesellschaften. Sie bietet leistungsstarke Such- und Filterfunktionen, mit denen sich relevante Quellen effizient identifizieren lassen. (ScienceDirect, 2024)

### Schritt 4 – Festlegen der Suchkomponenten

Anhand der Forschungsfrage und der in Schritt 2 definierten Kriterien wurden geeignete Suchkomponenten festgelegt:

<b>Thermografie</b>	<b>Gebäudezustandserfassung</b>	<b>Fassaden</b>	<b>Luftgestützte Aufnahmen</b>
thermography thermal infrared	building building diagnostic energy diagnostic diagnostic heat loss	facade façade oblique	airborne aerial drone aircraft airplane

**Tabelle 3:** Suchkomponenten (eigene Darstellung)

### Schritt 5 – Entwickeln der Suchstrings

Basierend auf den definierten Suchkomponenten wurden folgende Suchstrings in englischer Sprache gebildet, wobei datenbankspezifische Operatoren zum Einsatz kamen:

(thermography OR thermal OR infrared) AND oblique AND building AND "heat loss" AND (airborne OR aerial)

(thermography OR thermal OR infrared) AND oblique AND building AND "heat loss" AND (drone OR aircraft OR airplane)

(thermography OR thermal OR infrared) AND (facade OR façade) AND "heat loss" AND (airborne OR aerial)

(thermography OR thermal OR infrared) AND (facade OR façade) AND "heat loss" AND (drone OR aircraft OR airplane)

(thermography OR thermal OR infrared) AND building AND ("energy diagnostic" OR "building diagnostic") AND (drone OR aircraft OR airplane)

(thermography OR thermal OR infrared) AND oblique AND ("energy diagnostic" OR "building diagnostic")

(thermography OR thermal OR infrared) AND oblique AND building AND diagnostic AND (drone OR aircraft OR airplane)

(thermography OR thermal OR infrared) AND "building diagnostic" AND (drone OR aircraft OR airplane)

**Tabelle 4:** Suchstrings (eigene Darstellung)

### Schritt 6 - Durchführung der Recherche

Basierend auf den zuvor festgelegten Suchstrings wurde die eigentliche Datenbanksuche durchgeführt. Dabei wurden die in Schritt 2 definierten Ein- und Ausschlusskriterien bezüglich der Aktualität der Daten sowie der Artikelart als Filter implementiert.

### Schritt 7 – Dokumentation

Alle Ergebnisse der Datenbanksuche wurden anschliessend exportiert und für die weitere Auswertung in Tabellenform dargestellt. Dabei wurden sämtliche von ScienceDirect® bereitgestellten Informationen übernommen, um eine fundierte Datenauswertung zu ermöglichen. Die Ergebnisse dieser Datenbanksuche sind in Kapitel 2.2.4 sowie in ausführlicher Form im Anhang A dokumentiert.

### 2.2.3 Datenauswertung

Nach Abschluss der Datenbanksuche wurden die identifizierten Dokumente näher untersucht und in einem mehrstufigen Prozess analysiert und bewertet. Wie in Kapitel 2.3 bereits erläutert, kam die PRISMA-Methode nach (Moher et al., 2010) zum Einsatz. Zunächst erfolgte eine Prüfung auf Dubletten sowie eine Bereinigung der Trefferliste. Anschliessend wurde in einem mehrstufigen Verfahren ermittelt, inwieweit die Quellen für eine vertiefte Analyse geeignet waren.

Im Rahmen der Datenbankrecherche wurden insgesamt 663 Dokumente identifiziert und im Anschluss näher untersucht. Nach dem Ausschluss von 235 Dubletten verblieben 428 Einträge, die in einer Tabelle (siehe ) zusammengefasst wurden. Diese Einträge wurden anhand der in Schritt 4 definierten Suchkomponenten automatisch durchsucht, wobei nicht nur Titel und Schlagwörter, sondern auch Abstracts einbezogen wurden. Da 353 Einträge nicht mindestens drei der vier Suchkomponenten enthielten, schieden sie aus. Die verbleibenden 75 Einträge wurden anschliessend inhaltlich geprüft und in vier Kategorien eingeordnet. Aus dieser Bewertung ergaben sich 13 Datensätze, die aufgrund ihres Inhaltes als exzellent oder sehr gut geeignet eingestuft wurden, um die Forschungsfragen dieser Masterarbeit zu beantworten. Der durchgeführte Prozess kann der nachfolgenden Abbildung 5 entnommen werden.

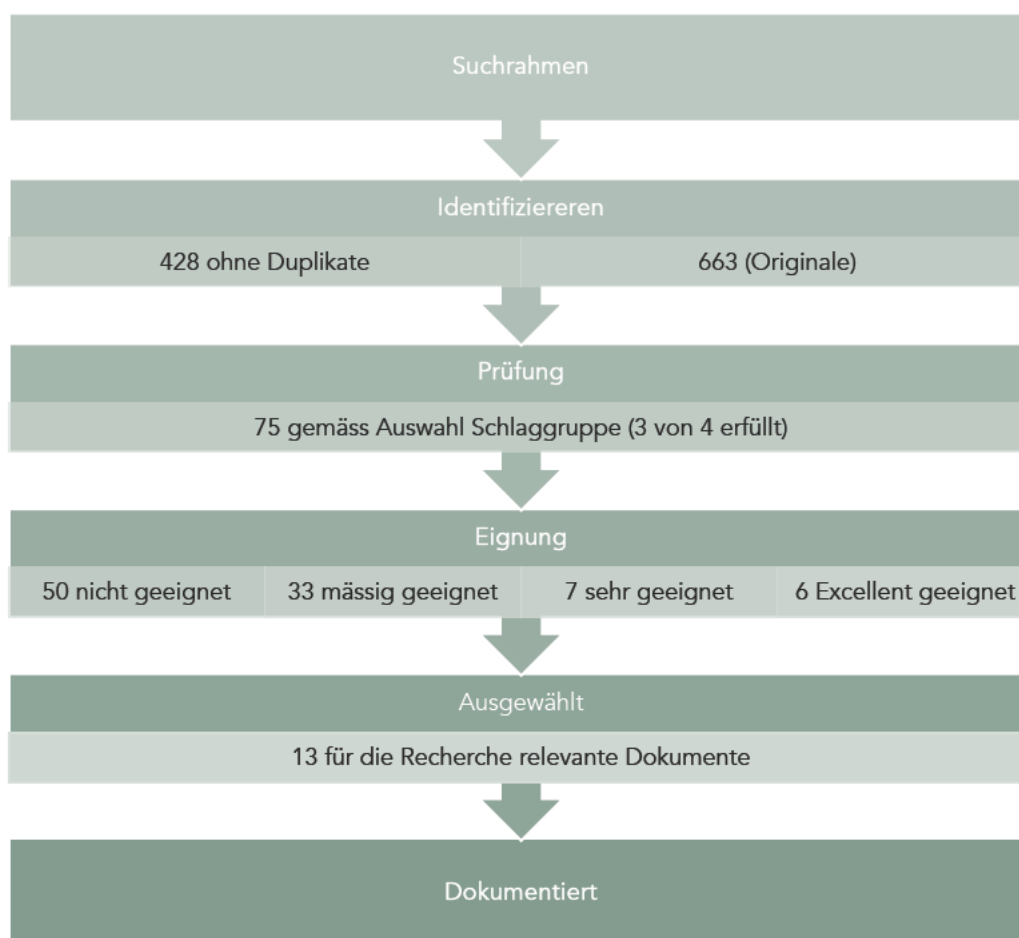


Abb. 4: Darstellung und Ergebnisse der Datenbanksuche (eigene Darstellung)

Eine detaillierte Untersuchung dieser 13 Datensätze (siehe Anhang A und Tabelle 4) zeigt, dass alle relevanten Dokumente Gebäudeaufnahmen behandeln. Keines davon thematisiert jedoch explizit Schrägaufnahmen (oblique) oder Aufnahmen aus Flugzeugen (airborne, aerial, aircraft, airplane). Die meisten Datensätze befassen sich mit Wärmeverlusten (heat loss), während sechs Studien ausdrücklich Drohnenaufnahmen (drone) oder Thermografieaufnahmen (thermography, thermal infrared) beschreiben.

Autoren / Jahr	Thermography; thermal infrared	oblique	facade; façade	building	heat loss	airborne aerial	aircraft airplane	drohne
(Rakha & Gorodetsky, 2018)	✓	-	-	✓	-	-	-	✓
(Shariq & Hughes, 2020)	✓	-	-	✓	✓	-	-	✓
(Bayomi et al., 2021)	✓	-	-	✓	-	-	-	✓
(Hou et al., 2021)	-	-	-	✓	-	-	-	-
(Puliti et al., 2021)	-	-	-	✓	✓	-	-	-
(Dabetwar et al., 2022)	-	-	-	✓	✓	-	-	-
(Rakha et al., 2022)	✓	-	-	✓	✓	-	-	✓
(Dabetwar et al., 2023)	-	-	-	✓	✓	-	-	-
(Motayyeb et al., 2023)	-	-	-	✓	-	-	-	-
(Mahmoodzadeh et al., 2023)	✓	-	-	✓	✓	-	-	✓
(Mayer et al., 2023)	-	-	-	✓	-	-	-	✓
(Zhang et al., 2023)	✓	-	-	✓	-	-	-	-
(Waqas & Araj, 2024)	-	-	-	✓	✓	-	-	-

**Tabelle 5:** Thematische Inhalte der Literatur (eigene Darstellung)

Neben dieser inhaltlichen Untersuchung fand eine zusätzliche Prüfung der Metadaten statt. Da die Recherche ausschliesslich in der grossen wissenschaftlichen Datenbank ScienceDirect® durchgeführt und auf die Publikationstypen Forschungsartikel sowie Übersichtsartikel beschränkt wurde, ist von einer grundsätzlich hohen wissenschaftlichen Qualität der ermittelten Ergebnisse auszugehen.

Ein Blick auf die zeitliche Verteilung der ausgewählten Publikationen (siehe Abb. 5) verdeutlicht, dass acht der dreizehn Datensätze nach 2022 veröffentlicht wurden. Dies unterstreicht zum einen die hohe Aktualität der Forschungsfrage und zum anderen die Aktualität der ausgewählten Studien. Auch die Autorenschaft der Publikationen ist breit gestreut: Nur zwei Hauptautor/innen (Dabetwar Shweta und Rakha Tarek) traten in jeweils zwei Artikeln auf. Diese breite Streuung spricht für eine grosse Vielfalt an Erkenntnissen und die Aussagekraft der Ergebnisse weiter stützt.

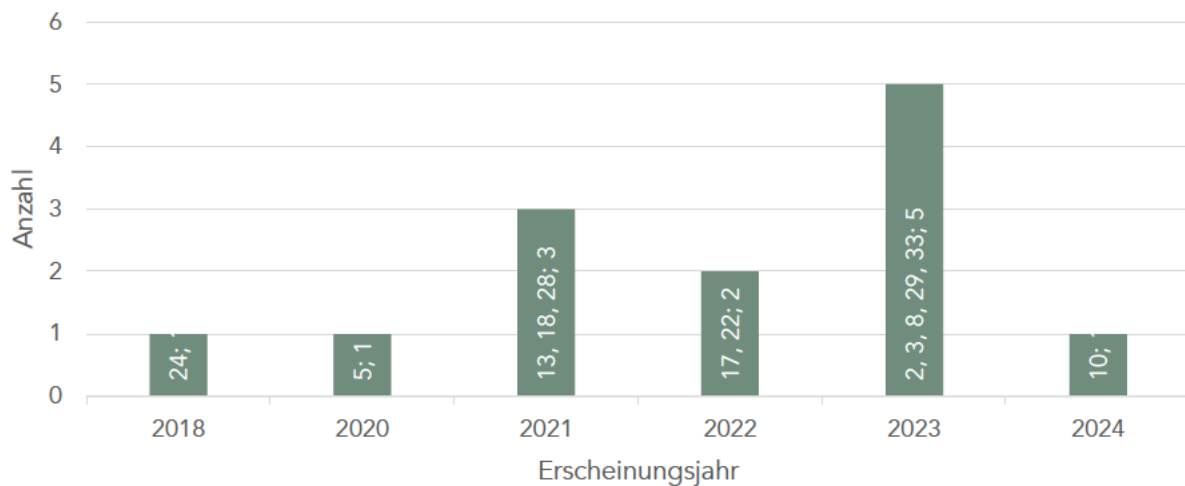


Abb. 5: zeitliche Analyse der Publikation (eigene Darstellung)

Die Mehrheit der Publikationen erschien in den Zeitschriften *Automation in Construction* (vier Publikationen) und *Energy and Buildings* (drei Publikationen). Der Impact Factor (IF), welcher die durchschnittliche Anzahl von Zitationen pro Artikel innerhalb der letzten zwei Jahre widerspiegelt, liegt für *Automation in Construction* bei 10,3 und für *Energy and Buildings* bei 6,7. (Clarivate, 2024; Elsevier, 2024a, 2024b) Diese Werte weisen auf den anerkannten Status der beiden Fachzeitschriften hin und sprechen für die Qualität der verwendeten Daten.

Insgesamt zeigt die Prüfung der Metadaten, dass eine solide und aktuelle Basis an qualitätsgeprüften Forschungsergebnissen vorliegt. Im Anschluss an diese Auswertung wurden die 13 als exzellent oder sehr gut geeigneten Datensätze vertieft untersucht. Sie dienten sowohl als Grundlage für die hier ausgearbeiteten Anwendungskonzepte als auch als Ausgangspunkt für weiterführende Recherchen nach dem Schneeballprinzip.

In folgenden Kapitel 2.2.4 werden schliesslich ausgewählte Publikationen vorgestellt, die aufgrund der zuvor geschilderten Analyse als besonders relevant für diese Masterarbeit gelten. Neben den Arbeiten aus der systematischen Literaturrecherche sind dort auch Studien enthalten, die entweder über die Schneeballsuche oder durch direkte Kontakte des Autors ermittelt wurden. Diese Auswahl von Publikationen bildet einen wichtigen Bestandteil für die Entwicklung der Anwendungskonzepte in Kapitel 5. Darüber hinaus werden in Kapitel 2.3 die kombinierten Ergebnisse beider Literaturrecherchen zusammengefasst, um einen umfassenden Überblick zu gewährleisten.

## 2.2.4 Relevante Publikationen

Im Folgenden werden fünf ausgewählte Publikationen vorgestellt, die für die Beantwortung der Forschungsfragen dieser Masterarbeit als besonders relevant eingestuft wurden. Die ersten drei Arbeiten von Bleisch, Rüdisser et al. sowie Papineau und Rivers wurden dem Autor entweder direkt zur Verfügung gestellt oder aufgrund einer Schneeballrecherche in die Auswahl aufgenommen. Die beiden weiteren Publikationen von Mayer et al. und Waqas und Arajii stammen hingegen aus der systematischen Literaturrecherche. Alle diese Studien bieten interessante Ansätze und Konzepte zum Umgang mit thermischen Luftaufnahmen. Weitere wichtige Quellen sind im Anhang A aufgeführt, wo sie in Bezug auf ihre Bedeutung für diese Arbeit eingeordnet werden.

### Auswahl 1: Wärmedurchblick mit dem ThermoPlaner3D – (Bleisch, 2023)

Der von Prof. Dr. Susanne Bleisch im Jahr 2023 im «Bulletin Electrosuisse» veröffentlichte Artikel thematisiert das von Innosuisse geförderte Forschungsprojekt „ThermoPlaner3D“ am Institut Geomatik der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW). Dieses Forschungsprojekt bildet den Ausgangspunkt der vorliegenden Masterarbeit. Im Zentrum steht die automatisierte Verarbeitung thermischer Luftaufnahmen von Gebäudedächern und -fassaden, um präzise Informationen über deren energetischen Zustand zu gewinnen.

Zur Erstellung der Thermalaufnahmen werden Vermessungsflugzeuge eingesetzt, die während der Heizperiode und möglichst nachts die Oberflächen der Dächer und Fassaden erfassen. So lassen sich Umwelteinflüsse wie Sonneneinstrahlung minimieren und möglichst exakte Messwerte erzielen. Die gewonnenen Daten dienen zur präzisen Analyse der Wärmeabstrahlung, was das Aufspüren von energetischen Schwachstellen in der Gebäudehülle ermöglicht. Diese Erkenntnisse sind sowohl für Gebäudeeigentümer/innen als auch für Energieversorgungsunternehmen von grossem Interesse. Erstere können gezielt Sanierungsmassnahmen einleiten, während Energieversorgungsunternehmen die Wärmeversorgung in ihrem Versorgungsgebiet besser priorisieren und beispielsweise Fernwärmenetze oder Wärme-Contracting-Angebote optimieren können.

Ein wesentlicher Aspekt des Projekts ist die Berücksichtigung lokaler Mikroklimata, welche die erfasste Temperatur beeinflussen. Damit lassen sich unterschiedliche Stadtgebiete, die aufgrund von Vegetation, Strassenkreuzungen oder anderen Faktoren abweichende Temperaturverhältnisse aufweisen, genauer vergleichen. Zudem ist eine interaktive Plattform geplant, die Eigentümer/innen den Zugang zu thermalen Analysen ihrer Gebäude ermöglicht. Dies soll die Daten für eine breite Nutzerschaft zugänglich machen.

Die im Rahmen dieses Projekts erarbeiteten Grundlagen sowie der im Artikel dargelegte Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen liefern wertvolle Ansätze für diese Masterarbeit. Mehrere der aufgezeigten Prozesse und Konzepte sind für die Umsetzung von Anwendungskonzepten in diesem Rahmen von grossem Interesse. Das Projekt wurde im Sommer 2024 abgeschlossen und strebt nun an, die entwickelten Prozesse in kommerzielle Produkte zu überführen.

## Auswahl 2: Spatially Resolved Analysis of Urban Thermal Environments Based on a Three-Dimensional Sampling Algorithm and UAV-Based Radiometric Measurements – (Rüdisser et al., 2021)

Die von Rüdisser, Weiss und Unger im Jahr 2021 in der Fachzeitschrift «Sensors» vorgestellte Studie beschreibt einen neuartigen Ansatz zur hochaufgelösten Erfassung thermischer Bedingungen in Städten. Zwar steht hier die Bewertung sommerlicher Hitze im Vordergrund, doch lassen sich die Ergebnisse und Methoden auch auf winterliche Fragestellungen übertragen, wie sie in dieser Masterarbeit betrachtet werden.

Kern des Verfahrens ist die Kombination von Messungen aus Drohnenflügen und Bodenmessungen mit einem dreidimensionalen Stadtmodell. Die Drohnen sind mit multispektralen und thermografischen Kameras ausgestattet, um Strahlung in verschiedenen Wellenlängenbereichen präzise zu erfassen. Ergänzend dazu werden am Boden diverse Umgebungsparameter wie Temperatur und Feuchtigkeit gemessen, damit die anschliessenden Auswertungen möglichst genau an die realen Verhältnisse angepasst werden können.

Ein wesentlicher Teil der Studie beschreibt, wie die erfassten Messwerte bereinigt und auf das dreidimensionale Stadtmodell übertragen werden. Dabei entstehen aus der Verknüpfung von realen Messdaten und Modelldarstellungen Texturen, welche die Wärmeabstrahlung und Reflexion unterschiedlicher Oberflächen der Gebäude und Strassen wiedergeben. Dieser Prozess erfordert sorgfältige Korrekturen, um etwa Materialeigenschaften, Vegetation und lokale Weterinflüsse korrekt abzubilden.

Für diese Masterarbeit sind mehrere Elemente der publizierten Methode besonders aufschlussreich. Einerseits zeigt die Studie, wie thermografische Daten umfassend korrigiert und mit weiteren Messgrössen verknüpft werden können. Andererseits veranschaulicht sie, wie mittels multispektraler Informationen diverse Oberflächen, zum Beispiel Vegetation oder Fassaden, eindeutig identifiziert und anschliessend in das Stadtmodell integriert werden. Hinzu kommt die Methode zur präzisen Projektion der Messwerte auf die geometrische Struktur des Stadtmodells, was eine anschauliche und gleichzeitig fundierte Analyse thermischer Zustände in Strassenzügen und an Gebäudeflächen erlaubt.

Auch wenn die Forschung von Rüdisser et al. vorrangig auf sommerliche Wärmeverhältnisse ausgerichtet ist, liefern die vorgestellten Verfahren interessante Anhaltspunkte für die winterliche Betrachtung der Gebäudehülle. Die Ergebnisse belegen, wie grossräumige und gleichzeitig detaillierte Wärmeanalysen durchgeführt werden können, indem Drohnenbefliegung, multispektrale Sensorik und ein dreidimensionales Stadtmodell verknüpft werden. Somit gibt die Studie wertvolle Hinweise darauf, wie Thermaldaten sorgfältig aufbereitet und in konkreten Planungskontexten für unterschiedlichste bauliche und energetische Entscheide eingesetzt werden können.

### Auswahl 3: Experimental evidence on heat loss visualization and personalized information to motivate energy savings – (Papineau & Rivers, 2022)

Das Paper von Papineau und Rivers (2022) berichtet im Journal of Environmental Economics and Management über eine umfangreiche Feldstudie, in der zufällig ausgewählte Haushalte unterschiedlich aufbereitete Informationen zu ihrem Energieverbrauch erhielten. Eine Gruppe bekam herkömmliche Energieberichte mit Verbrauchsvergleichen, während die andere Gruppe zusätzlich Thermal-Aufnahmen ihres Gebäudes zur Visualisierung von Wärmeverlusten erhielt. Das MyHeat-Projekt aus Kanada diente dabei als Vorreiter für die grossflächige Erfassung und Analyse dieser Wärmeverluste.

Die Ergebnisse zeigten, dass Haushalte mit Thermal-Aufnahmen ihren Energieverbrauch deutlich stärker reduzierten als jene, die nur traditionelle Berichte erhielten. Sie waren zudem eher bereit, in energieeffiziente Massnahmen und Geräte zu investieren. Besonders ineffiziente Haushalte erreichten die grössten Einsparungen, was die Bedeutung einer gezielten Ansprache unterstreicht. Von besonderem Interesse sind die psychologischen Aspekte, die durch die bildhafte Darstellung von Wärmeverlusten eine stark motivierende Wirkung entfachen. Papineau und Rivers verweisen darauf, dass eine anschauliche Visualisierung und eine personalisierte Kommunikation tiefere Verhaltensänderungen bewirken können als rein textbasierte Informationen. Die Studie liefert somit wertvolle Hinweise darauf, wie Thermal-Aufnahmen verknüpft mit konkreten Handlungsempfehlungen dazu beitragen können, den Energieverbrauch in Gebäuden signifikant zu senken.

Diese Ergebnisse sind für die Masterarbeit in mehrfacher Hinsicht relevant. Erstens veranschaulichen sie, wie bildliche Darstellungen in Kombination mit personalisierten Einsparpotenzialen die Wirksamkeit von Energieeffizienzprogrammen deutlich steigern können. Zweitens wird im Beitrag gezeigt, dass psychologische Faktoren eine zentrale Rolle bei der Vermittlung von Informationen spielen. Drittens betont die Studie die Bedeutung von Projekten wie MyHeat für eine grossflächige und kostengünstige Erfassung von Energieverlusten, was direkt an die Zielsetzung einer umfassenden Gebäudezustandserfassung anknüpft. Insgesamt verdeutlicht die Arbeit, dass Thermal-Aufnahmen ein wirkungsvolles Instrument sein können, um Energieeinsparungen in einem grösseren Massstab anzustossen und dadurch einen Beitrag zur Erreichung ambitionierter Klimaziele zu leisten.

#### Auswahl 4: Deep learning approaches to building rooftop thermal bridge detection from aerial images – (Mayer et al., 2023)

In der Fachzeitschrift *Automation in Construction* wurde von Mayer et al. (2023) das Paper "Deep learning approaches to building rooftop thermal bridge detection from aerial images" veröffentlicht. Darin wurde der Einsatz von Drohnen und tiefen neuronalen Netzwerken zur automatisierten Erkennung von Wärmebrücken auf Gebäudedächern untersucht.

Die Autor/innen fokussierten sich auf die Erkennung von Wärmebrücken anhand thermografischer Aufnahmen, die von Drohnen aufgenommen wurden. Diese Aufnahmen kombinierten sichtbare (RGB), thermische und Höheninformationen. Basierend auf diesem Datensatz wurden verschiedene Methoden des maschinellen Lernens verglichen, um Wärmebrücken in den entsprechenden Bildern zu erkennen.

Das Paper betonte die Vorteile der Drohnentechnologie für die flächendeckende Gebäudebewertung, insbesondere in städtischen Gebieten, wo herkömmliche bodengestützte Thermografiemethoden aufgrund von Zugangs- und Perspektivproblemen eingeschränkt sind. Die Autor/innen hoben hervor, dass die Integration von Höheninformationen als dritte Dimension in die Bildanalyse entscheidend war, um genaue Ergebnisse zu erzielen und Fehlinterpretationen wie fälschlicherweise erkannte Wärmebrücken zu vermeiden.

Die Studie demonstrierte das Potenzial tiefer neuronaler Netzwerke zur Verbesserung der Energieeffizienz und nachhaltigen Sanierung von Gebäuden. Die entwickelte Methode ermöglichte eine präzise und effiziente Identifikation von Wärmebrücken auf grossflächiger Ebene. Dieser maschinelle Ansatz könnte auch für die vorliegende Masterarbeit von entscheidender Bedeutung sein.

#### Auswahl 5: Machine learning-aided thermography for autonomous heat loss detection in buildings – (Waqas & Araj, 2024)

Das Paper "Machine learning-aided thermography for autonomous heat loss detection in buildings", das von Waqas und Araj (2024) im renommierten Journal *Energy Conversion and Management* veröffentlicht wurde, untersucht die Anwendung von Thermografieaufnahmen in Kombination mit maschinellem Lernen, um Wärmeverluste an Gebäudehüllen autonom zu erkennen und zu quantifizieren.

Die Autor/innen zeigen auf, dass traditionelle Methoden der Datenanalyse zeitaufwendig und stark von der Expertise von Thermograf/innen abhängig sind. Dies macht die Automatisierung dieser Prozesse durch maschinelles Lernen besonders wertvoll. Das entwickelte Verfahren kombiniert thermale Aufnahmen mit Deep-Learning-Modellen zur Anomalieerkennung und einem mathematischen Modell zur Quantifizierung des Wärmeflusses.

Die Studie adressiert auch die Herausforderungen, die durch Umweltbedingungen und die Komplexität der gesammelten thermischen Daten entstehen. Dadurch deckt die Arbeit mehrere zentrale Themenbereiche ab, die auch im Rahmen dieser Masterarbeit von grosser Bedeutung sind.

## 2.3 Zusammenfassung

Dieses Kapitel bietet einen umfassenden Überblick über traditionelle und innovative Methoden der Gebäudezustandserfassung, wobei der Schwerpunkt auf der Fassadenanalyse liegt. Durch die Betrachtung sowohl thermografischer als auch nicht-thermografischer Verfahren wurden relevante Informationen ermittelt, um den Gebäudezustand präzise zu erfassen und die aktuellen Praxisstandards in der Schweiz zu identifizieren.

Zu Beginn wurden die normativen Grundlagen detailliert untersucht. Insbesondere standen die Schweizer Normen SIA 469, SIA 180 und SIA 269 sowie der Gebäudeenergieausweis der Kantone (GEAK) im Fokus. Dabei wurde festgestellt, dass die thermische Analyse der Fassade nicht isoliert betrachtet wird, sondern im Gesamtkontext der Gebäudeuntersuchung definiert und beschrieben ist. Mit der Veröffentlichung der Norm SIA 180.223 im Jahr 2024, die sich speziell auf die Feststellung von Unregelmässigkeiten bezüglich Wärme, Luft und Feuchtigkeit in Gebäuden mittels Infrarotverfahren konzentriert, gewinnt das Thema der Infrarot-Thermografie in verschiedenen Gebäudetypen an besonderer Aktualität.

Im Anschluss daran wurde der GEAK als etabliertes Instrument zur energetischen Bewertung von Gebäuden näher beleuchtet. Es zeigte sich jedoch, dass die für eine umfassende thermografische Fassadenanalyse notwendigen Untersuchungen nicht Bestandteil des standardisierten GEAK-Prozesses sind und lediglich in spezifischen Fällen ergänzend durchgeführt werden können. Aufgrund ihrer Ausrichtung auf Einzelgebäude und des hohen personellen Aufwands eignen sich die beschriebenen Methoden und Systeme nicht für grossflächige Untersuchungen von umfangreichen Gebäudebeständen.

Darauf aufbauend wurden verschiedene Prüfmethode analysiert, um ein breites Spektrum an quantitativen und qualitativen Verfahren abzudecken. Hierzu zählen die Analyse bestehender Pläne und Unterlagen, Befragungen von Nutzern und Betreibern, das Differenzdruckverfahren (Blower-Door-Test), endoskopische Untersuchungen, Feuchtemessungen, Monitoringsysteme, Probenahmen mit Labortests sowie Ultraschall- und Radarverfahren. Ergänzt werden diese durch visuelle Inspektionen, bei denen zunehmend der Einsatz von Drohnen zum Tragen kommt. Obwohl diese Methoden eine umfassende Bewertung des energetischen Zustands von Fassaden und der gesamten Gebäudehülle ermöglichen, sind sie aufgrund ihres hohen Zeit- und Personalaufwands für grossflächige Anwendungen weniger geeignet.

Ein besonderer Fokus lag auf der thermografischen Zustandserfassung von Gebäuden. Die thermografische Analyse ermöglicht es, Oberflächentemperaturen sichtbar zu machen und thermische Anomalien wie Wärmebrücken oder Feuchtigkeitsprobleme zu identifizieren. Dabei wurde zwischen qualitativer und quantitativer Thermografie unterschieden. Die qualitative Thermografie dient der visuellen Identifikation von Problemstellen, während die quantitative Thermografie genaue Messwerte liefert. Es wurde hervorgehoben, dass die Berücksichtigung von Umgebungsfaktoren sowie die Ergänzung durch weitere Verfahren unerlässlich sind, um valide Ergebnisse zu erzielen. Allerdings wurde festgestellt, dass die Definition und Umsetzung von Anforderungen

an die Genauigkeit thermografischer Daten aufgrund der Vielzahl an Einflussfaktoren mit erheblichen Herausforderungen verbunden ist.

Um den aktuellen Forschungsstand im Bereich luftgestützter thermischer Schrägbildaufnahmen zu ermitteln, wurde eine systematische Literaturrecherche nach der Methode von Heil durchgeführt. Die Recherche konzentrierte sich auf wissenschaftliche Publikationen der letzten zehn Jahre, die sich mit der thermografischen Energie- und Wärmeverlustanalyse von Gebäuden unter Verwendung von luftgestützten Aufnahmen befassen. Dabei zeigte sich, dass in diesem speziellen Bereich eine Forschungslücke besteht und nur wenige Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sich damit intensiv beschäftigen (siehe Rüdiger et al., 2021; Bleisch, 2023).

Trotz dieser Lücke adressieren mehrere Studien die technischen Aspekte der in dieser Arbeit gestellten Forschungsfragen durch innovative Lösungsansätze. So betonen verschiedene Arbeiten die Notwendigkeit präziser Korrekturmechanismen, die das Mikroklima berücksichtigen, um die Genauigkeit thermischer Analysen zu erhöhen. Der Einsatz von tiefen neuronalen Netzen und maschinellem Lernen wird als vielversprechender Ansatz hervorgehoben, um die Effizienz und Präzision der Gebäudebewertung zu steigern und den Bedarf an manueller Datenanalyse zu reduzieren.

Weiterhin wurde deutlich, dass die Visualisierung von Wärmeverlusten in Kombination mit personalisierten Energiesparhinweisen eine effektive Methode darstellt, um Investitionen in Energieeffizienzmassnahmen zu fördern. Dies unterstreicht die Bedeutung der Kommunikation und der visuellen Aufbereitung von Daten. Projekte wie der ThermoPlanner3D nutzen thermische Luftaufnahmen, um detaillierte energetische Gebäudedaten bereitzustellen, die wiederum für fundierte Investitionsentscheidungen genutzt werden können.

Abschliessend bilden die gewonnenen Erkenntnisse eine solide Grundlage für die weitere Untersuchung der praktischen Anwendbarkeit und Effektivität luftgestützter thermischer Schrägbildaufnahmen von Fassaden. Sie dienen zudem als Wissensbasis für die bevorstehenden Expert/innen-Gesprächen, in denen die identifizierten Potenziale und Herausforderungen dieser Technologie evaluiert und die spezifischen Bedürfnisse der Nutzerinnen und Nutzer adressiert werden sollen.

### 3 Expert/innen-Gespräche

Ergänzend zur Literaturrecherche wurden Expert/innen-Gespräche mit Fachleuten aus den Bereichen Thermografie und Gebäudezustandsermittlung durchgeführt. Die Gespräche haben mehrere Ziele: Zum einen sollten praktische Erfahrungen und aktuelle Herausforderungen in konventionellen sowie innovativen Verfahren der Gebäudezustandsbewertung erfasst werden, insbesondere im Hinblick auf die darin enthaltene energetische Zustandsermittlung von Fassaden. Zum anderen galt es, ein vertieftes Verständnis für die Auswertung thermischer Schrägbildaufnahmen und deren weitere Verwendung zu erlangen.

Die Expert/innen lieferten Einblicke in praktische Möglichkeiten und Herausforderungen dieser Prozesse, was insbesondere für die Beantwortung der ersten und zweiten Teilfrage dieser Masterarbeit relevant ist. In diesem Zusammenhang stand die Frage im Vordergrund, welche Elemente existierender, thermografie-basierter Methoden zur Fassadenanalyse auf die in dieser Arbeit untersuchten luftgestützten, gering aufgelösten thermischen Fassaden-Schrägbildaufnahmen übertragen werden können.

Darüber hinaus wurde untersucht, wie die Expert/innen gegenwärtig Erkenntnisse aus der Analyse von Thermalaufnahmen bei der Gebäudezustandsbewertung einsetzen, welche bestehenden Prozesse sich daraus ergeben und welche Anforderungen diese Nutzungen an thermografische Daten stellen. Diese Überlegungen sind sowohl für die Beantwortung der ersten als auch der dritten Teilfrage dieser Masterarbeit von entscheidender Bedeutung.

Ein besonderes Augenmerk lag zudem auf der Diskussion der niedrigen Auflösung luftgestützter Aufnahmen, die sich aufgrund aktueller technischer Beschränkungen in derameratechnik sowie der Flughöhe ergibt. Weiter wurde erörtert, inwiefern Schrägbildaufnahmen die großflächige Ermittlung des Fassadenzustands beeinflussen können. Zur Veranschaulichung kamen reale Thermalaufnahmen zum Einsatz, wodurch mögliche Auswirkungen und Lösungsansätze im Rahmen der Gespräche eingehend beleuchtet werden konnten.

Der methodische Aufbau der Expert/innen-Gespräche umfasste die Festlegung geeigneter Gesprächsmethoden, die Auswahl passender Gesprächspartner/innen sowie die Vorbereitung der eigentlichen Gespräche. Dazu zählten das Festlegen eines Rahmens für die Informationsanforderungen der Anspruchsgruppen, das Aufbereiten exemplarischer Thermografieaufnahmen und die Entwicklung entsprechender Gesprächsleitfäden. Auf diese Weise sollte eine breite Abdeckung der untersuchten Themen und Fragestellungen gewährleistet und gleichzeitig eine strukturierte Erhebung der Gesprächsinhalte sichergestellt werden. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte dieses Vorgehens näher erläutert.

## 3.1 Vorgehen

### 3.1.1 Gesprächsmethoden

Um während der Expert/innen-Gespräche ausreichend Flexibilität zu bewahren und dennoch die gewünschte Tiefe zu erreichen, wurde eine Kombination aus Elementen strukturierter Gespräche und teilstrukturierter Gesprächsführung gewählt. Dieses Vorgehen wird im Folgenden als teilstrukturierte Gespräche bezeichnet (Reinders et al., 2011). Die Struktur des Gesprächs wurde, ähnlich wie in anderen strukturierten Gesprächsformen, durch einen Leitfaden festgelegt, der grundlegende Themen und Fragen vorgibt. Dennoch blieb die Durchführung flexibel, sodass sich auch komplexe Aspekte abdecken liessen, die nicht durch vorab definierte Antwortoptionen erfassbar gewesen wären.

Diese Methode erlaubt eine tiefgehende Erkundung der individuellen Erfahrungen und Wahrnehmungen der befragten Personen, da sie Raum für offene Gesprächsanteile und ergänzende Erzählungen bietet. Gleichzeitig stellt der Leitfaden sicher, dass ein gewisser Grad an Strukturiertheit erhalten bleibt, was die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse fördert (Averbeck-Lietz & Meyen, 2016). Um eine hohe Qualität und Tiefe der Forschungsergebnisse zu erreichen, wurden die Gesprächsleitfäden nach dem in Kapitel 3.1.5 beschriebenen SPSS-Prinzip entwickelt, was wesentlich zur Validität der erhobenen Daten beiträgt. (Helfferich, 2011)

### 3.1.2 Gesprächspartner/innen

Auf Grundlage der vorangegangenen Literaturrecherche und erster Sondierungsgespräche wurden Expert/innen aus den Bereichen Thermografie und Gebäudezustandsermittlung ausgewählt, deren beruflicher Hintergrund, Erfahrung und erste Einschätzungen als besonders relevant für die Beantwortung der Forschungsfragen erachtet wurden. Die Gruppe der ausgewählten Personen umfasst Vertreter/innen aus Wirtschaft, Kantons- und Stadtverwaltungen sowie der Forschung.

Die Expert/innen stammen aus dem persönlichen und beruflichen Netzwerk des Verfassers, was den Zugang zu ihnen erleichterte. Dadurch konnten auch sensible Themen wie interne Prozesse, spezifische Vorgehensweisen oder mögliche Herausforderungen angesprochen werden, die üblicherweise nicht öffentlich diskutiert werden. Zwar besteht durch die Fokussierung auf das persönliche Netzwerk ein gewisses Bias-Risiko, doch wurde dies angesichts der Vorteile, wie offene Gespräche und direkter Zugang zu den Personen, als vertretbar eingeschätzt. Mögliche Auswirkungen dieses Vorgehens auf die Ergebnisse sowie der daraus resultierende Bedarf an weiterführender Forschung werden in den Kapiteln 5 und 6 eingehender beleuchtet. Um eine offene Gesprächsführung zu fördern, wurde mit den ausgewählten Gesprächspartner/innen vereinbart, dass ihre Identität nicht veröffentlicht wird und ihre Aussagen entsprechend anonymisiert sind. In einer Übersichtstabelle wird jedoch dargelegt, welchen Hintergrund die jeweiligen Personen mitbringen und warum sie als Expert/innen für diese Masterarbeit ausgewählt wurden. Auf Basis

der durchgeführten Eignungsbewertung wurden die Personen, die als sehr geeignet eingestuft wurden, ausgewählt und zu einem Gespräch eingeladen.

Person	Beschreibung	Kriterium	Eignung
Person 1	...ist bei einem der grossen Gebäudetechnikunternehmen der Schweiz in leitender Funktion tätig und führt Gebäudeanalysen mit neuen Simulationstechniken durch. Zudem besteht eine langjährige Erfahrung bei der energetischen Analyse von Gebäudehüllen.	+ technisch sehr versiert und fokussiert auf neue Technologien  - bisher nur begrenzte Anwendung von Thermografie-Aufnahmen  Kategorie: Wirtschaft	Mässig geeignet  Sondierungsgespräche zeigen, dass durch den technischen Hintergrund bei der Gebäudesimulation interessante Inputs möglich wären. Person steht allerdings in Bezug auf Erfahrung mit Thermografie hinter Person 6, welche ebenfalls aus der Wirtschaft kommt, zurück.
Person 2	...ist Mitarbeitende/r des Instituts für Nachhaltigkeit und Energie am Bau der Fachhochschule Nordwestschweiz und verfügt über vertieftes Wissen zum Prozess des GEAK sowie weiterer Zertifizierungen.	+ tiefes Wissen im Bereich des nachhaltigen Bauens und der Gebäudezertifizierung  - bisher nur begrenzte Anwendung von Thermografie-Aufnahmen  Kategorie: Forschung	Geeignet  Analyse der bisherigen Tätigkeit und Vertiefungsbereiche zeigt eine interessante Erweiterung hinsichtlich Gebäudezertifizierung. Person steht jedoch in Bezug auf technische Erfahrung hinter Person 3, welche ebenfalls aus der Forschung kommt, zurück.
Person 3 <b>Auswahl</b>	...ist leitend an einem Zentrum für Integrale Gebäudetechnik an einer Schweizer Hochschule tätig und verfügt über fundiertes Wissen in Bauphysik, Thermografie und Forschung zur Gebäudetechnik. Zuvor erfolgte eine Tätigkeit im Bereich Thermografie bei einem grossen Bauunternehmen in der Schweiz.	+ tiefes Wissen in Thermografie und Gebäudetechnik  + direkte Einsicht in laufende Forschung mit potenziellen Weiterentwicklungen  Kategorie: Forschung; (Wirtschaft)	Sehr geeignet  Hintergrund sowohl in der Forschung als auch in der Wirtschaft, zusammen mit bereits bestehender tiefer Erfahrung in Thermografie, passt sehr gut zu den Fragestellungen dieser Arbeit. Sondierungsgespräche zeigten zudem grosses Potenzial auf.
Person 4 <b>Auswahl</b>	...ist ausgebildete/r Architekt/in und arbeitet in einer mittelgrossen Schweizer Stadt in der Bauverwaltung. Zuvor erfolgte eine Tätigkeit als GEAK-Expert/in, wodurch Wissen über städtische Verwaltung und praktische Zertifizierung von Gebäuden vereint wird.	+ repräsentiert öffentliche Nutzung und damit verbundene breite Anwendung  + grosse Erfahrung mit GEAK-Verfahren und weiteren Zertifizierungen  - nur begrenztes Wissen zur Thermografie  Kategorie: Öffentliche Hand; (Wirtschaft)	Sehr geeignet  Kombination aus Erfahrung im öffentlichen Bereich und der Wirtschaft, sowie Kenntnis von Verfahren wie GEAK und weiteren Zertifizierungen, ist sehr relevant für diese Arbeit. Das begrenzte Wissen zur Thermografie ist in diesem Kontext ausreichend.

Person	Beschreibung	Kriterium	Eignung
<p>Person 5</p> <p><b>Auswahl</b></p>	<p>...ist in leitender Funktion als Umweltingenieur/in in einer grossen Schweizer Stadt tätig und arbeitet dort in der Bauverwaltung im Bereich Energie und Technik. Zuvor wurde bereits bei einer der grössten Städte der Schweiz eine ähnliche Position ausgeübt. In der aktuellen Rolle wird ein Informationsportal entwickelt, das die Bevölkerung über den energetischen Zustand ihrer Immobilien informieren soll.</p>	<p>+ repräsentiert öffentliche Nutzung und damit verbundene breite Anwendung mit einem aktuell laufenden Projekt zu einem neuen Energieportal mit Interesse, Thermografie einzubinden.</p> <p>+ Erfahrung mit Gebäudeenergiezertifizierung</p> <p>- nur begrenztes Wissen zur Thermografie</p> <p>Kategorie: Öffentliche Hand</p>	<p>Sehr geeignet</p> <p>Spannende Sondierungsgespräche zu Potenzialen einer öffentlichen Nutzung grossflächiger Thermalaufnahmen. Bereits vorhandenes Wissen zur grossflächigen Gebäudezustandsanalyse mit verschiedenen Verfahren auf Stadtebene. Zudem hohes Potenzial für Thermografiedaten im geplanten Energieportal.</p>
<p>Person 6</p> <p><b>Auswahl</b></p>	<p>...ist Geschäftsführende/r eines Unternehmens, das Dienstleistungen zur Gebäudezustandserfassung und Bauphysik anbietet und GEAK-Zertifizierungen ausstellt. Langjährige und vertiefte Kenntnisse in der thermografischen Zustandanalyse von Gebäuden sind vorhanden.</p>	<p>+ langjähriges und sehr tiefes Wissen zum Thema der thermografischen Gebäudezustandsermittlung</p> <p>+ Hintergrund in der Bauphysik</p> <p>+ grosse Erfahrung mit dem GEAK-Verfahren und weiteren Zertifizierungen</p> <p>Kategorie: Wirtschaft</p>	<p>Sehr geeignet</p> <p>Für die Fragestellungen dieser Arbeit relevanter Hintergrund in der Bauphysik und umfassende praktische Erfahrung bei Gebäudezustandserfassungen, insbesondere mit thermografischen Verfahren.</p>
<p>Person 7</p> <p><b>Auswahl</b></p>	<p>...ist in leitender Funktion bei einem Kanton in der Schweiz tätig und für die Publikation und Bereitstellung von Geoinformationen sowie flächendeckenden Energieinformationen zuständig.</p>	<p>+ repräsentiert öffentliche Nutzung und damit verbundene breite Anwendung</p> <p>+ langjährige Erfahrung bei der Bereitstellung grosser Datensätze zur öffentlichen Nutzung</p> <p>Kategorie: Öffentliche Hand</p>	<p>Sehr geeignet</p> <p>Wichtige Schnittstelle zur grossflächigen Nutzung thermischer Daten im öffentlichen Sektor. Durch die leitende Position sind Einblicke in zukünftige Entwicklungen und Anwendungsfelder möglich.</p>
<p>Person 8</p>	<p>...ist zuständig für die Betreuung von Schweizer Gemeinden bei der Umsetzung von Energiestrategien, wobei Kommunikation mit verschiedenen Anspruchsgruppen und Wissenstransfer im Vordergrund stehen.</p>	<p>+ grosse Erfahrung bei der Umsetzung von Informationsstrategien im öffentlichen Bereich</p> <p>- nur begrenztes Wissen zur Thermografie</p> <p>Kategorie: Wirtschaft</p>	<p>Geeignet</p> <p>Interessanter Hintergrund für die Nutzung von Gebäudezustandsdaten auf Gemeindeebene. Im Vergleich zu Person 6 jedoch weniger Erfahrung im Bereich Thermografie.</p>

**Tabelle 6:** Auflistung der Personenauswahl und ihre Eignung (eigene Darstellung)

Die gezielte Auswahl dieser Expert/innen stellt sicher, dass sowohl praktische Erfahrungen als auch wissenschaftliche Erkenntnisse in die Untersuchung einfließen. Die unterschiedlichen Perspektiven tragen dazu bei, ein umfassendes Bild der aktuellen Möglichkeiten und Herausforderungen im Bereich der Gebäudezustandserfassung zu zeichnen.

### 3.1.3 Informationsanforderungen

Eines der Ziele dieser Arbeit ist es, zu klären, welche Anforderungen an Informationen gestellt werden, die aus thermografischen Aufnahmen zum Gebäudezustand gewonnen werden können. Eine präzise Definition solcher Informationsanforderungen ist entscheidend, um die Bedürfnisse verschiedener Anspruchsgruppen strukturiert darzulegen (Krcmar, 2015). Diese Anforderungen können sowohl klar definierbare quantitative Kriterien als auch qualitative Aspekte umfassen, die eher in Form eines Spektrums betrachtet werden.

Aus ersten Sondierungsgesprächen in Vorbereitung der Expert/innen-Gespräche sowie aus der vorangegangenen Literaturrecherche ergab sich, dass neben den durch Normen wie SIA 180.223 (2024) definierten Vorgaben vor allem qualitative Anforderungen im Vordergrund stehen. Bereits die in Kapitel 3.1.1 zusammengefassten Normen verdeutlichen, dass die Definition und Umsetzung von Genauigkeitsansprüchen an thermografische Daten aufgrund zahlreicher Einflussfaktoren eine komplexe Aufgabe darstellt. Dieses Ergebnis ist insbesondere deshalb bedeutend, weil sich diese Arbeit im Kontext des Virtual Design and Construction (VDC)-Frameworks bewegt, bei dem neben technischen Faktoren vor allem der menschliche Aspekt eine zentrale Rolle einnimmt.

Auf Basis dieser Erkenntnis wurde nach einem geeigneten Rahmenwerk gesucht, das sich nicht nur auf quantitative Kriterien stützt, sondern ebenfalls Informationsanforderungen in den Mittelpunkt rückt, die aufzeigen, wie Informationen aus luftgestützten, niedrig aufgelösten thermischen Schrägsichtaufnahmen von Fassaden für Endnutzende verständlich und in der Praxis anwendbar gestaltet werden können.

Die Wahl fiel dabei auf das von Wang und Strong (1996) entwickelte Rahmenwerk „Beyond Accuracy: What Data Quality Means to Data Consumers“. Dieses hebt hervor, dass Datenqualität mehr umfasst als technische Genauigkeit und setzt sich mit den vielfältigen Bedürfnissen der Datennutzenden auseinander. Die Autor/innen betonen, dass die Optimierung von Datenqualität in vielen Fällen übermässig stark auf Genauigkeit fokussiert, obwohl die Anforderungen von Datenverbraucher/innen weit reichender sind.

Im Rahmen einer empirischen Untersuchung entwickelten Wang und Strong ein hierarchisches Modell, das vier Hauptdimensionen der Datenqualität unterscheidet. Diese Hauptdimensionen wurden vom Autor dieser Arbeit aus dem Englischen übersetzt und in der folgenden Tabelle 7 beschrieben.

Dimensions-Name	Beschreibung
Intrinsische Datenqualität	Bezieht sich auf die inhärente Qualität der Daten, einschliesslich Genauigkeit, Objektivität, Glaubwürdigkeit und Reputation.
Kontextuelle Datenqualität	Betont die Relevanz und Angemessenheit der Daten für spezifische Aufgaben, einschliesslich Faktoren wie Aktualität, Vollständigkeit und Mehrwert.
Repräsentationsqualität der Daten	Betrifft die Klarheit, Konsistenz und Verständlichkeit der Datenpräsentation.
Zugänglichkeitsdatenqualität	Adressiert die Verfügbarkeit und Sicherheit der Daten sowie die Benutzerfreundlichkeit beim Zugriff.

**Tabelle 7:** Auflistung der Hauptdimensionen der Datenqualität (eigene Darstellung in Anlehnung an (Wang & Strong, 1996))

Innerhalb dieser Hauptdimensionen identifizierten Wang und Strong verschiedene Datenqualitäten, die in Tabelle 6 zusammengefasst sind:

Data Quality			
Intrinsic Data Quality	Contextual Data Quality	Representational Data Quality	Accessibility Data Quality
Believability Accuracy Objectivity Reputation	Value-added Relevancy Timeliness Completeness Appropriate amount of data	Interpretability Ease of understanding Representational consistency Concise representation	Accessibility Access security

**Tabelle 8:** Auflistung der Datenqualität (eigene Darstellung in Anlehnung an (Wang & Strong, 1996))

Dieses Rahmenwerk zeigt, dass hohe Datenqualität nicht nur technisch definiert wird, sondern auch vom Anwendungskontext und der Wahrnehmung der Nutzenden abhängt. Um festzustellen, welche Anforderungen die Gesprächspartner/innen an die Informationen aus thermischen Schrägaufnahmen von Fassaden stellen, wurde zusätzlich die Interpretation von Krcmar (2015) aus dessen Buch „Informationsmanagement“ herangezogen. Krcmar liefert praxisnahe Erläuterungen zu den von Wang und Strong definierten Dimensionen, was eine direkte Übertragung in die Expert/innen-Gespräche erleichtert.

Für eine noch genauere Einschätzung der Relevanz jeder einzelnen Dimension im Rahmen dieser Masterarbeit erstellte der Verfasser ausserdem eine eigene Interpretation, die sich auf das Thema luftgestützte, niedrig aufgelöste thermische Schrägsichtaufnahmen von Fassaden bezieht. Diese Interpretation zeigt, wie die jeweiligen Datenqualitätsdimensionen in einer möglichen praktischen Umsetzung Anwendung finden könnten (siehe ).

Durch dieses methodische Vorgehen wird sichergestellt, dass die in den Expert/innen-Gesprächen ermittelten Informationsanforderungen sowohl umfassend als auch praxisnah erfasst werden. Auf diese Weise können die bereitgestellten Informationen den Bedürfnissen der Endnutzenden gerecht werden und in die Anwendungskonzepte für die jeweiligen Nutzergruppen einfließen.

### 3.1.4 Thermografieaufnahmen

Um die drei Teilfragestellungen dieser Arbeit zu beantworten, bildete die Betrachtung und Diskussion realer, luftgestützter thermografischer Aufnahmen einen wesentlichen Fokus der Expert/innen-Gespräche. Einerseits sollte überprüft werden, wie sich die Bildauflösung auf die Qualität und den Umfang der Informationen auswirkt, die aus diesen Aufnahmen herausgelesen werden können. Diese Fragestellung ist von Bedeutung, weil das für diese Arbeit relevante Projekt «ThermoPlaner3D» Aufnahmen aus Flugzeugbefliegungen nutzt, bei denen die Kombination aus vorhandener Kameratechnik und grosser Flughöhe zu einer im Vergleich zu bodengestützten Aufnahmen niedrigeren Auflösung führt.

Andererseits dienten die Aufnahmen als Grundlage, um gemeinsam mit den Expert/innen zu erörtern, wie etablierte Techniken aus der Gebäudezustandserfassung mit luftgestützten Schrägbildaufnahmen von Fassaden kombiniert oder ergänzt werden können. Anhand der Bilder liessen sich mögliche Problematiken wie Anomalien oder Messfehler konkret aufzeigen, um anschliessend zu diskutieren, wie sich diese korrigieren oder vermeiden lassen.

Weiter wurde im Rahmen der gemeinsamen Betrachtung der Aufnahmen erörtert, inwiefern sich Schrägbildaufnahmen oder daraus resultierende dreidimensionale photogrammetrische Modelle auf die grossflächige Ermittlung des Fassadenzustands auswirken und welche neuen Anwendungsmöglichkeiten sich zukünftig ergeben könnten. Das Vorhandensein von visuellem Material förderte dabei eine vertiefte Diskussion der Thematik und trug wesentlich zu einer anschaulichen Gesprächsführung bei.

#### Vorbereitung der Datensätze

Für die Expert/innen-Gespräche wurden mehrere Datensätze mit Thermografieaufnahmen zusammengestellt. Da sich das Projekt «ThermoPlaner3D» zum Zeitpunkt dieser Arbeit noch in der Entwicklung befand, stand kein kompletter Datensatz mit nativ niedriger Auflösung aus Flugzeugbefliegungen zur Verfügung. Stattdessen griff man auf vergleichbare Drohnenaufnahmen mit Thermalkameras zurück, die vom Institut für Gebäudetechnik und Energie (IGE) an der Hochschule Luzern stammen, wo auch der Autor dieser Arbeit tätig ist.

Diese Datensätze umfassen zum einen Bilder in einer nativen Auflösung von etwa 7 cm pro Pixel sowie in einer heruntergerechneten Auflösung von ca. 25 cm pro Pixel, entsprechend der im Projekt «ThermoPlaner3D» maximal erwarteten Bildauflösung. Zum Vergleich mit ähnlichen Projekten, etwa jenem von Rüdisser et al. (2021), wurden die Aufnahmen zusätzlich auf 50 cm pro Pixel reduziert, was den derzeitigen, technischen Möglichkeiten von flugzeuggestützter

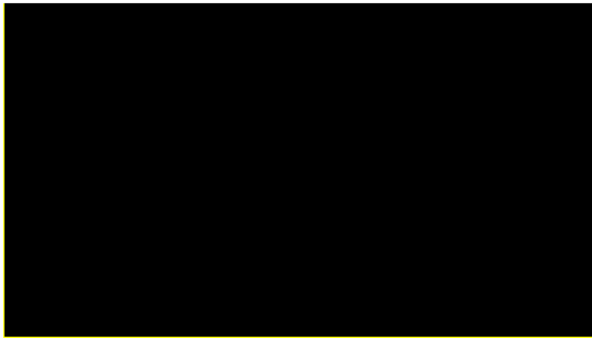
Thermalkameratechnik entspricht. Als vierte Variante wurden die Bilder mit 50 cm pro Pixel weiter verändert, um das Erscheinungsbild typischer Aufnahmen aus einer höheren Flughöhe zu simulieren. Aufgrund der grösseren Distanz zum Objekt und physikalischer Einflüsse während der Aufzeichnung wirken solche Aufnahmen üblicherweise weniger klar und kontrastreich.

Ergänzend wurden Aufnahmen aus einem photogrammetrisch errechneten 3D-Modell in den gleichen vier Auflösungen bereitgestellt, um zu prüfen, wie sich die Erstellung eines photogrammetrischen Modells auf das Ergebnis auswirkt. Allerdings konnte der sich kumulierende Effekt einer möglicherweise geringen Auflösung bei der Photogrammetrie nur eingeschränkt simuliert werden. Die daraus entstehenden Einschränkungen werden in Kapitel 5 näher erläutert. Für die in dieser Arbeit vorgesehenen visuellen Analyseschritte und als Grundlage für die Expert/innen-Gespräche reichte die erzeugte Bildqualität jedoch aus.

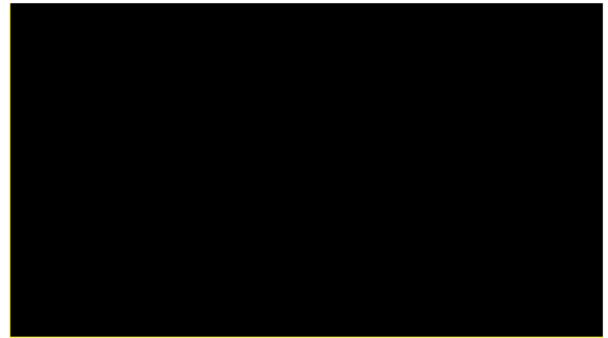
### Eigenschaften der Aufnahmen

Alle Bilder wurden in der Nacht sowie während der Heizperiode aufgenommen und zeigen ein Backsteingebäude mit Produktions- und Büroräumen. Auf dem Metaldach befinden sich verschiedene gebäudetechnische Installationen. Damit die Expert/innen die Thermografieaufnahmen möglichst unverfälscht beurteilen konnten, wurden die ursprünglichen Aufnahmen ohne Korrekturen hinsichtlich der vorherrschenden Umwelteinflüsse belassen.

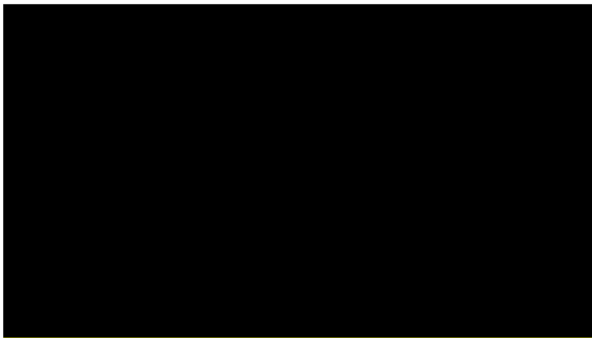
Im Folgenden sind exemplarisch acht Aufnahmen dargestellt. In Anhang J bis Anhang Q können die Bilder in voller Grösse betrachtet werden.



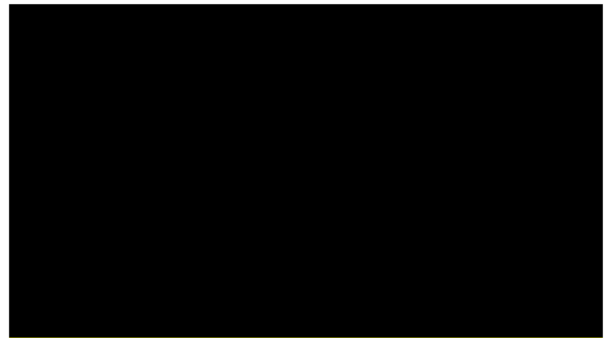
**Abb. 6:** Nächtlche, unkorrigierte Aufnahme mit nativer Bodenauflösung von ca. 7 cm/Pixel (HSLU, 2024)



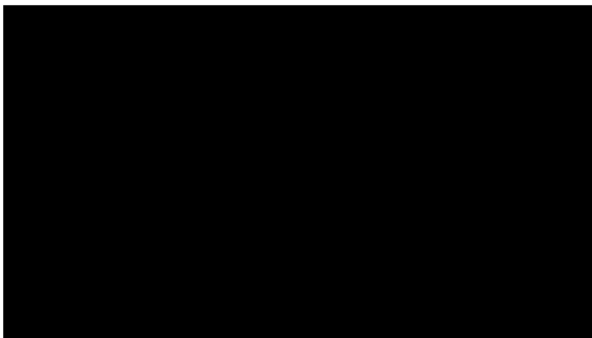
**Abb. 7:** Photogrammetrisches thermales 3D-Modell mit einer Bodenauflösung von ca.7 cm/Pixel (HSLU, 2024)



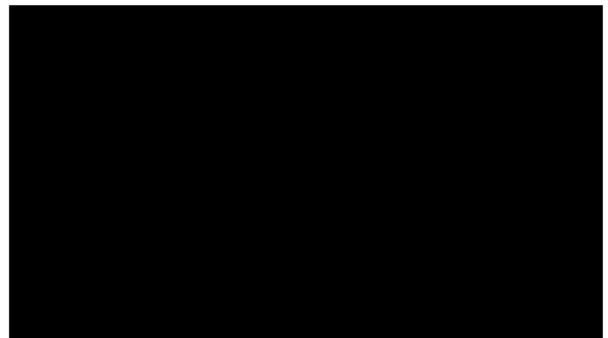
**Abb. 8:** Nächtlche, unkorrigierte Aufnahme mit einer Bodenauflösung von ca. 25 cm/Pixel, wie sie im Projekt «ThermoPlaner3D» (2023) erwartet wird (HSLU, 2024)



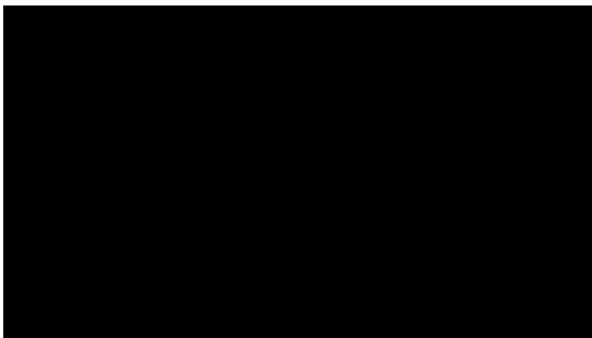
**Abb. 9:** Photogrammetrisches thermales 3D-Modell mit einer Bodenauflösung von ca. 25 cm/Pixel, wie sie im Projekt «ThermoPlaner3D» (2023) erwartet wird (HSLU, 2024)



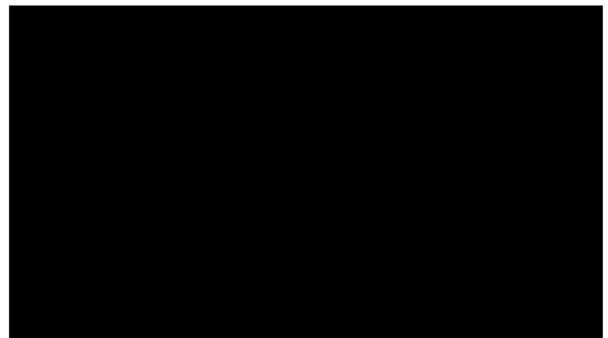
**Abb. 10:** Nächtlche, unkorrigierte Aufnahme von ca. 50cm/Pixel wie sie im Projekt von Rüdissler et al. (2021) verwendet wird (HSLU, 2024)



**Abb. 11:** Photogrammetrisches thermales 3D-Modell mit einer Bodenauflösung von ca. 50cm/Pixel wie sie im Projekt von Rüdissler et al. (2021) verwendet wird (HSLU, 2024)



**Abb. 12:** Nächtlche, unkorrigierte Aufnahme von ca. 50cm/Pixel aus grosser Höhe wie sie im Projekt von Rüdissler et al. (2021) verwendet wird (HSLU, 2024)



**Abb. 13:** Photogrammetrisches thermales 3D-Modell mit einer Bodenauflösung von ca. 50cm/Pixel aus grosser Höhe wie sie im Projekt von Rüdissler et al. (2021) verwendet wird (HSLU, 2024)

### 3.1.5 Gesprächs-Leitfäden

Zur praktischen Durchführung der Expert/innen-Gespräche wurden für jedes der fünf Gespräche eigene Leitfäden erstellt. Diese Leitfäden waren auf den beruflichen Hintergrund, das Vorwissen und die fachlichen Schwerpunkte der jeweiligen Gesprächspartner/innen zugeschnitten. Da in dieser Arbeit eine möglichst breite Abdeckung verschiedener Bedürfnisse und Kenntnisse angestrebt wird – und nicht der direkte Vergleich zwischen einzelnen Personen – ermöglichte dieser individuelle Ansatz eine umfassende Berücksichtigung unterschiedlicher Perspektiven. Die Einschränkungen, die sich aus diesem Vorgehen ergeben, werden in Kapitel 6.3 genauer erläutert.

#### Entwicklung der Leitfäden anhand des SPSS-Prinzips

Bei der Erstellung der Leitfäden kam das aus der qualitativen Forschung bekannte SPSS-Prinzip zum Einsatz. Dieses Prinzip umfasst die vier Schritte Sammeln, Prüfen, Sortieren und Subsumieren, die in der folgenden Tabelle beschrieben sind:

Schritte	Beschreibung
<b>Sammeln</b>	Im ersten Schritt werden alle Fragen zusammengetragen, die sich auf das Forschungsthema beziehen. Die genaue Formulierung spielt hier noch eine untergeordnete Rolle; wichtiger ist, möglichst alle potenziell relevanten Fragen zu erfassen, um das Forschungsinteresse umfassend abzudecken.
<b>Prüfen</b>	Die zusammengestellte Frageliste wird anschliessend kritisch bewertet, wobei sowohl das Vorwissen der Forschenden als auch die Anforderungen eines offenen Forschungsansatzes berücksichtigt werden. Ziel ist es, die Liste zu verkürzen und auf jene Fragen zu reduzieren, die für das Forschungsanliegen wirklich zielführend sind (siehe ).
<b>Sortieren</b>	Die verbleibenden Fragen und Stichworte werden systematisch geordnet. Hierbei kann eine zeitliche Gliederung hilfreich sein, beispielsweise wenn es um narrative Elemente wie Handlungsabläufe geht. Ebenso lassen sich thematische Cluster bilden, in der Regel mit ein bis vier übergeordneten Themenbereichen (siehe ).
<b>Subsumieren</b>	Die verbleibenden Fragen und Stichworte werden systematisch geordnet. Hierbei kann eine zeitliche Gliederung hilfreich sein, beispielsweise wenn es um narrative Elemente wie Handlungsabläufe geht. Ebenso lassen sich thematische Cluster bilden, in der Regel mit ein bis vier übergeordneten Themenbereichen (siehe ).

Tabelle 9: Vorgehensweise nach dem SPSS-Prinzip (eigene Darstellung) (Helfferich, 2011)

#### Umsetzung

Basierend auf den Erkenntnissen der Literaturrecherche und ersten Sondierungsgesprächen wurden im ersten Schritt insgesamt 167 potenzielle Fragen gesammelt, darunter 40 Hauptfragen und 127 ergänzende Fragen (siehe ). Anschliessend folgte eine kritische Überprüfung und Reduktion dieses Katalogs auf 94 Fragen, die als besonders zielführend identifiziert wurden (siehe ).

Auf Grundlage dieser 94 Fragen entstand für jede Person ein eigener Gesprächsleitfaden, der auf deren spezifischen Hintergrund, Fachwissen und Perspektiven zugeschnitten wurde. Je nach Teilnehmer/in umfasste der Leitfaden 29 bis 44 Haupt- und Ergänzungsfragen. Dies ermöglichte eine fokussierte und zugleich strukturierte Gesprächsführung, sei es in virtuellen Treffen oder in persönlichen Gesprächen (siehe Anhang D bis Anhang H).

Ein Beispiel für einen solchen Leitfaden zeigt Abbildung 14. Vollständige Versionen sämtlicher Leitfäden sind in Anhang D bis Anhang H zu finden.

Auf Basis dieser Leitfäden wurden anschliessend die Gespräche mit den Expert/innen geführt, teilweise in physischer und teilweise in virtueller Form. Die Ergebnisse sind in Kapitel 3.2 dokumentiert.

Kategorie	Leitfrage / Erzählauforderung	Check - wurde das erwähnt? Memo für mögliche Nachfragen, nur stellen, wenn nicht von allein angesprochen	Aufrechterhaltungs- und Steuerungsfragen (für alle Themen)
Gebäudezustandsermittlung	Welche Methoden zur Ermittlung des Gebäudezustands werden derzeit als am effektivsten erachtet?	Welche Vor- und Nachteile haben diese Methoden?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Können Sie dazu noch etwas mehr erzählen?</li> <li>• Und dann? Wie ging das weiter?</li> <li>• Wie war das so mit...?</li> <li>• Weshalb ist das so?</li> <li>• Wie wichtig ist Ihnen das?</li> <li>• Was löst das in Ihnen aus?</li> <li>• Wie meinen Sie das genau?</li> <li>• Können Sie ein Beispiel dafür machen?</li> <li>• Wie könnte es besser sein? Was müsste geändert werden?</li> </ul>
	Welche spezifischen Herausforderungen bestehen bei der Kalibrierung und Interpretation der Daten?	Wie unterscheiden sich diese Methoden in ihrer Anwendung bei verschiedenen Gebäudetypen?	
	Wie wichtig sind hochauflösende Aufnahmen im Vergleich zu gering aufgelösten Aufnahmen für die Zustandsanalyse?	Wie beeinflusst die Auflösung der Aufnahmen die Zuverlässigkeit?	
		In welchen Situationen sind hochauflösende Aufnahmen unerlässlich?	
Thermografie-basierte Methoden	Welche Vorteile bieten thermografische Schrägbildaufnahmen gegenüber herkömmlichen NDIR-Bildern?	Welche zusätzlichen Informationen können durch Schrägbildaufnahmen gewonnen werden?	
	Wie beeinflusst der Aufnahmewinkel die Datenqualität?		
	Wie könnten bestehende Thermografie-Methoden an neue luftgestützte Systeme angepasst werden?	Inwiefern unterscheiden sich die thermischen Charakteristika von Fassaden und Dächern bei der Analyse?	
		Welche spezifischen Herausforderungen bestehen bei der Analyse von Fassaden?	
		Wie können diese Unterschiede bei der Dateninterpretation berücksichtigt werden?	
		Welche Normen und Standards existieren für die Analyse von Fassaden und Dächern?	
Datenanalyse	Wie werden die Daten aus thermischen Schrägbildaufnahmen hinsichtlich der Energieeffizienz eines Gebäudes interpretiert?	Welche spezifischen Kennzahlen und Indikatoren werden verwendet?	
	Welche Analysemethoden sind für die Bewertung thermischer Aufnahmen besonders geeignet?	Welche Softwarelösungen werden bevorzugt?	
Praxisrelevanz und Umsetzbarkeit	Welche praktischen Anwendungen gibt es für die Nutzung luftgestützter Thermografie-Aufnahmen in der Gebäudeanalyse?	Welche Anwendungsbeispiele haben sich als besonders erfolgreich erwiesen?	
		Welche neuen Anwendungen sind in der Entwicklung?	
	In welchen Bereichen wird der grösste Nutzen von thermografischen Schrägbildaufnahmen gesehen?	Welche spezifischen Anwendungsfälle haben das grösste Potenzial?	
	Wie kann der Nutzen dieser Aufnahmen maximiert werden?		

Abb. 14: Leitfaden Person 3 (siehe Anhang D)

## 3.2 Ergebnisse Expert/innen-Gespräche

Dieses Kapitel fasst die Ergebnisse und Erkenntnisse aus den geführten Expert/innen-Gesprächen zusammen und stellt sie in den Kontext der Fragestellungen dieser Masterarbeit. Dabei wurden Fachpersonen mit unterschiedlichen Hintergründen befragt, um ein möglichst breites Spektrum an Sichtweisen auf die luftgestützte, niedrig aufgelöste thermische Schrägbildaufnahme von Fassaden zu erhalten. Bereits während der Auswertung der Gespräche zeigte sich, dass die gesammelten Aussagen stark variierende Anforderungen und Nutzungsbedürfnisse erkennen lassen. Ziel war es, diese Vielfalt zu ordnen und die Informationen so aufzubereiten, dass sie für die späteren Anwendungskonzepte (Kapitel 5.1 und 5.2) nutzbar werden. Im Folgenden werden zentrale Aussagen der Expert/innen zu den Haupt- und Teilfragestellungen vorgestellt, bevor erläutert wird, wie sich die Anspruchsgruppen "Experten" und "Kommunen" gebildet haben. Anschliessend werden die beiden Gruppen näher beschrieben.

### 3.2.1 Relevante Aussagen der Expert/innen

Die Expert/innen-Gespräche lieferten wertvolle Einblicke, die in Bezug auf die Haupt- und Teilfragestellungen betrachtet werden können. Zu Beginn wurde die Frage untersucht, wo genau die Potenziale und Grenzen luftgestützter, niedrig aufgelöster thermischer Schrägbildaufnahmen von Fassaden liegen. Hier waren sich viele Gesprächspartner/innen einig, dass sich bereits mit relativ einfacher Technik und bei vergleichsweise moderatem Aufwand grosse Gebiete erfassen lassen. Gerade für eine erste Zustandsbeurteilung oder zur Identifikation grossflächiger energetischer Schwachstellen schätzten die Befragten die Methode als vielversprechend ein. Gleichzeitig verdeutlichten sie die Grenzen: Verschiedene Expert/innen betonten, dass die Auflösung häufig nicht ausreicht, um kleinräumige Details präzise zu erfassen. Sollen Bauteilübergänge oder filigrane Wärmebrücken erkannt werden, sind bodengestützte Aufnahmen, Drohnenflüge in geringer Höhe oder ergänzende Messverfahren erforderlich.

In Bezug auf die Teilfragestellung, welche Informationen für die Ermittlung des Gebäudezustands aus niedrig aufgelösten thermischen Schrägbildaufnahmen gewonnen werden können, hoben mehrere Personen hervor, dass sich zumindest grobe Trends und auffällige Wärmeverluste erkennen lassen. Dadurch entsteht ein erster Eindruck des energetischen Zustands der Gebäudehülle und eine Basis für Vergleiche zwischen verschiedenen Bauten. Genaue quantitative Aussagen, beispielsweise exakte U-Werte, sind jedoch nur bedingt ableitbar. Einige Fachleute, insbesondere Person 3 und Person 6, wiesen darauf hin, dass man zwar erste Analysen oder Vergleiche anstellen könne, jedoch ohne weitergehende Korrekturen oder zusätzliche Informationen keine verlässlichen zahlenbasierten Ergebnisse zu erwarten seien.

Die Frage, inwiefern klassische thermografiebasierte Methoden auf die untersuchten, luftgestützten Aufnahmen übertragbar sind, wurde in den Gesprächen vielseitig beantwortet. Generell bejahten alle Gesprächspartner/innen eine hohe Übertragbarkeit bewährter Analysemethoden, etwa beim Umgang mit Emissions- oder Reflexionswerten. Zu den grössten Herausforderungen zählten jedoch die Korrekturspiegelungen bei Metallfassaden und anderen stark reflektierenden

Flächen, was Person 3 und Person 6 speziell erwähnten. Auch Strategien zur Anomalieerkennung, wie Zeitreihenvergleiche, liessen sich prinzipiell anwenden, erfordern jedoch deutlich mehr und regelmässige Befliegungen. Andere Konzepte wie die Berücksichtigung von Mikroklima und Materialeigenschaften wurden von den Befragten ebenfalls angesprochen, wobei sich zeigte, dass gerade bei flugzeuggestützter Thermografie ein höherer Korrekturaufwand entsteht.

Bezüglich der Produkte, die sich für Planer/innen und andere potenzielle Nutzende eignen, machte vor allem die Unterscheidung zwischen anspruchsvollen fachlichen Expertentools und vereinfachten Portalen für eine breite Öffentlichkeit Sinn. Personen wie Person 4, die in der Stadtverwaltung tätig ist, betonten die Notwendigkeit leicht verständlicher, vergleichender Darstellungen, wohingegen Fachpersonen wie Person 6 eine möglichst genaue, dokumentierte Datenaufbereitung forderten, damit die Daten in tiefergehenden Analysen verwendet werden können. Dieser Aspekt leitete letztlich zur Bildung der zwei Hauptanspruchsgruppen.

### 3.2.2 Entstehung der zwei Nutzergruppen und deren Einteilung

Aus den Gesprächen ging hervor, dass sich die befragten Personen hinsichtlich ihrer Prioritäten und Anforderungen an die thermischen Daten deutlich voneinander unterscheiden. Um diesem Umstand gerecht zu werden, wurde eine Einteilung in zwei Hauptgruppen vorgenommen, die sich an den Datenqualitätsdimensionen nach Wang und Strong (1996) orientiert, ähnlich wie es Krcmar (2015) vorschlägt. Die Zuordnung erfolgte anhand einer systematischen Auswertung der Gesprächsprotokolle, bei der vor allem Aspekte wie Glaubwürdigkeit, Genauigkeit, Objektivität, Zugänglichkeit und Verständlichkeit analysiert wurden. Nach den Gesprächen zeigte sich, dass manche Interviewte eine tiefe technische Genauigkeit verlangten, während andere eher an einer leicht interpretierbaren, benutzerfreundlichen Darstellung interessiert waren.

Anspruchsgruppe "Experten"		Anspruchsgruppe "Kommunen"	
Person 3; (Person 4); Person 6		Person 4; Person 5; Person 7	
Intrinsische Datenqualität	Kontextuelle Datenqualität	Repräsentative Datenqualität	Zugängliche Datenqualität
Glaubwürdigkeit; Genauigkeit; Objektivität; Ruf	Wertschöpfung; Relevanz; Aktualität; Vollständigkeit; Angemessene Datenmenge	Interpretierbarkeit; Verständlichkeit; Konsistenz der Darstellung; Prägnante Darstellung	Zugänglichkeit; Zugriffssicherheit

Tabelle 10: Schwerpunkt der Informationsanforderungen nach Gruppen (eigene Darstellung)

Hätte man andere Gesprächspartner/innen oder eine andere Zusammensetzung gewählt, wären möglicherweise nur eine oder mehr als zwei Gruppen identifiziert worden. Die zwei beschriebenen Gruppen, hier als "Experten" und "Kommunen" benannt, ergaben sich jedoch als deutliche Cluster in den Anforderungsprofilen. Obgleich eine weitere Untergliederung denkbar wäre,

wurde für den Rahmen dieser Masterarbeit auf eine Feinabstufung verzichtet, um die nachfolgenden Konzepte übersichtlich halten und passgenau validieren zu können.

### 3.2.3 Anspruchsgruppe "Experten"

Die Gruppe "Experten" umfasst Fachleute wie Planer/innen, Ingenieur/innen, spezialisierte Techniker/innen sowie Personen aus dem Forschungsbereich, welche in den Gesprächen betonten, dass die intrinsische und kontextuelle Datenqualität im Vordergrund steht. Für diese Gruppe spielen Aspekte wie Glaubwürdigkeit, Genauigkeit und Objektivität eine zentrale Rolle. Da sie meist selbst fundierte Fachkenntnisse mitbringen, sind sie in der Lage, Daten eigenständig zu interpretieren und zu korrigieren, sofern genaue Dokumentationen über die Aufnahmeverfahren, Korrekturanpassungen und möglichen Abweichungen vorliegen. Person 3 und Person 6 unterstrichen beispielsweise, dass sie aktuell ihre eigenen Thermografieaufnahmen in aufwendigen Schritten kalibrieren und bearbeiten. Für sie wäre es ein erheblicher Gewinn, wenn ein automatisierter Workflow bereits grosse Teile der Korrektur übernehmen könnte.

Diese Anspruchsgruppe bewertet die begrenzte Auflösung von 25 bis 50 Zentimetern pro Pixel meist als ausreichend für eine grobe Erstbewertung, sieht jedoch klare Grenzen, sobald kleinere Bauteilübergänge oder feine Wärmebrücken untersucht werden sollen. Einige Fachpersonen verwiesen zudem auf das Problem spiegelnder Metallfassaden, das eine höhere Komplexität bei Korrekturverfahren bedingt. Dass die Daten in einer benutzerfreundlichen Weboberfläche aufbereitet werden, ist für diese Expertengruppe sekundär. Wichtig ist jedoch, dass sämtliche Korrekturparameter und Informationen über Ausrichtung und Mikroklima dokumentiert werden, damit sie die Daten in professionellen Auswertungs- und Simulationswerkzeugen weiterverwenden können.

### 3.2.4 Anspruchsgruppe "Kommunen"

Demgegenüber steht die Gruppe "Kommunen", zu der neben Behördenpersonal auch eine breitere Zielgruppe an Interessierten, Gebäudeeigentümern und Laien gehören kann. Für diese Gruppe sind Verständlichkeit, Interpretierbarkeit und einfache Zugänglichkeit im Vordergrund. Da hier zum Teil weniger technisches Vorwissen vorhanden ist, sollen die Daten so aufbereitet werden, dass eine rasche Orientierung zum energetischen Zustand von Gebäuden möglich ist. Das Prinzip besteht darin, mit geringen technischen Einstiegsbarrieren ein erstes energetisches Bild zu vermitteln, das zu sinnvollen Massnahmen motiviert und gleichzeitig Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Gebäuden oder Quartieren ermöglicht.

Person 4 und Person 5 beschrieben beispielsweise Kommunalprojekte, in denen Gebäudezustände auf einer interaktiven Plattform oder in Energieportalen visualisiert werden, um Eigentümer/innen zu motivieren und zu informieren. Die quantitative Genauigkeit tritt in diesem Kontext in den Hintergrund, da es primär auf eine leicht verständliche Darstellung ankommt. Allerdings betonten mehrere Befragte, dass die Ergebnisse keinesfalls verfälscht oder stark vereinfacht werden sollten. Fehlerfreiheit und eine zumindest gut kommunizierte Unsicherheit spielen auch für

die Gruppe "Kommunen" eine wichtige Rolle, jedoch liegt das Hauptaugenmerk auf der Frage, wie Menschen ohne tiefes technisches Wissen zum Thema Sanierungs- oder Fördermöglichkeiten sensibilisiert werden können.

### **3.3 Zusammenfassung Expert/innen-Gespräche**

Die Befragungen haben bestätigt, dass luftgestützte thermische Schrägbildaufnahmen von Fassaden ein beachtliches Potenzial für die Gebäudezustandserfassung bieten, jedoch je nach Nutzungsziel an unterschiedliche Grenzen stossen. Durch die Gesprächsanalysen konnte eine Zweiteilung in die Gruppen "Experten" und "Kommunen" herausgearbeitet werden, die sich vor allem in den Forderungen nach Datenqualität, Korrekturprozessen, Objektivität und Präsentation unterscheiden. Während "Experten" auf Transparenz, Nachvollziehbarkeit und genaue Korrekturmöglichkeiten setzen, um die Daten in spezialisierte Verfahren zu integrieren, steht für "Kommunen" die einfache Interpretation, Zugänglichkeit und praxisnahe Anwendbarkeit im Vordergrund. Beide Gruppen schätzen allerdings die Möglichkeit, grossflächige Informationen zum energetischen Zustand von Gebäuden zu erhalten, um daraus priorisierte Handlungsfelder abzuleiten. Die hier gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage für die in den anschliessenden Kapiteln entwickelten Anwendungskonzepte, die jeweils auf die Bedürfnisse der beiden Anspruchsgruppen zugeschnitten sind.

## 4 Methodik

### 4.1 Entwicklung der Anwendungskonzepte

Mit der Entwicklung der Anwendungskonzepte werden Antworten auf die zweite und dritte Teilfragestellung dieser Masterarbeit erarbeitet.

Die zweite Teilfragestellung bezieht sich darauf, welche Elemente der bereits existierenden Methoden, mit denen die Beurteilung von Fassaden bezüglich ihrer Energieeffizienz möglich ist, auf die innovativen Fassaden-Schrägbildaufnahmen, welche in dieser Arbeit untersucht wurden, übertragen werden können.

Die dritte Teilfrage beschäftigt sich im ersten Teil damit, mit welchen Produkten die Informationen aus den in dieser Arbeit untersuchten, luftgestützten, gering aufgelösten, thermischen Fassaden-Schrägbildaufnahmen Planern und anderen relevanten Nutzern optimal zugänglich bereitgestellt werden können.

Der zweite Teil der dritten Teilfragestellung, wie die Umsetzung in ein konkretes Produkt aussehen könnte, wurde im Rahmen der Entwicklung der Anwendungskonzepte angedacht und dann in einem Proof of Concept (PoC) in Kapitel 5.4 konkretisiert.

Für die Entwicklung der Anwendungskonzepte wurden die theoretischen Erkenntnisse der Literaturrecherche aus Kapitel 2 mit den praxisbezogenen Ergebnissen der Expertinnen-Gespräche aus Kapitel 3 kombiniert. Dabei flossen sowohl die identifizierten Anforderungen der beiden Hauptanspruchsgruppen als auch die technologischen Möglichkeiten ein und bildeten die Grundlage für die Ausarbeitung mehrerer Anwendungskonzepte auf der Basis eines gemeinsamen Grundkonzepts.

Die Anwendungskonzepte zielten darauf ab, den unterschiedlichen Bedürfnissen der beiden Hauptanspruchsgruppen "Experten" und "Kommunen" gerecht zu werden. Wie in Kapitel 3 genauer beschrieben, lassen sich die an den Gesprächen beteiligten Personen aufgrund ihrer Anforderungen, welche sie an die Daten stellen, in zwei Gruppen aufteilen.

Anspruchsgruppe "Experten" fokussierte auf hohe Datenqualität und genaue Korrekturprozesse. Für sie war es essenziell zu wissen, wie die Daten korrigiert wurden, um daraus ableiten zu können, wie sie die Daten weiterverwenden können. Durch die Nachvollziehbarkeit der Datenerhebung, Analyse und Aufbereitung mit innovativen, aber auch klassischen Methoden sollte das nötige Vertrauen in die Korrektheit und Aussagekraft der Daten geschaffen werden.

Die Anspruchsgruppe "Kommunen" legte Wert auf Zugänglichkeit und einfache Interpretierbarkeit der Daten. Für sie war es wichtig, einen einfachen Zugang zu den Informationen aus der energetischen Gebäudeanalyse zu erhalten und diese leicht interpretieren zu können.

In einem ersten Schritt wurde ein Anwendungskonzept nach den Bedürfnissen der Experten erstellt, da in diesem Zusammenhang die zweite Teilfragestellung ebenfalls beantwortet werden

konnte. Das Anwendungskonzept sollte aufzeigen, wie das neue Medium der luftgestützten, gering aufgelösten, thermischen Fassaden-Schrägbildaufnahmen mit den klassischen Methoden einer Gebäudezustandsbewertung untermauert werden kann. Dafür wurde ein Prozessprotokoll erstellt, das verständlich aufzeigt, wie der Weg von der Erfassung der Daten über deren Korrektur bis zur Aufbereitung für die Anwendung aussehen könnte. Wichtig war bei diesem Prozess, dass die Gesprächspartnerinnen kontinuierlich eingebunden waren. Auf diese Weise sollten die unterschiedlichen Informationsanforderungen der Planer und anderer relevanter Nutzer erfüllt und der Praxisbezug gewährleistet werden.

In einem zweiten Schritt wurde anschliessend aus diesem umfangreichen Anwendungskonzept für die Gruppe der Experten ein einfacheres Anwendungskonzept für die Anspruchsgruppe der «Kommunen» entwickelt. Dieses umfasst weniger Korrekturschritte und erfordert eine weniger hohe Qualität der Daten, da hier vor allem Anforderungen wie Interpretierbarkeit, prägnante Darstellung und Zugänglichkeit im Vordergrund standen.

### Iterativer Prozess

Die Entwicklung der Anwendungskonzepte erfolgte in einem iterativen Prozess, welcher sich stark an den Prinzipien des Design Thinking nach Lewrick et al. (2018) orientiert. Dieser Ansatz wurde gewählt, da, wie bereits bei der Definition der Informationsanforderungen nach Wang und Strong (1996), Lösungen im Vordergrund stehen sollten, bei denen die Bedürfnisse der Nutzerinnen an erster Stelle stehen. Hier bieten die Prinzipien des Design Thinking mit ihrer Nutzerzentrierung detaillierte Ansätze, wie ein solcher Prozess aussehen kann. Statt lediglich technische Machbarkeit oder wirtschaftliche Aspekte zu beachten, legt Design Thinking den Fokus auf den Menschen als Anwender des neuen Produkts oder der neuen Technologie. Entsprechend wurde das Anwendungskonzept nicht linear entwickelt, sondern zyklisch immer wieder im Austausch mit den Anspruchsgruppen bewertet, nachjustiert und verbessert. Durch das Einbinden echter Nutzer\*innen in allen Prozessschritten entstanden Lösungen, die nicht nur innovativ, sondern tatsächlich nutzbar und wünschenswert waren. Damit die Nutzer leicht beurteilen konnten, ob die erarbeiteten Lösungen ihren Anforderungen entsprachen, wurde besonders darauf geachtet, die Ergebnisse fortlaufend zu visualisieren, so dass eine gute Veranschaulichung erreicht werden konnte.

Ein weiteres Prinzip des Design Thinking ist die interdisziplinäre Zusammenarbeit, bei der viel Wert darauf gelegt wird, ein umfassendes Verständnis der Rahmenbedingungen, der Zielgruppe und des Kontextes, in dem ein Produkt oder eine Dienstleistung genutzt wird, zu erhalten. Bei den Expertengesprächen wurde bereits interdisziplinär gearbeitet, indem Personen aus den verschiedensten Bereichen der Gebäudezustandserfassung befragt wurden. Zusammen mit den Literaturrecherchen entstand eine breite Basis an Grundwissen, auf der die Anwendungskonzepte aufgebaut werden konnten. So konnte ein ganzheitliches Verständnis der Ausgangslage und der damit verbundenen Herausforderungen beim Einsatz von luftgestützten, gering aufgelösten thermischen Fassaden-Schrägbildaufnahmen erzielt werden.

Im Folgenden sind die einzelnen Schritte des iterativen und explorativen Vorgehens in Anlehnung an Lewrick et al. (2018) als Grafik visualisiert. Das stetige Testen und Überarbeiten verringert das Risiko, erst spät im Entwicklungsprozess beurteilen zu können, wie eine Idee funktioniert (Brown, 2009).

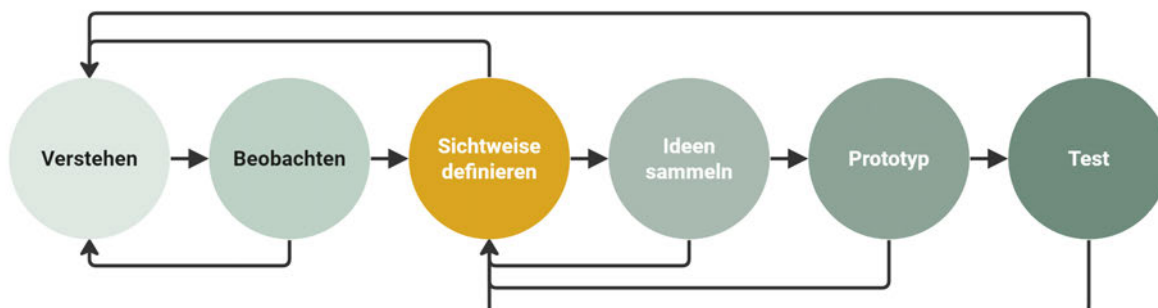


Abb. 15: Macro Circle – iterativer Prozess gemäss Lewrick et al. (eigene Darstellung in Anlehnung an (Lewrick et al., 2018))

## 4.2 Entwicklung des Konzeptnachweises

Die Entwicklung des Konzeptnachweises (Proof of Concept, PoC) knüpfte an die bereits vorgestellten Anwendungskonzepte an und verfolgte einen ähnlich iterativen Ansatz wie zuvor bei der Erarbeitung der Lösungen für die Anspruchsgruppen. Ausgangspunkt war die dritte Teilfrage dieser Masterarbeit, die unter anderem nach einer konkreten Produktumsetzung fragte. Um dies zu beantworten, wurden die Erkenntnisse der Literaturrecherche (Kapitel 2) und die Ergebnisse der Expert/innen-Gespräche (Kapitel 3) genutzt, um schrittweise ein Prototyp-Konzept zu erstellen.

Im Gegensatz zur umfassenderen Ausarbeitung der Anwendungskonzepte für "Experten" und "Kommunen" fiel der Prozess für den Konzeptnachweis bewusst schlanker aus. Er konzentrierte sich darauf, eine exemplarische Lösung für die Gruppe "Kommunen" auszuarbeiten und diese in einem realitätsnahen Prototyp zu veranschaulichen. Zunächst wurden auf Basis der Anforderungen von Person 5, der bereits erwähnten Fachperson in der Stadtverwaltung, wichtige Kriterien wie Benutzerfreundlichkeit, Integration in bestehende städtische Portale und Erweiterbarkeit definiert. Anschliessend erfolgte eine technische und gestalterische Umsetzung in Form einer Webanwendung, die mithilfe von Low-Code-Werkzeugen (Microsoft Power Apps) realisiert wurde. Während der Entwicklung wurden fortlaufend Zwischenschritte mit den beteiligten Gesprächspartner/innen abgestimmt, um sicherzustellen, dass das Konzept sowohl praxisnah als auch anpassungsfähig blieb. Dabei griff das Team auf das in Kapitel 4.1 beschriebene Vorgehen zurück, das neben technischen Aspekten auch nutzerzentrierte Prinzipien aufnahm. Die iterative Validierung mit Person 5 diente als Schlüssel für die zielgerichtete Weiterentwicklung der Funktionen, um die Einbindung thermischer Daten in eine kommunale Plattform zu demonstrieren. So entstand ein konzentrierter, aber aussagekräftiger Nachweis, wie die zuvor konzipierten Ideen zur Integration luftgestützter Schrägbildaufnahmen tatsächlich in einem konkreten Produktumfeld genutzt werden könnten.

## 5 Ergebnisse

In den folgenden Kapiteln 5.1 und 5.2 werden und die Anwendungskonzepte sowohl für die Anspruchsgruppe der «Experten» wie auch für die «Kommunen» detailliert beschrieben.

### 5.1 Anwendungskonzept für Anspruchsgruppe "Experten"

Die Gruppe der Expertinnen und Experten legte grossen Wert auf eine hohe Datenqualität sowie genaue Korrekturprozesse. Für sie war es entscheidend zu wissen, auf welche Weise die Daten korrigiert wurden, um die Ergebnisse später entsprechend nutzen zu können. Durch die sorgfältige Dokumentation von Datenerhebung, Analyse und Aufbereitung mit innovativen und klassischen Methoden sollte das nötige Vertrauen in Aussagekraft und Korrektheit geschaffen werden.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurde gemeinsam mit den Gesprächspartner/innen versucht, alle relevanten Methoden und Korrekturmöglichkeiten aus der traditionellen, bodengestützten Thermografie in einen automatisierten Workflow zu übertragen. Bisher werden solche Korrekturen überwiegend durch Vor-Ort-Beurteilungen der Thermografieexpert/innen und deren Erfahrung gesteuert. Das Ziel ist, die Verlässlichkeit luftgestützter Thermografieergebnisse so weit zu verbessern, dass sie auch in qualitativen und gegebenenfalls quantitativen Verfahren der Gebäudezustandserfassung eingesetzt werden können. Die dazu verwendeten Technologien beruhen auf den in der Literaturrecherche identifizierten und für dieses Konzept angepassten Methoden. Zudem haben Bleisch (2023) und Rüdisser et al. (2021) in laufenden Projekten bereits Teilschritte dieses Ansatzes beschrieben, die ebenfalls Teil unseres Konzepts sind.

Der daraus entstandene Prozess ist in Abbildung 16 als Flussdiagramm dargestellt und im Anhang W in voller Grösse zu finden. Im weiteren Verlauf wird der Ablauf von Datenaufnahme und -verarbeitung chronologisch beschrieben und begründet. Es empfiehlt sich, zur Veranschaulichung der Abhängigkeiten der einzelnen Komponenten den Anhang W heranzuziehen.

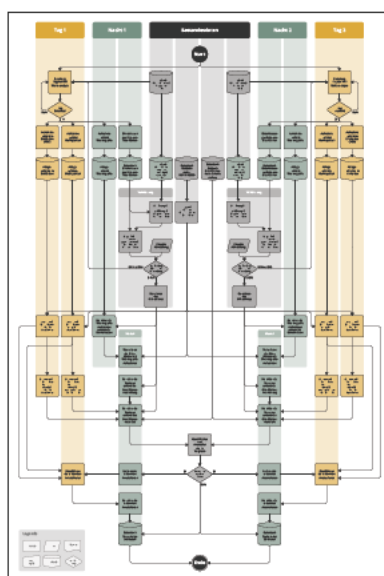


Abb. 16: Flussdiagramm für die Anspruchsgruppe "Experten" (siehe Anhang J)

### Ausgangslage

Vor Beginn des Aufnahme- und Korrekturprozesses müssen bestimmte Grundlagendaten vorliegen. Ihre Bedeutung im Aufnahme- und Korrekturprozess wird in den nächsten Schritten genauer beschrieben. Dazu zählt eine Datenbank mit aktuellen Wetterdaten. In dem hier vorgestellten Konzept wird zudem auf das dreidimensionale Stadtmodell swissBUILDINGS3D 3.0 des Schweizer Bundesamts für Landestopografie (swisstopo, 2024) zurückgegriffen, das detaillierte dreidimensionale Darstellungen der Gebäude in verschiedenen Städten und Gemeinden der Schweiz enthält. Ein zentraler Vorteil dieses Modells ist seine präzise Erfassung von Fassaden und Gebäudestrukturen, die in den weiteren Schritten entscheidend sind.

Zusätzlich kann eine Datenbank eingebunden werden, die Informationen über bekannte Oberflächenmaterialien in einer Gemeinde enthält, zum Beispiel Materialangaben zu kommunalen Gebäuden oder Daten aus künftigen Bauvorhaben. Diese Grundlagendaten bilden die Basis für die folgenden Arbeitsschritte.

### Tag 1: Vorbereitung und Aufnahme von Echtfarben- und Multispektraldaten

Zunächst wird, ähnlich wie bei der Erstellung bodengestützter Aufnahmen, anhand der Wettervorhersage geprüft, ob die geplante Befliegung und Aufnahme der Thermografiebilder an diesem Tag und in der folgenden Nacht sinnvoll ist (Person 6, 2024). Die in der Norm SIA 180.223 (2024) genannten idealen Wetterbedingungen für thermografische Aufnahmen können dabei als Grundlage dienen. Zum Beispiel sollte in der Nacht der Messung ein ausreichender Temperaturunterschied zwischen den beheizten Innenräumen und der Aussenumgebung bestehen. Gleichzeitig sollte die Sonneneinstrahlung tagsüber möglichst gering sein, um unerwünschte Aufheizungseffekte auf den Fassaden zu vermeiden. Sind die Bedingungen günstig, kann die erste Befliegung tagsüber erfolgen. Dabei werden Aufnahmen im

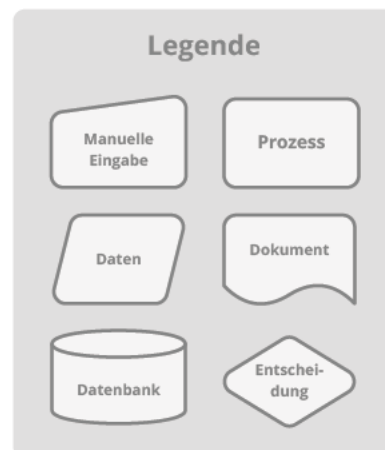


Abb. 17: Legende des Flussdiagramm (siehe Anhang J)

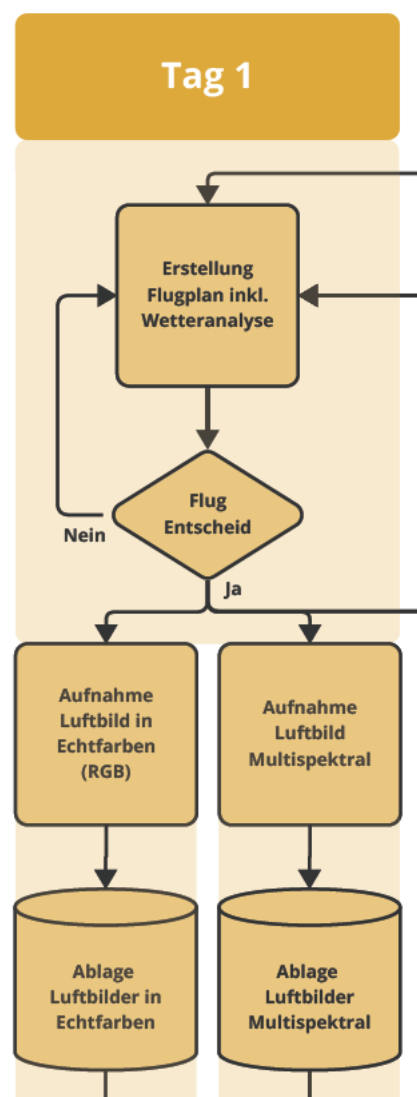


Abb. 18: Ausschnitt Tag 1 aus Flussdiagramm für die Anspruchsgruppe "Experten" (siehe Anhang J)

sichtbaren Lichtspektrum und, wie von Rüdissler et al. (2021) beschrieben, in mehreren anderen Spektralbereichen erstellt. Die so gewonnenen Multispektraldaten werden in den folgenden Schritten weiter genutzt. Dieser Schritt entspricht der Erfassung von Oberflächenmaterialien durch geschulte Techniker/innen bei einer klassischen thermografischen Zustandsanalyse.

Im Anschluss wird die von Rüdissler et al. (2021) entwickelte Methode angewendet, um das swissBUILDINGS3D-Modell mithilfe der Echtfarben- und Multispektralaufnahmen zu texturieren. Dazu wird aus den Aufnahmen ein photogrammetrisches Punktwolkenmodell berechnet. Rüdissler et al. schlagen vor, die einzelnen Punkte der Punktwolke mit einem Algorithmus auf das Mesh des swissBUILDINGS3D-Modells zu projizieren, sodass jede Fassadenfläche eine eigene Textur erhält.

Im nächsten Schritt kann anhand der Echtfarben- und Multispektraltexturen das Material jeder Fassadenfläche bestimmt werden. Auch hierfür liefern Rüdissler et al. Lösungsansätze. Es sei erwähnt, dass für diesen Schritt auch andere Verfahren infrage kämen, da verschiedene Photogrammetrie-Softwares heute die Möglichkeit bieten, Texturen auf andere Modelle zu übertragen. Für die vorliegende Untersuchung wurde das Verfahren von Rüdissler et al. gewählt, da es bereits in der Anwendung mit thermografischen Daten erprobt wurde.

Ziel dieses Zuordnungsprozesses von Texturen zu den Fassadenflächen ist es, nach dem von Waqas und Araj (2024) aufgezeigten Ansatz Anomalien wie warme Kamine oder offene Fenster, durch die Wärme ausströmt, zu korrigieren. Andernfalls könnten Fehlinterpretationen entstehen und möglicherweise nicht vorhandene Wärmebrücken angenommen werden. Dieser Prozess wird in konventionellen Verfahren durch die Techniker/innen vor Ort durchgeführt, indem sie mögliche Auffälligkeiten in den Bildern festhalten und diese anschliessend selbst vor Ort identifizieren (Person 6 2024).

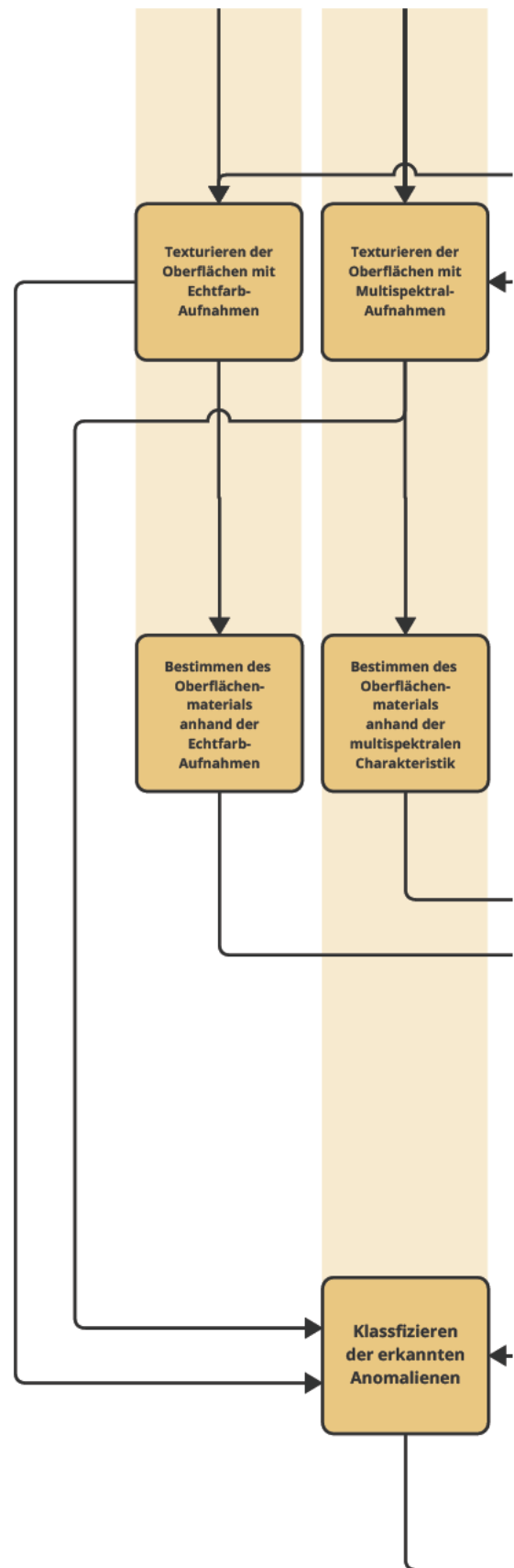


Abb. 19: Ausschnitt Tag 1 aus Flussdiagramm für die Anspruchsgruppe "Experten" (siehe Anhang J)

### Nacht 1: Aufnahme von Thermografiedaten und Validierung

In der darauffolgenden Nacht werden thermische Aufnahmen desselben Gebiets angefertigt. Gleichzeitig werden, wie von Bleisch (2023) beschrieben, Bodenmessungen durchgeführt, um die Temperaturen von Oberflächen mit bekanntem Material und Aufbau zu erfassen. Dabei kann es sich etwa um öffentliche Gebäude handeln, deren Materialien bekannt sind, oder um spezielle Referenzflächen. Bleisch verwendet zum Beispiel Strassenflächen, die im gesamten Gemeindegebiet meist ähnliche Materialaufbauten aufweisen.

Dieser Schritt entspricht dem manuellen Messen von Oberflächentemperaturen in einem konventionellen Verfahren, bei dem ebenfalls überprüft wird, ob die thermografischen Aufnahmen plausibel sind, damit sie gegebenenfalls korrigiert werden können (Person 6 2024).

Im Anschluss erfolgt eine erste Validierung, um den Ansprüchen der Expert/innen an Verlässlichkeit und Glaubwürdigkeit gerecht zu werden. Hierbei werden die gemessenen Oberflächentemperaturen mit den aus den Wetterdaten der letzten 48 Stunden berechneten Temperaturen für ähnliche Oberflächen abgeglichen. So wird geprüft, ob die relevanten Wetterdaten und thermischen Faktoren in der erforderlichen Qualität vorliegen. Entsprechen die Werte dem definierten Toleranzbereich, wird der Prozess fortgesetzt. Andernfalls muss die Befliegung wiederholt werden, da möglicherweise ungünstige Messbedingungen vorliegen.

Dieser Schritt ist in dieser Form bis jetzt nur in der Forschung umgesetzt. Bleisch et al. nutzen ausschliesslich die Korrektur nach den vor Ort gemessenen Mikroklimadaten, die ebenfalls im weiteren Verlauf zum Einsatz kommen. Dennoch wurde dieser Korrekturschritt speziell von Person 6 gewünscht, um bereits in diesem Stadium die Daten zu plausibilisieren.

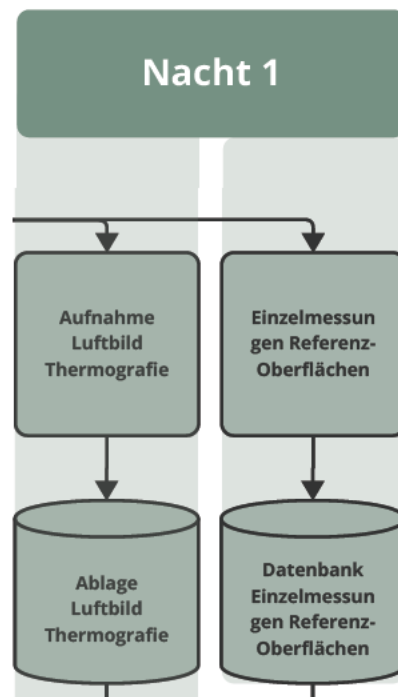


Abb. 20: Ausschnitt Nacht 1 aus Flussdiagramm für die Anspruchsgruppe "Experten" (siehe Anhang J)

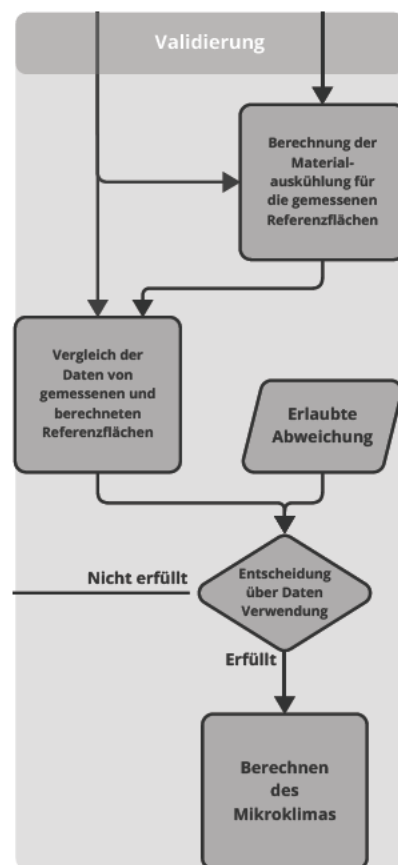


Abb. 21: Ausschnitt Nacht 1 aus Flussdiagramm für die Anspruchsgruppe "Experten" (siehe Anhang J)

Durch die Wetterdaten und die vor Ort gemessenen Werte wird die Berechnung eines exakten Mikroklimas möglich, wie es Bleisch (2023) vorsieht. Dieser Prozess wird in modifizierter Form auch in der bodengestützten Thermografie angewendet, indem die Expert/innen am Aufnahmeort meteorologische Daten einbeziehen. Mithilfe des berechneten Mikroklimas können die zuvor erfassten thermografischen Aufnahmen nun gemäss Bleisch (2023) korrigiert werden.

In einem weiteren Schritt werden die Fassadenflächen des swissBUILDINGS3D-Modells nach dem bereits bei Tag 1 beschriebenen Verfahren mit den thermografischen Aufnahmen texturiert.

Anschliessend erfolgt die Korrektur der einzelnen thermografischen Texturen der Fassaden unter Einbezug ihrer geografischen Ausrichtung. Die Positionen und Neigungswinkel der Flächen sind bereits durch das swissBUILDINGS3D-Modell definiert. Für die eigentliche Korrektur kann erneut das von Rüdissler et al. (2021) entwickelte Verfahren herangezogen werden. Dabei werden zunächst die Flächenkorrektur und dann die Materialkorrektur mithilfe der bei Tag 1 identifizierten Oberflächenmaterialien in einem kombinierten Schritt vorgenommen. Die einfallende Wärmestrahlung wird durch ein dreidimensionales Verfahren charakterisiert und kompensiert.

Neben der einfallenden Wärmestrahlung aus verschiedenen Himmelsrichtungen müssen weitere Strahlungsquellen berücksichtigt werden, etwa die Wärmestrahlung umliegender Vegetationsobjekte oder städtischer Oberflächen. Die Berechnung dieser Strahlungen und die Ermittlung ihrer Abschwächung oder Verstärkung durch die Atmosphäre setzen genaue meteorologische Daten voraus, die bereits zuvor erfasst wurden (Rüdissler et al., Bleisch). Zudem werden dabei die materialabhängigen Korrekturen anhand der bekannten Emissions-, Transmissions- und Reflexionswerte durchgeführt (Person 6 2024). Diese Werte basieren auf den spezifischen Materialeigenschaften und deren Oberflächenzustand wie Rauheit oder Verwitterungsgrad. Die Qualität dieser Korrekturen hängt somit entscheidend davon ab, wie exakt die Materialien anhand der Echtfarben- und Multispektralaufnahmen erkannt und beschrieben wurden. Im bodengestützten Verfahren erfolgt eine ähnliche Kompensation grösstenteils durch die Intuition des oder der Thermografieexpert/in.

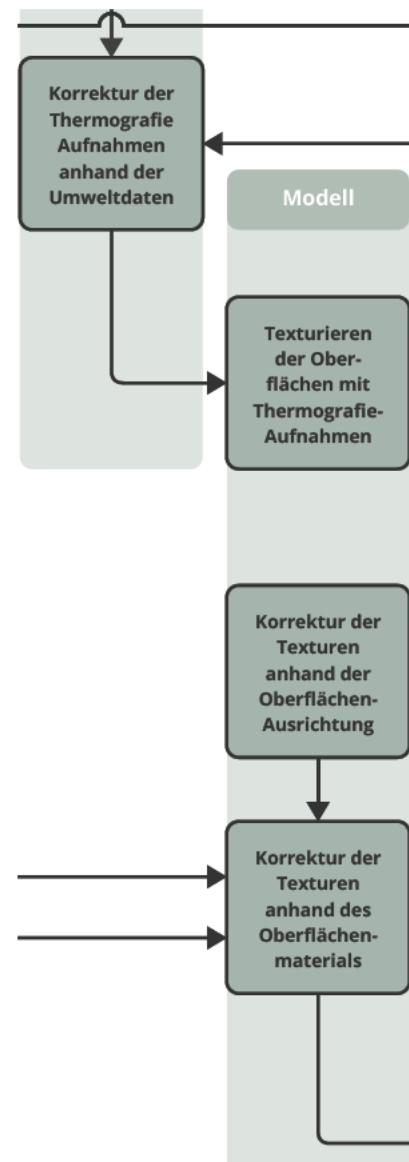


Abb. 22: Ausschnitt Nacht 1 aus Flussdiagramm für die Anspruchsgruppe "Experten" (siehe Anhang J)

Abschliessend wird der Prozess der Anomalieerkennung automatisiert, der bei bodengestützten Aufnahmen üblicherweise manuell stattfindet. Dabei wird unterschieden zwischen Anomalien, die durch Wärmebrücken oder Gebäudeschäden entstehen, und solchen, die auf offene Fenster, Kamine, Lüftungen oder andere Störungen zurückzuführen sind. Hierfür kann ein maschinelles Lernverfahren angewendet werden, das auf den Thermografieaufnahmen der ersten Nacht basiert.

Wie bereits bei Tag 1 erwähnt, kommen Objekterkennungsverfahren zum Einsatz, die Waqas und Araj (2024) sowie Batchuluun et al. (2021) beschrieben haben. Dies entspricht weitgehend der Arbeitsweise eines Thermografieexperten oder einer Thermografieexpertin bei der Identifikation von Anomalien. Aufgrund der begrenzten Auflösung und anderer Besonderheiten von Thermografieaufnahmen erweist sich dieser Prozess für maschinelles Lernen häufig als schwierig. Durch zusätzliche Nutzung der Echtfarben- und Multispektralaufnahmen kann die Effizienz jedoch deutlich gesteigert werden. Im bodengestützten Verfahren wird diese Korrektur, wie bereits bei Tag 1 erwähnt, von den vor Ort tätigen Expert/innen übernommen.

### Weiterer Prozess

Ein weiterer zentraler Bestandteil des vorgeschlagenen Ansatzes ist die Wiederholung der Befliegung und Datenerhebung einige Tage später unter möglichst ähnlichen Bedingungen. Die Bearbeitungs- und Korrekturabläufe entsprechen jenen von Tag 1 und Nacht 1. Diese erneut erzeugten Daten dienen dazu, die Anomalieerkennung in den Aufnahmen der ersten Nacht und umgekehrt in der zweiten Nacht zu verbessern. Dies ist nötig, weil die automatisierte Anomalieerkennung nur mit einer ausreichenden Datenmenge verlässlich arbeitet (Waqas und Araj 2024, Batchuluun et al. 2021). Ausserdem erlaubt dieser zweite Datensatz den Vergleich zweier Modelle aus jeweils einer Nacht. Das Vergleichen von Aufnahmen ist im klassischen bodengestützten Verfahren eine wesentliche Methode und steigert das Vertrauen der Thermografieexpert/innen in die Aufnahmen und deren potenziellen Mehrwert (Person 6 2024).

Durch den vorgeschlagenen Abgleich von Aufnahmen aus unterschiedlichen Zeitpunkten können verschiedene Einflussfaktoren adressiert werden, die bei einer flächendeckenden Analyse von Wärmebildern als problematisch gelten. So lassen sich Gebäude oder Gebäudeteile identifizieren, die während einer der Befliegungen unbewohnt und damit unbeheizt waren oder einen unbeheizten Dachboden aufwiesen. Ohne diesen Abgleich könnte man solche Gebäude fälschlich als sehr gut gedämmt einstufen.

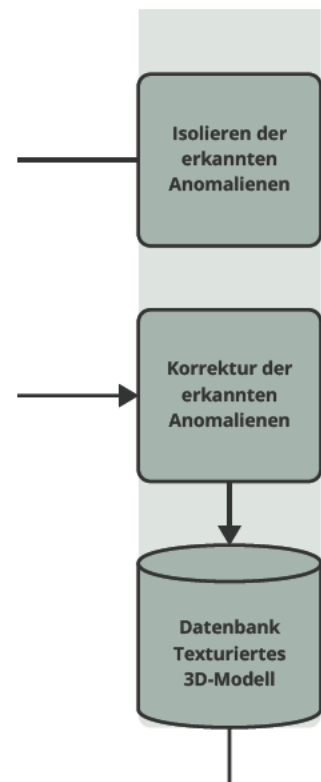


Abb. 23: Ausschnitt Nacht 1 aus Flussdiagramm für die Anspruchsgruppe "Experten" (siehe Anhang J)

## 5.2 Anwendungskonzept für Anspruchsgruppe "Kommunen"

Basierend auf dem umfangreichen Prozess, der für die Gruppe der Expert/innen konzipiert wurde, entstand in einem weiteren Schritt ein angepasster Ablauf für die Anspruchsgruppe „Kommunen“. Diese legt besonderen Wert auf eine leicht zugängliche und verständliche Darstellung der Ergebnisse, um vor allem eine erste qualitative Einschätzung des energetischen Gebäudezustands zu ermöglichen. Anstelle einer vollständigen und aufwendigen Datenbereinigung konzentriert sich dieses Konzept auf eine vereinfachte Bereitstellung der thermografischen Luftaufnahmen und grundlegende Korrekturen.

Für diesen Zweck genügt eine einzige Nachtbefliegung, bei der thermische Schrägbildaufnahmen erstellt werden, um die Wände und Dächer von Gebäuden abzubilden. Anschliessend werden die Aufnahmen mithilfe vorhandener Wetter- und Umgebungsdaten in einer ersten, eher groben Korrektur bearbeitet. Im Vergleich zur Expert/innen-Lösung entfallen zusätzliche Schritte wie Tagesbefliegungen oder mehrfach wiederholte Nachtaufnahmen. Auch die vollständige Bestimmung und Korrektur der Oberflächenmaterialien wird vereinfacht: Statt eines vollständig automatisierten Verfahrens wird hier auf die aktive Mitwirkung der Anwender/innen gesetzt. So können etwa Eigentümer/innen und interessierte Personen in einem Energieportal selbst Materialinformationen ergänzen oder aktualisieren. Dadurch werden lokale Kenntnisse einbezogen und mögliche Fehlinterpretationen – beispielsweise durch spiegelnde Fassaden – weiter minimiert.

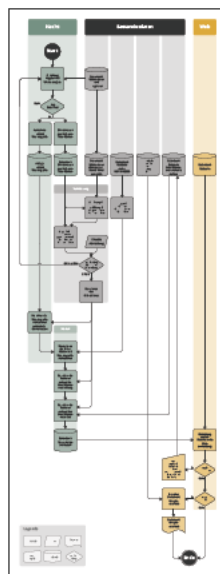


Abb. 24: Flussdiagramm für die Anspruchsgruppe "Kommunen" (siehe Anhang J)

Der daraus entstandene Prozess wird in Abbildung 24 als Flussdiagramm dargestellt (siehe auch Anhang X für die vollständige Darstellung). Hier werden nur die wesentlichen Korrekturschritte beibehalten, die eine grundlegende Verlässlichkeit der thermischen Daten sicherstellen. Die weitergehenden, detaillierten Verfahren aus dem Expert/innen-Konzept sind nicht zwingend erforderlich, da die Daten bei Kommunen vor allem als Orientierungshilfe dienen sollen. Ziel ist es, eine unkomplizierte, aber dennoch hilfreiche Einsicht in den energetischen Zustand der Gebäude

zu geben, sodass Eigentümer/innen und andere Interessierte erste Schritte bei energetischen Sanierungsprozessen gehen können.

Zusätzlich sieht das Konzept vor, dass Nutzende des Energieportals ein kurzes Dokument erstellen können, das ihre thermischen Aufnahmen und grundlegende Informationen übersichtlich zusammenfasst. Dieses Dokument unterstützt die Vorabklärung mit Banken, Energieberatern oder Baufirmen und erleichtert so den Übergang zu konkreten Sanierungsmassnahmen. Insgesamt entsteht ein praxisnaher Ansatz, bei dem sowohl eine verlässliche thermische Datengrundlage bereitgestellt als auch der individuelle Handlungsspielraum durch interaktive Eingaben und persönliche Dokumentationen erweitert wird.

### 5.3 Zusammenfassung Anwendungskonzepte

In den vorangegangenen Kapiteln wurden zwei unterschiedliche Anwendungskonzepte vorgestellt, die je nach Zielgruppe verschiedene Anforderungen an Genauigkeit und Nutzerfreundlichkeit erfüllen.

Kapitel 5.1 beschreibt ein umfassendes Anwendungskonzept, das speziell für die hohe Datenqualität und Transparenz konzipiert wurde, welche Expert/innen fordern. Dabei flossen die Praxiskenntnisse mehrerer Fachpersonen, darunter Person 3 und Person 6, sowie Erkenntnisse aus der Literaturrecherche ein. Eine Schlüsselrolle spielen etablierte Methoden der bodengestützten Thermografie, wie sie etwa in SIA 180.223 (2024) erläutert werden. Ziel ist es, diese Methoden mitsamt ihren Korrekturschritten in einen automatisierten Workflow für luftgestützte Schrägbildaufnahmen zu überführen. Neben der Beachtung verschiedener Witterungsfaktoren und weiteren Bedingungen sieht dieses Konzept mehrere Befliegungen und ausführliche Validierungsprozesse vor, um die Luftbilddaten so zu verbessern, dass sie in qualitativen und, unter Umständen, auch quantitativen Verfahren der Gebäudezustandserfassung eingesetzt werden können. Dieses Vorgehen knüpft stark an die in Bleisch (2023) und Rüdiger et al. (2021) entwickelten Verfahren an, indem klassische Vor-Ort-Beurteilungen des Thermografieexperten durch automatisierte Korrekturprozesse ergänzt und erweitert werden.

Kapitel 5.2 demonstriert darauf aufbauend ein vereinfachtes Konzept für Kommunen, das trotz geringerer Anforderungen an die Genauigkeit auf demselben Prinzip beruht. Statt mehrerer Tag- und Nachtbefliegungen genügt hier eine einmalige Nachtaufnahme, die nur einer grundlegenden Korrektur unterzogen wird. Spezielle Verfahren wie umfassende Materialbestimmungen oder mehrfaches Wiederholen der Messkampagne entfallen. Um die Qualität trotzdem auf einem sinnvollen Niveau zu halten, können Besitzer/innen oder andere Interessierte in einem Energieportal selbst Materialdaten ergänzen. Dies baut auf das Prinzip der Interaktion mit lokalen Kenntnissen auf und vermeidet eine aufwendige Automatisierung sämtlicher Korrekturschritte. Auf diese Weise bekommen Kommunen schnell und verständlich eine erste qualitative Einschätzung des energetischen Zustands ihrer Gebäude, ohne den kompletten Aufwand des Expert/innen-Konzepts leisten zu müssen. Ein eigens erstelltes Dokument hilft zudem bei der Vorbereitung

etwaiger Sanierungs- oder Beratungsschritte und stellt eine praxisnahe Verknüpfung zwischen den thermischen Aufnahmen und dem weiteren Vorgehen sicher.

Beide Anwendungskonzepte – das umfassende Expert/innen-Verfahren mit Fokus auf Datenqualität und detaillierter Korrektur sowie die vereinfachte Lösung für Kommunen mit Schwerpunkt auf niederschwelligem Zugang – sind eng miteinander verknüpft. Während das Expert/innen-Konzept präzise und robuste Ergebnisse für anspruchsvolle Gebäudeanalysen liefert, bietet die kommunale Variante eine rasche, gut verständliche Orientierung und schafft eine Grundlage für weitere Entscheidungs- und Sanierungsschritte. Zudem wurden beide Konzepte in enger Zusammenarbeit mit den Gesprächspartner/innen fortlaufend evaluiert, sodass sichergestellt war, dass sie den Anforderungen der jeweiligen Zielgruppe, insbesondere der Expert/innen, kontinuierlich entsprachen.

#### 5.4 Konzeptnachweis (PoC)

Im folgenden Kapitel wird die Entwicklung eines Konzeptnachweises beschrieben, der aufzeigt, wie niedrig aufgelöste thermografische Luftaufnahmen in einem konkreten Produkt eingesetzt werden können. Wie bereits in der Methodik dargestellt, bestand das Ziel darin, anhand eines realen Beispiels zu veranschaulichen, wie thermische Schrägbilddaten in eine bestehende kommunale Plattform integriert werden können.

Bereits während der Sondierungs- und Expert/innen-Gespräche zeichnete sich ab, dass in der Stadt, in der Person 5 tätig ist, ein neues Energieportal im Aufbau war. Dieses Portal soll der Bevölkerung einen einfachen Zugang zu energetisch relevanten Gebäudedaten ermöglichen. Zum Zeitpunkt des Erstkontakts mit Person 5 befand sich das Portal in einer fortgeschrittenen Phase, in der bereits Verbrauchsdaten, wie Heizungskennzahlen, visualisiert und – gestützt auf Informationen wie das Baujahr des Gebäudes – ein Energiescore berechnet werden konnten. Person 5 zeigte starkes Interesse daran, thermografische Luftaufnahmen zum Gebäudezustand in das Portal aufzunehmen. Da das kommunale Projekt jedoch kurz vor der Veröffentlichung stand und deshalb keine Erweiterungen mehr rechtzeitig integriert werden konnten, wurde entschieden, die thermischen Daten exemplarisch ausserhalb der eigentlichen städtischen Website zu demonstrieren. Dieser Ansatz machte es möglich, prototypisch zu verdeutlichen, wie thermische Informationen künftig im Energieportal bereitgestellt werden könnten, ohne den bereits laufenden Entwicklungsplan zu beeinträchtigen.

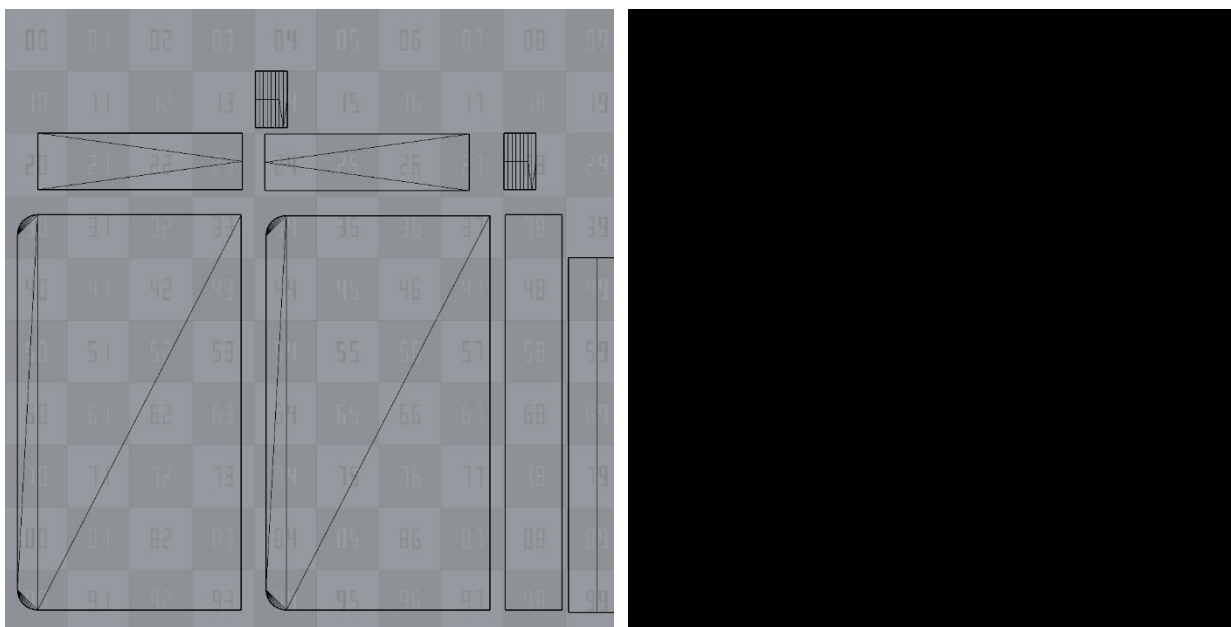
Als Grundlage diente das Anwendungskonzept für die Anspruchsgruppe "Kommunen", das in Kapitel 5.2 entwickelt wurde und an dessen Ausarbeitung Person 5 aktiv mitwirkte. Während mehrerer Treffen wurde diskutiert, wie sich die thermografischen Aufnahmen und die daraus resultierenden Informationen sinnvoll in das Portal einbinden lassen, welche Einschränkungen zu berücksichtigen sind und wie eine Umsetzung aussehen könnte. Die Hauptidee bestand darin, bereits bestehende Portalstrukturen zu nutzen, damit auch Personen ohne tiefgehendes Fachwissen die Fassadendaten verstehen. Zusätzlich sollten die thermischen Informationen in das existierende Angebot eingebettet werden, damit die Endnutzer/innen neben den bereits

vorhandenen Verbrauchs- und Gebäudeinformationen ein qualitatives Bild des energetischen Zustands ihrer Immobilien erhalten.

### 5.4.1 Modelle

Um diese Idee in der Praxis umzusetzen, wurde beschlossen, das Konzept mithilfe einer neu erstellten Applikation auf dem Stadtgebiet von Person 5 zu testen. Diese Applikation dient als Prototyp, der verdeutlicht, wie die im Anwendungskonzept beschriebenen Funktionen ins Energieportal integriert werden könnten und wie die Interaktion mit thermografischen Fassadenmodellen konkret aussehen würde.

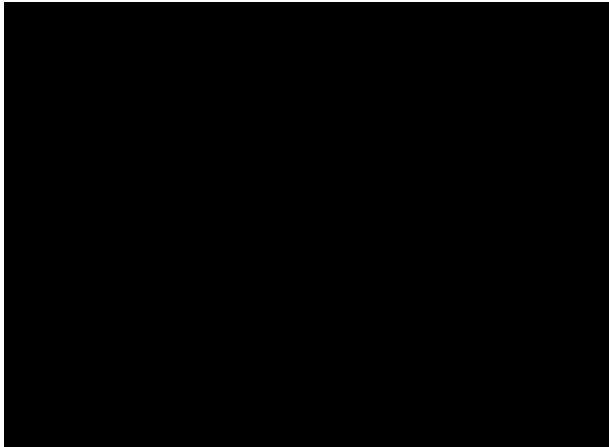
Zunächst wurde überprüft, wie sich die für die Anspruchsgruppe "Kommunen" vorgesehene Methode von Rüdiger et al. (2021) manuell nachbilden lässt, um ein texturiertes 3D-Modell mit thermischen Informationen zu erzeugen. Mehrere Softwareanwendungen kamen dabei zum Einsatz, um vorhandene Mesh-Modelle zu bearbeiten, zu vereinfachen und anschliessend mit Texturen zu versehen. Schliesslich wurde eine Kombination aus Rhino zur Mesh-Bearbeitung und Photoshop für das manuelle Mapping der Texturen verwendet. In einem künftigen, automatisierten Verfahren für die kommunale Nutzerschaft würden diese Schritte von entsprechenden Algorithmen übernommen.



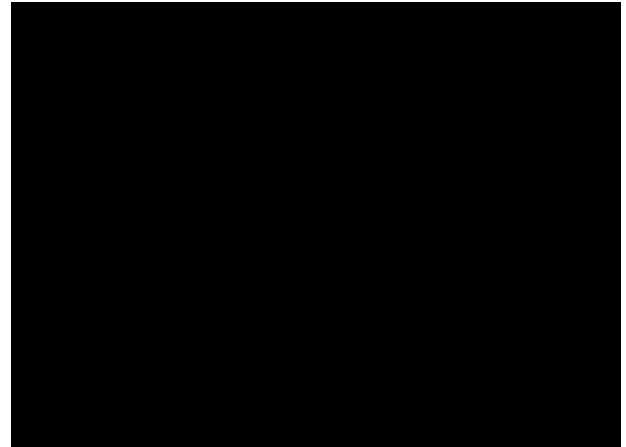
**Abb. 25:** Native Textur von Rhino sowie eine vom Autor bereits aufbereiteter Textur.

Durch dieses Vorgehen entstand ein beispielhaftes, texturiertes Fassadenmodell, das illustriert, wie die automatisierten Verfahren in einer endgültigen Anwendung aussehen könnten. Abbildung 25 zeigt einen Vergleich zwischen der nativen Textur aus Rhino und einer bereits aufbereiteten Textur. Hierdurch wird auch deutlich, wie unterschiedlich ein reines photogrammetrisches Modell (siehe Abbildung 26) im Gegensatz zu einer präzisen Übertragung der Texturen auf ein bereits bestehendes Stadtmodell (siehe Abbildung 27) interpretiert werden kann. Diese texturierten 3D-Modelle bildeten die Grundlage für den weiteren Konzeptnachweis und erlaubten

bereits, verschiedene im Anwendungskonzept vorgesehene Darstellungsformen praxisnah zu testen und deren Wirkung gemeinsam mit Person 5 zu validieren. Dabei wurden notwendige Anpassungen besprochen und umgesetzt, bis ein Stand erreicht war, der für die nächsten Schritte geeignet ist.



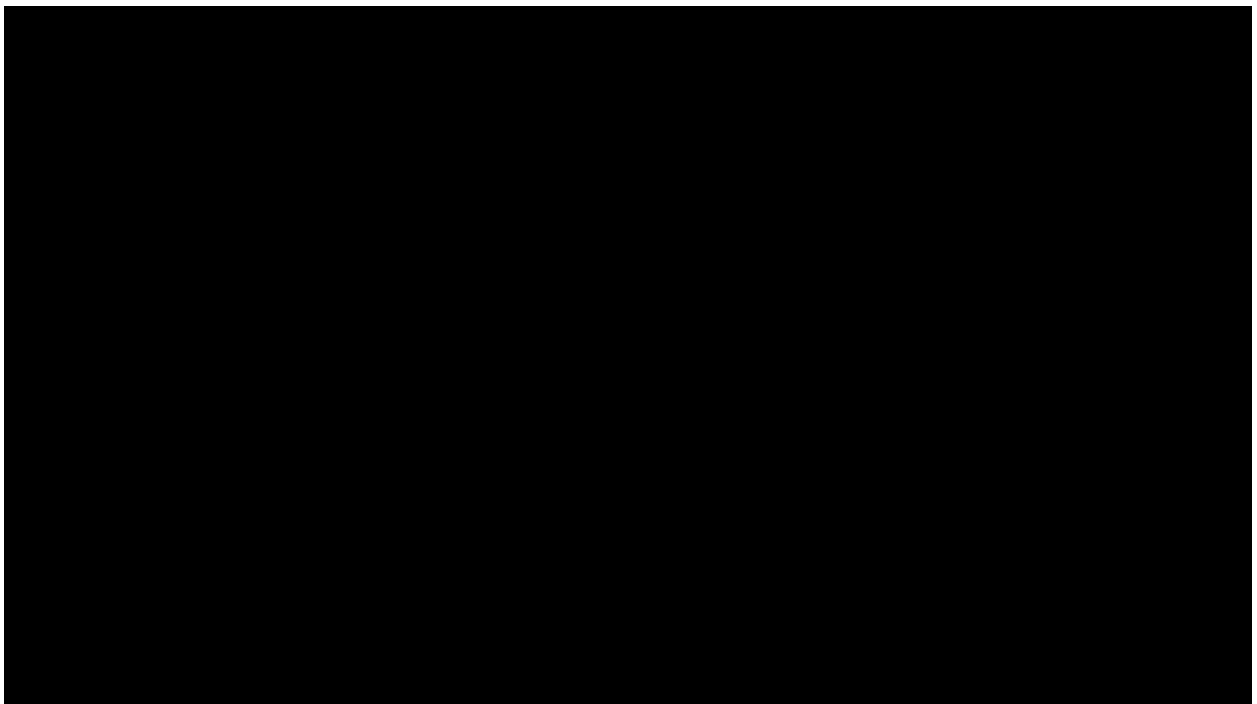
**Abb. 26:** Ausschnitt eines photogrammetrischen Modells aus Thermalaufnahmen (Blesich, 2024)



**Abb. 27:** Ausschnitt aus der dreidimensionalen Darstellung im geplanten Energieportal (eigene Darstellung)

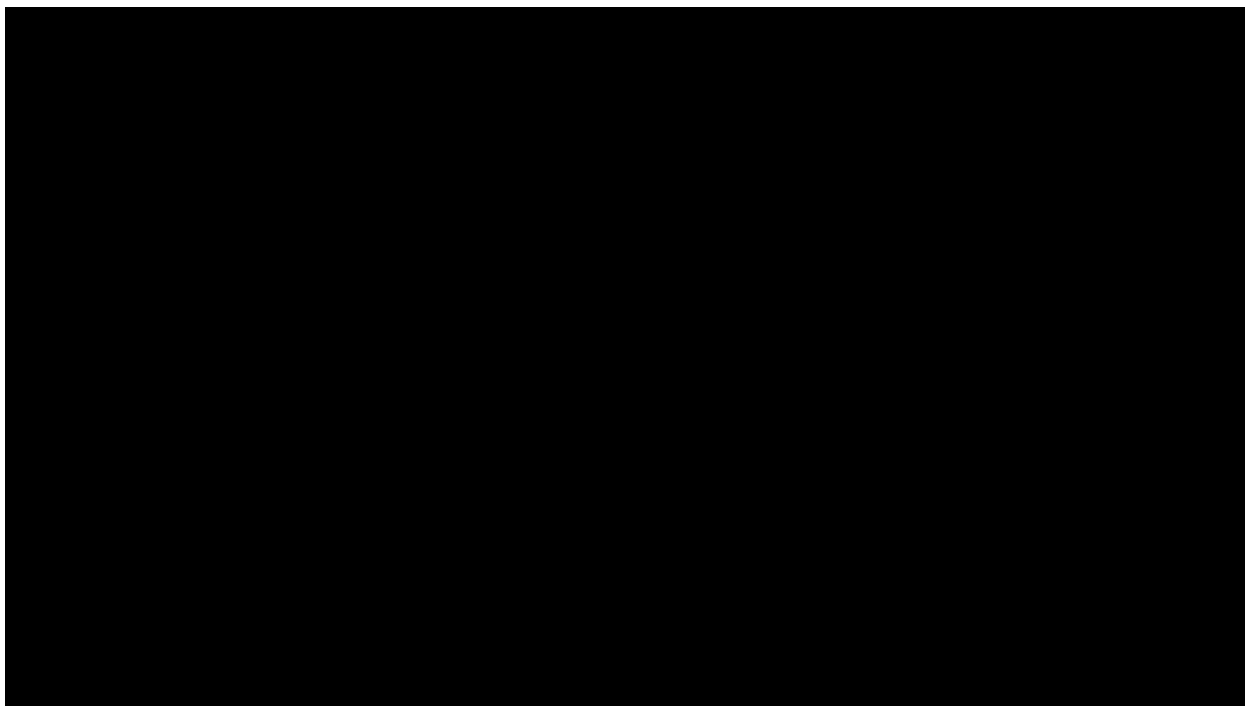
#### 5.4.2 Webanwendung

Im Anschluss daran folgte die Entwicklung einer Webanwendung, die auf dem Design des neuen Energieportals basierte. Ziel war es, eine Plattform zu schaffen, auf der sowohl die dreidimensionalen thermografischen Modelle als auch weitere Informationen zum Gebäude angezeigt werden können. Dadurch erhalten die Nutzer/innen einen ganzheitlichen Überblick über die aktuelle Situation einer Liegenschaft.



**Abb. 28:** Übersicht Liegenschaftsauswertung (eigene Darstellung aus Microsoft PowerApp)

Eine zentrale Funktion ermöglicht das Auswählen einzelner Gebäudeteile wie Wände im 3D-Modell, um ihre Eigenschaften, beispielsweise Oberflächenbeschaffenheit oder Material, zu bearbeiten. Auf diese Weise lassen sich die im Anwendungskonzept beschriebenen Reflexions- und Transmissionswerte direkt im Modell anpassen, was eine verbesserte Darstellung thermischer Texturen ermöglicht. Indem die Nutzer/innen Rückmeldungen oder Korrekturen, etwa zum Oberflächenmaterial, eingeben, kann die Datenqualität des Modells fortlaufend erhöht werden, ohne dass städtische Mitarbeitende oder externe Datenerfassende erneut vor Ort tätig werden müssen.



**Abb. 29:** Eingabemaske für Daten durch Nutzenden (eigene Darstellung aus Microsoft PowerApp)

Gedacht war auch an eine Funktion, mit der Benutzer/innen selbst Anomalien wie offene Fenster oder Kamine identifizieren und markieren könnten, um Fehldetektionen zu minimieren. Allerdings erwies sich diese Erweiterung als technisch zu komplex, um sie im Rahmen dieser Arbeit umzusetzen.

Als technische Plattform für den PoC (Proof of Concept) wurde Microsoft Power Apps gewählt, ein Low-Code-Werkzeug, das die schnelle Entwicklung interaktiver Anwendungen erlaubt. Der Prototyp greift dabei auf eine zentrale Datenquelle zu, in der sowohl die thermischen Daten als auch die im Energieportal bereits vorhandenen Gebäudedaten gespeichert sind. Ausserdem werden neu erfasste Eigenschaften, etwa zu Oberflächenmaterialien oder anderen Nutzereingaben, dort hinterlegt. So entsteht ein konsistentes System, in dem thermische Informationen, bestehende Energiedaten und mögliche Korrekturen oder Ergänzungen durch Nutzende zusammenfließen.

In Anhang Z wird ein Klassendiagramm präsentiert, das alle Anforderungen an den Konzeptnachweis strukturiert zusammenfasst. Es zeigt, wie die verschiedenen Datensätze miteinander

verknüpft sind und welche Attribute gebraucht werden, damit sie korrekt ausgewertet und dargestellt werden können. Damit dient es als technische Grundlage für eventuelle zukünftige Erweiterungen oder eine vollständige Integration ins städtische Energieportal.

Der daraus resultierende Prototyp erlaubt es Anwender/innen, über eine nachgebildete Startseite auf ein fiktives Energieportal zuzugreifen. Durch eine Suchfunktion kann das gewünschte Gebäude gefunden werden, um anschliessend thermische Daten sowie ergänzende Informationen zur Energieeffizienz anzuzeigen. Dies umfasst einen groben energetischen Fassadenzustand, empfohlene Massnahmen und eine einfache Möglichkeit, fehlerhafte Daten zu melden oder einen Termin mit städtischen Fachpersonen zu vereinbaren (siehe Abbildung 28). In Abbildung 29 ist zudem eine Eingabemaske ersichtlich, über die Nutzende weitere Informationen eingeben oder ändern können.

### Zusammenfassung

Der im Rahmen dieser Arbeit entstandene Konzeptnachweis zeigt, wie sich thermische Luftaufnahmen in ein kommunales Energieportal integrieren lassen. Dabei wurden alle relevanten Schritte aus dem Anwendungskonzept für "Kommunen" in einem realitätsnahen Prototyp prototypisch nachgebildet. Er demonstriert, dass sich die gewonnene thermische Information, kombiniert mit lokalem Wissen und bereits vorhandenen Gebäude- und Energiedaten, als nutzerfreundliche Entscheidungsgrundlage einsetzen lässt. Somit bildet das Konzept eine praxisnahe Ergänzung zu den in Kapitel 5.2 aufgezeigten Verfahren und verdeutlicht das Potenzial, das eine solche Integration für unterschiedliche Stakeholdergruppen, insbesondere Kommunen, bietet.

## 6 Diskussion

Dieses Kapitel nimmt die zentralen Erkenntnisse der vorliegenden Masterarbeit auf, verknüpft sie mit den in den vorangegangenen Kapiteln behandelten Inhalten und beantwortet dabei die Haupt- und Teilfragestellungen in einem zusammenhängenden Kontext. Es zeigt sich, dass luftgestützte, niedrig aufgelöste thermische Schrägbildaufnahmen durchaus ein wertvolles Instrument für die Gebäudezustandserfassung sein können, indem sie bestehende Methoden sinnvoll ergänzen. Gleichzeitig sind jedoch wichtige Herausforderungen offengeblieben, die sich vor allem auf die notwendige Auflösung, Korrekturverfahren und fehlende Normierung beziehen.

### 6.1 Hauptfragestellung

Zu Beginn dieser Arbeit wurde die Hauptfrage gestellt, wo Potenziale und Grenzen von luftgestützten, gering aufgelösten thermischen Schrägbildaufnahmen für die Gebäudezustandsermittlung liegen. Die durchgeführte Literaturrecherche und die Expert/innen-Gespräche (Kapitel 3) zeigten, dass grossflächige Luftbefliegungen mit thermischen Schrägbildern ein breites Spektrum an energetischen Informationen liefern können. Im Gegensatz zur rein bodengestützten Thermografie oder zu senkrechten Luftaufnahmen lassen sich so grosse Areale in relativ kurzer Zeit abdecken und auch Fassadenflächen erfassen, die bei Nadirbildern oft unzureichend berücksichtigt werden. Dies entspricht dem ersten zentralen Potenzial: Eine umfassende, vergleichsweise effiziente Erfassung von Schwachstellen in ganzen Quartieren oder Städten. Weiterhin zeigte sich, dass thermische Schrägbilder vor allem in frühen Planungs- oder Sanierungsphasen nützlich sein können, um grobe energetische Problemstellen zu identifizieren und bei grossen Gebäudebeständen priorisieren zu können.

### 6.2 1. Teilfragestellung

Die Masterarbeit beleuchtete zudem verschiedene Teilfragestellungen. Eine wesentliche Überlegung betraf die Frage, welche Informationen aus solchen Schrägbildaufnahmen für die Ermittlung des Gebäudezustands überhaupt gewonnen werden können. Die Ergebnisse legen nahe, dass sich die Aufnahmen insbesondere für eine erste qualitative Einschätzung eignen. Zwar erlauben sie eine grobe Tendaussage über Wärmeverluste, etwa in welchen Fassadensegmenten grössere thermische Auffälligkeiten auftreten, doch für genauere quantitative Bewertungen einzelner Bauteile fehlen die erforderlichen Feindaten. Eine Ergänzung durch bodengestützte Messungen oder intensivere Korrekturschritte ist hier unumgänglich. Diese Einsicht deckt sich mit den Erkenntnissen aus den Gesprächen mit Fachleuten (Kapitel 3) und der Literatur, insbesondere mit den Forschungsansätzen von Bleisch, die betonen, dass ortsbezogene Bodenmessungen als Referenz oder Plausibilitätsprüfung weiterhin unverzichtbar sind.

### 6.3 2. Teilfragestellung

Die zweite Teilfragestellung war, inwieweit etablierte thermografische Methoden für Fassadenanalysen auf diese neue, luftgestützte Aufnahmetechnik übertragbar sind. Die Analysen (Kapitel 2.1.4) bestätigten, dass viele Verfahren prinzipiell anwendbar sind, etwa die Berücksichtigung von Emissionsgrad, Reflexion, Transmission, Materialeigenschaften oder Feuchtigkeitseinflüssen. Allerdings wurden in der Untersuchung aufwendige Korrekturverfahren identifiziert, die für eine saubere quantitative Auswertung zwingend notwendig sind. Dies führt zu einem erheblichen Mehraufwand, sobald ein bestimmter Genauigkeitsanspruch erfüllt werden soll. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass sich klassische Strategien der bodengestützten Thermografie – zum Beispiel die Zeitreihenanalyse, das Einbeziehen von Materialdaten und die Validierung anhand von Mikroklimawerten – durchaus adaptieren lassen, um bei luftgestützten Aufnahmen die Aussagekraft zu verbessern.

### 6.4 3. Teilfragestellung

Eng verknüpft damit ist die dritte Teilfragestellung, nämlich in welchen Produkten und Anwendungsfeldern die gewonnenen Informationen bereitgestellt werden könnten. Die Masterarbeit unterscheidet hier zwei Hauptnutzergruppen: „Experten“ und „Kommunen“. Für erstere wurde ein detaillierter Prozess entwickelt, bei dem grosse Sorgfalt auf Dokumentation, Nachvollziehbarkeit und Korrektur gelegt wird. Dieser Ansatz richtet sich an Fachpersonen, die tiefer gehende Analysen durchführen wollen, etwa für vertiefte energetische Bewertungen einzelner Gebäude oder Teile davon. Solche Daten könnten in spezialisierten Simulationsprogrammen weiterverarbeitet werden. Das von Rüdisser et al. (2021) vorgestellte Vorgehen, bei dem die thermografischen Luftaufnahmen in ein dreidimensionales Stadtmodell projiziert und mit umfassenden Korrekturen angereichert werden, zeigt den hohen Anspruch an Transparenz und Korrektheit, den die Experten verlangen. Für die kommunale Ebene hingegen wurde ein reduziertes Konzept entwickelt, das in Form eines vereinfachten Proof of Concept (PoC) demonstriert, wie thermische Daten auf einer Low-Code-Plattform bereitgestellt werden können. Die Ergebnisse lassen sich intuitiv darstellen, indem laienfreundliche Visualisierungen und Interaktionsmöglichkeiten angeboten werden. Dieser Ansatz ist besonders wertvoll für Personen, die weder tief greifendes thermografisches Fachwissen noch Zeit oder Mittel für komplexe Verfahren haben, aber dennoch eine erste Einschätzung zum energetischen Zustand erhalten möchten.

### 6.5 Interpretation dieser Resultate

Die Interpretation dieser Resultate legt nahe, dass die Nutzenden weniger die rein technischen Details – wie Auflösung oder Korrekturalgorithmen – in den Vordergrund stellen, sondern vor allem, wie anwendbar die Daten im jeweiligen Kontext sind. Die Gespräche mit den Expert/innen (Kapitel 3) brachten hervor, dass diese Gruppe detailreich über thermografische Parametrierungen informiert sein will, um die Verlässlichkeit der Daten einzuschätzen. Gleichzeitig wurde ersichtlich, wie relevant einfache Nutzungsschnittstellen für die kommunale Anwendung sind.

Diese Befunde decken sich mit der These „beyond accuracy“ von Wang und Strong, wonach bei neuen Technologien die Nutzerbedürfnisse und die praktische Einsatzfähigkeit entscheidender für den Erfolg sind als die blossen technischen Spezifikationen.

Betrachtet man die Gesamtheit der Arbeit, so zeigt sie eine im Wesentlichen erwartungsgemässe Wirkung: Das Potenzial, grossflächig Fassadenzustände qualitativ sichtbar zu machen, wird deutlich; auch, dass Grenzen hinsichtlich Auflösung und Normierungen bestehen. Bemerkenswert ist, dass sich der Schwerpunkt stärker auf die Anwendungen verschob, da die Gespräche mit den Fachpersonen klarmachten, dass Effizienz und Nutzungsfreundlichkeit nicht weniger bedeutsam sind als präzise Messwerte. Die Zielgruppen unterscheiden sich hier deutlich. Kommunen benötigen leicht verständliche, schnell verfügbare Instrumente, Expert/innen fordern fundierte Korrekturschritte und eine tiefe Prozessdokumentation. Dieser Umstand bestätigt die Arbeit von MyHeat, bei der die Einbettung von Wärmeverlustvisualisierungen in benutzerfreundlichen Portalen hohe Priorität hat. Zudem bestätigt er, wie bereits Bleisch et al. anmerkten, dass automatisierte Korrekturverfahren weiterhin intensiv erforscht werden müssen.

## 6.6 Beschränkung der Forschung

Diese Arbeit stösst jedoch an gewisse Grenzen. Erstens ist die Anzahl der geführten Gespräche überschaubar, sodass die Repräsentativität eingeschränkt bleibt. Zwar bringt die Diversität der Hintergründe aller Befragten eine gewisse Breite, dennoch wäre eine Ausweitung auf mehr Fachrichtungen und Akteur/innen wünschenswert. Zweitens ist das verwendete Projekt „ThermoPlanner3D“ noch in Entwicklung, wodurch keine finalen nativen Befliegungsdaten vorlagen. Man griff unter anderem auf Drohnenbilder und simulierte Auflösungen zurück, was prinzipiell übertragbar ist, jedoch an mancher Stelle eine definitive Validierung erschwert. Drittens besteht derzeit kaum eine klare Normierung für flugzeuggestützte thermische Fassadenaufnahmen. SIA 180.223 oder GEAK-Verfahren berücksichtigen solche Schrägbilder noch nicht umfassend, was eine konsistente Bewertung, wie man sie von bodengestützten Methoden her kennt, erschwert.

## 6.7 Weiterer Forschungsbedarf

Die Resultate machen deutlich, dass eine weitere systematische Forschung vielversprechend wäre. Ein wichtiger Fokus wäre die Entwicklung einheitlicher Methoden und Qualitätsstandards, damit Anwender/innen nicht jedes Mal eigene Wege für Korrektur und Validierung suchen müssen. Auch eine umfassende Normierung, etwa durch Ergänzungen in der Norm SIA 180, würde das Potenzial dieser Technologie für die Praxis deutlich steigern. Zusätzlich sollte untersucht werden, inwiefern mikroklimatische Einflüsse, städtische Wärmeinseln und verschiedene Oberflächenmaterialien automatisiert einbezogen werden können, um quantitative Aussagen zu verbessern. Schliesslich könnten Pilotversuche auf kommunaler oder kantonaler Ebene wertvolle Erkenntnisse liefern, wie sich automatisierte Anomalieerkennung und Anwenderportale in den behördlichen Alltag integrieren lassen.

## **6.8 Zusammenfassung und Ausblick**

Insgesamt zeigt die Diskussion, dass die vorliegende Masterarbeit eine solide Grundlage dafür schafft, die Potenziale und Grenzen luftgestützter, niedrig aufgelöster thermischer Schrägbildaufnahmen von Fassaden realistisch einzuschätzen. Sie trägt damit zur Schnittstelle zwischen technischer Machbarkeit und Nutzer/innenfreundlichkeit bei und liefert zugleich Hinweise, wie verschiedene Anspruchsgruppen – von Expert/innen bis hin zu kommunalen Nutzenden – eingebunden werden können. Die vorgeschlagenen Konzepte legen nahe, dass in Zukunft ein umfassender, normativ und technisch fundierter Ansatz möglich ist, bei dem Thermografie aus der Luft nicht nur ein spannendes Feld in der Forschung bleibt, sondern auch in praktischen Anwendungen, etwa in Energieportalen oder Sanierungskonzepten, eine wichtige Rolle spielen könnte.

## 7 Fazit

Die vorliegende Masterarbeit beleuchtet das Potenzial und die Grenzen von luftgestützten, gering aufgelösten, thermischen Schrägbildaufnahmen von Fassaden als Teil der Gebäudezustandserfassung. Dabei wurde deutlich, dass solche Aufnahmen einen vielversprechenden Ansatz darstellen, um den energetischen Zustand von Gebäuden grossflächig und vergleichsweise effizient zu erfassen. Sie eröffnen zusätzliche Perspektiven auf Fassadenflächen, die bei rein bodengestützten Verfahren oder senkrechten Flugaufnahmen nur unzureichend abgedeckt werden und können daher Schwachstellen und Wärmeverluste an Fassaden identifizieren. Damit ergänzen sie bestehende bodengestützte Thermografie-Verfahren um einen neuartigen Blickwinkel, der sich besonders für eine erste Einschätzung oder eine grobe Klassifizierung auf Quartier- oder Stadtebene eignet, wo grosse Areale in kurzer Zeit abgebildet werden sollen.

Gleichzeitig wurde deutlich, dass dieses Verfahren Grenzen aufweist, sobald eine präzise quantitative Bewertung einzelner Bauteile erforderlich ist. Die vergleichsweise geringe Bodenauflösung kann Messungen verfälschen oder erschwert zumindest eine genaue Analyse auf Bauteilebene. Die Ergebnisse der Arbeit belegen zudem, dass das Zusammenspiel verschiedener Faktoren – unter anderem Materialeigenschaften, mikroklimatische Bedingungen und die Art der Gebäudenutzung – eine entscheidende Rolle bei der Datenauswertung spielt. Ergänzungen durch Korrekturverfahren und teilweise auch durch bodengestützte Referenzmessungen verbessern den Aussagewert der Aufnahmen erheblich, verlangen jedoch einen deutlichen Mehraufwand.

Die dafür vorgestellten Korrektur- und Aufbereitungsverfahren illustrieren, dass sich etablierte thermografische Methoden grundsätzlich auf luftgestützte Aufnahmen übertragen lassen, sofern zusätzliche Informationen wie Materialdaten und Umgebungsvariablen vorliegen. Gleichzeitig betont die Arbeit, dass es weiterführende Forschung zu automatisierten Korrekturverfahren sowie einer umfassenderen Normierung in Regelwerken oder des Gebäudeenergieausweises bedarf, um das Verfahren für Planer/innen, Kommunen und weitere Nutzergruppen verlässlicher zu machen.

Ein zentraler Mehrwert dieser Arbeit liegt in der Unterscheidung zweier Anspruchsgruppen, welche unterschiedliche Bedürfnisse haben. „Experten“ legen Wert auf eine möglichst präzise, umfassend dokumentierte und durch Korrekturmassnahmen abgesicherte Datenaufbereitung, um Ergebnisse in simulierten oder quantitativen Verfahren weiter zu verwenden. Für «Kommunen» oder private Eigentümer/innen stehen niederschwellige Zugänge und eine anschauliche Visualisierung im Vordergrund, damit auch Personen ohne spezifisches Fachwissen ein qualitatives Bild zum energetischen Zustand eines Gebäudes erhalten. In beiden Fällen zeigt sich jedoch, dass die rein technischen Herausforderungen häufig weniger ausschlaggebend sind als Fragen der Anwendbarkeit, Transparenz und Nutzerfreundlichkeit. Durch die Entwicklung zweier Anwendungskonzepte, eines umfangreichen für Expert/innen und eines vereinfachten für die breite Öffentlichkeit, konnten passgenaue Lösungswege aufgezeigt werden

Die vorgestellten Konzepte wurden verfeinert, indem innovative Verfahren aus Forschungsprojekten wie jenen von Bleisch oder Rüdiger an die vorliegenden Anwendungsfälle angepasst wurden. So entstand einerseits ein detaillierter Workflow für Expert/innen, der sämtliche notwendigen Korrekturschritte sowie Validierungen umfasst und damit eine hohe Datenqualität ermöglicht. Andererseits wurde ein Proof of Concept für Kommunen entwickelt, in dem vorwiegend eine vereinfachte Datendarstellung und Nutzerinteraktion im Vordergrund stehen. Diese Zweiteilung verdeutlicht, wie wichtig es ist, die Ergebnisse je nach Verwendungszweck flexibel und kontextsensitiv aufzubereiten.

Aus diesen Erkenntnissen folgt, dass grossflächige, luftgestützte thermische Schrägbildaufnahmen von Fassaden sowohl in Forschung als auch Praxis eine relevante Rolle spielen können. Um das volle Potenzial dieser Technologie auszuschöpfen, ist es ratsam, an den identifizierten Schlüsselpunkten anzusetzen: Die Normierung für luftgestützte Fassadenaufnahmen sollte weiter vorangetrieben werden, um eine einheitliche Qualitäts- und Gütesicherung zu erreichen. Ebenso sind automatisierte Verfahren zur Berücksichtigung von Mikroklima, städtischen Wärmeinseln und materialbedingten Parametern zu verbessern, damit quantitative Aussagen verlässlicher werden. Weiterhin ist eine Ausweitung auf grössere Nutzerstudien sinnvoll, um zu klären, wie unterschiedliche Anwendergruppen – von Fachplanenden bis hin zur breiten Öffentlichkeit – diese Daten effizient einsetzen können.

Insgesamt zeigt diese Arbeit, dass die Technologie zwar nicht alle konventionellen thermografischen Ansätze ersetzt, aber eine wertvolle Ergänzung darstellt und neue Anwendungsperspektiven eröffnet. Mit der fokussierten Unterscheidung verschiedener Zielgruppen, der Entwicklung konzeptueller Workflows für die Datennutzung und der Diskussion um notwendige Standards, Normen und Korrekturverfahren legt die Masterarbeit eine fundierte Grundlage für weitere Untersuchungen. Sie bestätigt, dass der Nutzen in naher Zukunft nicht nur im technischen Fortschritt, sondern vor allem in der Anbindung an praktische Anwendungen und benutzerorientierte Lösungen liegen wird.

## 8 Persönliche Reflexion

Meine persönliche Motivation für diese Arbeit beruhte von Beginn an auf der Idee, dass eine grossflächige, luftgestützte Erfassung des Gebäudezustands einen erheblichen Beitrag zu ganzheitlichen Sanierungsstrategien leisten kann. Dank meiner planerischen Erfahrung und dem im Masterstudium erworbenen Verständnis für Virtual Design and Construction befasste ich mich gerne mit dieser Technologie. Am Anfang konzentrierte ich mich stark auf die technischen Aspekte der definierten Fragestellung, was zu einer ausführlichen Literaturrecherche führte. Die Literaturrecherche zeigte mir deutlich, dass bei der technischen Anwendung noch viele Fragen offen sind und dass noch grosser Forschungsbedarf besteht, um in Zukunft das Potential der luftgestützten Erfassung des Gebäudezustandes voll entfalten zu können. Meine Literaturrecherche bildete dann die Grundlage für die Expert/innen-Gespräche, deren Gesprächsleitfäden ich individuell anpasste, um den verschiedenen Hintergründen der Beteiligten gerecht zu werden.

Die Expert/innen-Gespräche erweiterten mein Verständnis für die Anforderungen der Nutzer/innen erheblich. Ausgehend von den Ergebnissen der Gespräche konnte ich mich in meiner Arbeit stärker auf die prozessbezogenen Aspekte einer flächendeckenden Gebäudezustandserfassung fokussieren. Aus den Rückmeldungen der Experten zeigte es sich schnell, dass die Belastbarkeit der Daten für alle Nutzer eine sehr hohe Priorität und Wichtigkeit hat. Interessant war aber die Erkenntnis, dass die Definition der Belastbarkeit der Daten je nach Stakeholdergruppe sehr unterschiedlich ausgelegt wird. Diese Erkenntnis war für mich überraschend, erscheint jedoch schlüssig im Hinblick auf das Zielpublikum und den unterschiedlichen Einsatz der Daten. Es war lehrreich für mich, die Gesprächsleitfäden so zu entwickeln, dass ich die Strukturiertheit der Gespräche sicherstellen konnte und dieses Hilfsmittel dann so flexibel einzusetzen, dass auch komplexe Aspekte erfasst werden konnten. Die Gespräche und Diskussionen mit verschiedenen Fachleuten waren mich auch persönlich sehr anregend, sie waren das Highlight meiner Masterthesis.

Eine grosse persönliche Herausforderung bestand darin, die Masterarbeit mit meiner beruflichen Tätigkeit zu vereinbaren und mich gleichzeitig auf die im Rahmen dieser Arbeit definierten Forschungsfragen zu konzentrieren. Nur durch eine konsequente Zeitplanung und den regelmässigen Austausch mit meiner Betreuungsperson gelang es mir, die Herausforderung der Doppelbelastung zu bewältigen. Im Zuge der Literaturrecherche und der Expert/innen-Gespräche bin ich laufend auf zahlreiche weitere Themen gestossen, denen ich gerne mehr Zeit gewidmet hätte. Zum Beispiel wären dies technische Aspekte wie die automatische Generierung von Gebäudehüllen aus LiDAR-Daten, die in der Publikation «LiDAR point-cloud mapping of building façades for building energy performance simulation» (O'Donnell et al., 2019) vorgestellt werden. Mehr Zeit hätte ich auch sehr gerne psychologischen Aspekten meiner Arbeit gewidmet. Speziell interessant und relevant fand ich, welches Potential Visualisierungen entfalten können. In diesem Zusammenhang bedeutsam ist das Nudging, das Papineau & Rivers (2022) untersuchen und in seinen unterschiedlichen Einsatzformen beschreiben. Ich habe in meiner Arbeit erfahren, wie entscheidend gerade solche psychologischen Faktoren für die Akzeptanz und damit für die

Realisierungschancen der neuen technologischen Möglichkeiten sind. Gerade in diesem Bereich zeigt sich für mich auch die Wichtigkeit der Interdisziplinarität und der Kommunikation zwischen Fachleuten und mit der Öffentlichkeit. Für diese Kommunikation wiederum ist es zentral wichtig, technische Themen eingängig zu erklären und gleichzeitig die Bedürfnisse unterschiedlicher Stakeholdergruppen in einem Konzept zu vereinen.

Rückblickend bot mir diese Arbeit die Möglichkeit, mich vertieft mit einem Gebiet zu beschäftigen, das mir bis dahin nicht in allen Details vertraut war. Ich hoffe, die im Verlauf dieser Masterarbeit entstandenen Kontakte zu unterschiedlichen Forschungsgruppen führen in Zukunft zu gemeinsamen Projekten, in denen konventionelle Verfahren mit innovativen Technologien verknüpft und kontinuierlich weiterentwickelt werden und in denen erarbeitet wird, wie das Zusammenspiel zwischen technischen Verfahren und nutzerorientierter Gestaltung künftig optimiert werden kann.

Für mich war es sehr befriedigend, zu realisieren, dass die in meiner Masterarbeit gewonnenen Erkenntnisse mittelfristig einen – wenn auch bescheidenen – Beitrag zur Erreichung der Klimaziele leisten können.

## 9 Verzeichnisse

### 9.1 Literaturverzeichnis

- Averbeck-Lietz, S., Meyen, M. (Eds.), 2016. *Handbuch nicht standardisierte Methoden in der Kommunikationswissenschaft*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-01656-2>
- Batchuluun, G., Kang, J.K., Nguyen, D.T., Pham, T.D., Arsalan, M., Park, K.R., 2021. *Deep Learning-Based Thermal Image Reconstruction and Object Detection*. *IEEE Access* 9, 5951–5971. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3048437>
- Bayomi, N., Nagpal, S., Rakha, T., Fernandez, J.E., 2021. *Building envelope modeling calibration using aerial thermography*. *Energy Build.* 233, 110648.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110648>
- Bleisch, S., 2023. *Wärmedurchblick mit dem ThermoPlaner3D*. *Bull. Electrosuisse* 49–51.
- Brown, T., 2009. *CHANGE BY DESIGN*, Bloomberg businessweek (Online). Bloomberg Finance LP, New York.
- Bundesamt für Energie (BFE), 2023. *Gebäudepark 2050 – Vision des BFE*. BFE, Bern.
- Bundesamt für Energie (BFE), 2022. *Energiegerecht sanieren - Ratgeber für Bauherrschaften*. BFE, Bern.
- Bundesamt für Landestopografie (swisstopo), 2024. *swissBUILDINGS3D 3.0 Beta* [WWW Document]. URL <https://www.swisstopo.admin.ch/de/landschaftmodell-swissbuildings3d-3-0-beta> (accessed 3.24.24).
- Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2020. *Das Gebäudeprogramm von Bund und Kantonen* [WWW Document]. URL <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-klima/klimawandel-stoppen-und-folgen-meistern/schweizer-klimapolitik/gebaeude/das-gebaeudeprogramm-von-bund-und-kantonen.html> (accessed 10.1.23).
- Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2018. *Klimapolitik der Schweiz - Umsetzung des Übereinkommens von Paris (No. UI-1803-D)*, Umwelt-Info. BAFU, Bern.
- Clarivate, 2024. *The Clarivate Analytics Impact Factor* [WWW Document]. Web Sci. Group. URL <https://clarivate.com/webofsciencegroup/essays/impact-factor/> (accessed 5.24.24).
- Dabetwar, S., Kulkarni, N.N., Angelosanti, M., Niezrecki, C., Sabato, A., 2022. *Sensitivity analysis of unmanned aerial vehicle-borne 3D point cloud reconstruction from infrared images*. *J. Build. Eng.* 58, 105070. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105070>
- Dabetwar, S., Padhye, R., Kulkarni, N.N., Niezrecki, C., Sabato, A., 2023. *Performance evaluation of deep learning algorithms for heat loss damage classification in buildings from UAV-borne infrared images*. *J. Build. Eng.* 75, 106948.  
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106948>
- Dainton, N., Huber, M., Scholtes, L., 2023. *Wegleitung Master-Thesis Studiengang Master of Science FHNW in Virtual Design and Construction (MSc FHNW VDC) Durchführung ab HS2023*.

- Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), 2021. Energiehaushalt: Erst sortieren, dann sanieren. EMPA, Dübendorf.
- Elsevier, 2024a. Automation in Construction [WWW Document]. URL <https://www.sciencedirect.com/journal/automation-in-construction/about/insights> (accessed 5.24.24).
- Elsevier, 2024b. Energy and Buildings [WWW Document]. URL <https://www.sciencedirect.com/journal/energy-and-buildings/about/insights> (accessed 5.24.24).
- Google, 2024. About Google Scholar [WWW Document]. URL <https://scholar.google.com/intl/de/scholar/about.html> (accessed 5.24.24).
- Heil, E.A., 2021. *Methode der Systematischen Literaturrecherche*, Justus-Liebig-Universität Giessen.
- Helfferich, C., 2011. *Die Qualität qualitativer Daten: Manual für die Durchführung qualitativer Interviews*, 4. Auflage. ed, Lehrbuch. VS, Verl. für Sozialwiss, Wiesbaden.
- Hochschule Luzern (HSLU), 2022. Gebäudetechnik und Energie IGE - Forschung [WWW Document]. Hochsch.-Luzern. URL <https://www.hslu.ch/de-ch/technik-architektur/ueberuns/organisation/kompetenzzentren-und-forschungsgruppen/bau/gebaeudetechnik-und-energie/> (accessed 5.24.24).
- Hochschule Luzern, I. für G. und E.I., 2024. *Thermografieaufnahmen*.
- Hou, Y., Volk, R., Chen, M., Soibelman, L., 2021. *Fusing tie points' RGB and thermal information for mapping large areas based on aerial images: A study of fusion performance under different flight configurations and experimental conditions*. Autom. Constr. 124, 103554. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103554>
- Institut Geomatik (IGEO) - Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), 2023. ThermoPlaner3D [WWW Document]. FHNW. URL <https://www.fhnw.ch/de/die-fhnw/hochschulen/architektur-bau-geomatik/institute/institut-geomatik/forschung/thermoplaner3d> (accessed 8.30.23).
- Köhler, C., 2020. *Basiswerkzeuge zur Erstellung wissenschaftlicher Arbeiten: Starthilfen und Tools zur praktischen Umsetzung*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-31238-1>
- Lewrick, M., Link, P., Leifer, L.J., 2018. *The design thinking playbook: mindful digital transformation of teams, products, services, businesses and ecosystems*. Wiley, Hoboken, New Jersey.
- Mahmoodzadeh, M., Gretka, V., Mukhopadhyaya, P., 2023. *Challenges and opportunities in quantitative aerial thermography of building envelopes*. J. Build. Eng. 69, 106214. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106214>
- Maier, J., 2012. *Handbuch Historisches Mauerwerk*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-25468-0>
- Mayer, Z., Kahn, J., Hou, Y., Götz, M., Volk, R., Schultmann, F., 2023. *Deep learning approaches to building rooftop thermal bridge detection from aerial images*. Autom. Constr. 146, 104690. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104690>

- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D.G., 2010. *Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement*. *Int. J. Surg.* 8, 336–341. <https://doi.org/10.1016/j.ijvsu.2010.02.007>
- Motayyeb, S., Samadzedegean, F., Javan, F.D., Hosseinpour, H., 2023. *Fusion of UAV-based infrared and visible images for thermal leakage map generation of building facades*. *Heliyon* 9, e14551. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14551>
- O'Donnell, J., Truong-Hong, L., Boyle, N., Corry, E., Cao, J., Laefer, D.F., 2019. *LiDAR point-cloud mapping of building façades for building energy performance simulation*. *Autom. Constr.* 107, 102905. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102905>
- Papineau, M., Rivers, N., 2022. *Experimental evidence on heat loss visualization and personalized information to motivate energy savings*. *J. Environ. Econ. Manag.* 111, 102558. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2021.102558>
- Person 3, 2024. *Expert/innen-Gespräche*.
- Person 4, 2024. *Expert/innen-Gespräche*.
- Person 5, 2024. *Expert/innen-Gespräche*.
- Person 6, 2024. *Expert/innen-Gespräche*.
- Person 7, 2024. *Expert/innen-Gespräche*.
- Puliti, M., Montaggioli, G., Sabato, A., 2021. *Automated subsurface defects' detection using point cloud reconstruction from infrared images*. *Autom. Constr.* 129, 103829. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103829>
- Rakha, T., Gorodetsky, A., 2018. *Review of Unmanned Aerial System (UAS) applications in the built environment: Towards automated building inspection procedures using drones*. *Autom. Constr.* 93, 252–264. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.002>
- Rakha, T., Masri, Y.E., Chen, K., Panagoulia, E., Wilde, P.D., 2022. *Building envelope anomaly characterization and simulation using drone time-lapse thermography*. *Energy Build.* 259, 111754. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111754>
- Reinders, H., Ditton, H., Gräsel, C., Gniewosz (Hrsg.), B., 2011. *Empirische Bildungsforschung. 2: Strukturen und Methoden*, 1. Aufl. ed. S.I.
- Rüdisser, D., Weiss, T., Unger, L., 2021. *Spatially Resolved Analysis of Urban Thermal Environments Based on a Three-Dimensional Sampling Algorithm and UAV-Based Radiometric Measurements*. *Sensors* 21, 4847. <https://doi.org/10.3390/s21144847>
- Sauer, A., Bauernhansl, T. (Eds.), 2016. *Energieeffizienz in Deutschland - eine Metastudie*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48883-6>
- Schulz, J., 2006. *Architektur der Bauschäden*. Vieweg+Teubner, Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9086-3>
- Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV), 2024. *Die SNV in Kürze [WWW Document]*. URL <https://www.snv.ch/de/ueber-uns/die-snv-in-kuerze.html> (accessed 5.24.24).

- Schweizerische Zentralstelle für Baurationalisierung (CRB), 2024. Normpositionen-Katalog NPK [WWW Document]. URL <https://www.crb.ch/Normen-Standards/Normpositionen/Katalog.html> (accessed 5.24.24).
- Schweizerische Zentralstelle für Baurationalisierung (CRB), 2023a. *Normpositionen-Katalog NPK 112.760 - Prüfung - Holzbau, Fassaden, Deckenbekleidungen, Bodenbeläge und Gebäudehüllen - Prüfung an Gebäudehüllen*, Schweizerische Zentralstelle für Baurationalisierung (CRB).
- Schweizerische Zentralstelle für Baurationalisierung (CRB), 2023b. *Normpositionen-Katalog NPK 112.850- Prüfung - Zustandserfassung und Prüfungen mit speziellen Instrumenten - Zustandserfassung von Holzbauwerken, an Fassaden, Deckenbekleidungen, Bodenbelägen und Gebäudehüllen*, Schweizerische Zentralstelle für Baurationalisierung (CRB).
- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2014. *SIA180 - Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden.pdf*.
- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), 2024. *SIA 180.223 - Verhalten von Gebäuden - Feststellung von wärme-, luft- und feuchtebezogenen Unregelmässigkeiten in Gebäuden durch Infrarotverfahren - Teil 1: Allgemeine Verfahren*.
- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), 2016. *SIA 180.206 - Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden - Differenzdruckverfahren*.
- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), 2014. *SIA 180 - Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden*.
- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), 2011a. *SIA 269/2 - Erhaltung von Tragwerken - Betonbau*.
- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), 2011b. *SIA 269/3 - Erhaltung von Tragwerken - Stahlbau*.
- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), 1997. *SIA 469 - Erhaltung von Bauwerken*.
- ScienceDirect, 2024. ScienceDirect - About [WWW Document]. [www.elsevier.com](http://www.elsevier.com). URL <https://www.elsevier.com/products/sciencedirect> (accessed 2.4.24).
- Shariq, M.H., Hughes, B.R., 2020. *Revolutionising building inspection techniques to meet large-scale energy demands: A review of the state-of-the-art*. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 130, 109979. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109979>
- Stahr, M. (Ed.), 2022. *Bausanierung: Erkennen und Beheben von Bauschäden*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-28148-9>
- Swiss Library Service Platform (SLSP), 2024. *Swisscovery FHNW* [WWW Document]. URL <https://fhnw.swisscovery.slsp.ch> (accessed 5.24.24).
- Verein GEAK, 2023a. *Basisbrochure GEAK*, Verein GEAK.
- Verein GEAK, 2023b. *Was ist der GEAK* [WWW Document]. URL <https://www.geak.ch/der-geak/was-ist-der-geak/> (accessed 10.7.23).

- Wang, R.Y., Strong, D.M., 1996. *Beyond Accuracy: What Data Quality Means to Data Consumers*. J. Manag. Inf. Syst. 12, 5–33. <https://doi.org/10.1080/07421222.1996.11518099>
- Waqas, A., Araj, M.T., 2024. *Machine learning-aided thermography for autonomous heat loss detection in buildings*. Energy Convers. Manag. 304, 118243. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118243>
- Zhang, C., Zou, Y., Dimyadi, J., Chang, R., 2023. *Thermal-textured BIM generation for building energy audit with UAV image fusion and histogram-based enhancement*. Energy Build. 301, 113710. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113710>

## 9.2 Abbildungsverzeichnis

<b>ABB. 1:</b> ECHTFARBAUFNAHME EINES BEHEIZTEN OFENS (HSLU, 2022) .....	14
<b>ABB. 2:</b> THERMOGRAFISCHE FALSCHFARBENAUFNAHME EINES BEHEIZTEN OFENS (HSLU, 2022).....	14
<b>ABB. 3:</b> DURCHFÜHRUNG DER RECHERCHE (EIGENE DARSTELLUNG) .....	18
<b>ABB. 4:</b> DARSTELLUNG UND ERGEBNISSE DER DATENBANKSUCHE (EIGENE DARSTELLUNG) .....	21
<b>ABB. 5:</b> ZEITLICHE ANALYSE DER PUBLIKATION (EIGENE DARSTELLUNG) .....	23
<b>ABB. 6:</b> NÄCHTLICHE, UNKORRIGIERTE AUFNAHME MIT NATIVER BODENAUFÖSUNG VON CA. 7 CM/PIXEL (HSLU, 2024) .....	38
<b>ABB. 7:</b> PHOTOGRAMMETRISCHES THERMALES 3D-MODELL MIT EINER BODENAUFÖSUNG VON CA.7 CM/PIXEL (HSLU, 2024).....	38
<b>ABB. 8:</b> NÄCHTLICHE, UNKORRIGIERTE AUFNAHME MIT EINER BODENAUFÖSUNG VON CA. 25 CM/PIXEL, WIE SIE IM PROJEKT «THERMOPLANER3D» (2023) ERWARTET WIRD (HSLU, 2024) .....	38
<b>ABB. 9:</b> PHOTOGRAMMETRISCHES THERMALES 3D-MODELL MIT EINER BODENAUFÖSUNG VON CA. 25 CM/PIXEL, WIE SIE IM PROJEKT «THERMOPLANER3D» (2023) ERWARTET WIRD (HSLU, 2024) .....	38
<b>ABB. 10:</b> NÄCHTLICHE, UNKORRIGIERTE AUFNAHME VON CA. 50CM/PIXEL WIE SIE IM PROJEKT VON RÜDISSER ET AL. (2021)VERWENDET WIRD (HSLU, 2024) .....	38
<b>ABB. 11:</b> PHOTOGRAMMETRISCHES THERMALES 3D-MODELL MIT EINER BODENAUFÖSUNG VON CA. 50CM/PIXEL WIE SIE IM PROJEKT VON RÜDISSER ET AL. (2021) VERWENDET WIRD (HSLU, 2024) .....	38
<b>ABB. 12:</b> NÄCHTLICHE, UNKORRIGIERTE AUFNAHME VON CA. 50CM/PIXEL AUS GROSSER HÖHE WIE SIE IM PROJEKT VON RÜDISSER ET AL. (2021)VERWENDET WIRD (HSLU, 2024) .....	38
<b>ABB. 13:</b> PHOTOGRAMMETRISCHES THERMALES 3D-MODELL MIT EINER BODENAUFÖSUNG VON CA. 50CM/PIXEL AUS GROSSER HÖHE WIE SIE IM PROJEKT VON RÜDISSER ET AL. (2021) VERWENDET WIRD (HSLU, 2024) .....	38
<b>ABB. 14:</b> LEITFADEN PERSON 3 (SIEHE ANHANG D) .....	40
<b>ABB. 15:</b> MACRO CIRCLE – ITERATIVER PROZESS GEMÄSS LEWRICK ET AL. (EIGENE DARSTELLUNG IN ANLEHNUNG AN (LEWRICK ET AL., 2018)).....	47
<b>ABB. 16:</b> FLUSSDIAGRAMM FÜR DIE ANSPRUCHSGRUPPE "EXPERTEN" (SIEHE ANHANG J).....	48
<b>ABB. 17:</b> LEGENDE DES FLUSSDIAGRAMM (SIEHE ANHANG J).....	49
<b>ABB. 18:</b> AUSSCHNITT TAG 1 AUS FLUSSDIAGRAMM FÜR DIE ANSPRUCHSGRUPPE "EXPERTEN" (SIEHE ANHANG J) ..	49
<b>ABB. 19:</b> AUSSCHNITT TAG 1 AUS FLUSSDIAGRAMM FÜR DIE ANSPRUCHSGRUPPE "EXPERTEN" (SIEHE ANHANG J) ..	50
<b>ABB. 20:</b> AUSSCHNITT NACHT 1 AUS FLUSSDIAGRAMM FÜR DIE ANSPRUCHSGRUPPE "EXPERTEN" (SIEHE ANHANG J) .....	51
<b>ABB. 21:</b> AUSSCHNITT NACHT 1 AUS FLUSSDIAGRAMM FÜR DIE ANSPRUCHSGRUPPE "EXPERTEN" (SIEHE ANHANG J) .....	51
<b>ABB. 22:</b> AUSSCHNITT NACHT 1 AUS FLUSSDIAGRAMM FÜR DIE ANSPRUCHSGRUPPE "EXPERTEN" (SIEHE ANHANG J) .....	52
<b>ABB. 23:</b> AUSSCHNITT NACHT 1 AUS FLUSSDIAGRAMM FÜR DIE ANSPRUCHSGRUPPE "EXPERTEN" (SIEHE ANHANG J) .....	53
<b>ABB. 24:</b> FLUSSDIAGRAMM FÜR DIE ANSPRUCHSGRUPPE "KOMMUNEN" (SIEHE ANHANG J) .....	54
<b>ABB. 25:</b> NATIVE TEXTUR VON RHINO SOWIE EINE VOM AUTOR BEREITS AUFBEREITETER TEXTUR. ....	57
<b>ABB. 26:</b> AUSSCHNITT EINES PHOTOGRAMMETRISCHEN MODELLS AUS THERMALAUFNAHMEN (BLESICH, 2024) .....	58
<b>ABB. 27:</b> AUSSCHNITT AUS DER DREIDIMENSIONALEN DARSTELLUNG IM GEPLANTEN ENERGIEPORTAL (EIGENE DARSTELLUNG).....	58
<b>ABB. 28:</b> ÜBERSICHT LIEGENSCHAFTAUSWERTUNG (EIGENE DARSTELLUNG AUS MICROSOFT POWERAPP) .....	58
<b>ABB. 29:</b> EINGABEMASKE FÜR DATEN DURCH NUTZENDEN (EIGENE DARSTELLUNG AUS MICROSOFT POWERAPP)....	59

### 9.3 Tabellenverzeichnis

<b>TABELLE 1:</b> TYPUS DER MASTERTHESIS (EIGENE DARSTELLUNG IN ANLEHNUNG AN (DAINTON ET AL., 2023).....	5
<b>TABELLE 2:</b> VORGEHEN BEI DER SYSTEMATISCHEN LITERATURRECHERCHE (EIGENE DARSTELLUNG IN ANLEHNUNG AN (HEIL, 2021)).....	17
<b>TABELLE 3:</b> SUCHKOMponentEN (EIGENE DARSTELLUNG).....	19
<b>TABELLE 4:</b> SUCHSTRINGS (EIGENE DARSTELLUNG) .....	20
<b>TABELLE 5:</b> THEMATISCHE INHALTE DER LITERATUR (EIGENE DARSTELLUNG).....	22
<b>TABELLE 6:</b> AUFLISTUNG DER PERSONENAUSWAHL UND IHRE EIGNUNG (EIGENE DARSTELLUNG) .....	33
<b>TABELLE 7:</b> AUFLISTUNG DER HAUPTDIMENSIONEN DER DATENQUALITÄT (EIGENE DARSTELLUNG IN ANLEHNUNG AN (WANG & STRONG, 1996) .....	35
<b>TABELLE 8:</b> AUFLISTUNG DER DATENQUALITÄT (EIGENE DARSTELLUNG IN ANLEHNUNG AN (WANG & STRONG, 1996)) .....	35
<b>TABELLE 9:</b> VORGEHENSWEISE NACH DEM SPSS-PRINZIP (EIGENE DARSTELLUNG) (HELFFERICH, 2011) .....	39
<b>TABELLE 10:</b> SCHWERPUNKT DER INFORMATIONSANFORDERUNGEN NACH GRUPPEN (EIGENE DARSTELLUNG) .....	42

## 10 Anhang

ANHANG A:	ANALYSE LITERATURVERZEICHNIS – STAND DER FORSCHUNG .....	78
ANHANG B:	SPSS-SAMMELN .....	83
ANHANG C:	SPSS-PRÜFEN & SORTIEREN .....	84
ANHANG D:	SPSS-SUBSUMMIEREN (GESPRÄCH-LEITFADEN) – PERSON 3 .....	92
ANHANG E:	SPSS-SUBSUMMIEREN (GESPRÄCH-LEITFADEN) – PERSON 4 .....	93
ANHANG F:	SPSS-SUBSUMMIEREN (GESPRÄCH-LEITFADEN) – PERSON 5 .....	95
ANHANG G:	SPSS-SUBSUMMIEREN (GESPRÄCH-LEITFADEN) – PERSON 6 .....	97
ANHANG H:	SPSS-SUBSUMMIEREN (GESPRÄCH-LEITFADEN) – PERSON 7 .....	99
ANHANG I:	KRITERIEN DER INFORMATIONSGUALITÄT .....	101
ANHANG J:	THERMALAUFNAHME 7CM/PIXEL .....	102
ANHANG K:	THERMALAUFNAHME 25CM/PIXEL .....	103
ANHANG L:	THERMALAUFNAHME 50CM/PIXEL .....	104
ANHANG M:	THERMALAUFNAHME 50CM/PIXEL AUS GROSSER HÖHE .....	105
ANHANG N:	AUSSCHNITT AUS DEM PHOTOGRAMMETRISCHEN MODELL 7 CM/PIXEL .....	106
ANHANG O:	AUSSCHNITT AUS DEM PHOTOGRAMMETRISCHEN MODELL 25CM/PIXEL .....	107
ANHANG P:	AUSSCHNITT AUS DEM PHOTOGRAMMETRISCHEN MODELL 50CM/PIXEL .....	108
ANHANG Q:	AUSSCHNITT AUS DEM PHOTOGRAMMETRISCHEN MODELL 50CM/PIXEL AUS GROSSER HÖHE.....	109
ANHANG R:	ZUSAMMENFASSUNGEN EXPERT/INNEN-GESPRÄCHE PERSON 3 (2024) .....	110
ANHANG S:	ZUSAMMENFASSUNGEN EXPERT/INNEN-GESPRÄCHE PERSON 4 (2024) .....	112
ANHANG T:	ZUSAMMENFASSUNGEN EXPERT/INNEN-GESPRÄCHE PERSON 5 (2024) .....	114
ANHANG U:	ZUSAMMENFASSUNGEN EXPERT/INNEN-GESPRÄCHE PERSON 6 (2024) .....	116
ANHANG V:	ZUSAMMENFASSUNGEN EXPERT/INNEN-GESPRÄCHE PERSON 7: (2024) .....	118
ANHANG W:	FLUSSDIAGRAMM ANSPRUCHSGRUPPE "EXPERTEN" .....	120
ANHANG X:	FLUSSDIAGRAMM ANSPRUCHSGRUPPE "KOMMUNEN" .....	121
ANHANG Y:	SWIMLANE-DIAGRAMM .....	122
ANHANG Z:	KLASSENDIAGRAMM .....	125
ANHANG AA:	VERWENDETE HILFSMITTEL .....	126

**ANHANG A: Analyse Literaturverzeichnis – Stand der Forschung**

Übersicht der untersuchten Publikationen mit der jeweiligen Berücksichtigung zur Eignung, Auswahl und Dokumentation.

Autoren / Jahr	Titel	Publikationstitel	Stichworte	Zusammenfassung und Relevanz	Eignung	Schlagworte Gesamt	Anzahl Schlagworte Kategorie be-reinigt
(Puliti et al., 2021)	Automated subsurface defects' detection using point cloud reconstruction from infrared images	Automation in Construction	Automatic detection; Energy efficiency; Infrared thermography; Non-destructive evaluation; Photogrammetry; Structure from motion	<p>Diese Studie präsentiert eine effektive Methode zur automatischen Erkennung von Untergrunddefekten durch die Rekonstruktion von Punktwolken aus Infrarotbildern. Die Autoren nutzen UAV-gestützte Thermografie, um präzise dreidimensionale Modelle von Gebäudeoberflächen zu erstellen und thermische Anomalien zu identifizieren. Die Ergebnisse beweisen, dass die Methode Untergrunddefekte präzise erkennt und die Integrität von Gebäudehüllen zuverlässig bewertet. Diese Technik ist die ideale Lösung, um verborgene Schäden zu identifizieren und die Instandhaltung von Gebäuden zu optimieren.</p> <p><u>Relevanz für die Masterarbeit:</u> Rekonstruktion von Punktwolken aus Infrarotbildern. Automatische Erkennung von Untergrunddefekten. Verbesserung der Gebäudezustandsbewertung.</p>	01	2	4
(Rakha et al., 2022)	Building envelope anomaly characterization and simulation using drone time-lapse thermography	Energy and Buildings	Defects; Envelope; Simulation; Thermal Imaging; Unmanned Aerial Systems (UAS)	<p>Diese Arbeit zeigt, wie Anomalien in Gebäudehüllen mittels zeitlich gestaffelter Thermografie mit Drohnen charakterisiert und simuliert werden können. Die Autoren entwickeln ein Verfahren, mit dem umfassende thermische Profile von Gebäudehüllen erstellt werden können. Dazu sammeln und analysieren sie zeitlich gestaffelte Infrarotdaten. Die Ergebnisse zeigen, dass diese Methode präzise Anomalien identifizieren und die Energieeffizienz von Gebäuden verbessern kann. Die Autoren unterstreichen die Bedeutung zeitlich gestaffelter Thermografie für eine präzise Zustandsbewertung und die Planung von Renovierungsmassnahmen.</p> <p><u>Relevanz für die Masterarbeit:</u> Nutzung zeitlich gestaffelter Thermografie. Erstellung umfassender thermischer Profile. Verbesserung der Energieeffizienz durch präzise Anomalie Erkennung.</p>	01	4	4
(Bayomi et al., 2021)	Building envelope modeling calibration using aerial thermography	Energy and Buildings	Building envelope; Energy modelling; Built environment; Building simulation; Infrared imaging; Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)	<p>Diese Studie zeigt, wie man Gebäudemodelle mittels Luftthermografie kalibrieren kann. Die Autoren haben eine Methode entwickelt, mit der sich die U-Werte von Gebäudehüllen automatisch schätzen und verifizieren lassen. Dazu verwenden sie Drohnen mit Thermografie-Sensoren. Als Fallstudie haben sie ein renoviertes Campusgebäude in Boston herangezogen, um Materialverschlechterung, thermische Brücken und Isolationsfehler zu analysieren. Die Ergebnisse beweisen, dass die Kalibrierung der Modelle die Genauigkeit der Energiesimulationen erheblich verbessert und somit die Planung von Renovierungsmassnahmen massgeblich unterstützt.</p> <p><u>Relevanz für die Masterarbeit:</u> Kalibrierung von Gebäudemodellen. Nutzung von Luftthermografie zur Datenerhebung. Verbesserung der Genauigkeit von Energiesimulationen.</p>	01	3	3

Autoren / Jahr	Titel	Publikationstitel	Stichworte	Zusammenfassung und Relevanz	Eignung	Schlagworte Gesamt	Anzahl Schlagworte Kategorie bereinigt
(Dabetwar et al., 2022)	Sensitivity analysis of unmanned aerial vehicle-borne 3D point cloud reconstruction from infrared images	Journal of Building Engineering	Computer vision; Energy efficiency; Infrared thermography; Nondestructive testing; Point cloud reconstruction; Structure from motion	<p>Diese Arbeit untersucht die Sensitivitätsanalyse der 3D-Punktwolkenrekonstruktion aus Infrarotbildern, die von UAVs aufgenommen wurden. Die Autoren analysieren die Einflussfaktoren auf die Genauigkeit der Punktwolkenmodelle, einschliesslich Flugparameter, Umweltbedingungen und Bildverarbeitungstechniken. Die Ergebnisse zeigen eindeutig, dass bestimmte Parameter wie Fluggeschwindigkeit, Höhe und Bildauflösung die Genauigkeit der rekonstruierten Modelle erheblich beeinflussen. Die Autoren empfehlen deshalb dringend, die Datenerfassungs- und Verarbeitungsmethodik zu optimieren, um die Genauigkeit der Modelle zu verbessern.</p> <p><u>Relevanz für die Masterarbeit:</u> Sensitivitätsanalyse der Punktwolkenrekonstruktion. Einfluss von Flugparametern und Umweltbedingungen. Verbesserung der Genauigkeit thermischer Modelle.</p>	01	2	4
(Hou et al., 2021)	Fusing tie points' RGB and thermal information for mapping large areas based on aerial images: A study of fusion performance under different flight configurations and experimental conditions	Automation in Construction	Data fusion; Large scale photogrammetry; Thermal mapping; Tie points; UAS data collection	<p>Dieses Paper untersucht die Fusion von RGB- und thermischen Informationen aus Luftbildern zur Erstellung von Karten grosser Gebiete. Ziel ist es, die Leistungsfähigkeit dieser Fusion unter verschiedenen Flugkonfigurationen und experimentellen Bedingungen zu bewerten. Dabei werden insbesondere die Herausforderungen der präzisen Ausrichtung und Integration von Daten unterschiedlicher Sensoren beleuchtet, um eine kohärente und zuverlässige Kartierung zu ermöglichen. Die Studie verwendet UAVs, die mit RGB- und Wärmebildkameras ausgestattet sind, und führt mehrere Testflüge in unterschiedlichen Höhen, Geschwindigkeiten und Wetterbedingungen durch. Die Daten werden anschliessend mit Punktfusionsalgorithmen verarbeitet, um die Genauigkeit und Qualität der kombinierten Karten zu bewerten. Ein zentraler Aspekt der Untersuchung ist die Korrektur von Verzerrungen und anderen Störungen, die durch unterschiedliche Flugbedingungen entstehen können. Die Ergebnisse zeigen eindeutig, dass eine präzise Synchronisation und Kalibrierung der Sensoren entscheidend für die Qualität der fusionierten Daten ist. Unter idealen Bedingungen konnten hochpräzise Karten erstellt werden, die sowohl thermische als auch visuelle Informationen nahtlos integrierten. Unter ungünstigeren Bedingungen, wie z. B. starkem Wind oder hohen Geschwindigkeiten, nahm die Fusionsgenauigkeit jedoch ab. Das zeigt, dass wir robustere Algorithmen benötigen, die auch unter suboptimalen Bedingungen zuverlässige Ergebnisse liefern.</p> <p><u>Relevanz für die Masterarbeit:</u> Integration von RGB- und Wärmebilddaten zur Gebäudezustandserfassung Herausforderungen und Lösungen zur Korrektur von Datenverzerrungen Einfluss der Flugbedingungen auf die Qualität der erfassten Daten</p>	01	1	4

Autoren / Jahr	Titel	Publikationstitel	Stichworte	Zusammenfassung und Relevanz	Eignung	Schlagworte Gesamt	Anzahl Schlagworte Kategorie be-reinigt
(Motayyeb et al., 2023)	Fusion of UAV-based infrared and visible images for thermal leakage map generation of building facades	Heliyon	Fusion; Improving energy efficiency; Point cloud; Region-based segmentation; Thermal leakage; UAV	<p>Diese Arbeit zeigt, wie Infrarot- und sichtbare Bilder von UAVs fusioniert werden können, um Karten von Wärmelecks an Gebäudeoberflächen zu erstellen. Ziel ist es, eine effiziente Methode zu entwickeln, mit der Wärmeverluste an Fassaden identifiziert und visualisiert werden können, um die energetische Sanierung von Gebäuden zu unterstützen. Die Studie verwendet Drohnen, die sowohl mit Infrarot- als auch mit visuellen Kameras ausgestattet sind. Durch die Fusion der beiden Bildtypen können detaillierte Karten erstellt werden, die sowohl die strukturellen Merkmale der Fassaden als auch die Wärmeverluste darstellen. Ein wesentlicher Bestandteil der Methodik ist die Kalibrierung der Kameras und die Synchronisation der Bilddaten. Dadurch können wir eine präzise Überlagerung der Infrarot- und der sichtbaren Informationen gewährleisten. Die Ergebnisse zeigen, dass die fusionierten Karten eine hohe Genauigkeit bei der Identifizierung von Wärmeverlusten bieten. Die Methode ermöglicht es uns, auch kleine Wärmeverluste zu erkennen. Damit können wir gezielte Sanierungsmassnahmen durchführen. Darüber hinaus muss diskutiert werden, wie diese Technik grossflächig eingesetzt werden kann, um städtische Gebiete systematisch zu analysieren und energetisch zu optimieren.</p> <p><u>Relevanz für die Masterarbeit:</u> Einsatz der Bildfusion zur detaillierten Analyse von Gebäudezuständen Kalibrierung und Synchronisation der Kameradaten zur Erhöhung der Genauigkeit Anwendung der Technologie zur energetischen Sanierung von Gebäuden</p>	01	1	4
(Dabetwar et al., 2023)	Performance evaluation of deep learning algorithms for heat loss damage classification in buildings from UAV-borne infrared images	Journal of Building Engineering	Unmanned aerial vehicles; Deep learning; Sensitivity analysis; Heat loss classification; Infrared images; Transfer learning	<p>Diese Arbeit untersucht die Leistungsfähigkeit von Deep-Learning-Algorithmen zur Klassifikation von Wärmeverlustschäden an Gebäuden anhand von UAV-Infrarotbildern. Die Autoren analysieren verschiedene Algorithmen, darunter Convolutional Neural Networks (CNNs) und Recurrent Neural Networks (RNNs), um deren Genauigkeit und Effizienz bei der Erkennung und Klassifizierung von Wärmeverlusten zu bewerten. UAV-gestützte Thermografie ist eine effektive Methode zur Erfassung thermischer Daten von Gebäudefassaden. Diese Daten sind für die Energieeffizienz und Schadensbewertung von Gebäuden von entscheidender Bedeutung. Die Ergebnisse zeigen, dass CNNs eine hohe Genauigkeit bei der Klassifizierung von Wärmeverlusten aufweisen. RNNs hingegen sind besser in der Lage, zeitliche Muster in den Daten zu erkennen. Die Autoren empfehlen deshalb die Integration von UAV-basierter Thermografie und Deep-Learning-Algorithmen in bestehende Gebäudeüberwachungs- und Wartungssysteme. Dadurch lässt sich die Energieeffizienz verbessern und Kosten können gesenkt werden.</p> <p><u>Relevanz für die Masterarbeit:</u> Untersuchung von Methoden zur Korrektur thermischer Daten. Anwendung von Deep Learning zur Klassifizierung von Gebäudeschäden. Einsatz von UAV-basierter Thermografie zur Datenerfassung.</p>	02	2	4

Autoren / Jahr	Titel	Publikationstitel	Stichworte	Zusammenfassung und Relevanz	Eignung	Schlagworte Gesamt	Anzahl Schlagworte Kategorie be-reinigt
(Mahmoodzadeh et al., 2023)	Challenges and opportunities in quantitative aerial thermography of building envelopes	Journal of Building Engineering	Aerial thermography; Drone; Dynamic IRT; Microbolometer; Quantitative; Stabilization; Stationary IRT; UAV; Wind	<p>Dieses Paper behandelt die Herausforderungen und Chancen der quantitativen Luftthermografie zur Bewertung von Gebäudehüllen. Es wird untersucht, wie UAVs mit Infrarotkameras zur Erfassung thermischer Daten eingesetzt werden können und welche wissenschaftlichen Gründe zu Messabweichungen zwischen dynamischer und stationärer Thermografie führen. Labor- und Feldexperimente beweisen, dass die durch die Propeller verursachte Konvektion die Stabilisierung des Microbolometers und damit die Messgenauigkeit beeinflusst. Das Paper präsentiert praktische Ansätze, um Fehlerquellen zu minimieren, einschliesslich des Einsatzes von Abschirmungen um die Kamera. Diese Erkenntnisse helfen Herstellern, die Grenzen der aktuellen IR-Kameratechnologie zu verstehen und robustere Thermografie-Protokolle zu entwickeln.</p> <p><u>Relevanz für die Masterarbeit:</u> Analyse der Herausforderungen und Chancen der UAV-gestützten Thermografie. Praktische Ansätze zur Minimierung von Messfehlern. Verbesserung der Genauigkeit thermischer Daten für die Gebäudezustandsbewertung.</p>	02	4	4
(Shariq & Hughes, 2020)	Revolutionising building inspection techniques to meet large-scale energy demands: A review of the state-of-the-art	Renewable and Sustainable Energy Reviews	Infrared thermography; Building energy audit; Photogrammetry; Building inspection; Drone 3D mapping; Real-time thermal modelling	<p>Diese Übersichtsarbeit präsentiert eine umfassende Untersuchung moderner Inspektionstechniken für Gebäude, die entwickelt wurden, um den steigenden Energieanforderungen gerecht zu werden. Der Schwerpunkt liegt auf der Integration fortschrittlicher Technologien wie UAVs, Infrarotthermografie und maschinellem Lernen in Inspektionsprozesse. Die Autoren zeigen die Vorteile und Herausforderungen dieser Technologien auf und erläutern, wie sie zur Verbesserung der Energieeffizienz und zur Reduzierung von Betriebskosten beitragen können. Dabei betonen sie, wie wichtig es ist, die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der erfassten Daten zu erhöhen, um fundierte Entscheidungen über Gebäuderenovierungen und -instandhaltung treffen zu können.</p> <p><u>Relevanz für die Masterarbeit:</u> Überblick über moderne Inspektionstechniken. Diskussion der Integration von UAVs und Thermografie. Verbesserung der Datenqualität für energieeffiziente Renovierungen.</p>	02	4	4
(Zhang et al., 2023)	Thermal-textured BIM generation for building energy audit with UAV image fusion and histogram-based enhancement	Energy and Buildings	3D thermal model; Building Information Model (BIM); Energy retrofit; Image fusion; Image-to-BIM registration; Infrared thermography; Unmanned Aerial Vehicle (UAV)	<p>In dieser Studie präsentieren wir ein Verfahren zur Erstellung von Building Information Models (BIM) basierend auf thermischen Texturen, die durch die Fusion von UAV-Bildern und einer histogrammbasierten Verbesserung erzeugt wurden. Unser Verfahren ermöglicht eine detaillierte Energieprüfung von Gebäuden, indem thermische Anomalien und Wärmeverluste in BIM integriert werden. Die Autoren beweisen, dass die Kombination von UAV-Thermografie und Bildverarbeitungsalgorithmen die Genauigkeit und Effizienz von Energieaudits erheblich verbessert. Die Ergebnisse zeigen deutlich, wie wichtig die präzise Erfassung und Analyse thermischer Daten für die Zustandsbewertung und Energieoptimierung von Gebäuden ist.</p> <p><u>Relevanz für die Masterarbeit:</u> Erstellung thermisch texturierter BIMs. Nutzung von UAV-Bildfusion zur Datenerhebung. Verbesserung der Energieaudits durch präzise thermische Daten.</p>	02	2	4

Autoren / Jahr	Titel	Publikationstitel	Stichworte	Zusammenfassung und Relevanz	Eignung	Schlagworte Gesamt	Anzahl Schlagworte Kategorie be-reinigt
(Waqas & Araji, 2024)	Machine learning-aided thermography for autonomous heat loss detection in buildings	Energy Conversion and Management	Thermography; Façade heat loss; Quantitative heat flow modeling; Thermal anomalies; YOLOv7	<p>Diese Arbeit zeigt, wie maschinelles Lernen die Thermografie bei der autonomen Erkennung von Wärmeverlusten in Gebäuden unterstützt. Die Autoren entwickeln ein System, das UAV-gestützte Thermografie mit maschinellen Lernalgorithmen kombiniert, um Wärmeverluste automatisch zu erkennen und zu klassifizieren. Die Ergebnisse beweisen, dass das System in der Lage ist, Wärmeverluste exakt zu identifizieren und potenzielle Problembereiche in Gebäudehüllen zu lokalisieren. Die Autoren betonen die Vorteile der Automatisierung und der Genauigkeit der Datenerfassung, die durch maschinelles Lernen erzielt werden können.</p> <p><u>Relevanz für die Masterarbeit:</u> Kombination von Thermografie und maschinellem Lernen. Automatisierte Erkennung von Wärmeverlusten. Verbesserung der Genauigkeit thermischer Inspektionen.</p>	02	2	3
(Rakha & Gorodetsky, 2018)	Review of Unmanned Aerial System (UAS) applications in the built environment: Towards automated building inspection procedures using drones	Automation in Construction	Building inspection; Energy audit; Retrofitting; Thermography; Unmanned Aerial System (UAS)	<p>Diese Übersichtsarbeit zeigt auf, wie unbemannten Luftfahrzeugsysteme (UAS) im Bauwesen eingesetzt werden können und wie sich automatisierte Inspektionsverfahren mit Drohnen entwickeln lassen. Die Autoren analysieren die aktuellen Einsatzmöglichkeiten von UAS zur Gebäudebewertung, einschliesslich Thermografie, Photogrammetrie und Schadensdiagnose. Sie diskutieren die Vorteile und Herausforderungen der Integration von UAS in Inspektionsprozesse und betonen die Notwendigkeit standardisierter Protokolle und Methoden zur Verbesserung der Datengenauigkeit und Effizienz.</p> <p><u>Relevanz für die Masterarbeit:</u> Überblick über UAS-Anwendungen im Bauwesen. Automatisierte Inspektionsverfahren. Standardisierung von Protokollen zur Datenverbesserung.</p>	02	3	3
(Mayer et al., 2023)	Deep learning approaches to building rooftop thermal bridge detection from aerial images	Automation in Construction	Computer vision; Deep learning; Object detection; Building analysis; Drones; Thermal bridges	<p>Dieses Paper zeigt, wie Deep-Learning-Ansätze zur automatisierten Erkennung von Wärmebrücken auf Gebäudedächern anhand von Luftaufnahmen eingesetzt werden können. Die Autoren entwickeln und evaluieren mehrere neuronale Netzwerke, um die Erkennung und Klassifizierung von thermischen Anomalien auf Dächern zu verbessern. Dadurch lassen sich Energieverluste und potenzielle Bauschäden schneller erkennen.</p> <p>Die Studie verwendet ein umfangreiches Datenset, das RGB-, thermische und Höheninformationen enthält. Verschiedene neuronale Netzwerke, darunter MaskRCNN, Swin-Transformer und TridentNet, werden auf diesen Daten trainiert und getestet. Ein besonderer Fokus liegt auf der Vorverarbeitung der Daten, um die Genauigkeit der Modelle zu maximieren, sowie auf der Analyse der Leistung der Modelle unter verschiedenen Bedingungen.</p> <p>Die Ergebnisse zeigen klar, dass vortrainierte Modelle, insbesondere der Swin-Transformer, eine herausragende Genauigkeit bei der Erkennung von Wärmebrücken aufweisen. Die Verwendung von Höheninformationen ist ein entscheidender Faktor für die Präzision der Detektionen. Die Studie unterstreicht die Bedeutung grosser, gut annotierter Datensätze und weist auf zukünftige Verbesserungsmöglichkeiten hin, wie beispielsweise die Erweiterung der Trainingsdaten und die Integration zusätzlicher Sensorinformationen.</p> <p><u>Relevanz für die Masterarbeit:</u> Einsatz von Deep Learning zur Erkennung von Wärmebrücken Bedeutung von gut annotierten Datensätzen für die Modellgenauigkeit. Integration von Höheninformationen zur Verbesserung der Erkennungsergebnisse</p>	02	2	3



**ANHANG C: SPSS-Prüfen & Sortieren**

Nr.	Kategorie	Frage	Eignung	Person 3	Person 4	Person 5	Person 7	Person 6
1	Gebäudezustandsermittlung	Welche Methoden zur Ermittlung des Gebäudezustands werden derzeit als am effektivsten erachtet?	✓					
2	Gebäudezustandsermittlung	Welche Vor- und Nachteile haben diese Methoden?	✓					
3	Gebäudezustandsermittlung	Wie unterscheiden sich diese Methoden in ihrer Anwendung bei verschiedenen Gebäudetypen?	✓					
4	Gebäudezustandsermittlung	Welche normierten Verfahren werden am häufigsten eingesetzt?	✓					
5	Gebäudezustandsermittlung	Wie schneiden nicht-normierte Verfahren im Vergleich zu normierten Verfahren ab?						
6	Gebäudezustandsermittlung	Wie wird die Zuverlässigkeit luftgestützter thermografischer Aufnahmen im Vergleich zu bodengestützten Systemen bewertet?	✓					
7	Gebäudezustandsermittlung	Welche spezifischen Herausforderungen bestehen bei der Kalibrierung und Interpretation der Daten?	✓					
8	Gebäudezustandsermittlung	Wie beeinflusst die Auflösung der Aufnahmen die Zuverlässigkeit?	✓					
9	Gebäudezustandsermittlung	Welche normativen Anforderungen müssen bei der Kalibrierung und Interpretation der Daten berücksichtigt werden?						
10	Gebäudezustandsermittlung	Gibt es spezifische Standards für die Durchführung und Auswertung dieser Aufnahmen?	✓					
11	Gebäudezustandsermittlung	Welche Herausforderungen bestehen bei der flächendeckenden Erfassung des Gebäudezustands in städtischen Gebieten?	✓					
12	Gebäudezustandsermittlung	Welche technologischen oder logistischen Hindernisse müssen überwunden werden?	✓					
13	Gebäudezustandsermittlung	Inwiefern spielen rechtliche und regulatorische Rahmenbedingungen eine Rolle?	✓					
14	Gebäudezustandsermittlung	Welche normativen Vorgaben gelten für die Erfassung in dicht besiedelten Gebieten?	✓					
15	Gebäudezustandsermittlung	Wie können normative Anforderungen die Durchführung solcher Erfassungen beeinflussen?						
16	Gebäudezustandsermittlung	Welche Rolle spielen thermische Schrägbildaufnahmen bei der Identifikation energetischer Schwachstellen?						
17	Gebäudezustandsermittlung	Welche spezifischen Schwachstellen können durch diese Methode am effektivsten identifiziert werden?						
18	Gebäudezustandsermittlung	Wie kann die Genauigkeit der identifizierten Schwachstellen überprüft werden?	✓					
19	Gebäudezustandsermittlung	Inwiefern berücksichtigen bestehende Normen die Nutzung von Schrägbildaufnahmen?	✓					
20	Gebäudezustandsermittlung	Welche Standards existieren zur Validierung der durch Schrägbildaufnahmen identifizierten Schwachstellen?						
21	Gebäudezustandsermittlung	Wie wichtig sind hochauflösende Aufnahmen im Vergleich zu gering aufgelösten Aufnahmen für die Zustandsanalyse?	✓					
22	Gebäudezustandsermittlung	In welchen Situationen sind hochauflösende Aufnahmen unerlässlich?	✓					

Nr.	Kategorie	Frage	Eignung	Person 3	Person 4	Person 5	Person 7	Person 6
23	Gebäudezustandsermittlung	Welche Kompromisse müssen bei der Nutzung von gering aufgelösten Aufnahmen eingegangen werden?	✓					
24	Gebäudezustandsermittlung	Welche normativen Anforderungen existieren bezüglich der Auflösung von Thermografie-Aufnahmen?						
25	Thermografie-basierte Methoden	Welche Vorteile bieten thermografische Schrägbildaufnahmen gegenüber herkömmlichen Nadirbildern?	✓					
26	Thermografie-basierte Methoden	Welche zusätzlichen Informationen können durch Schrägbildaufnahmen gewonnen werden?	✓					
27	Thermografie-basierte Methoden	Wie beeinflusst der Aufnahmewinkel die Datenqualität?	✓					
28	Thermografie-basierte Methoden	Welche normativen Vorgaben beeinflussen die Nutzung dieser Methoden?						
29	Thermografie-basierte Methoden	Wie könnten bestehende Thermografie-Methoden an neue luftgestützte Systeme angepasst werden?	✓					
30	Thermografie-basierte Methoden	Welche Anpassungen sind notwendig, um die Datenintegration zu verbessern?	✓					
31	Thermografie-basierte Methoden	Welche neuen Herausforderungen entstehen durch den Einsatz luftgestützter Systeme?	✓					
32	Thermografie-basierte Methoden	Welche normativen Anpassungen sind erforderlich, um neue luftgestützte Systeme zu integrieren?						
33	Thermografie-basierte Methoden	Inwiefern unterscheiden sich die thermischen Charakteristika von Fassaden und Dächern bei der Analyse?	✓					
34	Thermografie-basierte Methoden	Welche spezifischen Herausforderungen bestehen bei der Analyse von Fassaden?	✓					
35	Thermografie-basierte Methoden	Wie können diese Unterschiede bei der Dateninterpretation berücksichtigt werden?	✓					
36	Thermografie-basierte Methoden	Welche Normen und Standards existieren für die Analyse von Fassaden und Dächern?	✓					
37	Thermografie-basierte Methoden	Welche technischen Verbesserungen könnten die Genauigkeit und Aussagekraft thermografischer Aufnahmen steigern?	✓					
38	Thermografie-basierte Methoden	Welche neuen Technologien sind vielversprechend?	✓					
39	Thermografie-basierte Methoden	Inwiefern könnten Software-Verbesserungen die Datenanalyse optimieren?	✓					
40	Thermografie-basierte Methoden	Wie könnten Normen und Standards diese technischen Verbesserungen beeinflussen?						
41	Thermografie-basierte Methoden	Welche Erfahrungen wurden mit der Integration von Thermografie-Daten in bestehende Gebäudemodelle gemacht?						
42	Thermografie-basierte Methoden	Welche Herausforderungen bestehen bei der Datenkompatibilität?	✓					
43	Thermografie-basierte Methoden	Welche Vorteile bietet die Integration für die Gebäudebewertung?						
44	Thermografie-basierte Methoden	Welche normativen Anforderungen bestehen für die Datenintegration?						
45	Datenanalyse	Wie werden die Daten aus thermischen Schrägbildaufnahmen hinsichtlich der Energieeffizienz eines Gebäudes interpretiert?	✓					

Nr.	Kategorie	Frage	Eignung	Person 3	Person 4	Person 5	Person 7	Person 6
46	Datenanalyse	Welche spezifischen Kennzahlen und Indikatoren werden verwendet?	✓					
47	Datenanalyse	Wie können diese Daten zur Priorisierung von Sanierungsmassnahmen genutzt werden?	✓					
48	Datenanalyse	Welche normativen Leitlinien gibt es für die Interpretation dieser Daten?	✓					
49	Datenanalyse	Welche spezifischen Informationen können aus den Daten des «ThermoPlaner3D»-Projekts gewonnen werden?	✓					
50	Datenanalyse	Wie werden diese Informationen in der Praxis verwendet?	✓					
51	Datenanalyse	Welche zusätzlichen Datenquellen könnten die Analyse ergänzen?	✓					
52	Datenanalyse	Wie werden diese Informationen im Rahmen normativer Anforderungen verwendet?						
53	Datenanalyse	Welche Analysemethoden sind für die Bewertung thermischer Aufnahmen besonders geeignet?	✓					
54	Datenanalyse	Welche Softwarelösungen werden bevorzugt?	✓					
55	Datenanalyse	Welche neuen Analysemethoden sind in der Entwicklung?	✓					
56	Datenanalyse	Welche normativen Anforderungen gelten für diese Analysemethoden?	✓					
57	Datenanalyse	Wie können Daten aus Thermografie-Aufnahmen am besten für Planer und Architekten aufbereitet werden?	✓					
58	Datenanalyse	Welche Visualisierungstechniken sind am effektivsten?	✓					
59	Datenanalyse	Welche Tools und Plattformen eignen sich für die Datenpräsentation?	✓					
60	Datenanalyse	Welche normativen Vorgaben existieren für die Datenaufbereitung?	✓					
61	Datenanalyse	Welche Herausforderungen bestehen bei der Datenintegration aus verschiedenen Quellen?	✓					
62	Datenanalyse	Wie können unterschiedliche Datenformate vereinheitlicht werden?	✓					
63	Datenanalyse	Welche Standards sollten bei der Datenintegration beachtet werden?	✓					
64	Datenanalyse	Welche Normen und Standards sollten bei der Datenintegration beachtet werden?	✓					
65	Informationsgewinnung und -aufbereitung	Welche Informationen sind für eine fundierte Bewertung des Gebäudezustands unerlässlich?	✓					
66	Informationsgewinnung und -aufbereitung	Welche zusätzlichen Datenquellen sind hilfreich?	✓					
67	Informationsgewinnung und -aufbereitung	Wie können Lücken in den vorhandenen Daten identifiziert und geschlossen werden?	✓					
68	Informationsgewinnung und -aufbereitung	Welche normativen Anforderungen definieren diese Informationen?	✓					

Nr.	Kategorie	Frage	Eignung	Person 3	Person 4	Person 5	Person 7	Person 6
69	Informationsgewinnung und -aufbereitung	Wie sollten Daten für unterschiedliche Stakeholder wie Planer, Architekten und Bauherren aufbereitet werden?	✓					
70	Informationsgewinnung und -aufbereitung	Welche spezifischen Anforderungen haben diese Stakeholder?	✓					
71	Informationsgewinnung und -aufbereitung	Wie kann die Kommunikation zwischen den Stakeholdern verbessert werden?	✓					
72	Informationsgewinnung und -aufbereitung	Welche spezifischen Normen und Standards gelten für die Datenaufbereitung?						
73	Informationsgewinnung und -aufbereitung	Welche Formate und Darstellungsweisen sind für die Präsentation von Thermografie-Daten am besten geeignet?	✓					
74	Informationsgewinnung und -aufbereitung	Welche Visualisierungssoftware wird bevorzugt?	✓					
75	Informationsgewinnung und -aufbereitung	Welche Formate sind am benutzerfreundlichsten?	✓					
76	Informationsgewinnung und -aufbereitung	Welche normativen Anforderungen existieren für diese Formate und Darstellungsweisen?						
77	Informationsgewinnung und -aufbereitung	Wie kann sichergestellt werden, dass die bereitgestellten Informationen leicht verständlich und nutzbar sind?	✓					
78	Informationsgewinnung und -aufbereitung	Welche Schulungen oder Unterstützungsangebote sind erforderlich?						
79	Informationsgewinnung und -aufbereitung	Wie kann die Benutzerfreundlichkeit der Datenpräsentation verbessert werden?						
80	Informationsgewinnung und -aufbereitung	Welche normativen Leitlinien gibt es zur Verbesserung der Benutzerfreundlichkeit?						
81	Informationsgewinnung und -aufbereitung	Welche Massnahmen werden ergriffen, um die Qualität und Genauigkeit der gesammelten Daten zu gewährleisten?						
82	Informationsgewinnung und -aufbereitung	Welche Standards und Protokolle werden verwendet?						
83	Informationsgewinnung und -aufbereitung	Wie werden die Daten regelmässig überprüft und aktualisiert?	✓					
84	Informationsgewinnung und -aufbereitung	Welche normativen Anforderungen und Standards werden angewendet, um die Datenqualität zu sichern?						
85	Nutzerbedürfnisse	Welche spezifischen Anforderungen haben Planer und Architekten an Thermografie-Daten?						
86	Nutzerbedürfnisse	Welche zusätzlichen Informationen werden häufig nachgefragt?	✓					
87	Nutzerbedürfnisse	Wie können diese Anforderungen am besten erfüllt werden?	✓					
88	Nutzerbedürfnisse	Welche normativen Leitlinien müssen diese Anforderungen erfüllen?						
89	Nutzerbedürfnisse	Inwiefern beeinflussen die Bedürfnisse der Nutzer die Darstellung und Aufbereitung der Daten?						
90	Nutzerbedürfnisse	Wie können die Daten individuell angepasst werden?	✓					

Nr.	Kategorie	Frage	Eignung	Person 3	Person 4	Person 5	Person 7	Person 6
91	Nutzerbedürfnisse	Welche Feedback-Mechanismen sind hilfreich?	✓					
92	Nutzerbedürfnisse	Wie können normative Anforderungen die Anpassung der Datendarstellung unterstützen?						
93	Nutzerbedürfnisse	Welche Rückmeldungen gibt es von Nutzern hinsichtlich der Praktikabilität von Thermografie-basierten Analysen?	✓					
94	Nutzerbedürfnisse	Welche Verbesserungen wurden vorgeschlagen?						
95	Nutzerbedürfnisse	Wie werden diese Rückmeldungen in die Weiterentwicklung einbezogen?						
96	Nutzerbedürfnisse	Welche normativen Anpassungen wurden aufgrund dieser Rückmeldungen vorgenommen?						
97	Nutzerbedürfnisse	Wie können die gewonnenen Erkenntnisse aus Thermografie-Daten in den Planungsprozess integriert werden?						
98	Nutzerbedürfnisse	Welche Tools und Methoden unterstützen diese Integration?						
99	Nutzerbedürfnisse	Welche Best Practices gibt es für die Nutzung der Daten im Planungsprozess?						
100	Nutzerbedürfnisse	Welche normativen Vorgaben existieren für die Integration dieser Daten?						
101	Nutzerbedürfnisse	Welche zusätzlichen Informationen werden von Planern und Architekten von Thermografie-Aufnahmen erwartet?						
102	Nutzerbedürfnisse	Wie können diese zusätzlichen Informationen bereitgestellt werden?						
103	Nutzerbedürfnisse	Welche neuen Technologien könnten diese Erwartungen erfüllen?						
104	Nutzerbedürfnisse	Welche normativen Anforderungen müssen diese zusätzlichen Informationen erfüllen?						
105	Praxisrelevanz und Umsetzbarkeit	Welche praktischen Anwendungen gibt es für die Nutzung luftgestützter Thermografie-Aufnahmen in der Gebäudeanalyse?	✓					
106	Praxisrelevanz und Umsetzbarkeit	Welche Anwendungsbeispiele haben sich als besonders erfolgreich erwiesen?	✓					
107	Praxisrelevanz und Umsetzbarkeit	Welche neuen Anwendungen sind in der Entwicklung?	✓					
108	Praxisrelevanz und Umsetzbarkeit	Welche normativen Anforderungen müssen diese Anwendungen erfüllen?						
109	Praxisrelevanz und Umsetzbarkeit	Wie wird die Umsetzbarkeit eines Proof of Concept (PoC) für die grossflächige Nutzung von Thermografie-Daten beurteilt?						
110	Praxisrelevanz und Umsetzbarkeit	Welche Erfolgsfaktoren sind entscheidend?						
111	Praxisrelevanz und Umsetzbarkeit	Welche Hindernisse müssen überwunden werden?						
112	Praxisrelevanz und Umsetzbarkeit	Welche normativen Leitlinien sind für die Umsetzung eines PoC relevant?						
113	Praxisrelevanz und Umsetzbarkeit	Welche technischen und organisatorischen Hürden bestehen bei der Implementierung solcher Systeme?						

Nr.	Kategorie	Frage	Eignung	Person 3	Person 4	Person 5	Person 7	Person 6
114	Praxisrelevanz und Umsetzbarkeit	Welche Lösungen gibt es für diese Hürden?						
115	Praxisrelevanz und Umsetzbarkeit	Wie kann die Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Akteuren verbessert werden?	✓					
116	Praxisrelevanz und Umsetzbarkeit	Welche normativen Anforderungen müssen bei der Implementierung berücksichtigt werden?						
117	Praxisrelevanz und Umsetzbarkeit	In welchen Bereichen wird der grösste Nutzen von thermografischen Schrägbildaufnahmen gesehen?	✓					
118	Praxisrelevanz und Umsetzbarkeit	Welche spezifischen Anwendungsfälle haben das grösste Potenzial?	✓					
119	Praxisrelevanz und Umsetzbarkeit	Wie kann der Nutzen dieser Aufnahmen maximiert werden?	✓					
120	Praxisrelevanz und Umsetzbarkeit	Welche normativen Anforderungen gelten für die Nutzung in diesen Bereichen?						
121	Praxisrelevanz und Umsetzbarkeit	Welche Beispiele für erfolgreiche Anwendungen dieser Technologie sind bekannt?						
122	Praxisrelevanz und Umsetzbarkeit	Welche Lehren können aus diesen Beispielen gezogen werden?						
123	Praxisrelevanz und Umsetzbarkeit	Wie könnten diese Beispiele auf andere Projekte übertragen werden?						
124	Praxisrelevanz und Umsetzbarkeit	Welche normativen Leitlinien wurden in diesen Beispielen beachtet?						
125	Innovative Technologien	Wie lässt sich die Thermografie-Technologie in bestehende Virtual Design and Construction (VDC) Systeme integrieren?						
126	Innovative Technologien	Welche Herausforderungen bestehen bei der Integration?						
127	Innovative Technologien	Welche Vorteile bietet die Integration für den Planungsprozess?						
128	Innovative Technologien	Welche normativen Anforderungen bestehen für die Integration?						
129	Innovative Technologien	Welche technologischen Verbesserungen könnten die Effektivität von Thermografie-Aufnahmen weiter steigern?	✓					
130	Innovative Technologien	Welche neuen Technologien sind vielversprechend?						
131	Innovative Technologien	Wie könnten diese Technologien in bestehende Systeme integriert werden?						
132	Innovative Technologien	Welche normativen Leitlinien könnten diese Verbesserungen beeinflussen?						
133	Innovative Technologien	Welche zukünftigen Entwicklungen werden im Bereich der Thermografie und Gebäudezustandserfassung erwartet?						
134	Innovative Technologien	Welche Trends zeichnen sich ab?	✓					
135	Innovative Technologien	Wie könnten diese Entwicklungen die Branche verändern?	✓					
136	Innovative Technologien	Welche normativen Anforderungen könnten diese Entwicklungen beeinflussen?						

Nr.	Kategorie	Frage	Eignung	Person 3	Person 4	Person 5	Person 7	Person 6
137	Innovative Technologien	Inwiefern könnten neue Technologien die Genauigkeit und Aussagekraft thermografischer Aufnahmen verbessern?	✓					
138	Innovative Technologien	Welche Technologien sind besonders vielversprechend?	✓					
139	Innovative Technologien	Welche Herausforderungen bestehen bei der Implementierung?	✓					
140	Innovative Technologien	Welche normativen Anforderungen sind für die Implementierung dieser Technologien relevant?						
141	Innovative Technologien	Welche Rolle spielen Drohnen und andere luftgestützte Plattformen in der Zukunft der Gebäudeanalyse?	✓					
142	Innovative Technologien	Welche Vorteile bieten diese Plattformen?	✓					
143	Innovative Technologien	Welche neuen Anwendungen sind möglich?	✓					
144	Innovative Technologien	Welche normativen Anforderungen gelten für den Einsatz dieser Plattformen?						
145	Förderung nachhaltiger Bau- und Energiewirtschaft	Wie können Thermografie-Aufnahmen zur Erreichung der Klimaziele beitragen?	✓					
146	Förderung nachhaltiger Bau- und Energiewirtschaft	Welche spezifischen Massnahmen könnten unterstützt werden?	✓					
147	Förderung nachhaltiger Bau- und Energiewirtschaft	Wie kann die Effektivität dieser Massnahmen gemessen werden?						
148	Förderung nachhaltiger Bau- und Energiewirtschaft	Welche normativen Leitlinien unterstützen den Einsatz von Thermografie-Aufnahmen in diesem Kontext?						
149	Förderung nachhaltiger Bau- und Energiewirtschaft	Welche Strategien könnten zur Verbesserung der Sanierungsrate von Gebäuden beitragen?	✓					
150	Förderung nachhaltiger Bau- und Energiewirtschaft	Welche Rolle spielt die thermografische Analyse in diesen Strategien?	✓					
151	Förderung nachhaltiger Bau- und Energiewirtschaft	Wie können diese Strategien gefördert werden?						
152	Förderung nachhaltiger Bau- und Energiewirtschaft	Welche Rolle spielen normierte Verfahren wie der GEAK bei diesen Strategien?	✓					
153	Förderung nachhaltiger Bau- und Energiewirtschaft	Inwiefern können Förderprogramme zur Energieeffizienz durch Thermografie-Daten unterstützt werden?	✓					
154	Förderung nachhaltiger Bau- und Energiewirtschaft	Welche Daten sind für diese Programme besonders relevant?	✓					
155	Förderung nachhaltiger Bau- und Energiewirtschaft	Wie können die Daten in Förderanträge integriert werden?	✓					
156	Förderung nachhaltiger Bau- und Energiewirtschaft	Welche normativen Anforderungen gelten für die Nutzung von Thermografie-Daten in Förderprogrammen?	✓					
157	Förderung nachhaltiger Bau- und Energiewirtschaft	Welche Rolle spielt die Gebäudethermografie bei der Planung und Umsetzung nachhaltiger Bauprojekte?						
158	Förderung nachhaltiger Bau- und Energiewirtschaft	Welche spezifischen Vorteile bietet die Thermografie?						

Nr.	Kategorie	Frage	Eignung	Person 3	Person 4	Person 5	Person 7	Person 6
159	Förderung nachhaltiger Bau- und Energiewirtschaft	Wie kann die Nutzung von Thermografie-Daten in nachhaltigen Bauprojekten gefördert werden?						
160	Förderung nachhaltiger Bau- und Energiewirtschaft	Welche normativen Leitlinien unterstützen die Nutzung von Thermografie-Daten in nachhaltigen Bauprojekten?						
161	Förderung nachhaltiger Bau- und Energiewirtschaft	Wie können politische Initiativen die Nutzung von Thermografie zur Gebäudeanalyse fördern?	✓					
162	Förderung nachhaltiger Bau- und Energiewirtschaft	Welche bestehenden Initiativen gibt es?	✓					
163	Förderung nachhaltiger Bau- und Energiewirtschaft	Wie könnten neue Initiativen gestaltet werden, um die Nutzung zu fördern?						
164	Förderung nachhaltiger Bau- und Energiewirtschaft	Welche normativen Anforderungen sollten in politischen Initiativen berücksichtigt werden?						
165	Förderung nachhaltiger Bau- und Energiewirtschaft	Wie kann der GEAK als Instrument in politischen Initiativen integriert werden?						

**ANHANG D: SPSS-Subsummieren (Gespräch-Leitfaden) – Person 3**

Kategorie	Leitfrage / Erzählaufforderung	Check – wurde das erwähnt? Memo für mögliche Nachfragen, nur stellen, wenn nicht von allein angesprochen	Aufrechterhaltungs- und Steuerungsfragen (für alle Themen)
Gebäudezustandsermittlung	Welche Methoden zur Ermittlung des Gebäudezustands werden derzeit als am effektivsten erachtet?	Welche Vor- und Nachteile haben diese Methoden?	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Können Sie dazu noch etwas mehr erzählen?</li> <li>▪ Und dann? Wie ging das weiter?</li> <li>▪ Wie war das so mit...?</li> <li>▪ Weshalb ist das so?</li> <li>▪ Wie wichtig ist Ihnen das?</li> <li>▪ Was löst das in Ihnen aus?</li> <li>▪ Wie meinen Sie das genau?</li> <li>▪ Können Sie ein Beispiel dafür machen?</li> <li>▪ Wie könnte es besser sein? Was müsste geändert werden?</li> </ul>
		Wie unterscheiden sich diese Methoden in ihrer Anwendung bei verschiedenen Gebäudetypen?	
	Welche spezifischen Herausforderungen bestehen bei der Kalibrierung und Interpretation der Daten?	Wie beeinflusst die Auflösung der Aufnahmen die Zuverlässigkeit?	
	Wie wichtig sind hochauflösende Aufnahmen im Vergleich zu gering aufgelösten Aufnahmen für die Zustandsanalyse?	In welchen Situationen sind hochauflösende Aufnahmen unerlässlich?	
		Welche Kompromisse müssen bei der Nutzung von gering aufgelösten Aufnahmen eingegangen werden?	
Thermografie-basierte Methoden	Welche Vorteile bieten thermografische Schrägbildaufnahmen gegenüber herkömmlichen Nadirbildern?	Welche zusätzlichen Informationen können durch Schrägbildaufnahmen gewonnen werden?	
	Wie beeinflusst der Aufnahmewinkel die Datenqualität?		
	Wie könnten bestehende Thermografie-Methoden an neue luftgestützte Systeme angepasst werden?	Inwiefern unterscheiden sich die thermischen Charakteristika von Fassaden und Dächern bei der Analyse?	
		Welche spezifischen Herausforderungen bestehen bei der Analyse von Fassaden?	
		Wie können diese Unterschiede bei der Dateninterpretation berücksichtigt werden?	
		Welche Normen und Standards existieren für die Analyse von Fassaden und Dächern?	
	Welche technischen Verbesserungen könnten die Genauigkeit und Aussagekraft thermografischer Aufnahmen steigern?	Welche neuen Technologien sind vielversprechend?	
Datenanalyse	Wie werden die Daten aus thermischen Schrägbildaufnahmen hinsichtlich der Energieeffizienz eines Gebäudes interpretiert?	Welche spezifischen Kennzahlen und Indikatoren werden verwendet?	
	Welche Analysemethoden sind für die Bewertung thermischer Aufnahmen besonders geeignet?	Welche Softwarelösungen werden bevorzugt?	
Praxisrelevanz und Umsetzbarkeit	Welche praktischen Anwendungen gibt es für die Nutzung luftgestützter Thermografie-Aufnahmen in der Gebäudeanalyse?	Welche Anwendungsbeispiele haben sich als besonders erfolgreich erwiesen?	
		Welche neuen Anwendungen sind in der Entwicklung?	
	In welchen Bereichen wird der grösste Nutzen von thermografischen Schrägbildaufnahmen gesehen?	Welche spezifischen Anwendungsfälle haben das grösste Potenzial?	
		Wie kann der Nutzen dieser Aufnahmen maximiert werden?	

**ANHANG E: SPSS-Subsummieren (Gespräch-Leitfaden) – Person 4**

Kategorie	Leitfrage / Erzählaufforderung	Check – wurde das erwähnt? Memo für mögliche Nachfragen, nur stellen, wenn nicht von allein angesprochen	Aufrechterhaltungs- und Steuerungsfragen (für alle Themen)
Gebäudezustandsermittlung	Welche Herausforderungen bestehen bei der flächendeckenden Erfassung des Gebäudezustands in städtischen Gebieten?	Welche technologischen oder logistischen Hindernisse müssen überwunden werden?	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Können Sie dazu noch etwas mehr erzählen?</li> <li>▪ Und dann? Wie ging das weiter?</li> <li>▪ Wie war das so mit...?</li> <li>▪ Weshalb ist das so?</li> <li>▪ Wie wichtig ist Ihnen das?</li> <li>▪ Was löst das in Ihnen aus?</li> <li>▪ Wie meinen Sie das genau?</li> <li>▪ Können Sie ein Beispiel dafür machen?</li> <li>▪ Wie könnte es besser sein? Was müsste geändert werden?</li> </ul>
		Inwiefern spielen rechtliche und regulatorische Rahmenbedingungen eine Rolle?	
		Welche normativen Vorgaben gelten für die Erfassung in dicht besiedelten Gebieten?	
		Wie kann die Genauigkeit der identifizierten Schwachstellen überprüft werden?	
		Inwiefern berücksichtigen bestehende Normen die Nutzung von Schrägbildaufnahmen?	
Datenanalyse	Wie können diese Daten zur Priorisierung von Sanierungsmassnahmen genutzt werden?		
	Welche normativen Leitlinien gibt es für die Interpretation dieser Daten?		
	Wie werden diese Informationen in der Praxis verwendet?		
	Welche zusätzlichen Datenquellen könnten die Analyse ergänzen?		
	Wie können Daten aus Thermografie-Aufnahmen am besten für Planer und Architekten aufbereitet werden?		
Informationsgewinnung und -aufbereitung	Welche Informationen sind für eine fundierte Bewertung des Gebäudezustands unerlässlich?	Welche zusätzlichen Datenquellen sind hilfreich?	
		Wie können Lücken in den vorhandenen Daten identifiziert und geschlossen werden?	
	Wie sollten Daten für unterschiedliche Stakeholder wie Planer, Architekten und Bauherren aufbereitet werden?	Welche spezifischen Anforderungen haben diese Stakeholder?	
	Welche Formate und Darstellungsweisen sind für die Präsentation von Thermografie-Daten am besten geeignet?	Welche Visualisierungssoftware wird bevorzugt?	
	Wie kann sichergestellt werden, dass die bereitgestellten Informationen leicht verständlich und nutzbar sind?		
	Wie werden die Daten regelmässig überprüft und aktualisiert?		
Nutzerbedürfnisse	Welche zusätzlichen Informationen werden häufig nachgefragt?		
	Wie können diese Anforderungen am besten erfüllt werden?		
	Wie können die Daten individuell angepasst werden?		
Praxisrelevanz und Umsetzbarkeit	Welche praktischen Anwendungen gibt es für die Nutzung luftgestützter Thermografie-Aufnahmen in der Gebäudeanalyse?	Welche Anwendungsbeispiele haben sich als besonders erfolgreich erwiesen?	

Kategorie	Leitfrage / Erzählaufforderung	Check – wurde das erwähnt? Memo für mögliche Nachfragen, nur stellen, wenn nicht von allein angesprochen	Aufrechterhaltungs- und Steuerungsfragen (für alle Themen)
		Welche neuen Anwendungen sind in der Entwicklung?	
	In welchen Bereichen wird der grösste Nutzen von thermografischen Schrägbildaufnahmen gesehen?	Welche spezifischen Anwendungsfälle haben das grösste Potenzial?	
		Wie kann der Nutzen dieser Aufnahmen maximiert werden?	
Förderung nachhaltiger Bau- und Energiewirtschaft	Welche Strategien könnten zur Verbesserung der Sanierungsrate von Gebäuden beitragen?	Welche Rolle spielt die thermografische Analyse in diesen Strategien?	
		Welche Rolle spielen normierte Verfahren wie der GEAK bei diesen Strategien?	
	Inwiefern können Förderprogramme zur Energieeffizienz durch Thermografie-Daten unterstützt werden?	Welche Daten sind für diese Programme besonders relevant?	
		Wie können die Daten in Förderanträge integriert werden?	

**ANHANG F: SPSS-Subsummieren (Gespräch-Leitfaden) – Person 5**

Kategorie	Leitfrage / Erzählaufforderung	Check – wurde das erwähnt? Memo für mögliche Nachfragen, nur stellen, wenn nicht von allein angesprochen	Aufrechterhaltungs- und Steuerungsfragen (für alle Themen)
Gebäudezustandsermittlung	Welche Herausforderungen bestehen bei der flächendeckenden Erfassung des Gebäudezustands in städtischen Gebieten?	Welche technologischen oder logistischen Hindernisse müssen überwunden werden?	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Können Sie dazu noch etwas mehr erzählen?</li> <li>▪ Und dann? Wie ging das weiter?</li> <li>▪ Wie war das so mit...?</li> <li>▪ Weshalb ist das so?</li> <li>▪ Wie wichtig ist Ihnen das?</li> <li>▪ Was löst das in Ihnen aus?</li> <li>▪ Wie meinen Sie das genau?</li> <li>▪ Können Sie ein Beispiel dafür machen?</li> <li>▪ Wie könnte es besser sein? Was müsste geändert werden?</li> </ul>
		Inwiefern spielen rechtliche und regulatorische Rahmenbedingungen eine Rolle?	
		Welche normativen Vorgaben gelten für die Erfassung in dicht besiedelten Gebieten?	
Datenanalyse	Wie können diese Daten zur Priorisierung von Sanierungsmassnahmen genutzt werden?		
	Welche normativen Leitlinien gibt es für die Interpretation dieser Daten?		
	Wie werden diese Informationen in der Praxis verwendet?		
	Welche zusätzlichen Datenquellen könnten die Analyse ergänzen?		
	Welche Visualisierungstechniken sind am effektivsten?	Welche Tools und Plattformen eignen sich für die Datenpräsentation?	
	Welche Herausforderungen bestehen bei der Datenintegration aus verschiedenen Quellen?		
Informationsgewinnung und -aufbereitung	Welche Informationen sind für eine fundierte Bewertung des Gebäudezustands unerlässlich?	Welche zusätzlichen Datenquellen sind hilfreich?	
		Wie können Lücken in den vorhandenen Daten identifiziert und geschlossen werden?	
	Wie sollten Daten für unterschiedliche Stakeholder wie Planer, Architekten und Bauherren aufbereitet werden?	Welche spezifischen Anforderungen haben diese Stakeholder?	
	Welche Formate und Darstellungsweisen sind für die Präsentation von Thermografie-Daten am besten geeignet?	Welche Visualisierungssoftware wird bevorzugt?	
	Wie kann sichergestellt werden, dass die bereitgestellten Informationen leicht verständlich und nutzbar sind?		
	Wie werden die Daten regelmässig überprüft und aktualisiert?		
Nutzerbedürfnisse	Welche zusätzlichen Informationen werden häufig nachgefragt?		
	Wie können diese Anforderungen am besten erfüllt werden?		
	Wie können die Daten individuell angepasst werden?		
Praxisrelevanz und Umsetzbarkeit	Welche praktischen Anwendungen gibt es für die Nutzung luftgestützter Thermografie-Aufnahmen in der Gebäudeanalyse?	Welche Anwendungsbeispiele haben sich als besonders erfolgreich erwiesen?	
		Welche neuen Anwendungen sind in der Entwicklung?	

Kategorie	Leitfrage / Erzählaufforderung	Check – wurde das erwähnt? Memo für mögliche Nachfragen, nur stellen, wenn nicht von allein angesprochen	Aufrechterhaltungs- und Steuerungsfragen (für alle Themen)
	In welchen Bereichen wird der grösste Nutzen von thermografischen Schrägbildaufnahmen gesehen?	Welche spezifischen Anwendungsfälle haben das grösste Potenzial?	
		Wie kann der Nutzen dieser Aufnahmen maximiert werden?	
Förderung nachhaltiger Bau- und Energiewirtschaft	Welche Strategien könnten zur Verbesserung der Sanierungsrate von Gebäuden beitragen?	Welche Rolle spielt die thermografische Analyse in diesen Strategien?	
		Welche Rolle spielen normierte Verfahren wie der GEAK bei diesen Strategien?	
	Inwiefern können Förderprogramme zur Energieeffizienz durch Thermografie-Daten unterstützt werden?	Welche Daten sind für diese Programme besonders relevant?	
		Wie können die Daten in Förderanträge integriert werden?	

**ANHANG G: SPSS-Subsummieren (Gespräch-Leitfaden) – Person 6**

Kategorie	Leitfrage / Erzählaufforderung	Check – wurde das erwähnt? Memo für mögliche Nachfragen, nur stellen, wenn nicht von allein angesprochen	Aufrechterhaltungs- und Steuerungsfragen (für alle Themen)
Gebäudezustandsermittlung	Welche Methoden zur Ermittlung des Gebäudezustands werden derzeit als am effektivsten erachtet?	Welche Vor- und Nachteile haben diese Methoden?	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Können Sie dazu noch etwas mehr erzählen?</li> <li>▪ Und dann? Wie ging das weiter?</li> <li>▪ Wie war das so mit...?</li> <li>▪ Weshalb ist das so?</li> <li>▪ Wie wichtig ist Ihnen das?</li> <li>▪ Was löst das in Ihnen aus?</li> <li>▪ Wie meinen Sie das genau?</li> <li>▪ Können Sie ein Beispiel dafür machen?</li> <li>▪ Wie könnte es besser sein? Was müsste geändert werden?</li> </ul>
		Wie unterscheiden sich diese Methoden in ihrer Anwendung bei verschiedenen Gebäudetypen?	
		Welche normierten Verfahren werden am häufigsten eingesetzt?	
	Welche spezifischen Herausforderungen bestehen bei der Kalibrierung und Interpretation der Daten?		
	Wie beeinflusst die Auflösung der Aufnahmen die Zuverlässigkeit?		
	Wie kann die Genauigkeit der identifizierten Schwachstellen überprüft werden?		
	Wie wichtig sind hochauflösende Aufnahmen im Vergleich zu gering aufgelösten Aufnahmen für die Zustandsanalyse?	In welchen Situationen sind hochauflösende Aufnahmen unerlässlich?	
		Welche Kompromisse müssen bei der Nutzung von gering aufgelösten Aufnahmen eingegangen werden?	
Thermografie-basierte Methoden	Welche Vorteile bieten thermografische Schrägbildaufnahmen gegenüber herkömmlichen Nadirbildern?	Welche zusätzlichen Informationen können durch Schrägbildaufnahmen gewonnen werden?	
		Wie beeinflusst der Aufnahmewinkel die Datenqualität?	
	Wie könnten bestehende Thermografie-Methoden an neue luftgestützte Systeme angepasst werden?		
	Inwiefern unterscheiden sich die thermischen Charakteristika von Fassaden und Dächern bei der Analyse?		
		Welche spezifischen Herausforderungen bestehen bei der Analyse von Fassaden?	
		Wie können diese Unterschiede bei der Dateninterpretation berücksichtigt werden?	
		Welche Normen und Standards existieren für die Analyse von Fassaden und Dächern?	
	Welche technischen Verbesserungen könnten die Genauigkeit und Aussagekraft thermografischer Aufnahmen steigern?	Welche neuen Technologien sind vielversprechend?	
Datenanalyse	Wie werden die Daten aus thermischen Schrägbildaufnahmen hinsichtlich der Energieeffizienz eines Gebäudes interpretiert?		
		Welche spezifischen Kennzahlen und Indikatoren werden verwendet?	
		Welche normativen Leitlinien gibt es für die Interpretation dieser Daten?	

Kategorie	Leitfrage / Erzählaufforderung	Check – wurde das erwähnt? Memo für mögliche Nachfragen, nur stellen, wenn nicht von allein angesprochen	Aufrechterhaltungs- und Steuerungsfragen (für alle Themen)
	Wie werden diese Informationen in der Praxis verwendet?		
	Welche zusätzlichen Datenquellen könnten die Analyse ergänzen?		
	Wie können Daten aus Thermografie-Aufnahmen am besten für Planer und Architekten aufbereitet werden?	Welche normativen Vorgaben existieren für die Datenaufbereitung?	
Informationsgewinnung und -aufbereitung	Welche Informationen sind für eine fundierte Bewertung des Gebäudezustands unerlässlich?	Welche zusätzlichen Datenquellen sind hilfreich?	
	Wie sollten Daten für unterschiedliche Stakeholder wie Planer, Architekten und Bauherren aufbereitet werden?	Welche spezifischen Anforderungen haben diese Stakeholder?	
	Welche Formate und Darstellungsweisen sind für die Präsentation von Thermografie-Daten am besten geeignet?	Welche Visualisierungssoftware wird bevorzugt?	
	Wie kann sichergestellt werden, dass die bereitgestellten Informationen leicht verständlich und nutzbar sind?		
	Wie werden die Daten regelmässig überprüft und aktualisiert?		
Nutzerbedürfnisse	Welche zusätzlichen Informationen werden häufig nachgefragt?		
	Wie können diese Anforderungen am besten erfüllt werden?		
Praxisrelevanz und Umsetzbarkeit	Welche praktischen Anwendungen gibt es für die Nutzung luftgestützter Thermografie-Aufnahmen in der Gebäudeanalyse?	Welche Anwendungsbeispiele haben sich als besonders erfolgreich erwiesen?	
		Welche neuen Anwendungen sind in der Entwicklung?	
	In welchen Bereichen wird der grösste Nutzen von thermografischen Schrägbildaufnahmen gesehen?	Welche spezifischen Anwendungsfälle haben das grösste Potenzial?	
		Wie kann der Nutzen dieser Aufnahmen maximiert werden?	

**ANHANG H: SPSS-Subsummieren (Gespräch-Leitfaden) – Person 7**

Kategorie	Leitfrage / Erzählaufforderung	Check – wurde das erwähnt? Memo für mögliche Nachfragen, nur stellen, wenn nicht von allein angesprochen	Aufrechterhaltungs- und Steuerungsfragen (für alle Themen)
Gebäudezustandsermittlung	Welche Herausforderungen bestehen bei der flächendeckenden Erfassung des Gebäudezustands in städtischen Gebieten?	Welche technologischen oder logistischen Hindernisse müssen überwunden werden?	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Können Sie dazu noch etwas mehr erzählen?</li> <li>▪ Und dann? Wie ging das weiter?</li> <li>▪ Wie war das so mit...?</li> <li>▪ Weshalb ist das so?</li> <li>▪ Wie wichtig ist Ihnen das?</li> <li>▪ Was löst das in Ihnen aus?</li> <li>▪ Wie meinen Sie das genau?</li> <li>▪ Können Sie ein Beispiel dafür machen?</li> <li>▪ Wie könnte es besser sein? Was müsste geändert werden?</li> </ul>
		Inwiefern spielen rechtliche und regulatorische Rahmenbedingungen eine Rolle?	
		Welche normativen Vorgaben gelten für die Erfassung in dicht besiedelten Gebieten?	
Datenanalyse	Wie können diese Daten zur Priorisierung von Sanierungsmassnahmen genutzt werden?		
	Welche normativen Leitlinien gibt es für die Interpretation dieser Daten?		
	Wie werden diese Informationen in der Praxis verwendet?		
	Welche zusätzlichen Datenquellen könnten die Analyse ergänzen?		
	Welche Visualisierungstechniken sind am effektivsten?		
	Welche Tools und Plattformen eignen sich für die Datenpräsentation?		
	Welche Herausforderungen bestehen bei der Datenintegration aus verschiedenen Quellen?		
Informationsgewinnung und -aufbereitung	Welche Informationen sind für eine fundierte Bewertung des Gebäudezustands unerlässlich?	Welche zusätzlichen Datenquellen sind hilfreich?	
		Wie können Lücken in den vorhandenen Daten identifiziert und geschlossen werden?	
	Wie sollten Daten für unterschiedliche Stakeholder wie Planer, Architekten und Bauherren aufbereitet werden?	Welche spezifischen Anforderungen haben diese Stakeholder?	
	Welche Formate und Darstellungsweisen sind für die Präsentation von Thermografie-Daten am besten geeignet?	Welche Visualisierungssoftware wird bevorzugt?	
	Wie kann sichergestellt werden, dass die bereitgestellten Informationen leicht verständlich und nutzbar sind?		
	Wie werden die Daten regelmässig überprüft und aktualisiert?		
Nutzerbedürfnisse	Welche zusätzlichen Informationen werden häufig nachgefragt?		
	Wie können diese Anforderungen am besten erfüllt werden?		
Nutzerbedürfnisse	Wie können die Daten individuell angepasst werden?		
Praxisrelevanz und Umsetzbarkeit	Welche praktischen Anwendungen gibt es für die Nutzung luftgestützter Thermografie-Aufnahmen in der Gebäudeanalyse?	Welche Anwendungsbeispiele haben sich als besonders erfolgreich erwiesen?	

Kategorie	Leitfrage / Erzählaufforderung	Check – wurde das erwähnt? Memo für mögliche Nachfragen, nur stellen, wenn nicht von allein angesprochen	Aufrechterhaltungs- und Steuerungsfragen (für alle Themen)
		Welche neuen Anwendungen sind in der Entwicklung?	
	In welchen Bereichen wird der grösste Nutzen von thermografischen Schrägbildaufnahmen gesehen?	Welche spezifischen Anwendungsfälle haben das grösste Potenzial?	
		Wie kann der Nutzen dieser Aufnahmen maximiert werden?	
Förderung nachhaltiger Bau- und Energiewirtschaft	Welche Strategien könnten zur Verbesserung der Sanierungsrate von Gebäuden beitragen?	Welche Rolle spielt die thermografische Analyse in diesen Strategien?	
		Welche Rolle spielen normierte Verfahren wie der GEAK bei diesen Strategien?	
	Inwiefern können Förderprogramme zur Energieeffizienz durch Thermografie-Daten unterstützt werden?	Welche Daten sind für diese Programme besonders relevant?	
		Wie können die Daten in Förderanträge integriert werden?	

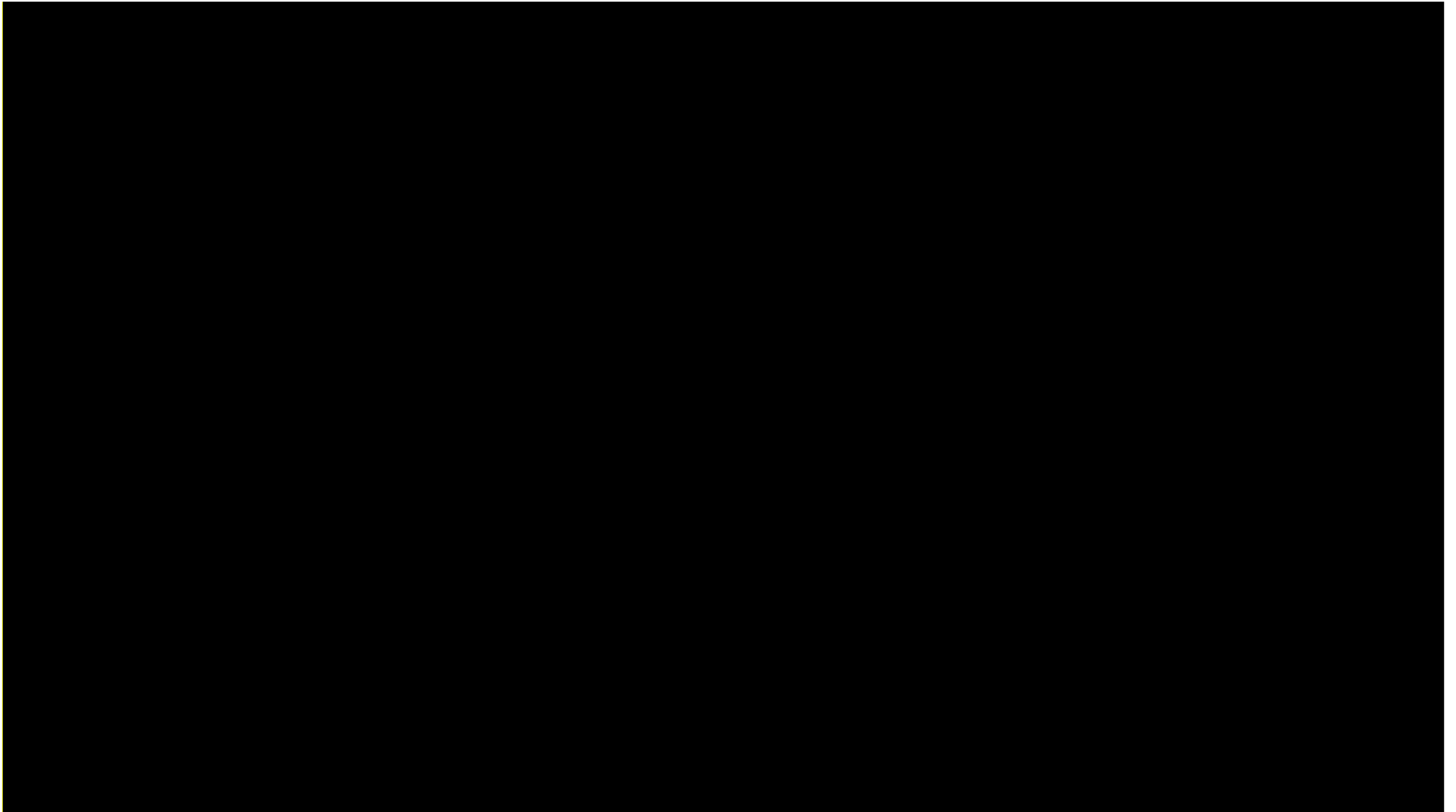
**ANHANG I: Kriterien der Informationsqualität**

in Anlehnung an (Wang & Strong, 1996) mit eigenen Interpretationen des Autors sowie der Gewichtung der Bedürfnisse der Experten durch den Autor

Nr.	Gr.	Dimension	Erklärung nach Krmar (2015)	Anwendung des Autors auf Projekt	P7	P4	P5	P3	P6
1	A	Zugänglichkeit	Informationen sind zugänglich, wenn sie anhand einfacher Verfahren und auf direktem Weg für den Anwender abrufbar sind	Die Daten, Aufnahmen und Modelle sollten über eine benutzerfreundliche Plattform zugänglich gemacht werden, die auf verschiedenen Geräten wie Smartphones, Tablets und Desktop-Computern funktioniert.	3	3	3	2	1
2	C	Angemessener Umfang	Informationen sind von angemessenem Umfang, wenn die Menge der verfügbaren Informationen den gestellten Anforderungen genügt	Die Daten, Aufnahmen und Modelle sollten sämtliche relevante Informationen zum energetischen Zustand von Gebäuden umfassen und gleichzeitig keine überflüssigen Daten enthalten.	2	2	3	1	1
4	C	Vollständigkeit	Informationen sind vollständig, wenn sie nicht fehlen und zu den festgelegten Zeitpunkten in den jeweiligen Prozess-Schritten zur Verfügung stehen	Die Daten, Aufnahmen und Modelle sollten umfassende Informationen zu den thermischen Verlusten der abgebildeten Gebäude enthalten, einschliesslich zeitnaher Datenupdates.	1	2	1	2	2
11	C	Relevanz	Informationen sind relevant, wenn sie für den Anwender notwendige Informationen liefern	Die dargestellten Daten sollten direkt auf die Bedürfnisse und Fragen der Nutzer/innen eingehen, z.B. welche Teile des Gebäudes sich in welchem energetischen Zustand befinden.	3	2	3	1	1
13	C	Aktualität	Informationen sind aktuell, wenn sie die tatsächliche Eigenschaft des beschriebenen Objektes zeitnah abbilden.	Die Daten, Aufnahmen und Modelle sollten regelmässig aktualisiert werden, um die neuesten Informationen über die Gebäudezustände widerzuspiegeln.	1	3	1	2	3
15	C	Wertschöpfung	Informationen sind wertschöpfend, wenn ihre Nutzung zu einer quantifizierbaren Steigerung einer monetären Zielfunktion führen kann.	Die Daten, Aufnahmen und Modelle sollten den Nutzer/innen ermöglichen, die Schwachstellen des Gebäudes zu identifizieren und potenzielle Einsparungen durch Gebäudesanierungen abzuschätzen.	3	3	3	3	3
3	I	Glaubwürdigkeit	Informationen sind glaubwürdig, wenn Zertifikate einen hohen Qualitätsstandard ausweisen oder die Informationsgewinnung und -verbreitung mit hohem Aufwand betrieben werden	Die Daten, Aufnahmen und Modelle sollten von zuverlässigen Quellen stammen und durch anerkannte Methoden validiert werden, um das Vertrauen der Nutzer/innen in das Datenmodell zu stärken.	2	3	2	3	3
8	I	Fehlerfreiheit	Informationen sind fehlerfrei, wenn sie mit der Realität übereinstimmen	Die verwendeten Daten, Aufnahmen und Modelle sollten genau sein, um Fehlinformationen und mögliche Missverständnisse zu vermeiden.	1	2	1	3	3
10	I	Objektivität	Informationen sind objektiv, wenn sie streng sachlich und wertfrei sind	Die Präsentation von Daten, Aufnahmen und Modelle sollte stets neutral und ohne Verzerrungen erfolgen, um eine objektive Bewertung des Gebäudezustandes zu gewährleisten.	1	3	1	3	3
12	I	Verlässlichkeit	Informationen sind als sehr verlässlich anzusehen, wenn die Informationsquelle, das Transportmedium und das verarbeitende System im Ruf einer hohen Vertrauenswürdigkeit und Kompetenz stehen.	Die Quellen der Daten, Aufnahmen und Modelle sollten als vertrauenswürdig und kompetent bekannt sein, was durch Transparenz in der Datenerhebung und -verarbeitung unterstützt werden kann.	2	3	2	3	3
5	R	Übersichtlichkeit	Informationen sind übersichtlich, wenn genau die benötigten Informationen in einem passenden und leicht fassbaren Format dargestellt sind	Die Präsentation der Daten, Aufnahmen und Modelle sollte klar und strukturiert erfolgen, um den Nutzer/innen eine schnelle Erfassung der für sie relevanten Informationen zu ermöglichen.	3	2	3	2	2
6	R	Einheitliche Darstellung	Informationen sind einheitlich dargestellt, wenn die Informationen fortlaufend auf dieselbe Art und Weise abgebildet werden	Die Präsentation der Daten, Aufnahmen und Modelle sollte konsistent sein, um Verwirrung zu vermeiden und die Benutzererfahrung zu verbessern. Dies beinhaltet einheitliche Farbcodes, Legenden und Skalen.	1	1	2	1	1
7	R	Bearbeitbarkeit	Informationen sind leicht bearbeitbar, wenn sie leicht zu ändern und für unterschiedliche Zwecke zu verwenden sind	Die Nutzer/innen sollten in der Lage sein, Daten, Aufnahmen und Modelle einfach zu nutzen oder zur weiteren Bearbeitung in andere Anwendungen zu übertragen.	1	2	1	2	2
9	R	Eindeutigkeit	Informationen sind eindeutig, wenn sie in gleicher, fachlich korrekter Art und Weise begriffen werden	Fachterminologie und Daten sollten klar definiert und konsistent verwendet werden, um Missverständnisse zu vermeiden.	2	2	2	2	2
14	R	Verständlichkeit	Informationen sind verständlich, wenn sie unmittelbar von den Anwendern verstanden und für deren Zwecke eingesetzt werden können.	Die Informationen sollten so aufbereitet sein, dass Laien sie ohne spezielle Vorkenntnisse verstehen und anwenden können.	3	1	3	1	1
						34	31	31	31

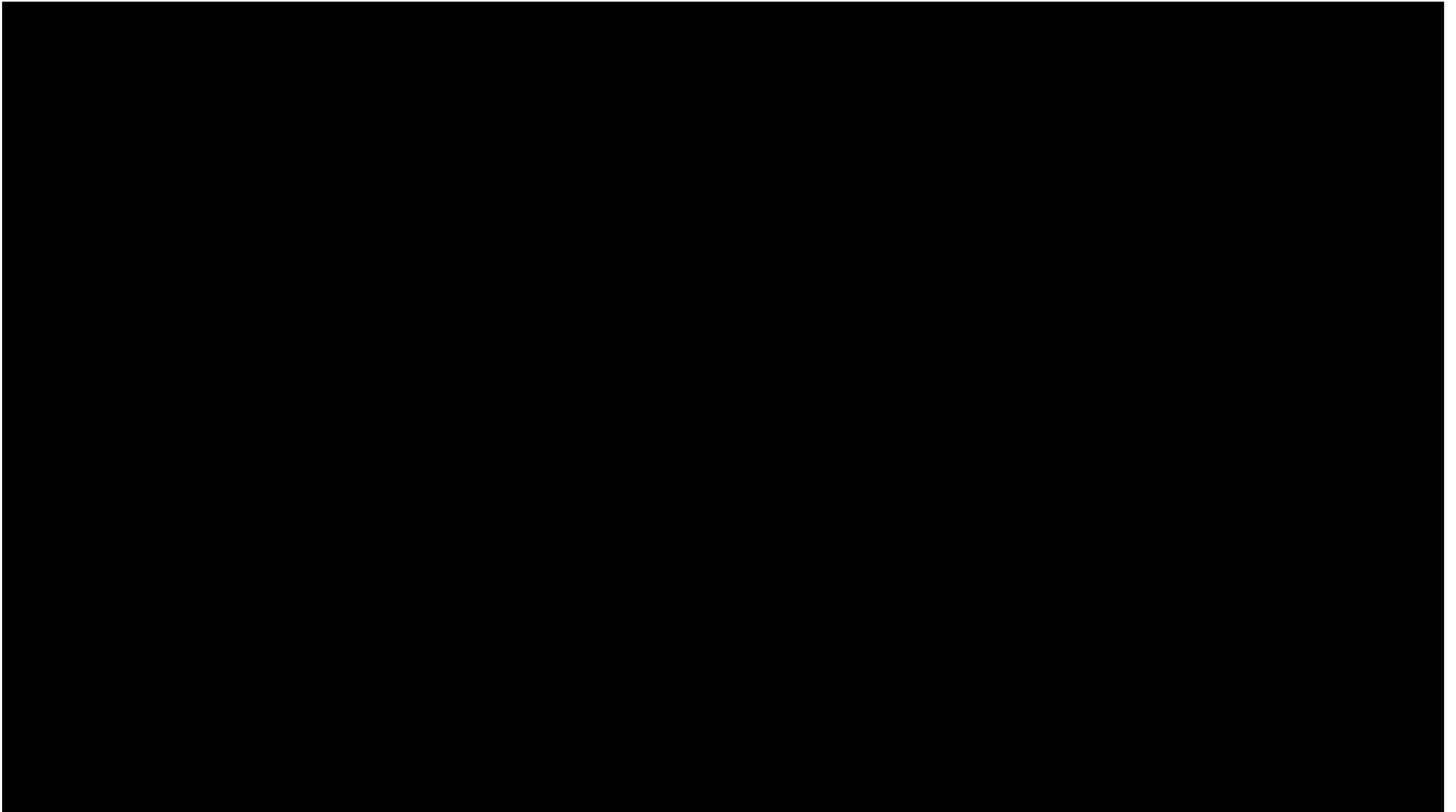
**ANHANG J: Thermalaufnahme 7cm/Pixel**

Nächtliche, unkorrigierte Aufnahme Backsteingebäude, mit der nativen Bodenauflösung von ca. 7cm/Pixel (HSLU, 2022)



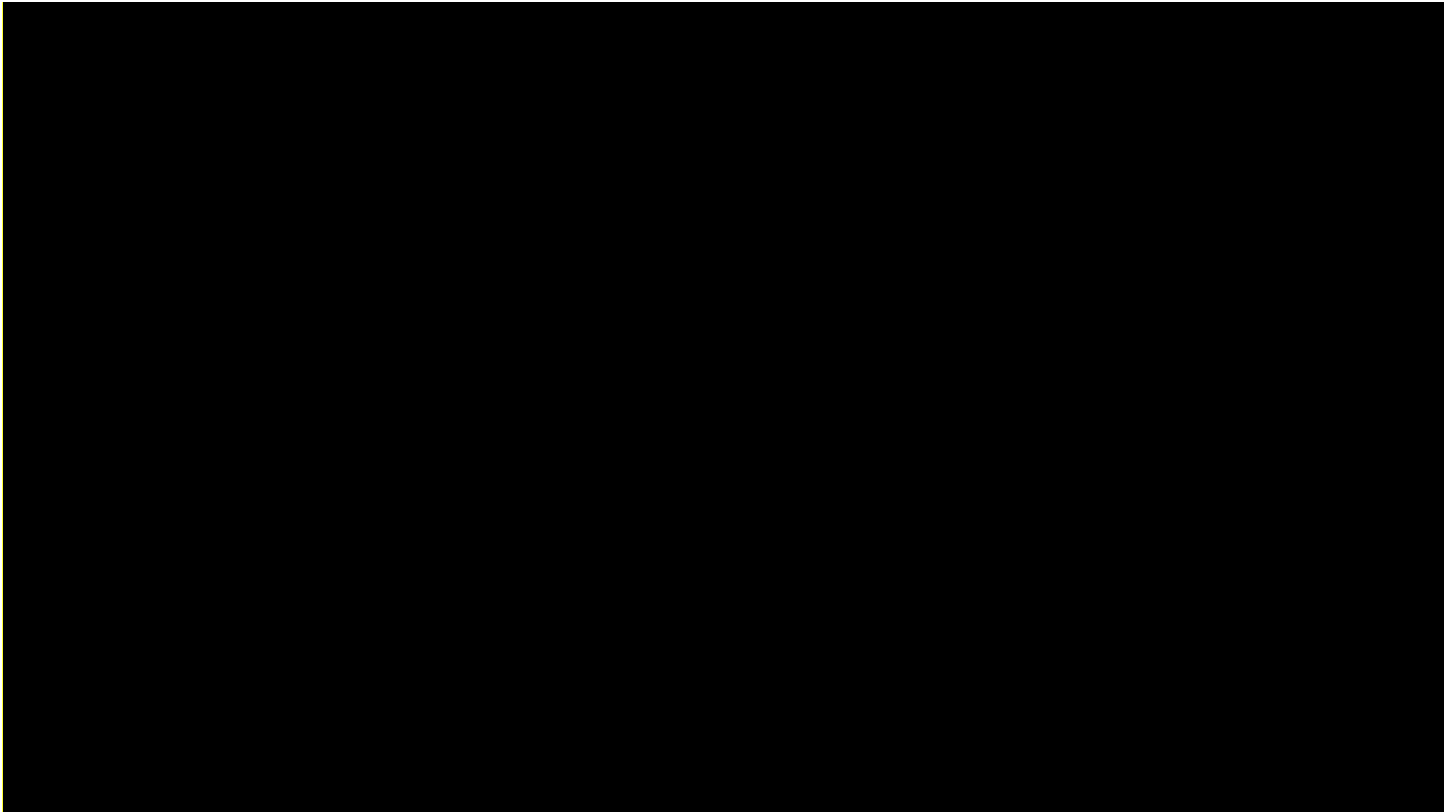
**ANHANG K: Thermalaufnahme 25cm/Pixel**

Nächtliche, unkorrigierte Aufnahme Backsteingebäude, Bodenauflösung von ca. 25cm/Pixel wie sie im Projekt Thermoplaner3D erwartet wird (HSLU, 2022)



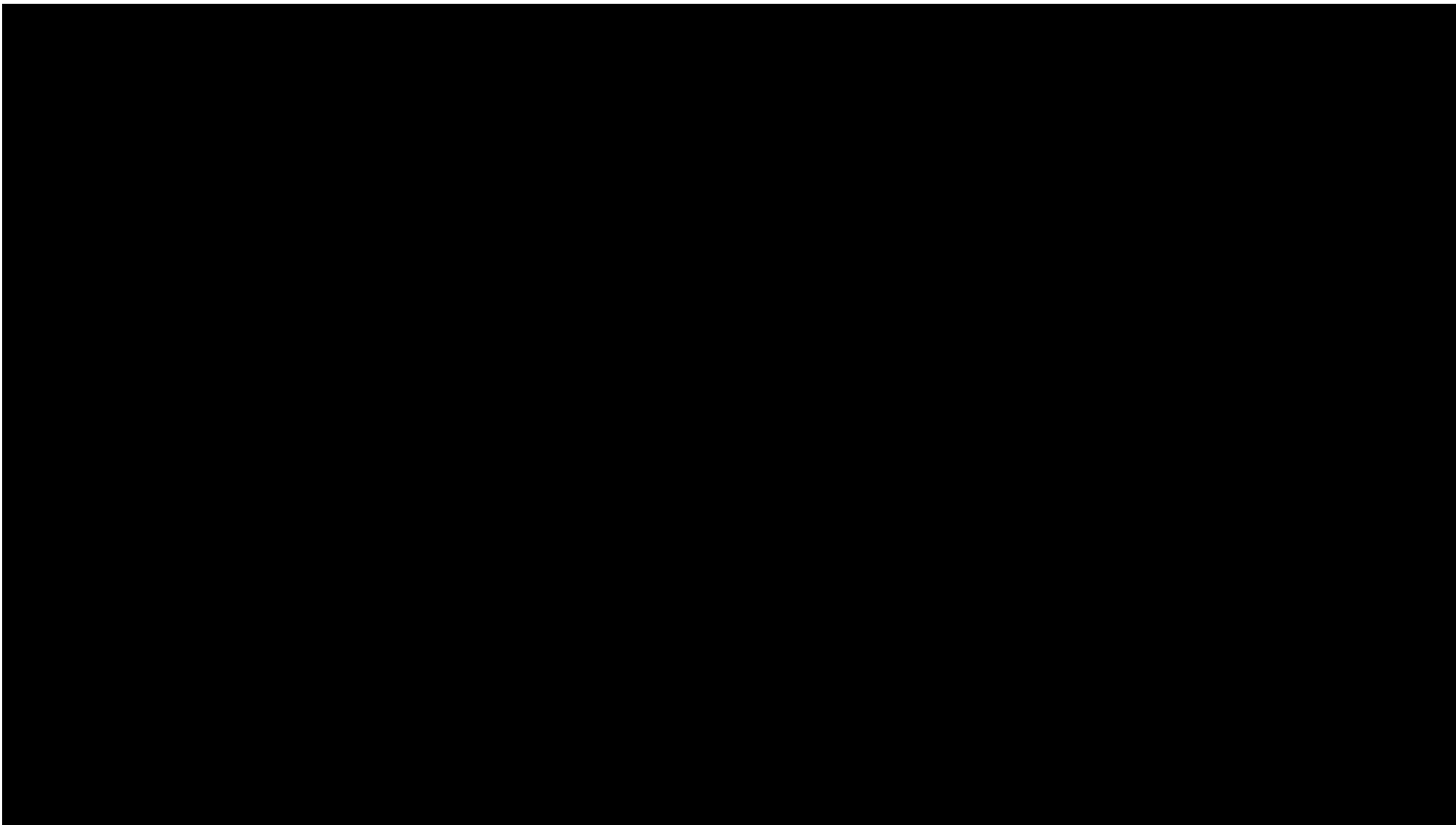
**ANHANG L: Thermalaufnahme 50cm/Pixel**

Nächtliche, unkorrigierte Aufnahme Backsteingebäude, Bodenauflösung von ca. 50cm/Pixel wie sie im Projekt von (Rüdiger et al., 2021) verwendet wird (HSLU, 2022)



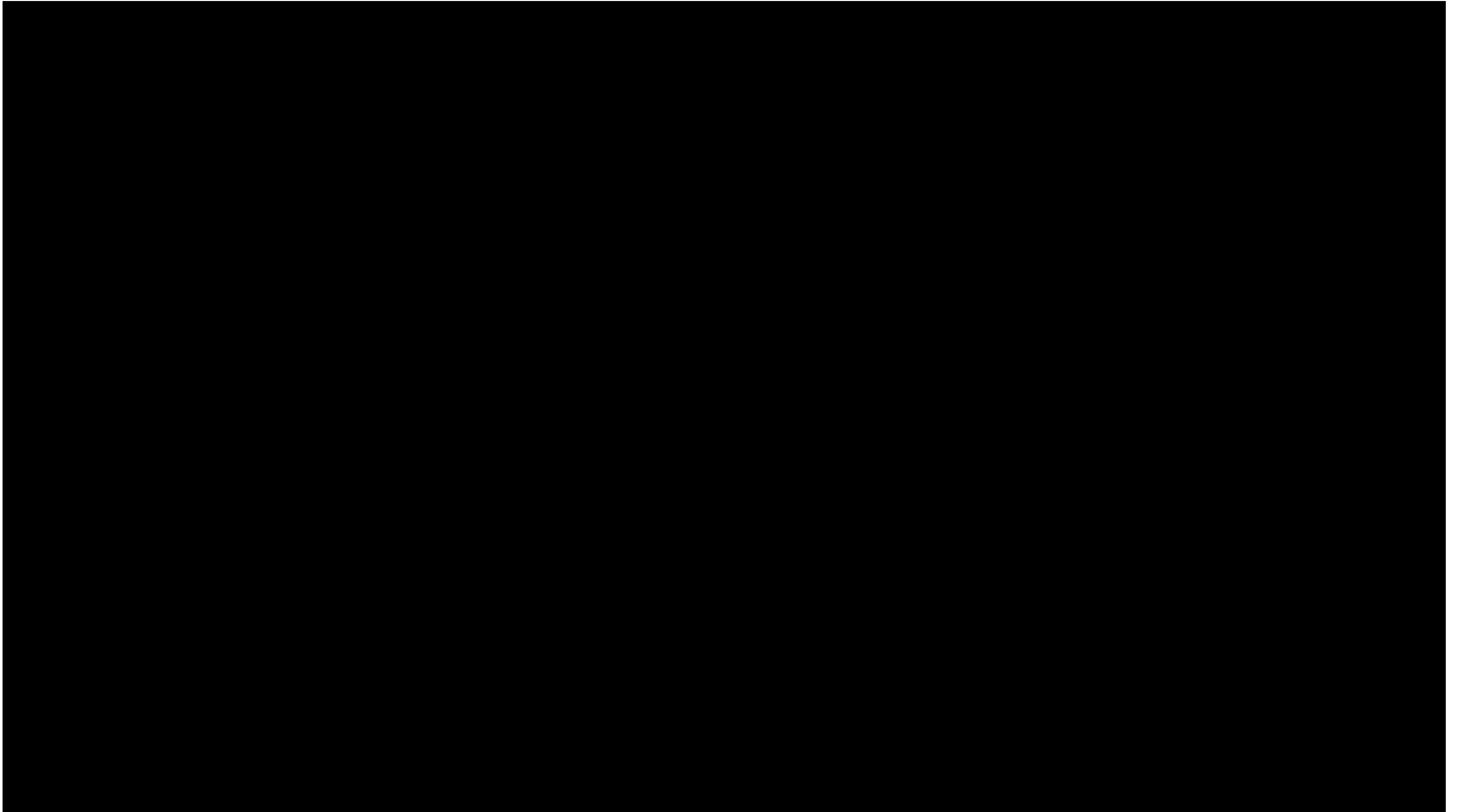
**ANHANG M: Thermalaufnahme 50cm/Pixel aus grosser Höhe**

Nächtliche, unkorrigierte Aufnahme von ca. 50cm/Pixel aus grosser Höhe wie sie im Projekt von Rüdissler et al. (2021) verwendet wird (HSLU, 2024)



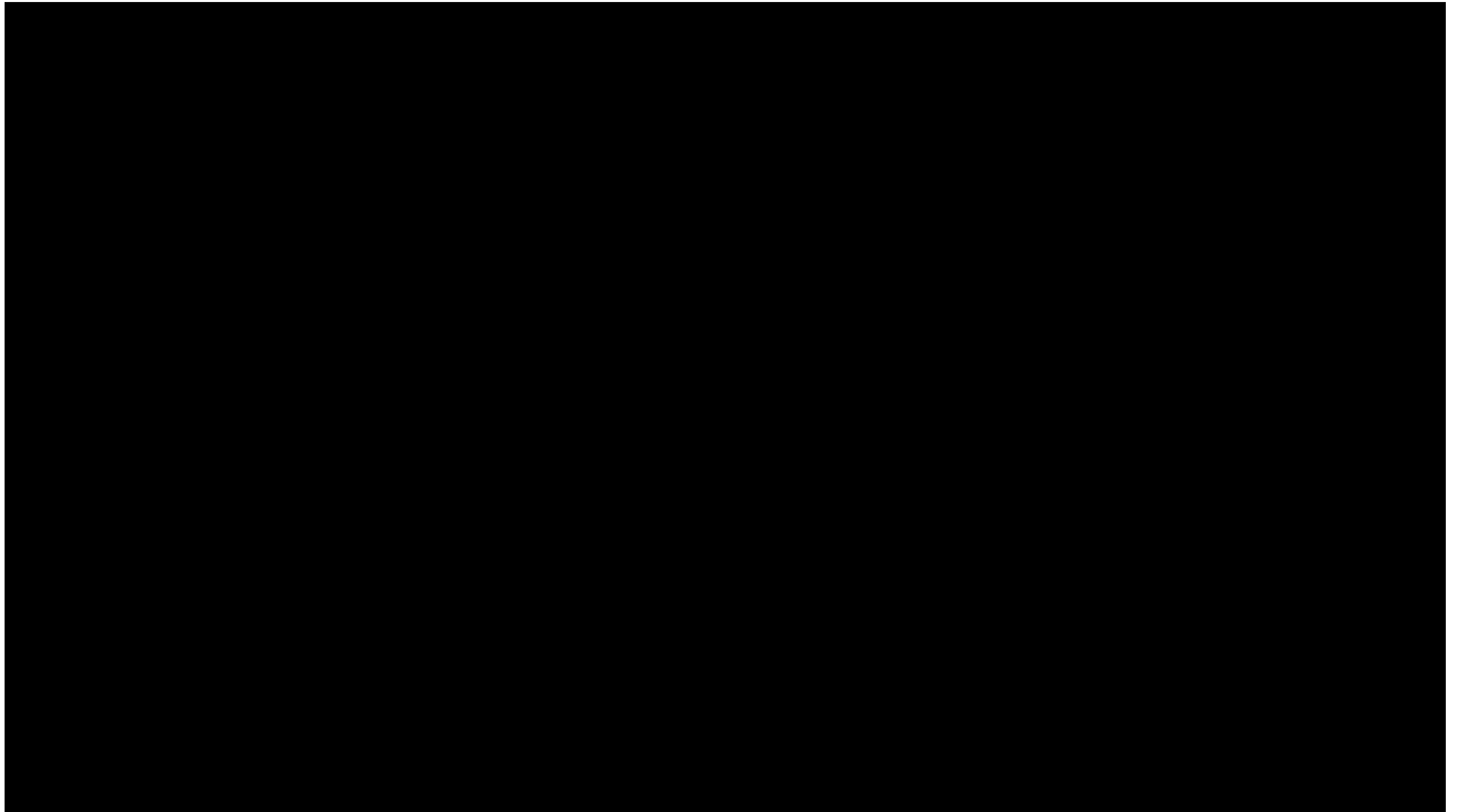
**ANHANG N:      Ausschnitt aus dem photogrammetrischen Modell 7 cm/Pixel**

Photogrammetrisches thermal Modell, mit der nativen Bodenauflösung von ca. 7cm/Pixel (HSLU, 2022)



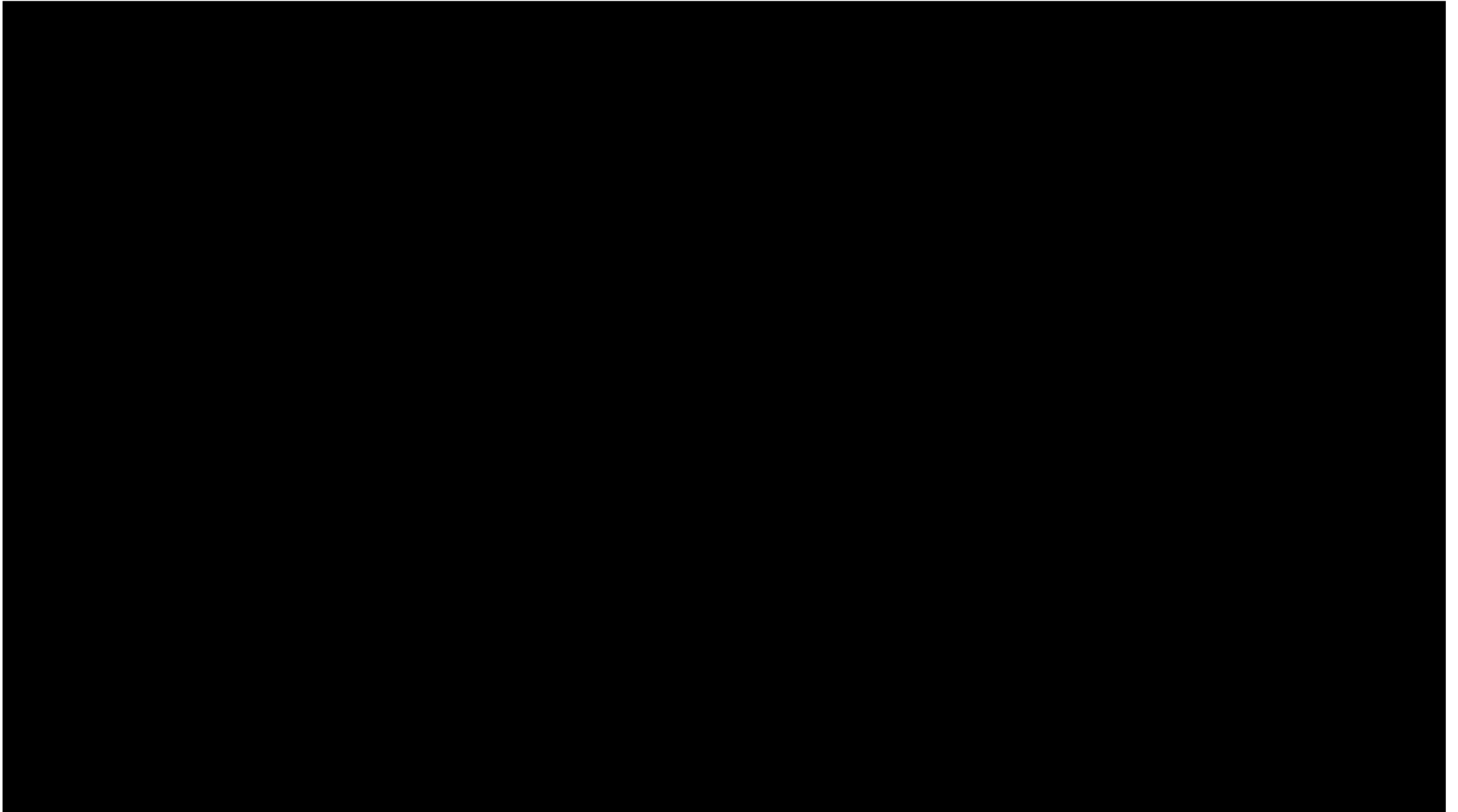
**ANHANG O:      Ausschnitt aus dem photogrammetrischen Modell 25cm/Pixel**

Photogrammetrisches thermal Modell, Bodenauflösung von ca. 25cm/Pixel wie sie im Projekt Thermoplaner3D erwartet wird (HSLU, 2022)



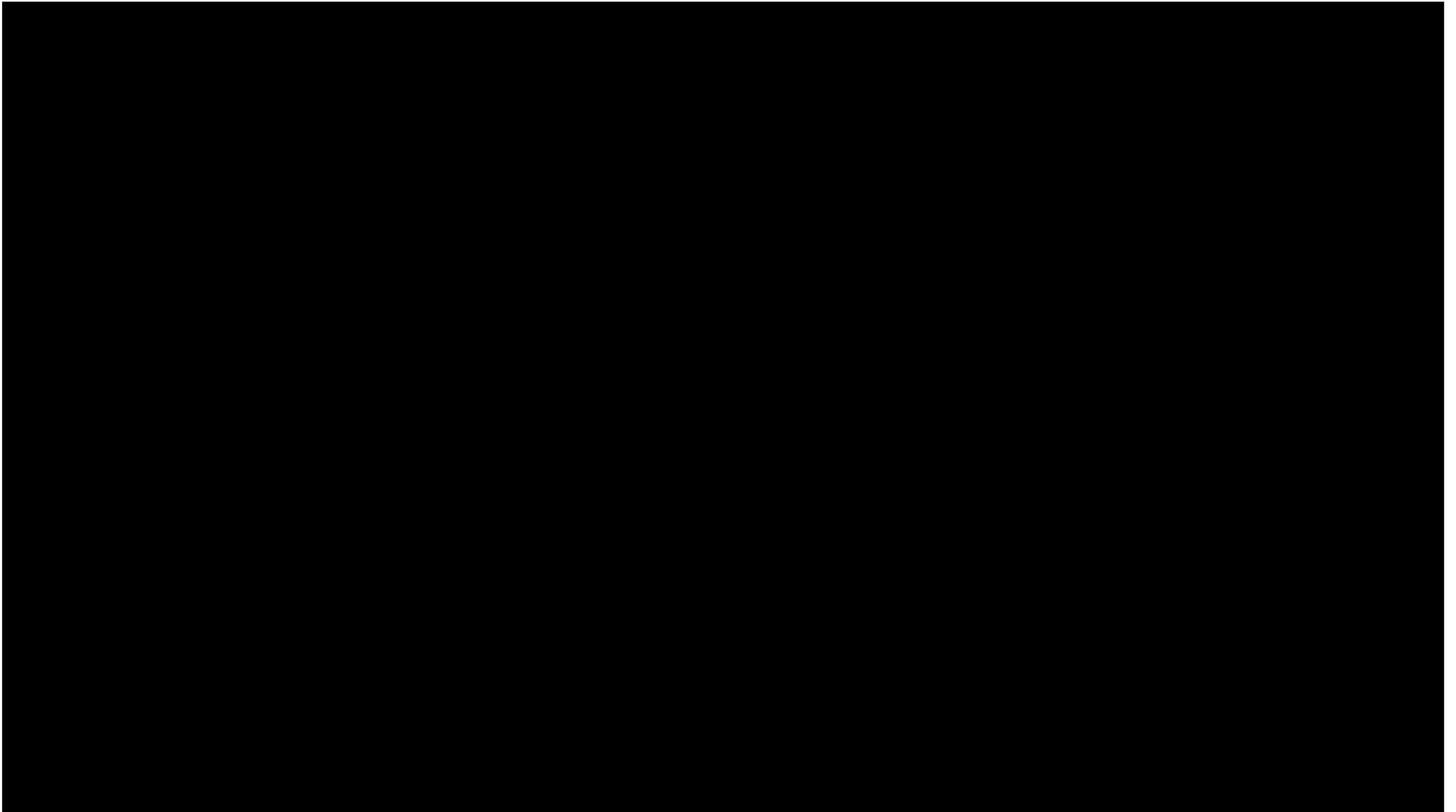
**ANHANG P:      Ausschnitt aus dem photogrammetrischen Modell 50cm/Pixel**

Photogrammetrisches thermal Modell, Bodenauflösung von ca. 50cm/Pixel wie sie im Projekt von (Rüdisser et al., 2021) verwendet wird (HSLU, 2022)



**ANHANG Q:      Ausschnitt aus dem photogrammetrischen Modell 50cm/Pixel aus grosser Höhe**

Photogrammetrisches thermales 3D-Modell mit einer Bodenauflösung von ca. 50cm/Pixel aus grosser Höhe wie sie im Projekt von Rüdisser et al. (2021) verwendet wird (HSLU, 2024)



## ANHANG R: Zusammenfassungen Expert/innen-Gespräche Person 3 (2024)

### Gebäudezustandsermittlung

- Derzeit kommen verschiedene Methoden zur Analyse des Gebäudezustands zum Einsatz. Im Gespräch wurden mehrere Verfahren beschrieben, zusammen mit Erfahrungen aus der Praxis. Diese Erfahrungen decken sich weitgehend mit den Grundlagen, die in früheren Kapiteln behandelt wurden.
- Keine konkreten Angaben dazu, welche Gebäudetypen besser oder schlechter für eine Beteiligung geeignet sind. Allerdings wurde auf Metallfassaden hingewiesen, etwa bei Industriebauten, die für thermografische Beurteilungen problematisch sein können.
- Thermografie gilt bei den genannten Verfahren als eines der wichtigsten Instrumente. Damit lässt sich der allgemeine Zustand eines Gebäudes rasch erfassen. Ausserdem können Schweregrad und Ausmass von Schäden im Vergleich zu anderen Verfahren relativ schnell beurteilt werden.
- Die erforderliche Auflösung thermografischer Aufnahmen hängt von der Grösse der zu beurteilenden Bauteile ab. Beispiele zeigten, dass bei Fassadenbauteilen wie Fenstern etwa 25 Pixel pro Zentimeter benötigt werden. Durch hohe Flughöhen oder spiegelnde Oberflächen kann die Genauigkeit allerdings sinken. Für eine grobe Zustandsabschätzung reicht die Auflösung jedoch häufig aus, insbesondere wenn ähnliche Bauteile an einem oder mehreren Gebäuden miteinander verglichen werden.

### Thermografie-basierte Methoden

- Bisher wenig Erfahrung mit senkrechten (nadiralen) Aufnahmen. Schrägbildaufnahmen werden als sehr vielversprechend angesehen, da sie eine Abdeckung der gesamten Gebäudehülle ermöglichen.
- Diskutiert wurde auch die Korrektur bei spiegelnden Materialien.
- Die Interpretation von Dach- und Fassadenaufnahmen gestaltet sich ähnlich. Allerdings gibt es bei Fassaden meist mehr unterschiedliche Oberflächenmaterialien. Dadurch steigt der Korrekturaufwand. Dieser sei aber mit bodengestützten Thermografie-Verfahren vergleichbar und hänge stark von der Erfahrung der ausführenden Personen ab.
- Die Technologie entwickelt sich: Bessere Sensoren sollen mehr Details liefern. Allerdings kann die Korrektur physikalischer Effekte dadurch aufwendiger werden. Grosse Fortschritte werden bei der Software erwartet, etwa durch Algorithmen, die physikalische Zusammenhänge besser abbilden.

Datenanalyse

- Es wurden Faktoren wie Oberflächenmaterialien, Schichtaufbauten und Umgebungsvariablen erwähnt, die das Aufwärm- und Abkühlverhalten beeinflussen.
- Keine konkreten Nennungen von Softwarelösungen. Meist lassen sich bei thermografischen Handkameras Umgebungsfaktoren direkt am Gerät einstellen.

Praxisrelevanz und Umsetzbarkeit

- Grosses Forschungsinteresse an grossflächigen thermografischen Schrägbildaufnahmen. Hierfür wurden Ideen genannt, etwa eine Erstbeurteilung von Gebäuden oder künftige Sommeranalysen zum Wärmeschutz in Städten.
- Notwendig seien geeignete Testmodelle, um die Methoden zu erproben und anschliessend in der Praxis zu etablieren.

Wichtigste Datenqualitäten für Person 3 nach den Dimensionen von Wang und Strong (1996):

<b>Person 3</b>			
Intrinsische Datenqualität	Kontextuelle Datenqualität	Repräsentative Datenqualität	Zugängliche Datenqualität
Glaubwürdigkeit; Genauigkeit; Objektivität; Ruf	<b>Wertschöpfung;</b> <b>Relevanz;</b> Aktualität; <b>Vollständigkeit;</b> Angemessene Datenmenge	Interpretierbarkeit; Verständlichkeit; Konsistenz der Darstellung; Prägnante Darstellung	Zugänglichkeit; Zugriffssicherheit

## **ANHANG S: Zusammenfassungen Expert/innen-Gespräche Person 4 (2024)**

### Gebäudezustandsermittlung

- Grosse Nachfrage nach Instrumenten, die helfen, den Zustand sämtlicher Gebäude im Stadtgebiet zumindest grob einzuschätzen. Daraus kann eine gezielte Interventionsstrategie abgeleitet werden. Dies umfasst sowohl städtische Gebäude als auch private Bauten.
- Die rechtlichen Rahmenbedingungen müssten geklärt werden, da die Stadt bereits Daten über die lokalen Gebäude sammelt. Ein angemessener Datenschutz sei entscheidend. Ob und wie solche Daten veröffentlicht werden, ist noch offen.
- Zum jetzigen Zeitpunkt kommt Thermografie in der Stadtverwaltung eher selten zum Einsatz. Häufiger werden Blower-Door-Tests oder ähnliche Verfahren angewendet, etwa bei Minergie-Bauten oder im Fall einer Zertifizierung. Bei Schadenfällen werden spezialisierte Fachleute hinzugezogen.

### Datenanalyse

- Das Potenzial für strategische Umsetzungen von Fördermassnahmen ist hoch, besonders für Gebäude mit auffällig schlechtem Zustand.
- Bereits existierende Visualisierungen aus anderen Projekten deuten darauf hin, dass eine ansprechende Darstellung des Gebäudezustands den Willen zur Sanierung in der Bevölkerung steigern kann.
- Für öffentlich genutzte Gebäude sei energetische Sanierung meist finanziell gesteuert und erfolge zusammen mit regulären Unterhaltszyklen.

### Informationsgewinnung und -aufbereitung

- Kaum Erfahrungen im Umgang mit thermografischen Daten. Werte wie das Baujahr und Heizungsangaben könnten die Interpretation erleichtern und die Daten absichern.
- Einfache Tools und Expertinnen oder Experten wären wünschenswert, damit auch Nicht-Fachleute eine Einschätzung treffen können.

### Nutzerbedürfnisse

- Sowohl für die Öffentlichkeit als auch intern in der Stadtverwaltung ist es wichtig, Daten in einem sinnvollen Kontext zu präsentieren. Unsicherheiten sollten klar ausgewiesen werden.
- Verschiedene Darstellungsformen, von einfachen Aufnahmen bis zu dreidimensionalen Modellen, sind denkbar. Aktualisierungen in ähnlichen Abständen wie die regulären Geodaten wären für den Anfang vermutlich ausreichend.

### Praxisrelevanz und Umsetzbarkeit

- Starkes Interesse an einer passenden Plattform, um solche Daten zu nutzen. Der Aufbau einer eigenen Plattform erscheint kostenintensiv. Bestehende Lösungen wie MyHeat wurden angesprochen, und das Interesse an deren Umsetzung ist gross.

- Förderung nachhaltiger Bau- und Energiewirtschaft
- Der Gebäudeenergieausweis (GEAK) ist stadtweit relevant, wird aber als wenig motivierend für die Bevölkerung eingeschätzt. Er ist zudem für eine Erstbeurteilung zu aufwendig.
- Eine neue Förderpraxis auf Basis thermografischer Daten ist denkbar, um die Gebäude mit deutlich erkennbaren Schwachstellen zu identifizieren und zu unterstützen.

Wichtigste Datenqualitäten für Person 4 nach den Dimensionen von Wang und Strong (1996):

<b>Person 4 (öffentliche Hand)</b>			
Intrinsische Datenqualität	Kontextuelle Datenqualität	Repräsentative Datenqualität	Zugängliche Datenqualität
<b>Glaubwürdigkeit;</b> Genauigkeit; Objektivität; Ruf	Wertschöpfung; Relevanz; Aktualität; Vollständigkeit; Angemessene Datenmenge	<b>Interpretierbarkeit;</b> <b>Verständlichkeit;</b> Konsistenz der Darstellung; <b>Prägnante Darstellung</b>	<b>Zugänglichkeit;</b> Zugriffssicherheit

Für Person 4 wurde zusätzlich eine zweite Zuordnung der Datenqualitäten nach den Dimensionen von Wang und Strong (1996) vorgenommen, da diese Person sowohl die öffentliche Hand vertrat als auch zuvor als GEAK-Experte tätig war. So konnten beide Sichtweisen abgedeckt werden.

<b>Person 4 (GEAK-Experte)</b>			
Intrinsische Datenqualität	Kontextuelle Datenqualität	Repräsentative Datenqualität	Zugängliche Datenqualität
<b>Glaubwürdigkeit;</b> <b>Genauigkeit;</b> <b>Objektivität;</b> Ruf	<b>Wertschöpfung;</b> <b>Relevanz;</b> Aktualität; <b>Vollständigkeit;</b> Angemessene Datenmenge	<b>Interpretierbarkeit;</b> Verständlichkeit; Konsistenz der Darstellung; Prägnante Darstellung	Zugänglichkeit; Zugriffssicherheit

## **ANHANG T: Zusammenfassungen Expert/innen-Gespräche Person 5 (2024)**

### Gebäudezustandsermittlung

- Ein neues Onlineportal befindet sich in Entwicklung. Dieses soll sowohl den Zustand der städtischen Gebäude erfassen als auch der Öffentlichkeit Informationen über den Gebäudebestand bereitstellen.
- Zurzeit werden für eine flächendeckende Einschätzung lediglich Heizungsinformationen und Baujahre berücksichtigt. Denkbar ist, dass die Bevölkerung künftig selbst Angaben ergänzt oder dass bei neuen Bauprojekten bestimmte Daten verpflichtend geliefert werden. Für ältere Bauten ist das jedoch noch keine Lösung.
- Der rechtliche Rahmen wird als relativ sicher eingeschätzt. Es bleibt offen, wie die Bevölkerung auf eine umfangreiche Darstellung von Gebäudedaten reagiert, zum Beispiel wenn man das eigene Haus mit anderen vergleichen kann.

### Datenanalyse

- Prozesse zur Ableitung konkreter Sanierungspläne aus den gesammelten Gebäudedaten stehen noch am Anfang. Wie genau priorisiert wird, ist gegenwärtig nicht eindeutig geregelt und es existieren kaum normative Grundlagen.
- Eine aktuelle Nutzungsidee besteht darin, der Bevölkerung zu zeigen, wo ihr Gebäude im Vergleich zu ähnlichen Bauten steht. Das erinnert an das Projekt MyHeat in Kanada, ist jedoch hier noch weniger ausgereift, was den Einsatz der Daten betrifft.
- Angedacht ist auch eine Verknüpfung der Gebäudedaten mit gezielten Informationskampagnen, eventuell per Post, um Personen zu erreichen, die keine Webseite besuchen.
- Daten zu grossen Verbrauchern, etwa aus Elektrizitäts- und Gaswerken, wären wünschenswert, liegen allerdings derzeit nicht vor.
- Bei der Visualisierung denkt man an verschiedene Optionen. Die bereits in Entwicklung befindliche Plattform legt Wert auf eine verständliche Darstellung, während bestehende städtische GIS-Lösungen als möglicher Integrationspfad betrachtet werden.

### Informationsgewinnung und -aufbereitung

- Es wurde darüber diskutiert, wie thermografische Daten quantifiziert und mit bestehenden Informationen abgeglichen werden könnten.
- Der Nutzen der Daten hängt stark von den geplanten Massnahmen ab. Bei einem blossen Heizungsersatz sind thermografische Informationen nicht zwingend nötig, eher Verbrauchswerte von Gas oder Strom und Angaben zur Heizungsart. Bei einem historischen Gebäude kann eine Fassadendämmung weniger Priorität haben, selbst wenn eine Heizung effizient ist.
- Die Daten sollten sowohl über ein speziell entwickeltes Portal als auch über etablierte Kanäle wie städtische oder kantonale GIS-Plattformen verfügbar sein. Die Anforderungen der verschiedenen Stakeholder sind noch genauer zu klären, ebenso die geeigneten Datenformate.

- Auf dem gegenwärtig in Entwicklung befindlichen Energieportal wird vor allem darauf geachtet, dass alle angezeigten Informationen gut erklärt und eingeordnet sind, was auch für thermografische Daten gelten sollte. Eine beispielhafte Einführung könnte Nutzer/innen zeigen, wie das Tool funktioniert.
- Eine Aktualisierung dieser Daten kann aufwendig sein, da eine erneute Datenerfassung nötig ist und wahrscheinlich das gesamte Stadtgebiet am Stück befliegen werden sollte. Dies ähnelt den bestehenden Geodatenprozessen und kann möglicherweise in diese Strukturen integriert werden.

Nutzerbedürfnisse

- Viele Menschen möchten wissen, ob sich eine Sanierung für ihr Gebäude lohnt, wo eine erste professionelle Beratung zu finden ist und welche Fördermassnahmen zur Verfügung stehen.
- Es interessiert auch, wie die Stadt selbst ihre öffentlichen Gebäude saniert, da dies das Vertrauen und die Motivation in der Bevölkerung steigern kann.
- Eine Ergänzung der Gebäudedaten durch Eigentümer/innen wäre spannend, allerdings müsste eine Überprüfung stattfinden, damit die Qualität stimmt.
- Es ist wesentlich, dass Modelle klar und anschaulich sind. Erste photogrammetrische Modelle haben offenbar nicht überzeugt. Man diskutiert, wie die Darstellung, ähnlich wie auf dem geplanten Energieportal, übersichtlicher gestaltet werden könnte. Die Visualisierung des Projekts MyHeat wurde als positiv wahrgenommen.

Praxisrelevanz und Umsetzbarkeit

- Die Stadt investiert bereits in die Erfassung von Gebäudezuständen und ist sehr interessiert daran, die Daten für Informationszwecke einzusetzen. Dabei wurden verschiedene Erweiterungen diskutiert.
- Wenn in Zukunft auch quantitative Daten für den Sommer vorliegen, könnte dies neue Einsichten bieten, unter anderem für Hitzeschutzmassnahmen. Man verwies dabei auf Arbeiten wie jene von Rüdisser.
- Eine Kombination aus Energieausweis (GEAK) und thermografischen Daten ist denkbar, sollte jedoch keine erheblichen Mehrkosten verursachen, da dies die Bereitschaft der Eigentümer/innen, solche Gutachten zu erstellen, verringern könnte.

Wichtigste Datenqualitäten für Person 5 nach den Dimensionen von Wang und Strong (1996):

Person 5			
Intrinsische Datenqualität	Kontextuelle Datenqualität	Repräsentative Datenqualität	Zugängliche Datenqualität
Glaubwürdigkeit; Genauigkeit; Objektivität; Ruf	Wertschöpfung; Relevanz; Aktualität; Vollständigkeit; Angemessene Datenmenge	Interpretierbarkeit; Verständlichkeit; Konsistenz der Darstellung; Prägnante Darstellung	Zugänglichkeit; Zugriffssicherheit

## **ANHANG U: Zusammenfassungen Expert/innen-Gespräche Person 6 (2024)**

### Gebäudezustandsermittlung

- Ausführliche Diskussion über bereits eingesetzte Verfahren sowie deren Unterschiede. Die Aussagen stimmen weitgehend mit Erkenntnissen aus der Literaturrecherche überein. In der Bautechnik spielt Thermografie eine wichtige Rolle, oft in Kombination mit anderen Methoden wie Blower-Door-Tests, um Schwachstellen aufzudecken.
- Der Gebäudetyp ist relevant, da grosse Bauten oft mehr Zeit für eine vollständige Untersuchung erfordern. Bei Industriebauten wird manchmal nur ein bestimmter Bereich überprüft, während im Wohn- und Geschäftsbereich meist die gesamte Gebäudehülle betrachtet wird. Verschiedene SIA-Normen wurden erwähnt.
- Die Kalibrierung der Geräte und die Interpretation der Ergebnisse hängen stark vom Erfahrungswissen der Fachleute ab. Es ist wichtig zu wissen, wie die Kameras kalibriert waren und welche Korrekturen vorgenommen wurden, um die Resultate richtig einzuordnen.
- Die gewünschte Bildauflösung richtet sich nach dem Anwendungsfall. Für erste Einschätzungen können 25 bis 50 Pixel pro Zentimeter genügen, für eine präzise Analyse sind bodengestützte Handgeräte oder Drohnenaufnahmen mit hoher Auflösung sinnvoll. Bei Aufnahmen aus grosser Höhe erkennt man oft nicht mehr, um welche Bauteile es genau geht, weshalb zusätzliche Echtfarbbilder oder ein 3D-Modell hilfreich sein können.

### Thermografie-basierte Methoden

- Diskussion darüber, welche Details auf Schrägbildaufnahmen sichtbar werden. Ein Vergleich mit bodengestützter Thermografie zeigt Ähnlichkeiten bei Dach- und Fassadenanalyse, etwa bei der Erkennung von Fensterflächen, Bauteilübergängen oder Anbauten.
- Der Aufnahmewinkel beeinflusst die erforderliche Korrektur. Eine sorgfältige Berücksichtigung des Einfallswinkels ist nötig.
- Ausserdem wurde ein umfassender Abgleich zu bisherigen bodengestützten Verfahren diskutiert, die auf luftgestützte Thermografie übertragbar sein könnten.
- Es besteht reges Interesse an den Forschungen von Rüdiger. Mehrere Nachfragen liessen sich in späteren Anwendungskonzepten beantworten.

### Datenanalyse

- Quantitative Auswertungen aus Schrägbildaufnahmen sind schwierig. Ein vergleichendes visuelles Verfahren kann jedoch schon wichtige Erkenntnisse liefern.
- Bei ausreichenden Korrekturen und bekanntem Oberflächenmaterial sind erste quantitative Rückschlüsse möglich. Dafür ist noch viel Entwicklungsarbeit erforderlich.
- Leitlinien sollen sich an SIA-Normen und Erfahrungswerten orientieren, da in vielen Fällen noch das Bauchgefühl von Fachleuten zählt.
- Bei luftgestützten Verfahren rät man zu zusätzlichen bodengestützten Messungen für eine Plausibilisierung. Herkömmliche Methoden dürfen keinesfalls ignoriert werden.

Informationsgewinnung und -aufbereitung

- Eine aufwendige Visualisierung ist im beruflichen Umfeld von Person 6 nicht zwingend nötig. Rohdaten genügen, sofern Angaben zu Aufnahmebedingungen und Datenqualität vorhanden sind.
- Detaillierte Anforderungen an öffentliche Darstellungsformen wurden nicht genannt, da man im eigenen Einsatzumfeld eher mit Fachpersonal arbeitet.

Nutzerbedürfnisse

- Es besteht aktuell ein Mangel an Fachleuten, die energiebezogene Bewertungen erstellen können. Wenn neue Verfahren den Prozess beschleunigen, wäre das hilfreich.
- Trotzdem müssten nach wie vor Personen den abschliessenden Entscheid treffen, insbesondere wenn finanzielle Konsequenzen anstehen.

Praxisrelevanz und Umsetzbarkeit

- Schrägbildaufnahmen bieten grosses Potenzial für erste Gebäudezustandsbeurteilungen. Falls die Datenqualität steigt, wäre auch ein erweitertes Einsatzspektrum denkbar.
- Person 6 weist jedoch auf mögliche Ungenauigkeiten durch hohe Flughöhen hin und empfiehlt, eher niedrige Flughöhen zu wählen.
- Weitere Herausforderungen wie die Korrektur physikalischer Effekte und die Einbindung in etablierte Verfahren sehen sie als lösbar an, aber noch nicht vollständig geklärt.

Wichtigste Datenqualitäten für Person 6 nach den Dimensionen von Wang und Strong (1996):

<b>Person 6</b>			
Intrinsische Datenqualität	Kontextuelle Datenqualität	Repräsentative Datenqualität	Zugängliche Datenqualität
Glaubwürdigkeit; Genauigkeit; Objektivität; Ruf	Wertschöpfung; Relevanz; Aktualität; Vollständigkeit; Angemessene Datenmenge	Interpretierbarkeit; Verständlichkeit; Konsistenz der Darstellung; Prägnante Darstellung	Zugänglichkeit; Zugriffssicherheit

## **ANHANG V: Zusammenfassungen Expert/innen-Gespräche Person 7: (2024)**

### Gebäudezustandsermittlung

- In vielen öffentlichen Institutionen fehlen vollständige, aktuelle Datensätze zum Gebäudezustand. Eine flächendeckende Neuerfassung ist aufwendig und teils rechtlich schwierig.
- Teure Erhebungsmassnahmen lassen sich im öffentlichen Bereich nur dann rechtfertigen, wenn ein klarer Nutzen erkennbar ist. Oft wird der Informationswert von Gebäudezuständen noch nicht als ausreichend hoch eingeschätzt.
- Es wäre wünschenswert, zumindest gewisse Basisdaten auf städtischer oder kantonaler Ebene zu haben, um daraus weitere Erkenntnisse ableiten zu können.

### Datenanalyse

- Einzelne Gemeinden nutzen bereits Energieportale, andere denken darüber nach. Ein einheitlicher Leitfaden auf höherer Ebene existiert jedoch nicht, was zu sehr individuellen Ansätzen führt.
- Die Qualität der Daten ist entscheidend. Mit unzureichend genauen Messwerten lassen sich lediglich ansprechende Visualisierungen erstellen, während belastbare Aussagen zum effektiven Gebäudezustand qualitativ hochwertige Daten erfordern.
- Für die Darstellung solcher Informationen wären bestehende kantonale oder kommunale Plattformen denkbar. Es ist wichtig, die Daten mit bereits vorhandenen Datensätzen in einen sinnvollen Kontext zu bringen und sie klar zu präsentieren.

### Informationsgewinnung und -aufbereitung

- Person 7 verfügt über wenig Erfahrung bei der eigentlichen Gebäudezustandsanalyse. Allerdings können vorhandene Geodaten zu Heizungstypen und Baujahr bereits erste Hinweise liefern.
- Mit Visualisierungen hat Person 7 reichlich Erfahrung und verweist auf Projekte, in denen dreidimensionale Stadtmodelle für die Kommunikation von Projekten an die Bevölkerung genutzt wurden.
- Man hat gelernt, dass ein klar strukturierter Aufbau und ein reduzierter Funktionsumfang für Nutzer/innen wesentlich sind. Fachanwendende können bei Bedarf zusätzliche Optionen erhalten, jedoch nicht auf Kosten der Benutzerfreundlichkeit.

### Nutzerbedürfnisse

- Informationen zum Gebäudezustand werden derzeit nicht stark nachgefragt, weil es noch kein etabliertes Angebot gibt. Die generellen Bedürfnisse wurden bereits früher erwähnt.

### Praxisrelevanz und Umsetzbarkeit

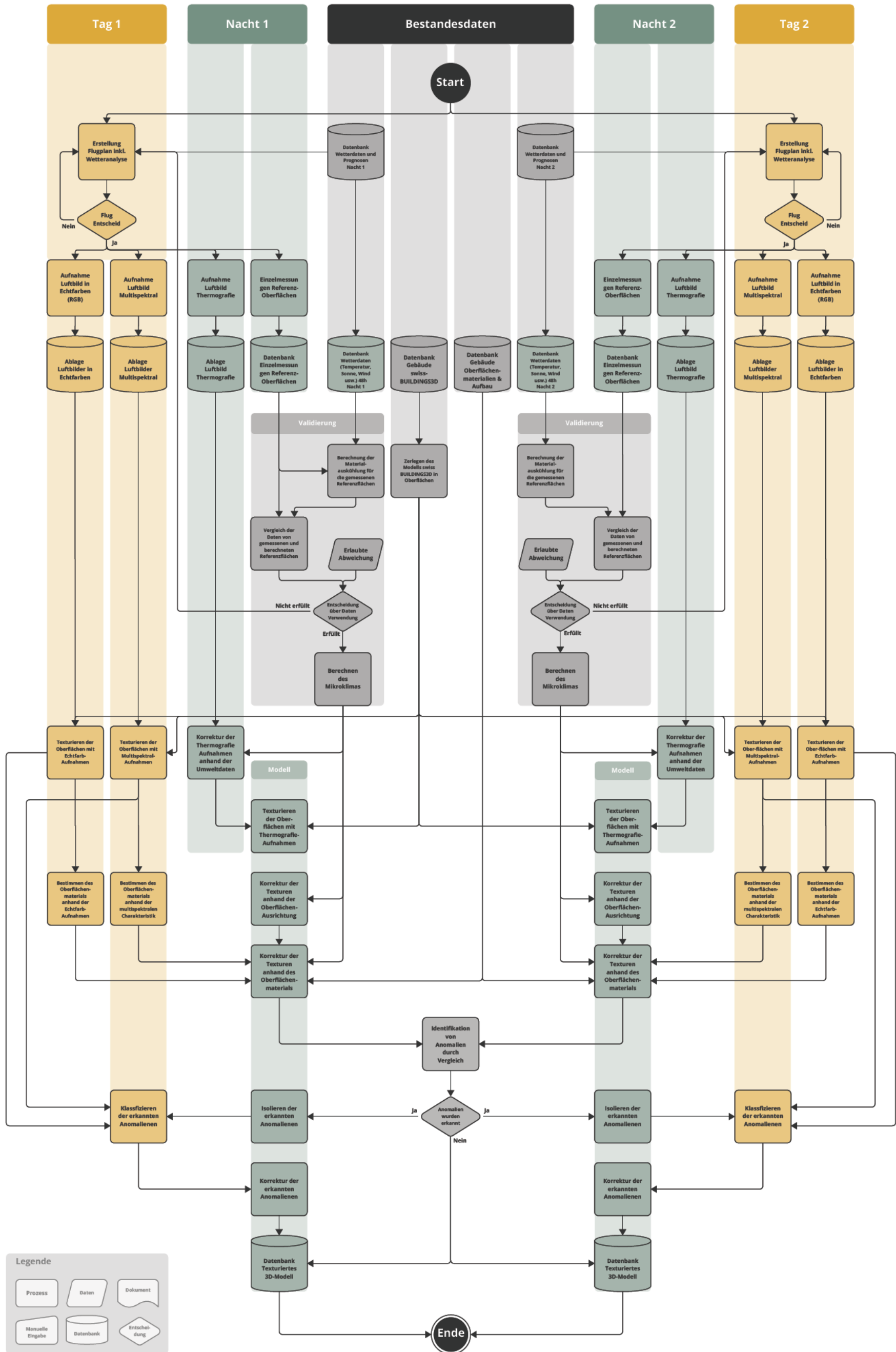
- Eine öffentliche Nutzung von grossflächigen thermografischen Daten stösst auf grosses Interesse. Die entscheidende Frage bleibt, für welche Zwecke die Datenqualität ausreicht.

- Bereits unkorrigierte Daten könnten ähnlich wie bei MyHeat der Bevölkerung eine grobe Einschätzung liefern und dadurch das Interesse am eigenen Gebäude steigern.

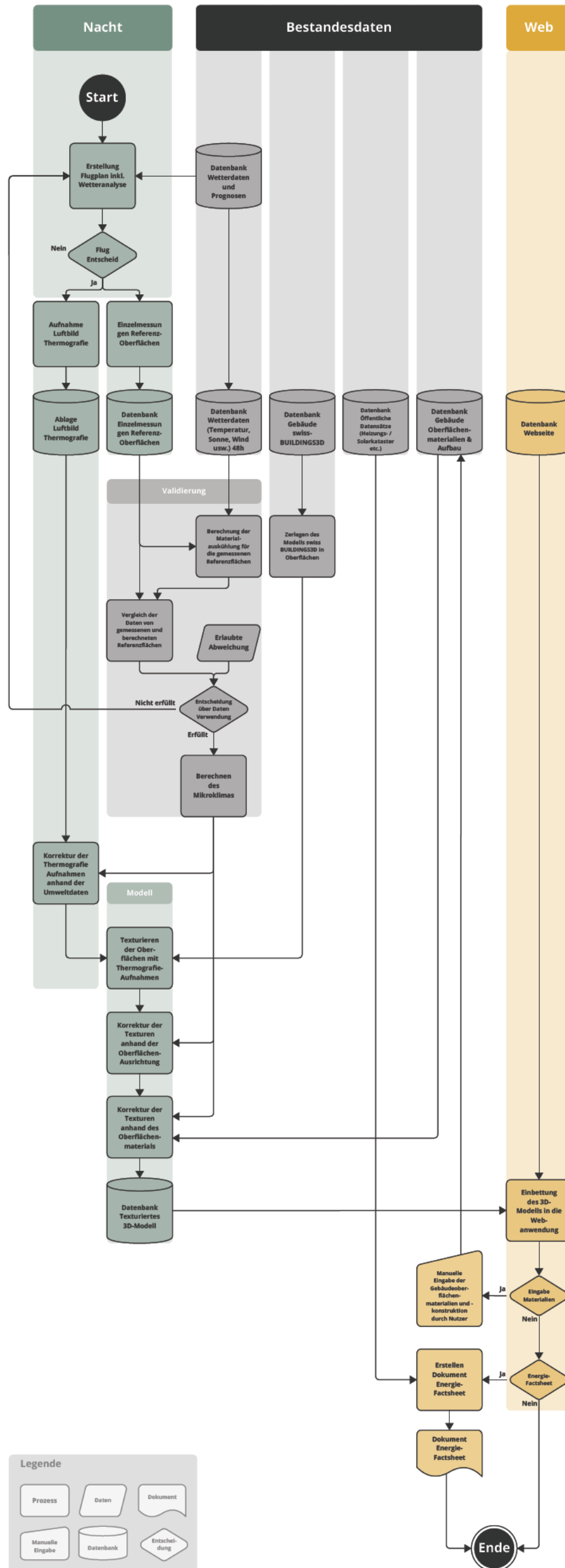
Wichtigste Datenqualitäten für Person 7 nach den Dimensionen von Wang und Strong (1996):

<b>Person 7</b>			
Intrinsische Datenqualität	Kontextuelle Datenqualität	Repräsentative Datenqualität	Zugängliche Datenqualität
<b>Glaubwürdigkeit;</b> Genauigkeit; Objektivität; Ruf	<b>Wertschöpfung;</b> Relevanz; Aktualität; Vollständigkeit; Angemessene Datenmenge	<b>Interpretierbarkeit;</b> <b>Verständlichkeit;</b> <b>Konsistenz der Darstellung;</b> <b>Prägnante Darstellung</b>	<b>Zugänglichkeit;</b> Zugriffssicherheit

ANHANG W: Flussdiagramm Anspruchsgruppe "Experten"

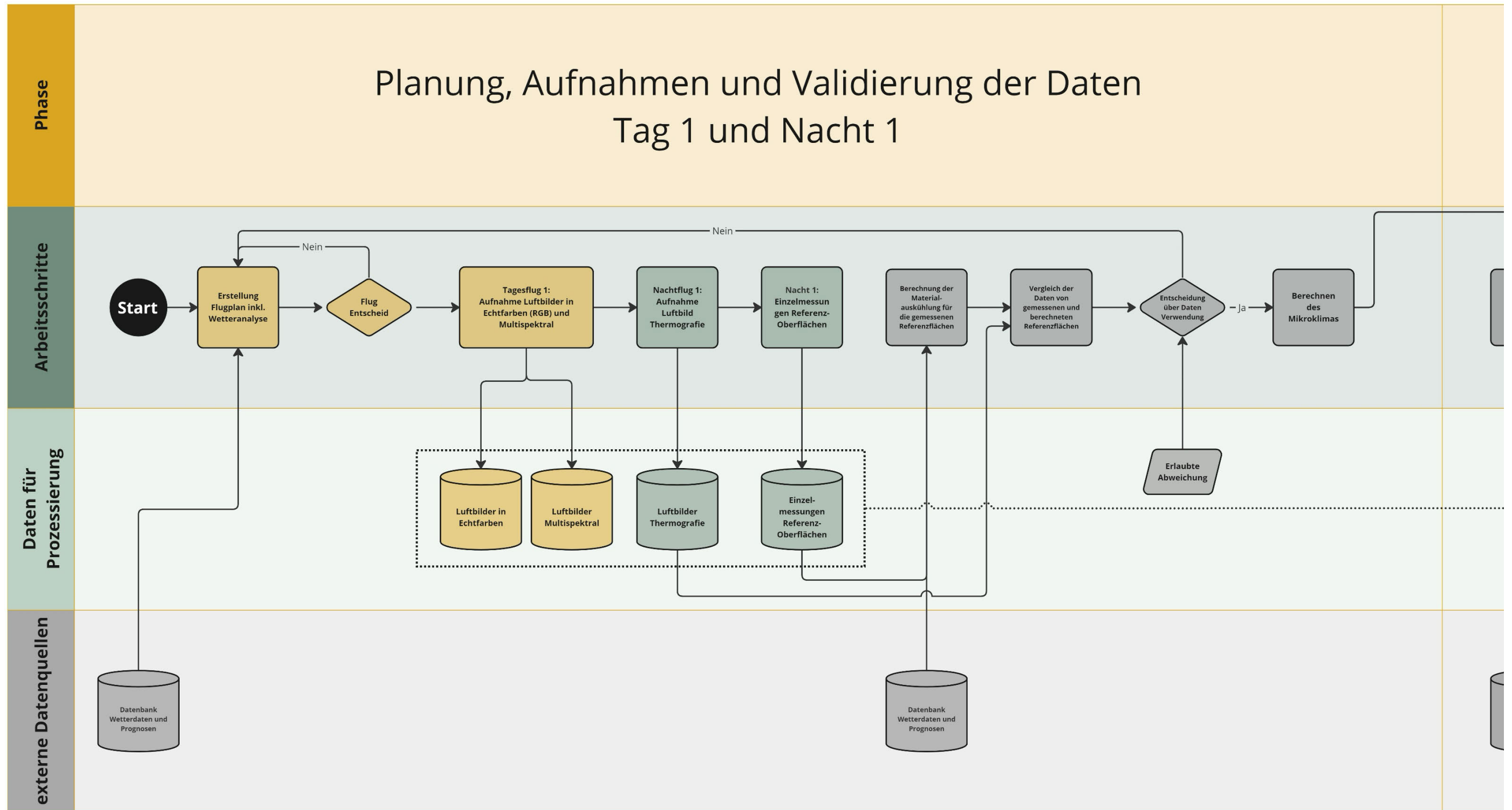


ANHANG X: Flussdiagramm Anspruchsgruppe "Kommunen"

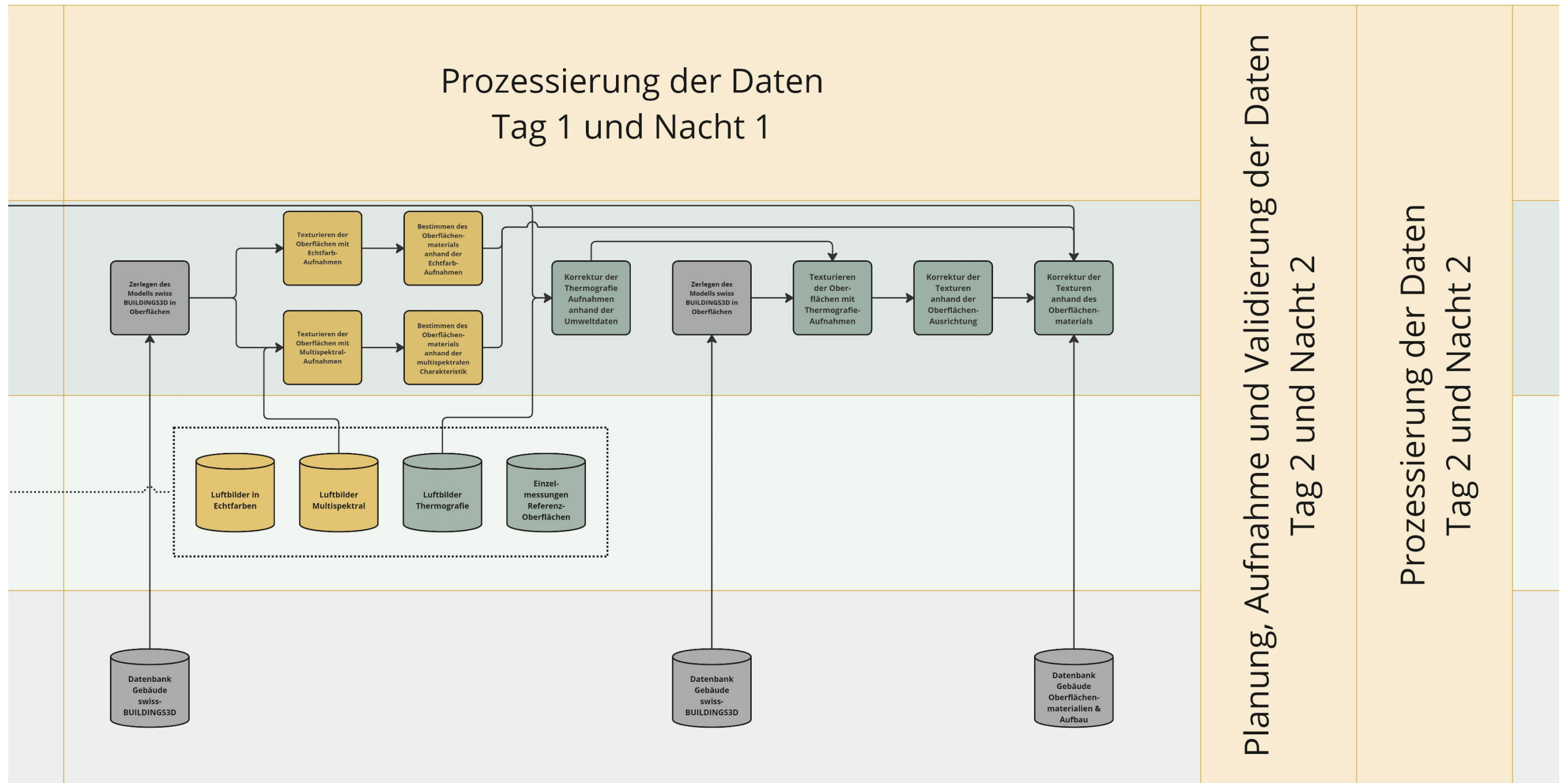


**ANHANG Y: Swimlane-Diagramm**

Teil 1



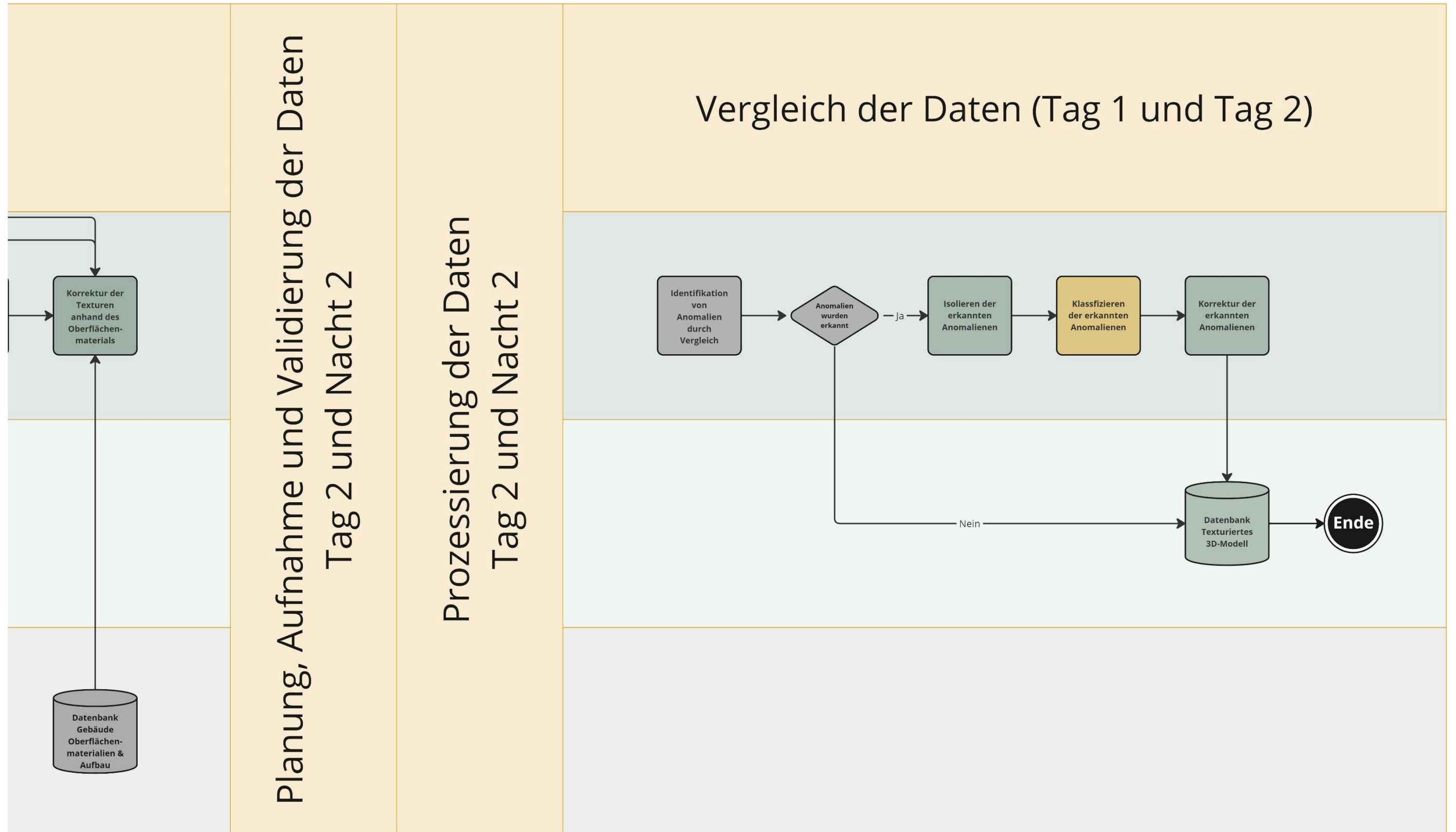
Swimlane-Diagramm Teil 2



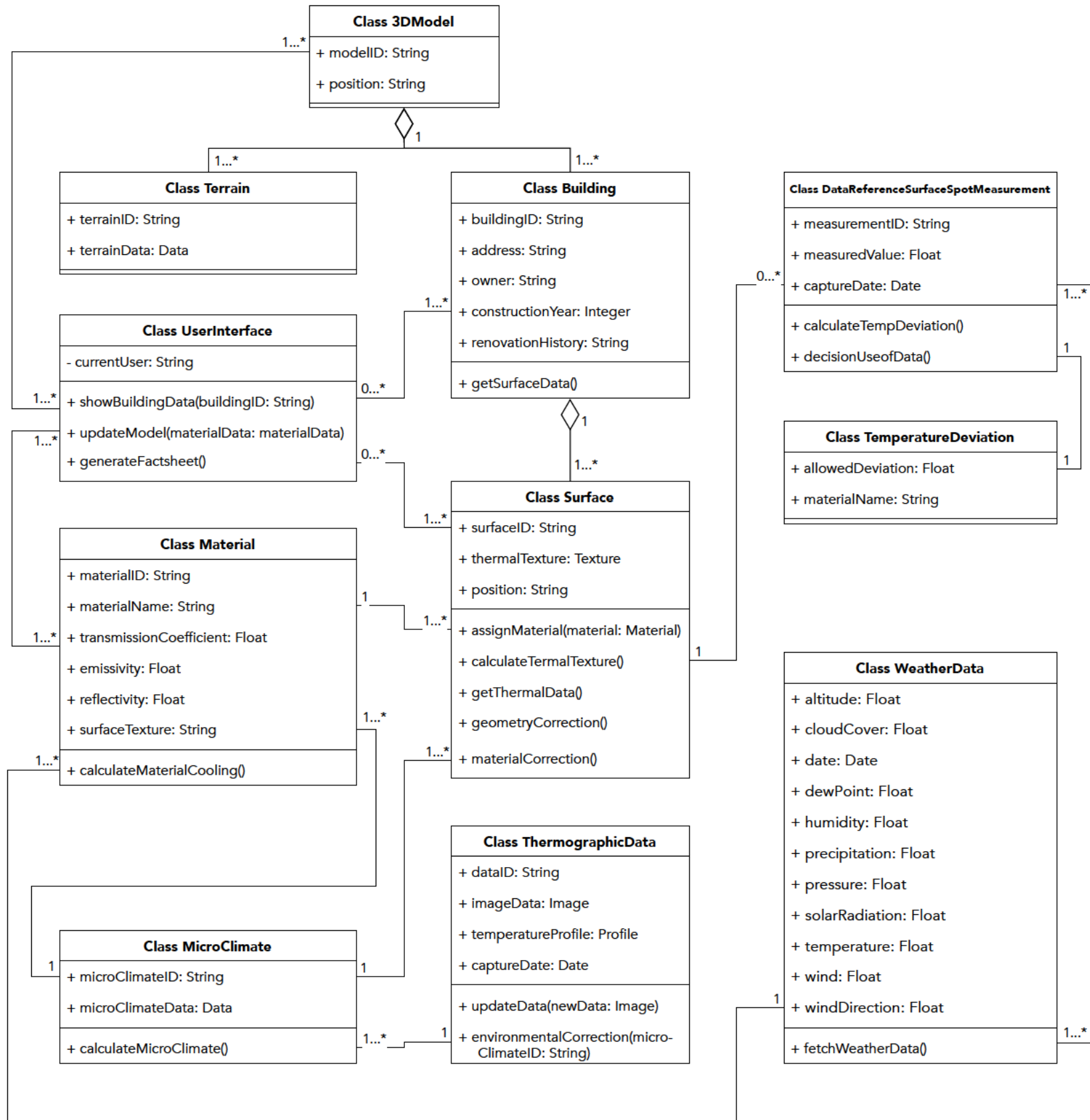
Planung, Aufnahme und Validierung der Daten  
Tag 2 und Nacht 2

Prozessierung der Daten  
Tag 2 und Nacht 2

Swimlane-Diagramm Teil 3



**ANHANG Z: Klassendiagramm**



## ANHANG AA:    **Verwendete Hilfsmittel**

In diesem Anhang sind alle Hilfsmittel aufgeführt, die bei der Erstellung verwendet wurden. Sie wurden entsprechend ihrer in der Tabelle beschriebenen Verwendung eingesetzt. Die inhaltlichen Texte, Schlussfolgerungen, Argumentationen und Analysen basieren vollständig auf den zitierten Quellen sowie auf eigenen Recherchen und Überlegungen des Verfassers. Aufgrund der Vielzahl von Online-Suchmaschinen sind in der Tabelle nur die relevantesten Suchmaschinen aufgeführt.

Hilfsmittel	Art des Einsatzes	Umfang
<b>DeepL Übersetzer*</b>	Für die Übersetzung von Wörtern innerhalb der Literaturquellen, die dem Verfasser nicht bekannt waren, um den Inhalt vollständig zu verstehen. Zudem wurde DeepL Übersetzer dazu eingesetzt, Teile der Kurzfassung in einer ersten Phase ins Englische zu übersetzen, welche anschliessend vom Autor dieser Arbeit weiter überarbeitet wurden.	Gesamte Arbeit
<b>DeepL Write*</b>	Unterstützung bei der Korrektur von Grammatik, Rechtschreibung, Zeitformen sowie bei Fragen zum Schreibstil in der gesamten Arbeit.	Gesamte Arbeit
<b>Draw.io</b>	Webanwendung zur Erstellung von Diagrammen bei der Erarbeitung von Anwendungskonzepten.	Anwendungskonzepten in Kapitel 5
<b>Generative pretrained Transformer (GPT-4)</b>	Unterstützung bei der Korrektur von Grammatik, Rechtschreibung, Zeitformen sowie bei Fragen zum Schreibstil in der gesamten Arbeit. Unterstützung bei der Übersetzung der Texte vom Englischen ins Deutsche und bei der Übersetzung der Zusammenfassung ins Englische.	Gesamte Arbeit
<b>Google Scholar</b>	Digitale Suchmaschine für die wissenschaftliche Literaturrecherche zum Auffinden von Quellen und Fachtexten.	Literaturrecherche in Kapitel 4
<b>Korrekturlesen</b>	Überprüfung der gesamten Arbeit auf sprachliche Fehler, Grammatik, unpassende Wortwahl, Zeichensetzung, unklare oder umständliche Sätze durch Verwandte und Freunde.	Gesamte Arbeit
<b>Microsoft Powerapps</b>	Webanwendung zur Erstellung von Low-Code Webapplikationen. Einsatz bei der Erstellung des Proof of Concept (PoC) und der daraus resultierenden Webanwendung.	Proof of Concept in Kapitel 5.4
<b>Microsoft Rechtschreibprüfung</b>	Zur Hilfe bei Grammatik, Zeichensetzung und Rechtschreibung während der gesamten Arbeit.	Gesamte Arbeit

Hilfsmittel	Art des Einsatzes	Umfang
<b>Miro</b>	Für die Planung und Organisation der gesamten Arbeit und der Ideen. Zur Erstellung von Grafiken in der Arbeit.	Gesamte Arbeit
<b>Nira</b>	Webanwendung zur Darstellung von texturierten 3D-Modellen. Einsatz bei der Erstellung des Proof of Concept (PoC) und der daraus resultierenden Webanwendung.	Proof of Concept in Kapitel 5.4
<b>ResearchGate</b>	Digitale Suchmaschine für die Recherche wissenschaftlicher Literatur zum Auffinden von Quellen und Fachtexten.	Literaturrecherche in Kapitel 4
<b>Rhino</b>	Anwendung für die Erstellung von 3D-Modellen. Einsatz bei der Erstellung des Proof of Concept (PoC) und der daraus resultierenden Webanwendung.	Proof of Concept in Kapitel 5.4
<b>ScienceDirect</b>	Digitale Suchmaschine für die Recherche wissenschaftlicher Literatur zum Auffinden von Quellen und Fachtexten.	Literaturrecherche in Kapitel 4
<b>Semantic Scholar</b>	Digitale Suchmaschine für die Recherche wissenschaftlicher Literatur zum Auffinden von Quellen und Fachtexten.	Literaturrecherche in Kapitel 4
<b>Swisscovery FHNW</b>	Digitale Suchmaschine für die Recherche wissenschaftlicher Literatur zum Auffinden von Quellen und Fachtexten.	Literaturrecherche in Kapitel 4
<b>Zotero</b>	Literaturverwaltungssoftware zum Organisieren und Zitieren von Fachliteratur für die gesamte Arbeit.	Gesamte Arbeit