

Diplomarbeit

Gebäudeerkundungsmethoden zur ganzheitlichen Gebäudeerfassung - Materialzusammensetzung, bauphysikalische und konstruktive Aspekte

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads

Diplom-Ingenieurin

eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

Diploma Thesis

Testing methods for a holistic building stock analysis - aspects of materials, building physics and construction

submitted in satisfaction of the requirements for the degree

Diplom-Ingenieurin

of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

Christina Elena Perkonig, BSc

Matr.Nr.: 01604766

Betreuung: Prof.in Dipl.-Ing.in Dr.in techn. **Iva Kovacic**
Dipl.-Ing. **Stefan Schützenhofer**, BSc
Institut für Hoch- und Industriebau
Forschungsbereich Integrale Planung und Industriebau
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/210-01, 1040 Wien, Österreich

Wien, im Mai 2025



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kurzfassung

Nachhaltiges Bauen und ökologisches Sanieren sollen im Bausektor als Strategie zur Bewältigung des Klimawandels eingesetzt werden. Dies stellt heutzutage eine große Herausforderung für den Bausektor dar.

Die vorliegende Arbeit fokussiert sich auf die Bestandsaufnahme für eine Gebäudesanierung. Eine gründliche Bestandsaufnahme vor Erstellung eines Sanierungskonzeptes dient als Grundlage für statische Berechnungen, Lebenszyklusanalysen bzw. Ökobilanzierung (Rückbaubarkeit und Wiederverwertung) oder thermische Bewertungen des Gesamtgebäudes oder einzelner Bauteile. Um Schäden an der Bausubstanz weitmöglichst zu verhindern soll der Fokus auf zerstörungsfreie Untersuchungsverfahren gelegt werden. Ziel dieser Arbeit ist das Darlegen relevanter Parameter für eine Bestandsaufnahme und das Aufzeigen möglicher zerstörungsfreier in-situ Messverfahren.

Die Forschungsmethoden sind Literaturrecherche, Expert:inneninterviews und empirische Testmessungen. Die Literaturrecherche präsentiert den Stand der Technik bezüglich der Bestandsaufnahme für Gebäudesanierungen und möglicher zerstörungsfreier Messverfahren. Anhand der generierten Ergebnisse wurde ein Parameterkatalog für eine ganzheitliche Bestandsaufnahme erstellt, die in einem interaktiven Excel Tool miteinander verknüpft wurden. Zur Beleuchtung der praktischen Anwendung zerstörungsfreier Verfahren an Bestandsgebäuden wurde anhand ausgewählter Verfahren: Laserscanning, Photogrammetrie, Thermographie, Heat Flow Meter, Ground Penetrating Radar und Schadstoffbelastungsmessungen, Expert:inneninterviews durchgeführt. Die Verfahren Laserscanning, Photogrammetrie und Thermographie wurden zusätzlich in empirischen Testmessungen untersucht.

Die Ergebnisse der Literaturrecherche zeigen, dass eine gründliche Bestandsaufnahme ein aufwendiger Prozess ist, der jedoch bestmögliche Sanierungskonzepte erlaubt. Zusätzlich lieferten sie eine Auswahl an möglichen zerstörungsfreien Messverfahren von denen einige auch in-situ angewendet werden können. Die Ergebnisse der Interviews zeigten jedoch, dass sich eine in-situ Messung nicht für alle Parameter (beispielsweise Materialgesundheit) eignet bzw. sinnvoll ist. Nach heutigem Stand ist vor allem für die Datenauswertung einiger Messverfahren Fachkompetenz Voraussetzung bzw. von Vorteil. Dies konnte auch im Zuge der Testmessungen bestätigt werden.

Die voranschreitende Digitalisierung im Bauwesen, wie robotergestützte Aufnahmen und KI-basierte Auswertungen, wird den praktischen Umgang der Verfahren optimieren. Trotzdem ist auf eine enge Zusammenarbeit und klare Kommunikation der Planungsbeteiligten zu achten. Eine vermehrte Anwendung in der Praxis macht die Verfahren für den Markt zugänglicher und leistbarer.

Die vorliegende Arbeit soll als Leitfaden zur Durchführung einer Bestandsermittlung dienen und ein Nachschlagewerk für bereits vorhandene zerstörungsfreie Messverfahren sein.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abstract

Sustainable building and ecological refurbishment are strategies from the construction sector against the climate change, which is still a big challenge.

This thesis focuses on the building stock analysis for refurbishment. A detailed examination before planning a refurbishment is the base for static analyses, lifecycle analyses (recycle and reuse) and for thermal analyses for buildings or building components. To prevent damage the examination should be done with non destructive testing methods. The aim of this thesis is to point out relevant parameters for the building stock analysis and to show possible non destructive in-situ testing methods.

The research methods are literature review, expert interviews and empirical testing. The literature research presents the state of the art of building stock analysis and possible non destructive testing methods, which were summarized in a parameter catalogue for a holistic building stock analysis. Both findings were integrated in an interactive Excel-Tool.

The practical use from chosen methods: laserscanning, photogrammetry, thermography, heat flow meter, ground penetrating radar and pollution measurements were carried out by interviews. At the same time, laserscanning, photogrammetry and thermography were empirically tested.

The findings of the literature review reveal that a detailed building stock analysis is necessary to obtain the best possible result for planning a refurbishment. They give also an overview of non destructive testing methods, which can also be used in-situ. The findings from the expert interviews point out that not every parameter (for example material health) is suitable for a useful result. Nowadays especially for the data evaluation expertise is necessary or advantageous, which was emphasized by the empirical testings. Digitalization in construction, like robot-based examination and AI-based evaluation, can optimize the handling of non destructive methods. However, close teamwork and good communication between planning participants will be still required. The more often the methods will be used in practice, the more they get accessible and affordable for the market.

This thesis commits itself as guideline to set up a building stock analysis and as a reference to check up non destructive testing methods.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die mich während meiner Studienzeit, wie auch bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt und begleitet haben.

Zu allererst bedanke ich mich bei Frau Prof.in Dipl.-Ing.in Dr.in Iva Kovacic und bei Herrn Dipl.-Ing. Stefan Schützenhofer für die Betreuung meiner Masterarbeit, die mir im Zuge des Schreibens mit ihrem Fachwissen und hilfreichen Anregungen zur Seite standen.

Ein weiterer Dank gilt meinen Interviewpartner:innen für Ihre Zeit meine Fragen zu beantworten.

Besonderen Dank möchte ich auch meinen Studienkolleg:innen Miriam, Hannes, Simone, Endrit, Georg, Clemens, Peter, Parim, Jan und Felix für unsere unvergessliche Studienzeit aussprechen.

Abschließend bedanke ich mich bei meiner Familie, vor allem Paul, Helga, Angela und Clemens, die mir während der gesamten Zeit mit viel Geduld und Verständnis den Rücken stärkten. Vielen Dank, dass ihr immer für mich da seid.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
1.1	Bauen im Bestand	12
1.2	Untersuchungsmethoden im Bestandsbau	13
1.3	Problemstellung und Forschungsrelevanz	14
1.4	Forschungsfragen und Ziel der Arbeit	14
2	Methodische Vorgehensweise	16
2.1	Literaturrecherche	16
2.2	Expert:inneninterviews	17
2.3	Empirische Fallstudie	17
3	Grundlagen der Bauwerksanalyse als Grundlage einer Bausanierung	19
3.1	Ablauf einer Bauwerksanalyse	19
3.2	Schadensmechanismen	22
3.2.1	Feuchtigkeit	22
3.2.2	Salze	22
3.2.3	Schadstoffe	24
4	Zerstörungsfreie Messmethoden	26
4.1	Mechanische Verfahren	28
4.1.1	Penetrometerprüfung	28
4.1.2	Rückprallhammer	28
4.1.3	Kratztest	29
4.1.4	Bohrwiderstandsmessung (Resistographie)	30
4.2	Akustische Verfahren	31
4.2.1	Ultraschallprüfung	31
4.2.2	Mikroseismik	33
4.2.3	Schallemissionsprüfung	34
4.2.4	Schallmessungen	35
4.2.5	Impakt Echo Verfahren	38
4.3	Elektromagnetische Verfahren	38
4.3.1	Radar Verfahren	38
4.3.2	Verfahren mit Magnetsensoren	40
4.4	Radiologische Verfahren	45
4.4.1	Radiographie	45
4.4.2	Radioskopie	46
4.5	Thermische Verfahren	47
4.5.1	Thermographie	47
4.5.2	Wärmeflussmessungen	49
4.6	Optische Verfahren	54
4.6.1	Sichtprüfung	54
4.6.2	Endoskopie	55

4.6.3	Optische Interferometrie	56
4.6.4	Digitale Bildkorrelation (DIC)	58
4.6.5	Optische Fasersensoren	59
4.6.6	Laserscanning	59
4.6.7	Photogrammetrie	61
4.6.8	Drohne	63
4.6.9	Mikroskopie	64
4.7	Weitere Verfahren	65
4.7.1	Magnetpulververfahren	65
4.7.2	Penetrationsverfahren/Eindringverfahren	66
4.7.3	Feuchtigkeitsmessungen	67
4.7.4	Potentialmessung	70
4.7.5	Spektroskopie	71
4.7.6	Messung der Schadstoffbelastung	73
4.8	Messverfahren und in situ Anwendung	74
5	Parameterkatalog für Bestandsaufnahme	76
5.1	Ergebnisse aus der Literaturrecherche	76
5.2	Parameterkatalog für eine Bestandsaufnahme	76
5.2.1	Baudokumentation	78
5.2.2	Materialgesundheit	78
5.2.3	Konstruktive Eigenschaften	78
5.2.4	Bauphysikalische Eigenschaften	79
5.2.5	Gebäudetechnische Eigenschaften	79
5.2.6	Zusammenführung der Parameter	79
5.3	Parameterkatalog als Tool für zerstörungsfreie Messverfahren	79
6	Untersuchung und Bewertung der ausgewählten Messverfahren	82
6.1	Ergebnisse aus Expert:inneninterviews	82
6.1.1	Laserscanning und Photogrammetrie	85
6.1.2	Thermographie	91
6.1.3	Ground Penetrating Radar (GPR)	94
6.1.4	Schadstoffbelastungsmessung	97
6.1.5	Heat Flow Meter (HFM)	102
6.2	Ergebnisse der empirischen Testmessungen	105
6.2.1	Untersuchungsobjekt	107
6.2.2	Auswertung des Laserscannings	107
6.2.3	Auswertung der Photogrammetrie	108
6.2.4	Auswertung der Thermographie	111
6.2.5	Zusammenführung der Ergebnisse	113
7	Zusammenfassung der Ergebnisse	115
8	Conclusio und Zukunftsausblick	121

Kapitel 1

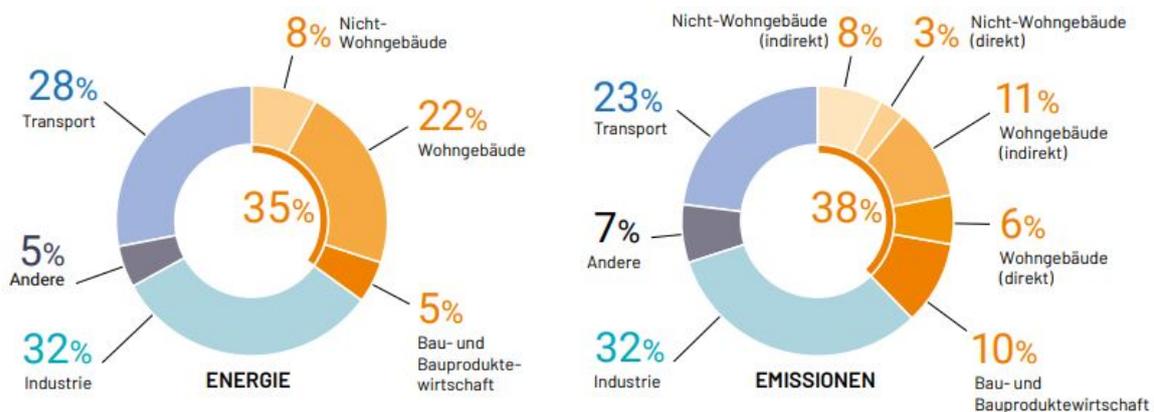
Einleitung

Die Verschärfung des Klimawandels veranlasste die Europäische Union zur Vereinbarung der Klimaneutralität mit 2050. Dabei soll der Durchschnittstemperaturanstieg gesenkt werden, der stark vom Ausstoß von Treibhausgasen verursacht wird. Hauptverursacher von Treibhausgasemissionen sind die Sektoren Landwirtschaft, Verkehr, Gebäude und Energie sowie Industrie [58].

Österreich hat sich das Ziel gesetzt, bereits bis 2040 klimaneutral zu werden und somit das EU-Klimaabkommen (Green Deal) früher zu erreichen. Das heißt, dass die österreichischen Emissionen von Treibhausgasen (THG) und deren Abbau durch Kohlenstoffsenken bis dahin ausgeglichen sein sollen (netto Null) [3].

Bauen und Sanieren von Gebäuden ist ein Kernbereich des Green Deals. Dabei sollen vor allem die Energieeffizienz von Umbauten in den nächsten 10 Jahren verdoppelt werden. Zentrale Punkte für Renovierungen sind: Reduktion des Energieverbrauchs, Ressourceneffizienz, Kreislaufwirtschaft und Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus von Gebäuden. Schlüssel für einen langfristigen Klimaschutz sind eine qualitativ hochwertige Sanierung und energieeffiziente Neubauten [3].

Gerade das Thema der thermischen Gebäudesanierung wird wichtiger. Denn der Bau- und Gebäudesektor macht 38% der globalen CO₂-Emissionen aus. Die Internationale Energieagentur (IEA) schätzt, dass die direkten CO₂-Emissionen von Gebäuden bis 2030 um 50% und die indirekten Emissionen des Bausektors um 60% sinken müssen [3]. Dabei beziehen sich die direkten Emissionen auf die fossilen Energieträger und die indirekten Emissionen auf die Stromerzeugung [47]. Die Abbildung 1.1 zeigt dabei die Aufteilung von Verbrauch der Energie und Emission global gesehen unterteilt in einzelne Einflussfaktoren.



Globaler Anteil an Endenergie und Emissionen von Gebäuden und der Bauwirtschaft, 2019
Abb.: 2020 Global Status Report for Buildings and Construction, Umweltprogramm der Vereinten Nationen; adaptiert aus "IEA World Energy Statistics and Balances" and "Energy Technology Perspectives" (IEA 2020d; IEA 2020b).

Abb. 1.1: Globale Energie und Emissionen [3]

Eine klimaneutrale Errichtung bzw. Sanierung von Gebäuden stellt den Bausektor vor große Herausforderungen [3]. Abhilfe hierfür können nachhaltiges Bauen und ökologisches Sanieren

schaffen. Hier stehen vor allem die eingesetzten Baustoffe, Konstruktion und Haustechnik im Fokus. Neben wirtschaftlichen Erfolgen, wäre diese Vorgehensweise auch an ökologische und soziokulturelle Aspekte geknüpft [53].

1.1 Bauen im Bestand

Grundsätzlich erfolgt Bauen im Bestand nach den Szenarien: Umbauplanung (Sanierung, Modernisierung, Umnutzung), Erweiterung oder Abriss und Neubau [5]. Diese Arbeit setzt den Fokus auf die Sanierung von Bestandsgebäuden.

Sanierung beschreibt alle Maßnahmen zur Wiederherstellung der Gebrauchsfähigkeit einer Baukonstruktion bzw. eines Gebäudes. Dabei geht es um eine Behebung von Missständen und nicht zwingend um eine Verbesserung. Unter Sanierungsmaßnahmen fallen Instandsetzung (Wiederherstellung des geeigneten Zustandes), Rekonstruktion (Wiederherstellung oder Wiederaufbau eines Gebäudes oder Bauteiles) und Adaptierung (Aufstockung, Anbau, Umbau und Ausbau) [11].

Eine Anpassung bzw. Optimierung des Gebäudebestandes sollte nicht um jeden Preis passieren, da nicht alle Faktoren wie, Standortprobleme (Verkehrslärm,...), Grundrissprobleme (fensterlose Badezimmer,...) oder unattraktive Gebäudetypen (Großsiedlungen,...) ausgebessert werden können. Auch muss auf das Baujahr der Gebäude geachtet werden, da die Bausubstanz teilweise variiert und deshalb individuelle Lösungen gefunden werden müssen [11]. Um eine Sanierung der Sanierung zu vermeiden, ist vor allem auf eine gründliche Bauaufnahme und Bauwerksanalyse zu achten und so eine erfolgreiche Sanierungsplanung zu garantieren [36].

Unter Bauwerksanalyse wird die Ermittlung und Bewertung von Eigenschaften eines Gebäudes, Bauteils oder Materials verstanden. Nach Horn [23] kann der Ablauf der Bauwerksanalyse in drei Phasen aufgeteilt werden:

- Einstiegs- und Vorbereitungsphase: Diese Phase umfasst eine Begehung und das Schaffen eines ersten Eindruckes über das Objekt, sowie Vorplanungsmaßnahmen für die Projektentwicklung. Je gründlicher die Vorbereitung abgehandelt wird, umso eher können Missverständnisse und Verzögerungen verhindert werden
- Untersuchungsphase: Diese Phase beinhaltet mehrere Schritte und dient als Grundlage für die Planungsphase
- Planungs- und Ausführungsphase: Diese Phase umfasst die Erstellung eines Sanierungskonzeptes und die bauliche Ausführung bis zur Fertigstellung

Ein besonderes Augenmerk ist grundsätzlich auf die Untersuchungsphase zu legen. Da hierauf weitere Planungsschritte, wie Erstellung eines Sanierungskonzeptes etc. basieren. Somit können Schäden oder Mängel frühzeitig untersucht und bewertet werden [23]. Typische Schwerpunkte sind hierbei: architektonische-konstruktive, statische-konstruktive, abdichtungstechnische, energetische, schalltechnische und Gefahrenstoffe [53].

In Anbetracht der Erhaltung eines Bestandsgebäudes ist auch der Lebenszyklus eines Gebäudes einzubeziehen. Deswegen sollte auch auf eine ausreichende Wartung der Gebäude geachtet werden, um die Wertigkeit und Sicherheit aufrecht zu erhalten [18]. In Bezug auf eine saubere Bestandsdokumentation sind regelmäßige Objektsicherheitsdokumentationen anzuraten, wie auch ein Anlegen und Ausfüllen von Dokumentationsunterlagen (Checklisten). Die ÖNORM B1300 (Objektsicherheitsprüfung für Wohngebäude) [39] und die ÖNORM B 1301 (Objektsicherheitsprüfung für Nicht-Wohngebäude) [40] geben Anweisungen zur Durchführung, sowie Vorgaben

einer Objektsicherheitsprüfung und stellen die notwendigen Checklisten jeweils im Anhang zur Verfügung.

1.2 Untersuchungsmethoden im Bestandsbau

Wie bereits beschrieben ist eine gründliche Bauwerksaufnahme essentiell für eine erfolgreiche Sanierungsplanung. Die Bauaufnahme beinhaltet eine vollständige Erfassung des Bestandes [36]. Dabei werden neben Erarbeiten von Planunterlagen, Verfassen einer Bestandsbeschreibung, auch eine Zustandserfassung und Schadensaufnahme durchgeführt. Um nicht sichtbare Schäden am Bauwerk zu erkennen sind passende Untersuchungsmethoden zu finden [23].

Im Bauwesen gibt es viele Methoden Bauteile und Bauwerke zu unterschiedlichen Zeitpunkten zu untersuchen. Abhängig von der Bereitschaft des Eingriffes in die Bauteile bzw. Bauwerke werden diese Methoden in zerstörende, semi-zerstörende und zerstörungsfreie Methoden unterteilt (siehe Abbildung 1.2) [49].

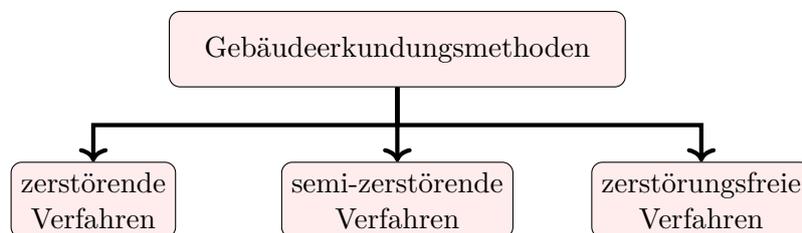


Abb. 1.2: Unterteilung Gebäudeerkundungsmethoden in Anlehnung an [49]

Alle drei Möglichkeiten können zur Beurteilung der Festigkeiten über die Nutzungsdauer eingesetzt werden. Belastungstests fallen beispielsweise unter zerstörende Messmethoden und werden vor allem in Bereichen des Brücken- und Straßenbaus eingesetzt. Bei Messungen mit semi-zerstörenden Methoden und zerstörenden Methoden werden Proben oder Bauteile entnommen, um Messungen durchzuführen [49]. Bei der Anwendung von semi-zerstörenden Methoden entstehen kleine Einkerbungen, welche die Gesamtstruktur nicht beeinflussen. [28]. Dabei werden nicht nur Festigkeitseigenschaften sondern auch andere Materialeigenschaften geprüft [49]. Bei Untersuchungen im Labor können im Unterschied zu in-situ Bauwerksuntersuchung quantitative Ergebnisse erzielt werden [19].

Der Vorteil von semi-zerstörenden und zerstörungsfreien Methoden ist, dass kein signifikanter Eingriff in die Struktur des Materials vorgenommen wird [28]. Gerade bei zerstörungsfreien Messmethoden bleibt das Bauteil bzw. Bauwerk unbeschädigt und erfüllt auch die Gütekriterien von Versuchen - Wiederholbarkeit, Verifizierung und Gültigkeit des Versuches [49].

Zerstörungsfreie Messverfahren werden oft als indirekte Verfahren beschrieben, da von einer messbaren physikalischen Größe auf eine Baustoffeigenschaft rückgeschlossen wird. Deshalb ist ein Heranziehen von erfahrenerm Fachpersonal notwendig, um eine zuverlässige Versuchsdurchführung wie auch Bewertung zu gewährleisten [23].

Für eine gründliche Bauaufnahme sollte eine geeignete Kombination aus den verfügbaren Verfahren ausgewählt werden [18]. Deswegen kann im Vorfeld der Untersuchung laut Hillemeier und Taffe [19] anhand von vier Fragen die richtige Strategie festgelegt werden:

- Was muss gemessen werden?
→ Festlegung der Messgröße bzw. Zielgröße

- Wo muss gemessen werden?
→ Definition der Messstellen
- Wann muss gemessen werden?
→ Bestimmung der Voraussetzungen von Verfahren
- Wie oft muss gemessen werden?
→ Vorgaben über die Anzahl und Wiederholungen von Messungen

Dabei ist schon bei der Beantwortung dieser Fragen zwingend auf eine enge Zusammenarbeit der beteiligten Personen zu achten, um ein optimales Ergebnis zu erzielen [19].

1.3 Problemstellung und Forschungsrelevanz

Teil der Bauwerksanalyse, wie in Unterkapitel 1.1 beschrieben, ist das Erheben des vorhandenen Planbestandes [23]. Häufig sind diese Planunterlagen unvollständig, wie z.B. nicht erfasste Änderungen, oder es gibt Abweichungen zum tatsächlichen Bestand oder nicht zutreffende Angaben über die Konstruktion. Zusätzlich sollte auch ein Augenmerk auf die Tragfähigkeit der Bauteile gelegt werden [5].

Es werden wenn möglich zerstörungsfreie Methoden präferiert. Doch häufig können im Zuge der Untersuchungsphase zerstörende Verfahren nicht vermieden werden, wobei der Eingriff in die Bausubstanz weitestgehend auf den tatsächlich benötigten Umfang begrenzt bleibt [53].

Neben dem Schutz der Gebäudesubstanz für eine etwaige weitere Nutzung des Gebäudes, ist im Bestand die Bewertung der Bauteile ebenfalls ein wesentlicher Faktor, denn in Bezug auf die Lebenszyklusanalyse kann so die Rückbaubarkeit bzw. die Wiederverwertung einzelner Bauteile überprüft werden [11].

Somit stellt sich die Frage wie ein Einsatz von zerstörungsfreien Messverfahren mit einer Bauwerksanalyse als Grundlage für eine Gebäudesanierung kombiniert werden kann. Neben einem Überblick und der Darstellung möglicher zerstörungsfreier Messverfahren soll diese Arbeit auch als Hilfestellung zur Wahl der passenden Messmethode als Grundlage für die Unterstützung der unterschiedlichsten Disziplinen dienen:

- Vervollständigungen von BIM Modellen,
- Thermische Gebäudesimulation,
- Lebenszyklusanalyse/Ökobilanz,
- Ressourceneffizienz,
- Lastaufstellung (statische Berechnungen).

Abbildung 1.3 gibt zusammenfassend einen Überblick über das Thema Bauen im Bestand und stellt den Fokus der Arbeit auf die Bestandsaufnahme für eine Gebäudesanierung dar:

1.4 Forschungsfragen und Ziel der Arbeit

Aus den vorher genannten Aspekten ergeben sich für diese Arbeit folgende Forschungsfragen:

- Welche zerstörungsfreien Messmethoden gibt es und wie können diese mit dem Prozess einer Bestandsaufnahme als Grundlage für eine Bausanierung in Beziehung gesetzt werden?

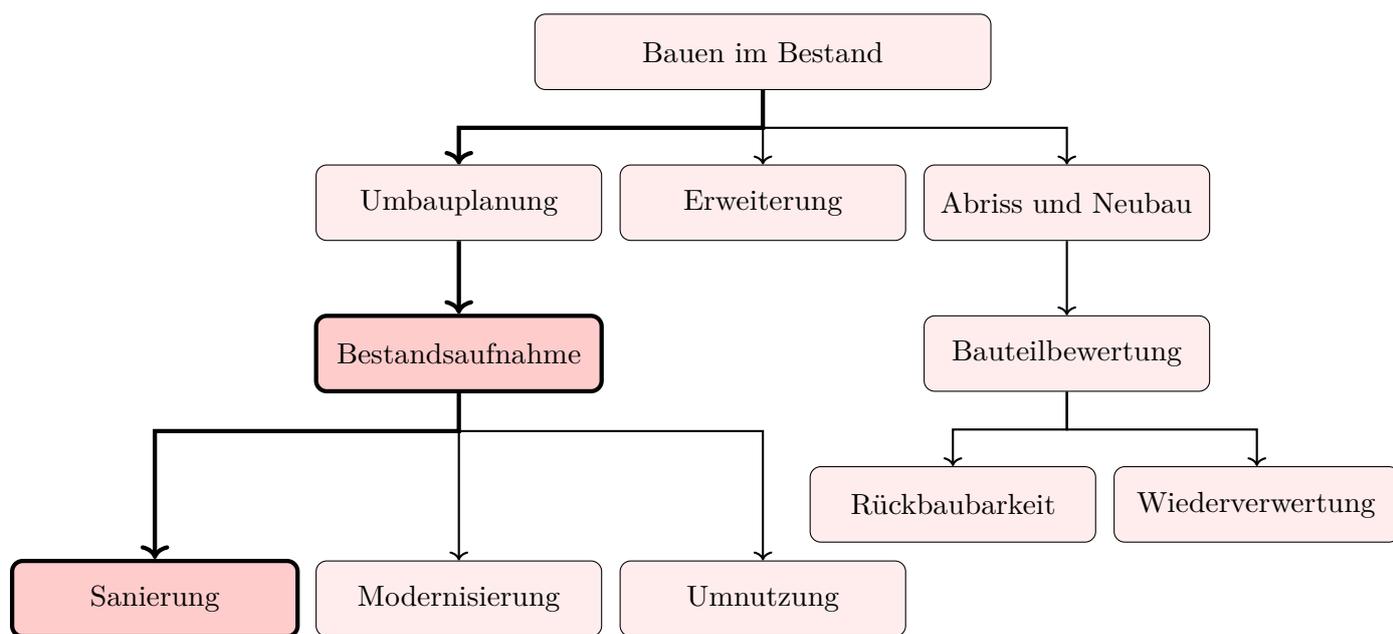


Abb. 1.3: Darstellung Prozess Bauen im Bestand [eigene Darstellung]

- Wie schaut eine praktische Anwendung von zerstörungsfreien Messverfahren aus?

Diese Arbeit soll einen Überblick über zerstörungsfreie Messverfahren in Bezug auf die Bestandsaufnahme als Grundlage einer Bausanierung geben. Dafür wird anfangs eine ausführliche Literaturrecherche durchgeführt. Daraufhin wird ein Parameterkatalog erstellt, der Parameter der Bestandsaufnahme mit zerstörungsfreien Messverfahren verknüpft. Anschließend wird eine Auswahl von Messmethoden auf Basis des Parameterkatalogs mit Interviews und einer empirischen Fallstudie über die Literatur hinaus ergänzend untersucht.

Kapitel 2

Methodische Vorgehensweise

Die methodische Vorgangsweise dieser Arbeit beruht grundlegend auf drei Forschungsmethoden:

- Literaturrecherche
- Expert:inneninterviews
- Empirische Fallstudie

Basierend auf einer Literaturrecherche zu den Themen zerstörungsfreie Messverfahren und der Bauwerksanalyse als Grundlage für eine Bausanierung, wurde anhand der gewonnenen Ergebnisse ein Parameterkatalog erstellt. Aus diesem Katalog wurde eine Auswahl von Parametern ausgewählt und die dazugehörigen Verfahren genauer beleuchtet. Diese Verfahren wurden anhand von Expert:inneninterviews und einer empirischen Fallstudie detaillierter untersucht.

2.1 Literaturrecherche

Die Basis der Arbeit ist die Literaturrecherche. Mithilfe der Literaturrecherche soll der Stand der Technik ermittelt und dargestellt werden. Die Literaturrecherche wurde mit den Plattformen: Sciedirect, Researchgate, Google Scholar und dem Bibliotheksuchprogramm (CatalogPlus) der TU Wien durchgeführt. Die zwei großen Themen der Literaturrecherche beinhalten Bauwerksanalyse als Grundlage für eine Bausanierung und zerstörungsfreie Messverfahren.

Zum Thema Bausanierung wurden vor allem die Grundlagen der Bausanierung mit besonderem Bezug auf die gängige Vorgangsweise einer Bauwerksuntersuchung genauer betrachtet. Bei der Thematik der zerstörungsfreien Messverfahren wurde zuerst nach einer Kategorisierung bzw. Einteilung der zerstörungsfreien Messverfahren gesucht und dann Beispiele der einzelnen Kategorien herausgearbeitet. Die Beschreibung jedes Verfahrens wurde in 'Steckbriefen' zusammengeführt. Dabei wurden alle möglichen Verfahren auf Technologie, Einsatzbereich und Messergebnisse untersucht, umso einen Überblick der Verfahren zu erarbeiten. Schlussendlich wurden aus den gefundenen Vertretern nach Verfahren gefiltert, die für eine in situ Gebäudeerkundungsmethode in Frage kommen bzw. schon eingesetzt werden.

Als Primärliteratur wird das Werk von Horn '*Bauwerksanalyse*' [23] herangezogen. Darin finden sich viele Informationen in Bezug auf Bauwerksanalyse und Untersuchungsmethoden am Bauwerk und im Labor. Eine weitere Primärliteraturquelle zu den zerstörungsfreien Messverfahren ist das '*Praxishandbuch Werkstoffprüfung*' von Schögl [51], sowie das Review '„Advances and Researches on Non Destructive Testing: A Review“' von Dwivedi et al. [7].

Die daraus generierten Ergebnisse wurden miteinander verglichen und zu einem Parameterkatalog mit allen relevanten Parametern für eine gründliche Bestandsaufnahme erstellt. Weiters wurde eine Beziehung zwischen Parameterkatalog und anzuwendenden zerstörungsfreien Methoden hergestellt und zu einem Auswahlkatalog auf Microsoft Excel verarbeitet.

2.2 Expert:inneninterviews

Nach einer ausführlichen Literaturrecherche wurden aus dem Parameterkatalog drei Hauptkategorien und dazupassende zerstörungsfreie Messverfahren ausgewählt. Die Kategorien aus dem Parameterkatalog bilden die Themen Gebäudeaufnahmen, Wärmeschutz und Materialgesundheit ab. Daraus wurden sechs Verfahren: Laserscanning, Photogrammetrie, Thermografie, Heat Flow Meter, Schadstoffbelastungsmessung, Ground Penetrating Radar genauer beleuchtet. Aufbauend auf die Literaturrecherche wurden zu den ausgewählten Verfahren Expert:inneninterviews mit einer Dauer von 20-45 Minuten durchgeführt.

Die Interviews waren leitfadengestützt. Dabei wurde bei der Formulierung der Fragen auf Einfachheit, Kürze und Eindeutigkeit geachtet. Die Auswertung der Interviews wurde mit der Erstellung eines Kategoriensystems durchgeführt und die jeweiligen Transkripte wurden danach kodiert [46]. Um eine bessere Vergleichbarkeit zu erzielen wurde für alle Verfahren der gleiche Leitfaden verwendet. Schließlich wurde anhand der Ergebnisse aus den Interviews für jedes Messverfahren ein Workflow erstellt.

Alle angegebenen Daten und Namen der Interviewpartner:innen werden im weiteren Verlauf der Arbeit anonym behandelt. Die Transkripte werden von der Autorin aufbewahrt und sind nach Absprache einsehbar.

2.3 Empirische Fallstudie

Zusätzlich zu der Expertise aus der Praxis wurden empirische Testmessungen an einem Untersuchungsobjekt durchgeführt. Aufgrund der Wahrung der Vertraulichkeit der Objektinformationen werden nur ausgewählte Informationen preisgegeben.

Es wurden drei aus den vorherigen Verfahren (Laserscanning, Photogrammetrie, Thermografie) ausgesucht. Da es sich um Testmessungen handelt wurden nur ausgewählte Abschnitte bzw. Stellen untersucht und aufgezeigt und anhand der Erfahrung der Autorin analysiert. Anschließend wurde über den Prozess der Testmessungen ein Workflow über den Arbeitsprozess erstellt.

In Abbildung 2.1 ist die methodische Vorgangsweise der Arbeit nochmals graphisch dargestellt:

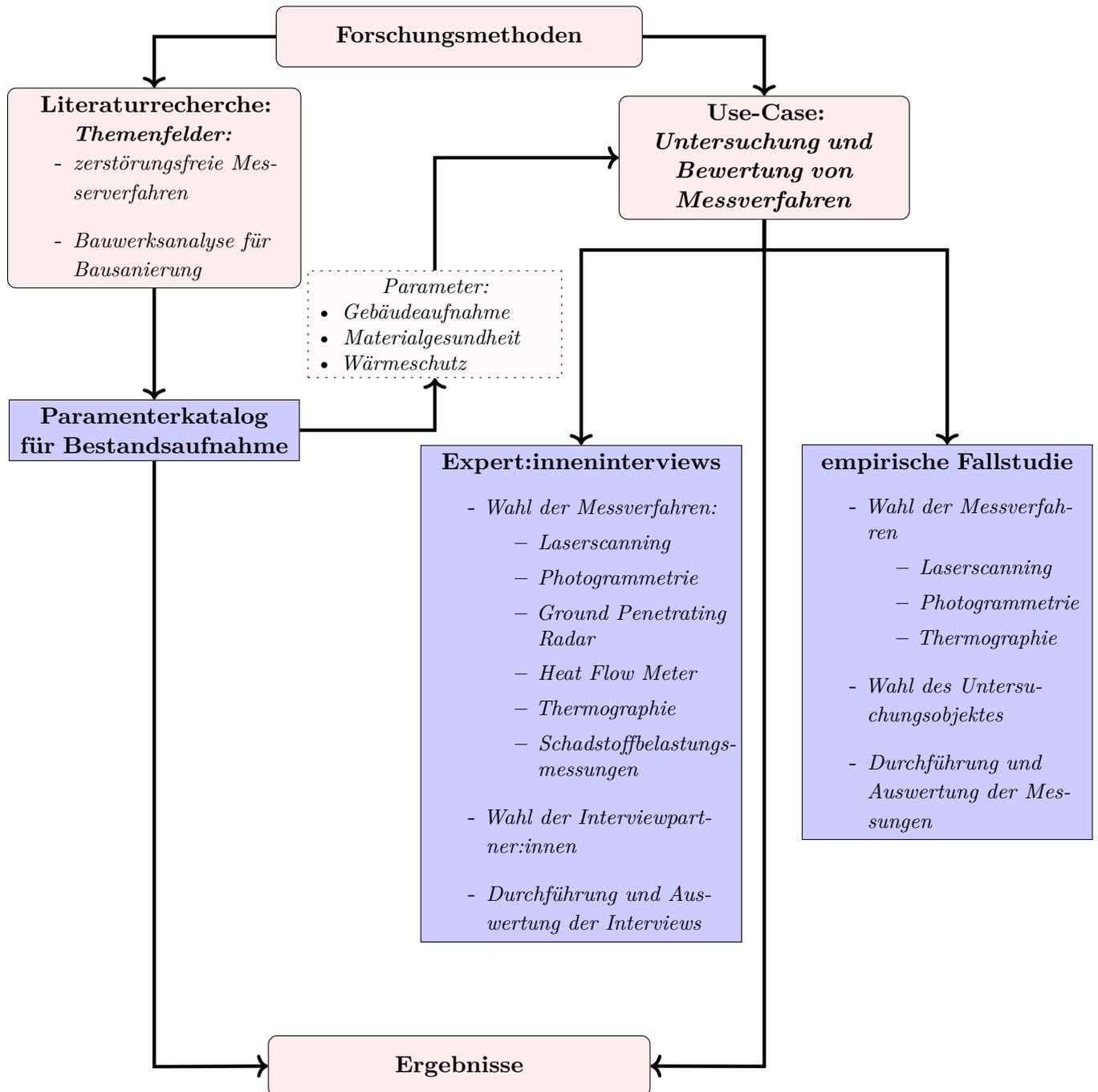


Abb. 2.1: Darstellung des Ablaufes der Methodik [eigene Darstellung]

Kapitel 3

Grundlagen der Bauwerksanalyse als Grundlage einer Bausanierung

In der Einleitung wurde bereits die Thematik der Bausanierung angesprochen. Folgend wird der Prozess einer Bausanierung noch genauer beschrieben und auf typische Schadensmechanismen eingegangen.

3.1 Ablauf einer Bauwerksanalyse

Sanierungen von historischen und denkmalgeschützten Gebäuden ist ein wesentlicher Bestandteil in der Baubranche [36]. Einhergeht immer die Einbeziehung zukunftsweisender Aspekte, wie Energieeffizienz und Nachhaltigkeit [23]. Doch ist auch bei der Bausanierung auf einen ordentlichen Ablauf und eine gründliche Untersuchung zu achten, um eine Sanierung der Sanierung zu vermeiden. Bei der Sanierung eines Bauwerkes ist im Gegensatz zu einem Neubau bei konstruktiven Eingriffen, wie auch bei der Materialwahl auf die vorhandene Bausubstanz zu achten. Somit stellt die Bausanierung eine komplexe Aufgabe dar [36].

Vor der Erstellung eines Sanierungskonzeptes ist die Bauwerksanalyse essentiell und unterscheidet sich in drei Phasen: Einstiegs- und Vorbereitungsphase, Untersuchungsphase und Planungs- und Ausführungsphase [23].

Grundlage für eine erfolgreiche Sanierung und für einen reibungslosen Ablauf der Bauwerksanalyse ist eine gründliche Vorbereitungsphase. Sie wird in Einstiegsphase und Vorplanung unterteilt [23]. In der Einstiegsphase werden die Verantwortlichkeiten festgelegt. An einer Planung einer Bausanierung sind viele verschiedene Personen aus unterschiedlichen Gewerken beteiligt. Für eine konfliktfreie Zusammenarbeit ist es wichtig die Aufgaben und Zuständigkeiten klar festzustellen und abzugrenzen. Neben einer ersten gemeinsamen Begehung, wird in dieser Phase auch eine Bauwerksakte angelegt, um eine saubere Dokumentation zu gewährleisten, aber auch im Falle eines Streitfalles rechtlich abgesichert zu sein [23].

Anschließend folgt die Vorplanung, je mehr Zeit in diese Phase gesteckt wird, umso eher können nachträgliche Änderungen und somit entstehende Kosten vermieden werden. Unter die Vorplanung fällt die Nutzungsanalyse, das heißt es wird untersucht, welche Maßnahmen in Bezug auf die spätere Nutzung des Gebäudes getroffen werden müssen. Weiters sollten in dieser Phase alle rechtlichen Vorgaben (alle für den Bau notwendigen baurechtlichen Genehmigungen) eingeholt werden. Neben den rechtlichen Vorgaben sollte in der Phase auch die Finanzierung abgeklärt werden und eine Umfeldanalyse (Untersuchung der Einflüsse auf das Bauwerk, wie Standort, Lage des Bauwerkes, klimatische Bedingungen,...) gemacht werden [23].

Um die Vorgaben aus der Vorbereitungsphase zu konkretisieren, ist eine Ermittlung des Ist-Zustandes ein wichtiger Schritt. Der Umfang einer solche Untersuchung ist von Objekt zu Objekt unterschiedlich. Diese Phase ist nicht zu vernachlässigen, da im Zuge der Voruntersuchung Überprüfungen der Standsicherheit, Schäden, Schadstoffbelastung, Bauphysik etc. durchgeführt werden und somit eine wesentliche Rolle für die weitere Bauwerksanalyse einnimmt [23].

Eine sehr effektive Methode, um einen Blick für das Sanierungsobjekt zu bekommen ist die Bauwerksbegehung. Hierbei werden nicht nur sichtbare Schäden innerhalb des Bauwerkes (Außenhülle und Innenbereich), sondern auch die Umgebung (Lage des Bauwerkes), die äußeren Einflussfaktoren (Witterungseinflüsse, Bautätigkeiten in der Umgebung,...) und die Haustechnik begutachtet. Bei der Bauwerksbegehung innerhalb des Gebäudes ist vor allem auf die üblichen Stellen, wie Fundamente, Keller, Außen- und Innenwände, Decken, Fenster und Türen, Dächer und Fassaden usw., zu achten. Neben einer optischen Untersuchung des Bauwerkes sollte auch über die historische Entwicklung recherchiert werden. Dafür wird eine Anamnese (Erkundung der Vorgeschichte) erstellt, um Themen die den Originalbestand betreffen, wie verwendete Materialien, bauliche Veränderungen, Bauzeitpunkt abzuklären. Dafür werden alle möglichen und vorhandenen Unterlagen gesichtet bzw. Rückschlüsse aus der Bauwerksbegehung gezogen [23].

In der Bauaufnahme werden Informationen wie: Aufmaß vor Ort, Zeichnungen, schriftliche Erläuterungen und die Beschreibung der Baugeschichte festgehalten [23]. Dabei kann die Bauaufnahme unterschiedlichen Zwecken dienen. Einerseits soll sie als planerische Grundlage fungieren und als Hilfestellung mit allen relevanten Daten für die weitere Sanierungsplanung dienen, andererseits als umfassende Baudokumentation [36]. Je nach Zielsetzung der Planungsaufgabe (Bausanierung, Sicherungsmaßnahmen, Behebung von Mängel und Schäden,...) können sich Bauaufnahmen nach Umfang, Art und Genauigkeit unterscheiden [23]. Als Anhaltspunkt kann die Bauaufnahme als Umkehrung des Planungsprozesses gesehen werden. Daraus folgt, dass die Genauigkeit der Bauaufnahme zumindest dem Genauigkeitsgrad der Bauausführung entsprechen sollte [36]. Zusätzlich sollten im Zuge der Bauaufnahme auch schon der Aspekt des Brandschutzes (Skizzen, detaillierte Angaben und Maße zu Nutzungseinheiten und Brandabschnitte, Abweichungen des Bestandes etc.) berücksichtigt werden. Bei der Erarbeitung des Brandschutzkonzeptes für eine Bausanierung ist an sinnvollen Lösungen zu arbeiten, da die Gebäude nicht von selbst schon den heutigen Brandschutzanforderungen entsprechen. Gerade im Brandschutz sind die Bauteile auf Trag- und Feuerwiderstandsfähigkeit zu untersuchen. Deswegen ist im Zuge der Bauwerksbegehung das Ausschau halten nach vorhandenen Brandschutzmängeln und Schäden ebenfalls ratsam [18].

Eine Sonderform der Bestandsaufnahme ist die Beweissicherung. In Bezug auf die Beweissicherung wird unterschieden zwischen: Beweissicherung am Objekt selbst, Beweissicherung am Nachbarobjekt und Gerichtsauftrag zur Beweissicherung mit zugehöriger Dokumentation [36]. Eine Beweissicherung im Bauwesen beschreibt eine Aufnahme des Ist-Zustandes vor den anstehenden Bauarbeiten. Bei bevorstehenden Bauarbeiten ist eine Beweissicherung sinnvoll, um bei etwaigen Schadensverursachen abgesichert zu sein. Eine Beweissicherung kann nicht nur vor Baubeginn, sondern auch als Kontrolle während den Bauarbeiten erfolgen. Diese ist hilfreich, um bei Streitfällen vor Gericht abgesichert zu sein. Es gibt mehrere Motive eine Beweissicherung durchzuführen: eine geplante Baumaßnahme, eine erhaltenswerte Bausubstanz, bestehende Schäden oder gerichtlich verordnete. Bei der gerichtlich verordneten Beweissicherung ist die Beweissicherung durch einen gerichtlichen Sachverständigen durchzuführen [23].

Der nächste Schritt ist die Bestandsbeschreibung, die eine Entscheidungsgrundlage für konkrete Bausanierung ist. Die Bestandsbeschreibung ist eine schriftliche Bauaufnahme, die neben der allgemeinen Beschreibung des Objektes (verwendete Materialien, Bauweise, ...), alle Inhalte behandelt, die in der Bauaufnahme zeichnerisch nicht oder nicht vollständig dargestellt werden konnten, um somit mit allen vorhandenen Informationen ein ausführliches Bild des Objektes zu schaffen [23].

Im Zuge der Vorbereitung der Sanierungsplanung soll nicht nur auf die Sicherung der Bausubstanz eingegangen werden, sondern auch auf die Beseitigung von Schäden [36]. Hierbei soll die direkte Ursache eines Schadens am Bauwerk oder eines Materials ermittelt werden. Dies

dient als Grundlage für die Sanierungsplanung ist aber auch eine Methode, um künftige Schäden zu verringern oder zu vermeiden. Eine vernachlässigte Schadensdiagnose und Behebung kann gleiche oder ähnliche Schäden zu einem späteren Zeitpunkt zur Folge haben. Deswegen sollten anhand der Schadensaufnahme weitere Untersuchungen am Bauwerk oder im Labor erfolgen, um eine zielführende Schadensdiagnose zu erstellen und die Schäden zu beheben. Die Art und Herkunft der Schäden kann sich unterscheiden: Oberflächenveränderungen (Durchfeuchtung, Fleckenbildung,...), Abnutzung und Verschleiß, Erosion, Korrosion, Risse, Pilzbefall, Insektenbefall, Schimmelbildung, Bauteilschwächung oder Bauteilversagen [23].

Nach Abschluss der Bauwerksbegehung, Anamnese, Bauaufnahme, Bestandsbeschreibung und Schadensaufnahme können weiterführende Untersuchungen am Bauwerk geplant werden. Es gibt mehrere Möglichkeiten eine Untersuchungsplanung durchzuführen: Beobachtungen, Messungen, Prüfungen, Berechnungen, Simulationen, experimentelle Verfahren usw. Bei der Wahl der Untersuchungsmethoden werden vor allem präferiert auf zerstörungsfreie bzw. zerstörungsarme Verfahren zurückgegriffen. Denn das Ziel ist es, das Gebäude nachhaltig und schonend zu untersuchen, um eine längere Lebensdauer zu gewährleisten [23].

Beim Erstellen einer Untersuchungsplanung ist auf die Aufbereitung der Unterlagen der Voruntersuchung und der Planunterlagen (Kennzeichnen benötigter Messstellen) aber auch auf den zeitlichen Ablauf zu achten, falls jahreszeitabhängige Prüfungen durchgeführt werden. Eine durchgängige Dokumentation (Protokolle, Fotos, Skizzen,...) ist unerlässlich. Im Bezug auf die Messungsdurchführung und -bewertung ist auch zu beachten, dass eventuell frühzeitig Fachpersonal herangezogen wird (Sachverständiger:innen, Gutachter:innen,...), um jeweils geeignete Methoden auszuwählen [23].

Ziel der Bauwerksuntersuchung ist das Lokalisieren und Bewerten von Schäden und Mängeln an der Bausubstanz. Die Bauwerksuntersuchung lässt sich unterteilen in Untersuchungen vor Ort und Untersuchungen mit Probenentnahmen und Testungen im Labor. Laut Horn [23] sind anbei Beispiele für übliche Untersuchungsmethoden:

- Auswertung vorhandener Unterlagen
- Visuelle Erkundung durch Einschätzung des Zustandes des Bauwerks anhand von sichtbaren Schäden (Verformungen, Schiefstellungen, Risse,...)
- Haptische Erkundung (Abtasten und Befühlen) der Oberflächenbeschaffenheit, Struktur, Feuchtigkeit, Temperaturunterschiede; dadurch kann auch eine erste Einschätzung zum verwendeten Baumaterial gemacht werden
- Abklopfen der Oberfläche mit der Hand oder einem Werkzeug zur Lokalisierung von Porosität, Hohlräumen eines Bauteiles, eine Hilfestellung bei der Interpretation ist die Tonhöhe
- Abhören mit Hilfe eines Stethoskops um z.B. eingemauerte Rohrleitungen am Fließgeräusch zu erkennen (viel Erfahrung notwendig)
- Ermittlung der Oberflächenbeschaffenheit mit Hilfe von Rückprallhammer, Haftprüfgerät, Pendelhammer,...
- Feuchtemessung mit in situ Messgeräten oder durch Untersuchung von Proben im Labor
- Aufsuchen von Metallen (verdeckte Stahlträger, Kabel, Wasserleitungen,...)
- Verformungsmessung, Rissbreitenmessung zur Beurteilung von Bauteilen und Erkennen von Schwächen eines Bauteils

- statische und bauphysikalische Berechnungen zur Überprüfung einer ausreichenden Stand-sicherheit und Gebrauchstauglichkeit, wie auch des Wärme-, Feuchte- und Schallschutzes
- Entfernen von Beschichtungen und Verkleidungen
- Freilegung der Grundkonstruktion
- Endoskopie
- Probenentnahme

In Abbildung 3.1 ist der Ablauf der Bauwerksanalyse nochmals dargestellt.

3.2 Schadensmechanismen

Ein Gebäude ist belastet von verschiedenen Prozessen: chemische, physikalische, biologische und mikrobiologische. Somit entstehen unterschiedliche Schadensbilder, speziell durch Feuchtigkeit, Salze, Mikroorganismen und Holzzerstörer [23].

3.2.1 Feuchtigkeit

Auslöser für Schäden sind oft hohe Luftfeuchtigkeit, Material- und Baugrundfeuchte, Niederschläge oder Wasserschäden. Besonders häufig betroffen sind Kellerbereiche und Fundamente. Durch vorhandene Feuchtigkeit werden chemische Reaktionen und biologische Abläufe gefördert. Dies wirkt sich negativ auf bauphysikalische Eigenschaften eines Bauteils aus [23]. Feuchtigkeit kann durch die unterschiedlichen Fähigkeiten der Wasseraufnahme eindringen [23]:

- kapillare Wasseraufnahmefähigkeit
- hygroskopische Wasseraufnahmefähigkeit
- Wasseraufnahme durch Kapillarkondensation (Tauwasserbildung)
- Diffusion

Beim Vorhandensein von Feuchtigkeit kann es auch zu mikrobiellen Ansiedelungen kommen. Dies sind häufig Algen, Pilze, Moose, Flechten, Hefe und Bakterien. Eine Ansiedlung solcher Mikroorganismen ist meist schon mit bloßem Auge erkennbar. Bei kurzzeitiger Ansiedlung führen sie zu keinen Beeinträchtigungen von Bauteilen, bei einer längerfristigen Beanspruchung ist auf eine mikrobielle Zerstörung (Biokorrosion) zu achten [23].

3.2.2 Salze

Schäden durch Salze entstehen oft durch das in den Baustoff eingedrungene Wasser, das als Transportmittel für gelöste Salze wirkt. Bei Verdunstung des Wassers kristallisieren die gelösten Salze und das Volumen vergrößert sich. Der entstehende Druck während der Salzkristallation zerstört die Baustoffe. Häufige Schadensbilder sind Ausblühungen, Verfärbungen, Gefügezerstörungen, Abplatzungen [23]. Abhängig von der Art der Salze, Konzentration im Bauteil und Verfügbarkeit von Feuchtigkeit unterscheidet sich das Ausmaß der Schäden. Häufige bauschädigende Salze sind: Sulfate (Gips, Ettringit,...), Nitrate (Kalksalpeter,...) und Chloride (Calciumchlorid) [23]. Bei Feststellung einer Salzbildung an einem Bauteil sollte eine Salzanalyse durch Proben am betroffenen Bauteil erfolgen [36]. Bei den Salzanalysen wird unterschieden zwischen [55]:

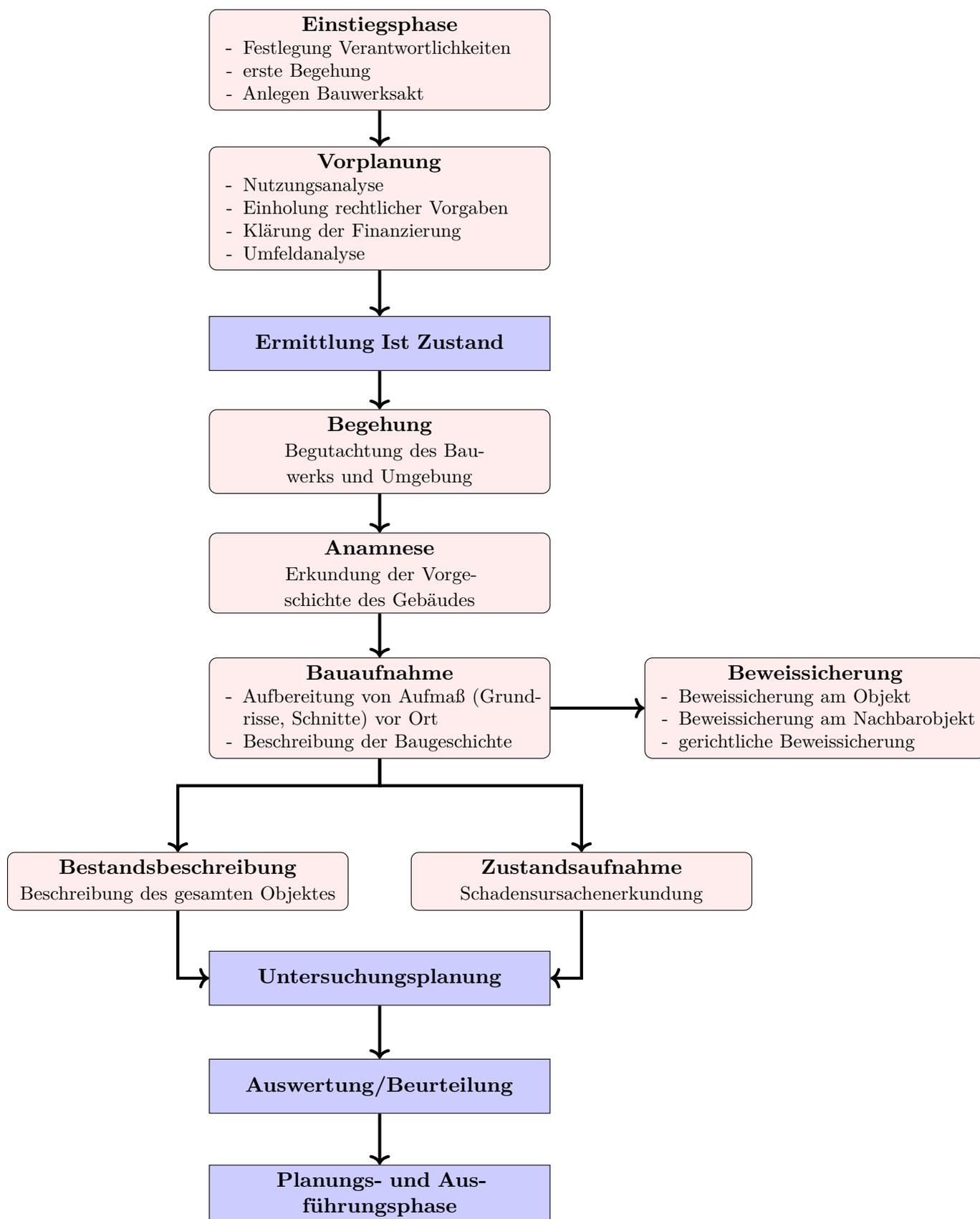


Abb. 3.1: Ablauf einer Bauwerksanalyse in Anlehnung an [23]

- **qualitative Salzanalysen** geben an ob Salze vorhanden sind. Dabei wird zwischen trocken-chemischer und nass-chemischer Analyse unterschieden
- **halbquantitative Salzanalysen** dienen als Hilfsmittel zur Bestimmung für weiterführende Prüfungen. Die Durchführung kann im Labor oder vor Ort mit Teststreifen geschehen
- **quantitative Salzanalysen** bestimmen den genauen Salzgehalt und die Salzeindringtiefe

3.2.3 Schadstoffe

Schadstoffe sind anorganische, organische oder künstlich hergestellte Stoffe, die sich negativ auf die Gesundheit von Mensch und Tier auswirken. Im Altbau waren teilweise manche Schadstoffe Teil des Bauens, weil die schädliche Auswirkung unbekannt oder unterschätzt wurde. Ob eine Substanz als Schadstoff kategorisiert wird ist abhängig von Menge und der Umgebungsbedingung [23].

Folgend sind einige Schadstoffe aus dem Altbau etwas genauer beschrieben:

- **Asbest**
Asbest ist ein fasriges Erdgestein und wurde vor allem in den 60er- und 70er Jahren in vielen Bauprodukten eingesetzt. Asbest ist aufgrund seiner gesundheitsschädigenden Wirkung heutzutage verboten. Asbest ist erst durch die Abgabe der Asbestfasern gefährlich. Ob eine Gefahr besteht bzw. auch eine Sanierung notwendig ist, ist durch ein/e Sachverständiger:in abzuklären [20].
- **Blei**
Blei kann beispielsweise in alten Trinkwasserleitungen vorhanden sein. Es ist ein blaugraues Metall und kann beim Menschen zu einer Bleivergiftung führen. Es ist besonders gefährlich für Ungeborene und Kinder [20].
- **Formaldehyd**
Formaldehyd kommt vor allem in verklebten Spanplatten vor. Das Gift macht sich durch einen muffig-süßlichen Duft bemerkbar. Es ist hauptsächlich in Fußböden, Wänden oder Decken zu finden. Bei Verdacht auf das Vorhandensein des Giftes ist ein/e Sachverständiger:in zu Rate zu ziehen [20].
- **Holzschutzmittel, PCP**
Viele Holzschutzmittel aus den 60er- und 70er Jahren beinhalten giftige Stoffe wie Pentachlorphenol (PCP), um das Holz vor Witterungseinflüssen, Insekten und Pilzen zu schützen. Diese Holzschutzmittel wurden für Holzelemente in Innenbereichen und Außenbereichen eingesetzt, was zu gesundheitsschädigenden Belastungen führen kann [20].
- **Künstliche Mineralfaser**
Künstliche Mineralfasern (KMF) sind häufig in Dämmelementen aus Glas- oder Steinwolle zu finden und sind vor allem sehr schädigend für die Lunge [20]
- **Flüchtige organische Verbindungen (VOC-Volatile Organic Compounds)**
VOCs sind leicht flüchtige Lösemittel, die häufig in Abbeizmitteln, Verdünnern, Farben, Lacken, Klebern etc. beigemischt sind. Teilweise werden in Farben und Lacken die VOCs durch Wasser oder schwer flüchtige Stoffe (z.B. Glykolverbindungen) ersetzt. Glykolverbindungen können ebenfalls lang andauernd Emissionen in die Innenraumluft abgeben [20].

- **Polychlorierte Biphenyle (PCB)**

PCBs sind eine Gruppe von organischen Chlorverbindungen, die vor allem in Flamm- schutzmitteln (Klebstoffen, Lacken, Wandfarben), Isolierflüssigkeiten (Transformatoren, Kondensatoren) und Hydraulikölen vorzufinden sind. Diese sind nicht akut giftig, sondern sind erst durch andauernde Belastung für den Körper gesundheitsschädigend [20].

- **Radon**

Radon ist ein radioaktives Edelgas, das beim Zerfall von Uran im Boden entsteht. Es dringt vor allem durch undichte Fundamentplatten, Risse im Mauerwerk oder durch Kabel- und Rohrdurchführungen ins Gebäude ein. Durch nicht ausreichendes Lüften reichert sich Radon in den Räumen an und kann zur Lungenkrebs führen. Es ist geschmacks- und geruchslos und kann am besten durch eine Langzeitmessung entdeckt werden [20]

- **Schimmel und Legionellen**

Schimmelpilze sind Teil der Umwelt und verursachen tendenziell bei nicht zu hoher Pilz- sporenkonzentration keine gesundheitlichen Probleme. Schimmelpilze können sich durch bauliche Mängel (Wärmebrücken,...) oder Fehlverhalten der Bewohnenden durch falsches Lüften anreichern. Feuchtigkeit und eine hohe relative Luftfeuchtigkeit begünstigen die Verbreitung von Schimmelpilzen. Auch im Hausstaub können sich Schimmelpilzsporen ansammeln [20]. Schimmel kann qualitativ oder quantitativ nachgewiesen werden. Direkte Nachweise können durch Luftprobenentnahmen, begleitend durch eine Bauwerksbege- hung erbracht werden. Es stehen aber auch Verfahren an der Materialoberfläche, wie das Abklatsch-, Abstrich-, und Klebefilmabrissverfahren zur Verfügung [43]. Vorsicht ist auch bei Legionellen (Stäbchenbakterien) in der Wasserleitung geboten [20].

- **Teerprodukte, PAK**

PAK sind Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe. Diese sind Einzelstoffe, die durch Verbrennungsvorgänge entstehen und befinden sich vor allem in Anstrichen, Kleber und Dachpappen auf Teerbasis. Abhängig von Einbauort und Zustand des Produktes ist es schädlich oder nicht [20].

Viele dieser Schadstoffe haben negative Folgen auf das Atemwegssystem, führen zu chronischen Erkrankungen oder sind krebserregend [20].

Kapitel 4

Zerstörungsfreie Messmethoden

In diesem Kapitel werden einige zerstörungsfreie Messverfahren vorgestellt. Dabei wurden zuerst alle möglichen zerstörungsfreien Messmethoden für die Gebäudeanalyse, die in der Literatur als zerstörungsfrei bzw. vereinzelt semi-zerstörungsfrei (die Grenze zwischen der Definition von zerstörungsfrei und semi-zerstörungsfrei ist fließend) herausgefiltert. Diese unterscheiden sich in ihrem Einsatzbereich (Labor oder in-situ). In einem weiteren Schritt wurden aus den vorgestellten Messmethoden, die zur strukturerhaltenden Bestandsermittlung eines Gebäudes eingesetzt werden, analysiert. Da bestmöglich versucht wird zerstörungsfreie Methoden einzusetzen und eventuell zerstörungsfreie Alternativen in Betracht zu ziehen.

Wie schon in der Einleitung beschrieben, gibt es mehrere Möglichkeiten Untersuchungsverfahren zu klassifizieren. Nach Schabowicz [49] lassen sich zerstörungsfreie Messverfahren grundsätzlich nach ihren zugrundeliegenden Technologien unterteilen: sklerometrische (härteprüfend) Methode, akustische Methode, elektromagnetische Methode, elektrische Methode, radiologische Methode und weitere Methoden [49]. Jaskowska-Lemańska und Sagan [28] kategorisieren zerstörungsfreie Messverfahren aber beispielsweise in folgende Gruppen: organoleptische (sensorische) Tests (makroskopische Bewertung) und alle technischen Tests, die auf akustischen, elektrischen, radiologischen oder elektromagnetischen Methoden basieren [28].

Im Zuge der weiteren Bearbeitung wurde folgende adaptierte Version der Kategorisierung nach Schabowicz [49] und Jaskowska-Lemańska und Sagan [28] weiterverwendet:

- **Mechanische Methoden:** sind alle Verfahren, die eine minimale mechanische Belastung auf ein Bauteil oder Material aufbringen
- **Akustische Methoden:** sind alle Verfahren, die als Grundlage die Ausstrahlung von akustischen Wellen (Schallwellen) besitzen
- **Elektromagnetische Methoden:** sind alle Verfahren, die als Grundlage die Ausstrahlung von elektromagnetischen Wellen besitzen
- **Thermische Methoden:** sind alle Verfahren, die einen Wärmefluss als Messgrundlage besitzen
- **Radiologische Methoden:** sind alle Verfahren, die als Grundlage die Ausstrahlung von radiologischen Wellen besitzen
- **Optische Methoden:** sind alle Verfahren, die mittels Licht bzw. elektromagnetischer Strahlung untersucht werden
- **Weitere Methoden:** sind alle Verfahren, die nicht unter die vorhergenannten Methoden fallen

Folgend werden die gefundenen Verfahren anhand der zugrundeliegenden Technik, Funktionsweise und dem Einsatzbereich beschrieben. Ein Überblick wird in Abbildung 4.1 gegeben:

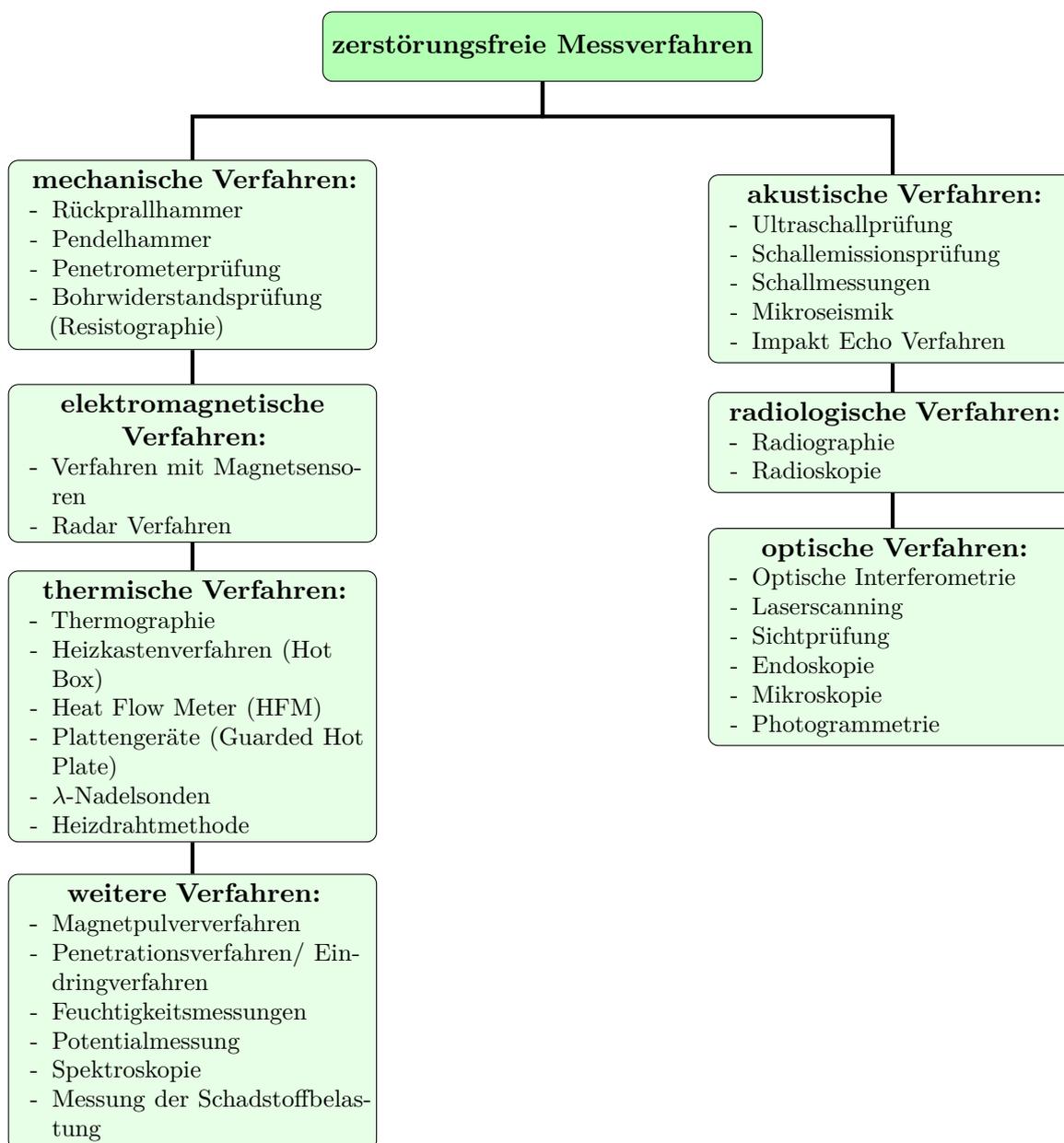


Abb. 4.1: Überblick Kategorisierung zerstörungsfreier Messverfahren [eigene Darstellung]

4.1 Mechanische Verfahren

4.1.1 Penetrometerprüfung

Bei der Penetrometerprüfung wird die Eindringtiefe einer Nadel in weiche Materialien, wie z.B. Mörtel bei Mauerwerk, gemessen und daraus die Druckfestigkeit ermittelt. Das Gerät besteht aus einem Hammer, der mit einer handbetätigten Feder verbunden ist und die Bewegung auf einen Schlagbolzen mit Stahlnadel ausübt (siehe Abbildung 4.2). Die Nadelspitze dringt mit konstanter Aufprallenergie in den Mörtel ein und es wird die nicht durchstochene Länge gemessen. Eine Penetrometerprüfung wird, um Messunsicherheiten vor Ort zu verringern, in mindestens fünf Durchgängen mit jeweils zehn Schlägen ausgeführt. Daraus ergibt sich ein Durchschnittswert für die Eindringtiefe, mit dem anschließend die Druckfestigkeit berechnet werden kann [12].

Penetrometerprüfung

Technologie: mechanisch → Reaktion auf Eindringen einer Nadel ins Material

Einsatzbereich: in-situ Prüfung am Bauteil z.B.: Mörtel

Messergebnis: Eindringtiefe der Nadel (Durchschnittswert aus min. fünf Durchgängen)
→ rechnerische Ermittlung der Druckfestigkeit

$$f_m = \frac{5.97E03 - \sqrt{1.58E06 * d - 5.3E06}}{1.58E03} \quad (4.1)$$



Abb. 4.2: Darstellung Penetrometerprüfung [12]

Quelle: [12]

4.1.2 Rückprallhammer

Die Prüfung mit dem Rückprallhammer wird zur Abschätzung von mechanischen Eigenschaften (Druckfestigkeit) durch die Messung des Rückpralls einer federgesteuerten Masse eingesetzt. Der Rückprallwert gibt Aufschluss über die Härte des Materials und ist Grundlage für die Berechnung der Druckfestigkeit [12]. Zwei Beispiele für den Rückprallhammer sind:

- Schmidt Hammer: Der Schmidt Hammer wird hauptsächlich für Messungen von Betontragwerken eingesetzt [12]. Der Schmidt Hammer ist in Abbildung 4.3 dargestellt.
- Pendelrückprallhammer: Der Pendelrückprallhammer misst den Pendelrückprall. Aufgrund der geringeren Schlagenergie wird der Pendelrückprallhammer tendenziell bei weichen Materialien, wie z.B. Mörtel, eingesetzt. Anhand von neun Messergebnissen an unterschiedlichen

Positionen wird der Median des Rückprallwertes ermittelt. Mit Hilfe des Rückprallwertes wird der Mörtel nach einer Bewertungstabelle eingestuft [12]. Der Pendelrückprallhammer ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

Rückprallhammer

Technologie: mechanisch → Prinzip des Rückpralls

Einsatzbereich: in-situ Prüfung am Bauteil z.B.: Beton, Mauerwerk

Messergebnis: Rückprallwert des Materials (Durchschnittswert aus zwölf Messungen) → rechnerische Ermittlung der Druckfestigkeit

$$f_m = 9E05 * (R_m)^{3.5652} \quad (4.2)$$

Verwandte Verfahren:

- Schmidt Hammer (Messungen von Betontragwerken)
- Pendelrückprallhammer (qualitative Bewertung Mörtel)



Abb. 4.3: Darstellung Schmidt Hammer [12]



Abb. 4.4: Darstellung Pendelrückprallhammer [12]

Quelle: [12]

4.1.3 Kratztest

Beim Kratztest wird mit Hilfe einer Feder eine Drehkraft auf die Oberfläche eines weichen Materials aufgebracht. Dabei ist eine Sonde mit Schleifspitze in direktem Kontakt mit der Oberfläche. Nach fünf vollen Umdrehungen wird die Eindringtiefe der Sonde gemessen. Der

Kratztest soll prinzipiell als qualitative Messung für die Dauerhaftigkeit von Materialien, wie z.B. Mörtel dienen [12]. Das Gerät ist in Abbildung 4.5 dargestellt.

Kratztest

Technologie: mechanisch → Reaktion auf Eindringen einer Sonde ins Material

Einsatzbereich: in-situ Prüfung am Bauteil z.B.: Mörtel

Messergebnis: Eindringtiefe der Sonde (Durchschnittswert aus min. fünf Durchgängen)
→ Prüfung der Dauerhaftigkeit des Materials (qualitative Messung)



Abb. 4.5: Darstellung Kratztest [12]

Quelle: [12]

4.1.4 Bohrwiderstandsmessung (Resistographie)

Die Bohrwiderstandsprüfung wird zur Beurteilung von Holzbauteilen eingesetzt. Dabei handelt es sich um eine zerstörungsarme Prüfmethode. Dieses Verfahren wird eingesetzt um Früh- und Spätholz voneinander zu unterscheiden, Risse, Hohlräume und Befall durch Holzzerstörer zu detektieren und Geometrie von Holzbauteilen und Holzverbindungen festzustellen. Im Zuge der Messung wird direkt vor Ort der Bohrwiderstand am Gerät angezeigt. Durch eine zerstörungsfreie Ausführung ist dieses Verfahren gut in denkmalgeschützten und tragenden Bauteilen anwendbar. Allerdings wird das Bohrwiderstandsprofil von der Holzfeuchte beeinflusst und die Durchführung und Auswertung benötigt Erfahrung [23]. In Abbildung 4.6 ist das Gerät dargestellt.

Bohrwiderstandsmessung (Resistographie)

Technologie: mechanisch → Bohrwiderstand

Einsatzbereich: in-situ Prüfung an Holzbauteilen

Messergebnis: Unterscheidung von Früh-Spätholz, Detektion Risse, Hohlräume und Befall von Holzzerstören



Abb. 4.6: Darstellung Bohrwiderstandsprüfung [23]

Quelle: [23]

4.2 Akustische Verfahren

4.2.1 Ultraschallprüfung

Die Ultraschallprüfung basiert auf dem Verhalten von Schallwellen (0,02-50 MHz). Schall beschreibt die Störung von Teilchen in einem Medium (Festkörper, Flüssigkeit, Gas). Je nach Medium breiten sich die Frequenzen unterschiedlich aus [17]. Der Ultraschallimpuls wird durch das Anlegen elektrischer Ladung an einem piezoelektrischen Element erzeugt und ähnelt dem Prinzip der Echolotung [7]. Prinzipiell laufen die Ultraschallwellen gleichförmig durch den Prüfkörper. Durch Diskontinuitäten werden die Eigenschaften des Impulses gestört und darauf aufmerksam gemacht [17]. Die Standardmethode der Ultraschallprüfung ist die Kathodenstrahlröhre. Hierbei wird die gemessene Zeit der horizontalen Bewegungen auf einem Punkt von links nach rechts dargestellt [7]. Der Aufbau einer Ultraschall-Prüfeinrichtung beinhaltet Prüfkopf bzw. Prüfköpfe und das Ultraschall Gerät [51]. In Abbildung 4.7 wird die Ultraschallprüfung gezeigt.

Die Ultraschallprüfung erfolgt bei schalleitenden Materialien und soll zur Erkennung von inneren Mängeln dienen [7].

Im Bereich der Ultraschallprüfung gibt es mehrere Prüfverfahren:

- Impuls Echo Verfahren

Das Impuls Echo Verfahren ist das am häufigsten angewandte Verfahren im Bereich der Ultraschallprüfung. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der Notwendigkeit der Zugänglichkeit von nur einer Fläche des Prüfstückes (Sender und Empfänger in einem). Dabei kann es auch zur exakten Ortung von Fehlern eingesetzt werden [51]. Abbildung 4.8 zeigt das Schema des Impuls Echo Verfahrens.

- Durchschallungsverfahren

Das Durchschallungsverfahren stellt die älteste Methode der Ultraschallprüfungen dar. Im Vergleich zum Impuls Echo Verfahren hat das Durchschallungsverfahren Nachteile, wie keine Ortung von Fehlern oder die Anwendung mit zwei Prüfkörpern (Sender und Empfänger getrennt). Allerdings wird das Verfahren zur Lokalisierung von Materialfehlern noch eingesetzt [51].

- Reflexionsverfahren

Die Messungen mit dem Reflexionsverfahren werden auch mit zwei Prüfkörpern (Sender und Empfänger getrennt) durchgeführt. Eingesetzt wird dieses Verfahren bei Wanddickenmessungen, Bewertung von oberflächennahen Materialfehlern und Ungängen (z.B. bei Schweißnahtprüfungen) [51].

- Phased Array Verfahren

Das Phased Array Verfahren ist eine Gruppenstrahlertechnik. Das bedeutet, dass durch die Anwendung mehrere Ultraschallelemente und durch elektronische Verzögerungen, Schallbündel erstellt werden. Diese Schallbündel können elektronisch gesteuert, abgetastet, geschwenkt und fokussiert werden. Somit können variabel mehrere Einschallpositionen erreicht werden. Das Phased Array Verfahren wird im Bereich der Wanddickenmessung und Erkennung von Fehlern eingesetzt. Vorteile bietet das Verfahren vor allem in Bezug auf Beurteilung des Fehlerbefundes, Datenspeicherung zur Prüfdokumentation, Prüfaufbau (kein Wechsel von Prüfköpfen notwendig) und schnellerer Abtastung der Prüffläche [51].

- TOFD-Verfahren (Time of Flight Diffraction = Laufzeit Beugung)

Das TOFD- Verfahren ist eine teil- oder vollmechanisierte Ultraschallprüftechnik. Hierbei wird neben zwei Prüfköpfen, einer zur "Beleuchtung" des Prüfobjektes und der andere zum Empfangen der Beugungssignale, auch ein Computer zur Datenerhebung benötigt. Durch die Aufnahme der schwachen Beugungssignale von den Fehlerrändern kann mit dem TOFD-Verfahren nicht nur ein Fehler lokalisiert, sondern auch dessen Größe bestimmt werden. Das TOFD-Verfahren wird hauptsächlich für Schweißnahtprüfungen, bei Messungen von Druckbehältern und Rohrleitungen eingesetzt [51].

Ultraschallprüfung

Technologie: akustisch → Ultraschall (0.02 bis 50 MHz)

Einsatzbereich: in-situ Prüfung am Bauteil

Messergebnis: Lokalisierung von inneren Materialfehlern (Schweißnähte,...), Ermittlung von Oberflächenfehlern (Risse,...)

Verwandte Verfahren:

- Durchschallungsverfahren (zwei Prüfköpfe)
- Impuls Echo Verfahren (ein Prüfkörper)
- TOFD (Time of Flight Diffraction) (Spezialanwendung)
- Phased Array Verfahren (Spezialanwendung)



Abb. 4.7: Darstellung Schema der Ultraschallprüfung [55]

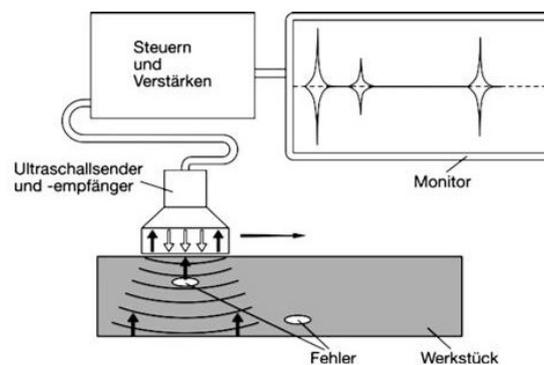


Abb. 4.8: Darstellung Schema der Ultraschallprüfung (Impuls Echo Verfahren) [25]

Quelle: [7], [17], [51]

4.2.2 Mikroseismik

Bei der Mikroseismik wird durch einen mechanisch angeregten Impuls am Prüfkopf, die Reflexion elastischer Wellen gemessen. Mit Hilfe eines Geophons bzw. Beschleunigungsaufnehmer wird die Laufzeit der reflektierten Wellen aufgezeichnet und in einer Software zu einer bildgebenden Darstellung angepasst. Mikroseismik wird zur Detektion von Diskontinuitäten und Rissen eingesetzt [55]. Der Aufbau einer mikroseismischen Prüfung wird in Abbildung 4.9 dargestellt.

Ein verwandtes Verfahren ist die Parallel Seismische Methode zur Messung von Betonpfählen. Ziel ist es die Tiefe und die Gleichmäßigkeit des Querschnitts zu überprüfen. Hierbei wird am Pfahlkopf mit einem kalibrierten Hammer ein Signal losgesendet. Die Ausbreitung der Welle wird mit einem Hydrophon entlang des Pfahl gemessen [21].

Mikroseismik

Technologie: Messung elastischer Wellen → Anregung durch Impuls

Einsatzbereich: in-situ Prüfung am Bauteil

Messergebnis: Detektion von Diskontinuitäten und Risse

Verwandte Verfahren: Parallel Seismische Methode



Abb. 4.9: Darstellung Schema der Mikroseismischen Prüfung [55]

Quelle: [55], [21]

4.2.3 Schallemissionsprüfung

Schallemission beschreibt die freigesetzte Energie in Form von elastischen Wellen durch die Verformung eines Materials [17]. Diese Verformung ist eine Spannung innerhalb eines Materials bzw. innere Veränderung (Schallwelle), die durch eine äußere Krafteinwirkung entsteht. Das Phänomen lässt sich durch das Ergebnis einer kleinen Oberflächenverschiebung eines Materials, die aufgrund von Spannungswellen entsteht und durch eine schnell freigesetzte Energie in einem Material oder auf der Oberfläche ausgelöst wird, beschreiben [7]. Die Schallemissionsprüfung ist eine Prozesskette. Das Verhalten des Werkstoffes wird durch externe Belastung, Werkstoffeigenschaften oder Umweltbedingungen beeinflusst. Die entstehenden elastischen Wellen werden von Schallemissionssensoren aufgenommen und zu Merkmaldatensätzen verarbeitet [51].

Der Einsatz der Schallemissionsprüfung ist vielseitig und wird oft zur Prüfung von metallischen Druckbehältern und Rohrleitungen verwendet [51]. Sie kann aber auch zur Untersuchung und/oder Verwendung bei Inspektion, Prüfung, Qualitätskontrolle, Systemrückmeldung, Prozessüberwachung etc. eingesetzt werden und eignet sich gut für die kontinuierliche Überwachung von tragenden Strukturen [7].

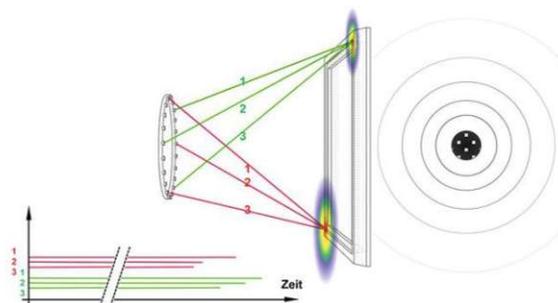


Abb. 4.10: schematische Darstellung und Funktionsweise der akustischen Kamera [44]

Schallemissionsprüfung

Technologie: akustisch → Freisetzung von elastischen Wellen durch äußere Krafteinwirkung (Belastung, Umweltbedingungen,...)

Einsatzbereich: Prüfung von metallischen Druckbehältern und Rohrleitungen, Qualitätskontrolle (Überwachung tragender Strukturen)

Messergebnis: elastische Wellen, die in Merkmaldatensätze verarbeitet werden

Quelle: [17], [7], [51]

4.2.4 Schallmessungen

Eine Methode, um Schallquellen bezüglich ihren Entstehungsorten darzustellen ist die akustische Kamera. Diese ist eine akustische Arraytechnik (Array von Mikrofonen) die neben volumenbezogenen Anwendungen auch flächenbezogene Aussagen zur Dichtheit (Leckagenortung) treffen kann. Grundsätzlich sind auch bau- und raumakustische Messungen mit der akustischen Kamera möglich. Die akustische Kamera besteht aus einer größeren Anzahl von Mikrofonen, die miteinander verbunden sind [44].

Von einer Schallquelle wird eine Schallwelle ausgestrahlt, die je nach Anordnung zu unterschiedlichen Zeitpunkten von den einzelnen Mikrofonen empfangen wird. Durch die geringen Laufzeitunterschiede können unterschiedliche Schallquellen identifiziert werden [60].

Die flächenhafte Aufnahme der Schallpegel erfolgt in unterschiedlichen Frequenzbändern (Durchgang von Schall ist abhängig vom Verhältnis der Wellenlänge). Bei der Messung eines flächenbezogenen Bildes wird die Schalldruckverteilung mit einem optischen Bild überlagert. Dadurch liegen die Daten in einer gewohnten Darstellungsform vor und sind leichter zu interpretieren. Die akustischen Kameras gibt es in unterschiedlichen Größen. Bei der Durchführung einer Messung können Sender und Empfänger auch vertauscht werden, da der Schallübertragungsweg derselbe bleibt. Eine Anwendung findet die akustische Kamera bereits in der Fahrzeugentwicklung [44]. Die Funktionsweise der akustischen Kamera ist in Abbildung 4.10 dargestellt.

Bei den Schallmessungen wird grundsätzlich zwischen Luftschall und Trittschall unterschieden [4]. Zur groben Bewertung der Trittschalldämmung und Luftschalldämmung, wie auch von Rohrleitungen in Bauteilen kann das zu untersuchende Bauteil abgehört werden. Als Hilfestellung dient ein Hörrohr mit einem Schlauchstethoskop. Dabei kann der Schall entweder durch Fremderzeugung oder durch Fließgeräusche (Rohrleitungen) beurteilt werden. Zur Beurteilung des Schalls durch Abhören ist viel Erfahrung notwendig [29].

Bei der genauen Messung der Luftschalldämmung wird ein Senderraum und ein Empfängerraum benötigt. Hierbei werden Lautsprecher aufgestellt und jeweils der Schallpegel im Senderraum und Empfängerraum mit Mikrofonen gemessen. Das Luftschalldämm-Maß wird aus den gemittelten Messergebnissen ermittelt [4].

Bei der genauen Messung des Trittschalls gibt es wieder einen Senderraum und Empfängerraum. Diesmal wird mit Hilfe eines Hammers im Senderraum Schall erzeugt und im Empfängerraum mit Mikrofonen gemessen. Anschließend wird der Trittschallpegel wieder rechnerisch ermittelt [4].

Zur Beurteilung des Körperschalls kann analog zur Ermittlung des Trittschalls ein Kleinhammerwerk, beispielsweise System Gösele (siehe Abbildung 4.13), zur Schallanregung eingesetzt werden. Anschließend wird der Körperschallpegel rechnerisch ermittelt. Dies wäre eine Möglichkeit, um Nutzergeräusche in Wohnungen beurteilen zu können [50].

Die Messungen von Schall- und Trittschall sind mittlerweile standardisiert laut Norm:

- Luftschall

In der EN ISO 16283-1 ist der Ablauf der Messung des Luftschallpegels beschrieben. Dabei werden zwei Messverfahren erläutert. Einerseits das Standardverfahren, welches zur Bestimmung des Schalldruckpegels, Nachhallzeit und Hintergrundgeräusche angewendet wird und andererseits ein zusätzliches Verfahren für tiefe Frequenzen.

Bei der Messung wird ein Sende- und ein Empfängerraum benötigt, wobei im Senderraum Lautsprecher aufgestellt sind (siehe Abbildung 4.11). Im Senderraum wird Schall erzeugt, der im Empfängerraum gemessen wird. Bei der Durchführung ist auf einen Gehörschutz der Personen, die an der Messung beteiligt sind, zu achten.

Eine detailliertere Beschreibung der Variationen der Positionen der Lautsprecher und Mikrofone, wie auch der Versuchsauswertung und Dokumentation der Ergebnisse wird in der Norm beschrieben [41].

- Trittschall

In der EN ISO 16283-2 ist der Ablauf der Messung des Trittschallpegels beschrieben. Dabei werden zwei Messverfahren erläutert. Einerseits das Standardverfahren, das zur Bestimmung des Schalldruckpegels, Nachhallzeit und Störgeräusch angewendet wird und andererseits noch ein zusätzliches Verfahren für tiefe Frequenzen.

Bei der Messung wird ein Sende- und ein Empfängerraum benötigt, wobei im Empfängerraum auf das Trennbauteil wirkende Trittschallquelle erzeugter Schall abgestrahlt wird (siehe Abbildung 4.12). Im Senderraum wird die Trittschallquelle betrieben. Es werden in der Norm zwischen zwei Trittschallquellen unterschieden: Hammerwerk und Gummiball.

Eine detailliertere Beschreibung der Variationen der Positionen der Mikrofone und Anwendung der zwei Trittschallquellen, wie auch der Versuchsauswertung und Dokumentation der Ergebnisse wird in der Norm beschrieben [42].

Schallmessungen

Technologie: akustisch → Schallausbreitung durch akustischen oder mechanischen Impuls

Einsatzbereich: Schallmessungen Gebäude

Messergebnis: Schallpegel (Luftschallpegel, Trittschallpegel, Körperschallpegel)

Angewandte Verfahren:

- akustische Kamera (Leckagenortung)
- Luftschallmessung nach EN 16283-1
- Trittschallmessung nach EN 16283-2
- Körperschallmessung mit Gösele System

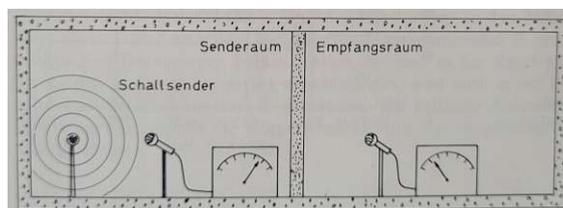


Abb. 4.11: schematische Darstellung Luftschallprüfung [4]

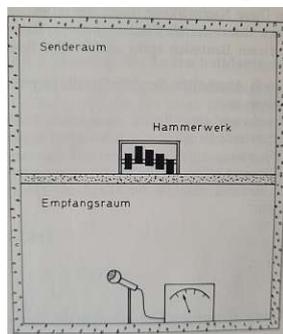


Abb. 4.12: schematische Darstellung Trittschallprüfung [4]



Abb. 4.13: Darstellung System Gösele [4]

Quelle: [44], [60], [29], [4], [50], [41], [42]

4.2.5 Impakt Echo Verfahren

Beim Impakt Echo Verfahren werden kurze mechanische Schläge einer handgeführten Kugel (Impaktor) an der Bauteiloberfläche ausgelöst, die Vielfachreflexionen in einem Bauteil erzeugt. Dabei ist die Frequenzzusammensetzung vom Kugeldurchmesser abhängig. Die Signale werden von einem Sensor aufgenommen, der auf der selben Bauteiloberfläche wie der Impaktor positioniert ist (siehe Abbildung 4.14). Das Verfahren ist gut für Dickenmessungen an dicht bewehrten Bauteilen und zur Lokalisierung von Hüllrohren geeignet. Eine Ortung von Bewehrungsstäben ist aufgrund der geringen Durchmesser nicht möglich [19].

Impakt Echo Verfahren

Technologie: akustisch → Schallausbreitung durch mechanischen Impuls

Einsatzbereich: in-situ Prüfung am Bauteil

Messergebnis: Interpretation reflektierter Signale → Dickenbestimmung dicht bewehrter Bauteile, Lokalisierung von Hüllrohren



Abb. 4.14: Darstellung der Impakt-Echo Prüfung [55]

Quelle: [19]

4.3 Elektromagnetische Verfahren

4.3.1 Radar Verfahren

Das Prinzip des Radar Verfahrens basiert auf der Erzeugung und Reflexion von elektromagnetischen Wellen. Abhängig von der dielektrische Eigenschaft der Materialien werden die Wellen unterschiedlich reflektiert. Dabei werden die Geräte nur von einer Seite an das Bauteil angelegt [55]. Zwei Varianten des Radar Verfahrens sind:

- Ground Penetrating Radar (GPR)

Das GPR funktioniert durch die Anwendung elektromagnetischer Wellen (10-6000 MHz). Durch eine Sendeantenne wird die elektromagnetische Welle erzeugt und wird bei Antreffen von Diskontinuitäten in den dielektrischen Eigenschaften des Mediums reflektiert und von einer Empfangsantenne aufgezeichnet. Dabei ist die Intensität der Amplitude (reflektiertes Signal) abhängig vom dielektrischen Kontrastwert zwischen den Medien [13]. Das reflektierte

Signal wird dann gemessen und analysiert [8]. Das Prinzip ist schematisch in Abbildung 4.15. Dadurch können Strukturen charakterisiert und lokalisiert werden. Diese Methode findet vor allem im Verkehrswesen (Straßen, Gehwegen, Brücken, ...) seine Anwendung, wird aber auch im Bereich der Gebäudeinspektion eingesetzt. Es können vor allem Bewehrungsstäbe innerhalb des Stahlbetons geortet, aber auch Gebäudeinformationen (Struktur und Zusammensetzung) erfasst werden. Das GPR ist durch das Aufzeigen und Bestimmen (Ort und Art) von Diskontinuitäten zwischen Materialien, in Bezug auf dielektrische Eigenschaften, eine vielversprechende Methode für zerstörungsfreie Messungen [8].

- Through Wall Imaging Radar (TWIR)

Das TWIR setzt ebenfalls auf die Anwendung der Technologie der elektromagnetischen Wellen, im besonderen Mikrowellen. Diese sollen zur Identifizierung und Darstellung physischer Eigenschaften von Objekten innerhalb eines Gebäudes eingesetzt werden. TWIR weist noch einige Schwächen in Bezug auf Wandstörungen bzw. Wanddämpfung, das Abschwächen der ausgesendeten Wellen durch das zweimalige Durchlaufen innerhalb der Wand, auf. Eine mögliche Lösung wäre das Radargerät mit niedrigeren Frequenzen (unter 3 GHz) anzusetzen, um somit eine bessere Abgrenzung der einzelnen Materialien und die Verringerung der Wanddämpfung zu erzeugen [8]. Eine andere Lösung ist die Hintergrundsubtraktion. Hierfür wird Vorwissen über die Eigenschaften der Wand vor der Radarmessung benötigt. Da die bekannten Werte von den gemessenen elektrischen Eigenschaften abgezogen werden. In der Praxis ist die Methode schwer umsetzbar, da häufig keine genauen Informationen vorab vorhanden sind [37]. Außerdem können Lufträume durch ihre konstanten Messwerte, das Messergebnis verzerren [8]. Neben dem Einsatz als zerstörungsfreie Messmethode, wäre ein Einsatz des TWIR im militärischen Bereich für Rettungseinsätze in eingestürzten Gebäuden ebenfalls interessant [8].

Radar Verfahren

Technologie: elektromagnetisch → elektromagnetische Wellen (10-6000 MHz) oder Mikrowellen (1 - 300 GHz)

Einsatzbereich: Gebäudeuntersuchung, Betonprüfung (Korrosion)

Messergebnis: Interpretation von reflektierten Wellen → Schichtaufbauten, Schichtdicken, Feuchtigkeit (nur GPR)

Verwandte Verfahren:

- Ground Penetrating Radar (GPR)
- Through Wall Imaging Radar (TWIR)

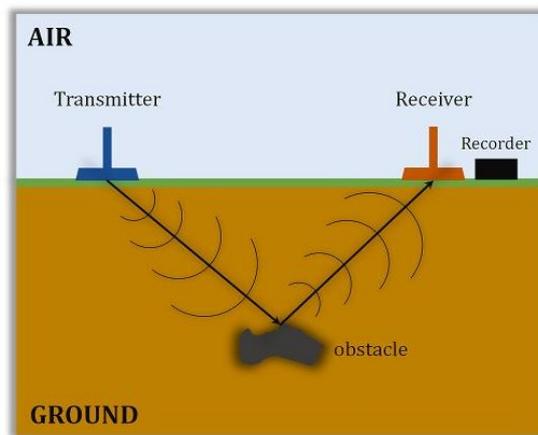


Abb. 4.15: schematische Darstellung des GPR [27]

Quelle: [55], [13], [8], [37]

4.3.2 Verfahren mit Magnetsensoren

Im Folgenden werden unterschiedliche Magnetsensoren vorgestellt. Magnetsensoren besitzen höhere Empfindlichkeit, kompakte Größen und die Fähigkeit als energieautarker Sensor zu arbeiten. Das Prinzip beruht auf der Störung eines Magnetfeldes durch einen Sensor. Das erzeugte Ausgangssignal ist proportional zur Magnetfeldstärke [9].

- Hall Effekt Sensor

Der Hall Effekt Sensor funktioniert anhand des Hall Effektes. Dieser beschreibt das Entstehen einer Spannungsdifferenz (Hall Spannung) zwischen einem elektrischen Ladungsträger und einem senkrecht zur Stromrichtung liegenden Magnetfeldes. Die Hall Spannung ist proportional zur Stärke des Magnetfeldes und wird durch den Hall Effekt Sensor unter der Annahme, dass sich dieses in einem festen Magnetfeld befindet, gemessen. Der Hall Effekt Sensor findet seine Anwendung zur Erkennung und Messung von Korrosionsmengen im Stahlbeton [9].

- Magnetoresistiver Sensor

Der magnetoresistive Effekt entsteht durch die Wechselwirkung zwischen dem elektrischen Widerstand eines ferromagnetischen Materials und einem äußeren Magnetfeldes [9]. Es werden drei Kategorien unterschieden:

- Anisotropische Magnetowiderstands-Sensoren (AMR)

AMR bestehen nur aus einer ferromagnetischen Schicht. Der elektrische Widerstand ist abhängig vom Winkel zwischen dem Strom und der Magnetisierungsrichtung. Bei einem Parallelverlauf ist der Widerstand am größten [9].

- Giga-Magnetowiderstands-Sensoren (GMR)

GMR bestehen aus zwei ferromagnetischen Schichten (z.B.: Eisen) und einer dazwischenliegenden nicht- magnetischen Schicht (z.B.: Kupfer) [9].

- Tunnel-Magnetowiderstands-Sensoren (TMR)

TMR bestehen aus zwei ferromagnetischen Schichten und einer isolierenden Schicht [9].

Die Abbildung 4.16 zeigt nochmal graphisch die Unterschiede zwischen den drei Kategorien

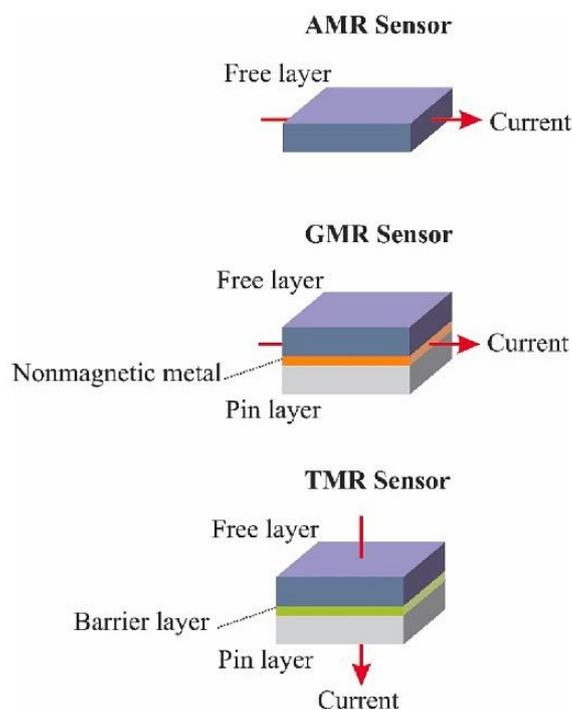


Abb. 4.16: Darstellung AMR-GMR-TMR [9]

Anwendung finden die Magnetoresistiven Sensoren bei der Untersuchung von Stahl. Mithilfe dieser Sensoren können Dicken, Spannungsschäden und Korrosion im Stahl ermittelt werden [9].

- Wirbelstromsensor

Wirbelstromsensoren arbeiten mit der Entstehung von Wirbelströmen. Diese werden durch ein sich änderndes Magnetfeld, durch die Bewegung eines Leiters in einem Magnetfeld oder durch die Änderung des Magnetfeldes um einen festen Leiter, induziert. Hierbei ist die Größe des Wirbelstromes proportional zum Magnetfeld. Bei einer Diskontinuität im

Leiter verändert sich der Wirbelstrom. Der Wirbelstromsensor wird zur Messung von oberflächennahen Defekten (Risse) bei Stahl, Rohren oder Aluminium eingesetzt [9].

Die Wirbelstromprüfung stellt einen bereits eingesetzten Wirbelstromsensor dar. Bei der Messung wird auf die Oberfläche des zu untersuchenden Objektes eine Sonde platziert und so das Material überprüft (siehe Abbildung 4.17). Anwendung findet die Wirbelstromprüfung bei der Erkennung von Rissen, Materialdickenmessung, Materialidentifikation mit Hilfe der Leitfähigkeitsmessung oder zur Überwachung von Hitzeschäden [7]. Die Ausführung der Wirbelstromprüfung erfolgt in gepulster Wirbelstromprüfung (mit Kontakt des Prüfobjektes) oder entfernter Wirbelstromprüfung (ohne Kontakt des Prüfobjektes) [17]. Die Anwendung der Wirbelstromprüfung ist allerdings auf Metalle beschränkt [7].

- Elektromagnetischer Sensor

Durch die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in unterschiedlichen Materialien kann der elektromagnetische Sensor zur Messung von Eigenschaften verschiedener Materialität eingesetzt werden. Die Richtung bzw. Intensität der Magnetfeldwellen werden durch ferromagnetische Materialien (Eisen, Stahl) beeinflusst. Elektromagnetische Sensoren werden bevorzugt mit anderen magnetischen Effekten (Hall-Effekt, magnetoresistiver Effekt) kombiniert. Anwendung finden die elektromagnetischen Sensoren z.B. zur Erkennung von Korrosion im Stahlbeton [9].

- Magnetoelastischer Sensor

Der magnetoelastische Effekt entsteht durch das Wechselspiel zwischen elastischen und magnetischen Eigenschaften eines Materials. Die elastische Kraft wird hierbei in ein elektrisches Signal umgewandelt. Durch das Aufbringen einer Zugkraft (Änderung der magnetischen Eigenschaften) wird das Ausgangssignal beeinflusst. Anwendung finden diese Sensoren zur Bestimmung der Zugkraft eines Stahl- bzw. Vorspannkabels [9].

- Magnetische Streufluss Methode

Magnetischer Streufluss entsteht durch Diskontinuitäten in einem ferromagnetischen Gegenstand, der als Magnet in einem gleichmäßigen Magnetfeld wirkt. Je größer die Diskontinuitäten, umso stärker ist der Streufluss. Durch das Anbringen eines Sensors, beispielsweise ein Hall-Sensor, kann der Schaden identifiziert werden. Mithilfe dieser Methode können Querschnittsverluste in Stahlkabeln oder Korrosion ermittelt werden [9].

- Magnetomechanischer Sensor

Bei den Messungen mit magnetomechanischer Technik wird ein magnetoelastischer aktiver Sensor (MEAS) eingesetzt. Der MEAS besteht aus einer Spule und einem Permanentmagneten. Diese beiden Mechanismen sollen elastische Wellen, Wirbelströme bei metallischen Strukturen und durch die Lorentzkraft die Erzeugung elastischer Wellen bei nichtferromagnetischen Metallen, erzeugen. Die erzeugten Wellen dringen in die Struktur ein und geben anhand der Impedanzantwort Auskunft über den Zustand eines Materials. Das magneto-mechanische Prinzip kann zur Messung von Spannungen in Stahl und zur Erkennung von losen Verbindungen und Rissen eingesetzt werden [9].

- Magnetostriktive Methode

Bei dieser Methode wird das Prinzip der Magnetostriktion (Veränderung des magnetischen Materials durch externe Belastung) angewendet. Anhand dieses Prinzips können Schäden in Stahlrohren oder Dehnungen in Verbundwerkstoffen gemessen werden [9].

- Magnetischer Mikrodrahtsensor

Der magnetische Mikrodraht ist ein Draht mit ferromagnetischem Kern umhüllt von Glas. Dieser wird in Materialien, meist Verbundwerkstoffe, eingebracht, um Spannungen in nicht ferromagnetischen Materialien zu messen. Messergebnisse ergeben sich durch die Erzeugung eines Magnetfeldes im Bereich des Mikrodrahtes durch eine Spule [9].

Ein weiteres Anwendungsbeispiel für Magnetsensoren ist der Remanenzmagnetismus. Das ist ein Verfahren, um Brüche in Spannstahldrähten zu detektieren. Dabei wird die ferromagnetische Eigenschaft von Spannstählen genutzt. Dabei werden die Spannglieder von der Betonoberfläche aus bleibend magnetisiert und die magnetische Flussdichte an der Betonoberfläche gemessen. Somit können Brüche in einzelnen Spanngliedern identifiziert werden, da sich charakteristische magnetische Streufelder ausbilden (siehe Abbildung 4.18). Die Anwendung funktioniert bei Spanngliedern mit einer Betondeckung von etwa 30cm. Dieses Verfahren wird zur Überprüfung von Brücken eingesetzt. Durch magnetinduktive Verfahren kann beispielsweise auch die Lage von Dübeln bestimmt werden [19].

Es gibt noch weitere Arten und Anwendungsbereiche von Magnetsensoren, wie im Bereich Brückenbau oder Betonbau. Bei der Auswahl des passenden Magnetsensors ist auf die Vor- und Nachteile der einzelnen Methoden zu achten. Im Bereich der Magnetsensoren wird noch weiter geforscht und Verbesserungen eingebracht [9].

Verfahren mit Magnetsensoren

Technologie: elektromagnetisch → sensorbasierte Messung eines Magnetfeldes

Einsatzbereich: Prüfung von ferromagnetischen Material

Messergebnis: Ausgangssignal (Störung) des Magnetfeldes → Erkennung von Korrosion, Detektion von Diskontinuitäten, Spannung von Stahl,...

Verwandte Verfahren:

- Hall-Effekt Sensor
- Magneto-resistiver Sensor
- Wirbelstromsensor
- Elektromagnetischer Sensor
- Magnetoelastischer Sensor
- Magnetische Streufluss Methode
- Magnetomechanischer Sensor
- Magneto-restriktive Methode
- Magnetischer Mikrodrahtsensor
- Anwendungsbeispiel: Wirbelstromprüfung, Remanenzmagnetismus

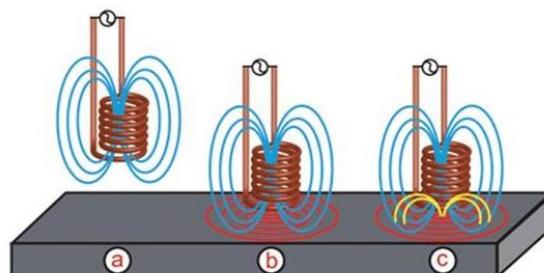


Abb. 4.17: schematische Darstellung der Wirbelstromprüfung [57]

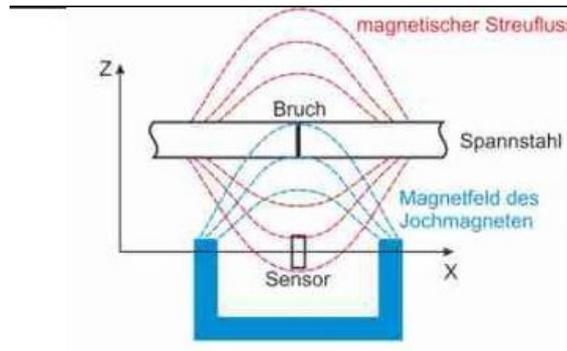


Abb. 4.18: schematische Darstellung Remanenzmagnetismus [55]

Quelle: [9], [7], [17], [19]

4.4 Radiologische Verfahren

4.4.1 Radiographie

Radiographie erfolgt über die Anwendung von Strahlung. Hierbei wird ein Material durch Strahlen, meist Röntgen oder γ -Strahlen, unter Aufnahme von Bildern durchstrahlt. Durch die Eigenschaft, dass Strahlung vom Material absorbiert wird, können anhand der Aufnahmen Unregelmäßigkeiten erkannt werden. Da im Bereich von Unregelmäßigkeiten die Strahlen weniger absorbiert werden [17]. Aufnahmen müssen von mehreren Positionen gemacht werden, da der Verlauf von Diskontinuitäten und Strahlung ein wichtiger Faktor ist, um diese zu erkennen [7].

Es werden folgend einige radiographische Prüfungen vorgestellt:

- Röntgengrobstrukturprüfung

Bei der Röntgengrobstrukturprüfung wird das Prüfobjekt durchstrahlt und die Strahlen werden absorbiert. Am anderen Ende des Prüfobjektes treten die nicht absorbierten Strahlen wieder aus und ergeben durch die Schwarzfärbung, abhängig von der Intensität der nicht absorbierten Strahlen, einen Film (siehe Abbildung 4.19). Nach der Entwicklung des Filmes können Defekte erkennbar gemacht werden [51]. Bei der Durchleuchtung von Metallen sammeln sich die Röntgenstrahlen in den Bereichen der Defekte bzw. Unregelmäßigkeiten an [7].

- Prüfung mit γ -Strahlen

Der Aufbau der Prüfung mit γ Strahlen ist gleich der Röntgengrobstrukturprüfung. Mit dem Unterschied, dass anstelle von Röntgenstrahlen, γ -Strahlen eingesetzt werden [51]. Die Verwendung von γ Strahlen ist durch die Anwendung von radioaktiven Materialien aber unpopulärer [7]. Trotzdem bietet eine Anwendung des γ -Strahlen Verfahrens eine größere Durchdringungsfähigkeit und ist auch ortsunabhängig einsetzbar [51]. Zusätzlich können auch innere Mängel und Defekte in eisenhaltigen und nicht eisenhaltigen Metallen und Materialien festgestellt werden [7]. Letztlich ist die Verwendung mit Vorsicht zu betrachten, da die Strahlenquelle nicht abgeschaltet werden kann (nur abschirmbar) und eine Handhabung eine größere Gefährdung im Vergleich zur Röntgenstrahlen darstellt [51].

- Computer Radiographie (CR)

Die Computer Radiographie verwendet statt Röntgenfilme digitale Speicherfilme. Diese Speicherfilme gibt es in unterschiedlichen Auflösungen und Formaten und sie können wiederverwendet werden. Auch eine digitale Datenaufnahme ist möglich. Die Computer Radiographie findet ihre Anwendung im Bereich der Schweißnahtprüfung und Zustandsuntersuchung (Korrosionsschäden) an isolierten Rohrleitungen [51].

Radiographie

Technologie: radiologisch → Absorption von Strahlung

Einsatzbereich: Prüfung am Bauteil (Labor oder in-situ)

Messergebnis: Erkennung Diskontinuitäten

Verwandte Verfahren:

- Prüfung mit Röntgenstrahlen (Röntgenstrahlen)
- Prüfung mit γ - Strahlen (γ Strahlen)
- Computer Radiographie (digitale Speicherfilme)

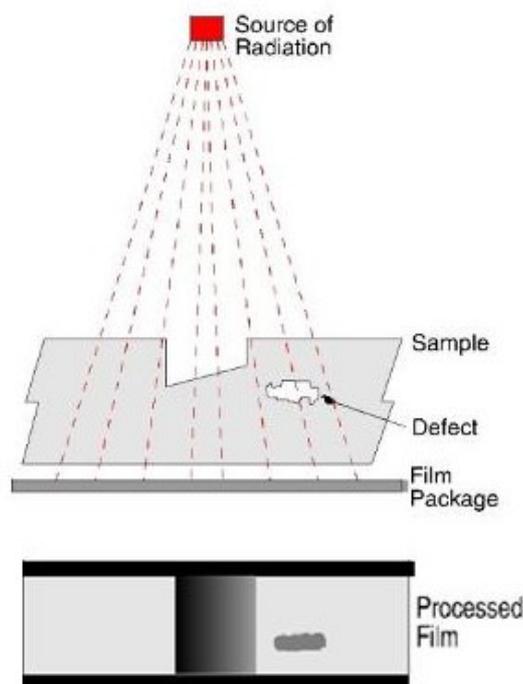


Abb. 4.19: Aufbau Röntgengrobstrukturprüfung [34]

Quelle: [17], [7], [51]

4.4.2 Radioskopie

Die Radioskopie ist ähnlich der Radiographie ein Durchstrahlungsverfahren mit Röntgenstrahlen. Im Gegensatz zur Radiographie ist das Ergebnis kein Film, sondern eine elektronische Auswertung, um die Signale direkt sichtbar zu machen. Deshalb ergibt sich hier der Vorteil einer sofortigen Befundung. Radioskopie kann für serienmäßige Testungen gut in Bereichen, wie Schweißnahtkontrollen von Rohren und Rohrbögen eingesetzt werden. Eine Anwendung am Feld ist eher unüblich, hier dominierend ist die Radiographie [51].

Die Computertomographie kann als Erweiterung von radioskopischen Aufnahmen gesehen werden. Da die Computertomographie aus einer Vielzahl radioskopischer Bilder ein dreidimensionales Modell erzeugt, können anschließend geometrische Eigenschaften, die auch im Objekt innenliegend sind, untersucht werden [51].

Somit lassen sich Aussagen über Bauteile und deren Einschlüsse bzw. Verbindungen treffen. Es können aber auch Kontrollen über geometrische Abmessungen einzelner Bauteile durchgeführt werden. Ein Export von computertomographischen Daten ins CAD ist ebenfalls möglich [51]. Laut Schöggel [51] befindet sich eine Weiterentwicklung der Computertomographie im Anfangsstadium zur Erkennung der Dichteverteilung in Objekten [51].

Radioskopie

Technologie: radiologisch → Absorption von Strahlung

Einsatzbereich: tendenziell Laborprüfung → sofortige Befundung

Messergebnis: Erkennung Diskontinuitäten, Schweißnahtkontrolle

Verwandte Verfahren: Computertomographie

Quelle: [51]

4.5 Thermische Verfahren

4.5.1 Thermographie

Die Thermographie funktioniert nach dem Prinzip der elektromagnetischen Wellen. In diesem Verfahren ist der Bereich der Infrarot Strahlung zu betrachten [51]. Es wird zwischen aktiver und passiver Thermographie unterschieden:

- Aktive Thermographie

Bei der aktiven Thermographie wird ein Bauteil durch die Anregung des Wärmetransportes auf Fehlstellen untersucht. Die Anregung des Wärmetransportes erfolgt durch externe Wärmequellen (z.B. Infrarotstrahlung). Der entstehende Wärmefluss wird von einem bildgebenden Temperatursensor (Infrarotkamera) aufgenommen. Fehlstellen sind bei der Aufnahme durch einen gedämpften und nur teilweise reflektierten Wärmefluss erkennbar. Eine Auswertung der Messungen ist nur über einen begrenzten Zeitraum möglich. Ebenso ist eine Weiterverarbeitung der Rohbilder notwendig, um zuverlässige Aussagen über das Untersuchungsobjekt zu treffen. Zur Untersuchung von oberflächennahen Fehlstellen bei Metallen wird oft auf die Induktionsthermographie zurückgegriffen [51].

- Passive Thermographie

Im Bereich der Passiven Thermographie stellen die zu untersuchenden Objekte die Wärmequelle dar. Einerseits kann das Prinzip der passiven Thermographie zu Instandhaltungs- und Wartungsprozessen eingesetzt werden. Wobei hier beispielsweise überlastete Stromleitungen oder Gaslecks identifiziert werden können. Andererseits kann die passive Thermographie im Bereich der Bauthermographie eingesetzt werden. Somit können Wärme- bzw. Kältebrücken besser identifiziert und der Energieverbrauch optimiert werden [51].

Ein praktisches Anwendungsverfahren der Thermographie ist die Infrarotthermographie (IRT). Hier wird der Oberflächentemperaturverlauf bestimmt. Es werden mit Kameras die Infrarot-

strahlung eines Objektes erfasst und anschließend in elektrische Signale umgewandelt und das Wärmebild erstellt (siehe Abbildung 4.20) [1]. Das Ergebnis der Wärmebildkamera ist durch die Infrarot-Emissivität beschränkt. Diese gibt die Empfindlichkeit für die Ergebnisdarstellungen an und unterscheidet sich vor allem durch die Oberflächenparameter wie Oberflächenbeschichtung und Rauheit [22]. Treten in dem Prüfobjekt Diskontinuitäten auf, unterscheidet sich die Wärmeleitfähigkeit und es kommt zu lokalen Temperaturveränderungen [33]. Die Messungen können abhängig vom gewünschten Ergebnis und Umwelteinflüssen tagsüber oder nachts durchgeführt werden [34]. Allerdings ist die Anwendung von IRT durch die thermischen Bedingungen der Messoberflächen beeinflusst [13].

Die IRT wird als zerstörungsfreie Fernmessmethode angewendet, um Prüfungen von Beton auf innere Hohlräume, Delaminationen und Risse durchzuführen [34]. Durch Erwärmung der Bewehrung mit elektromagnetischer Induktion kann diese auch als Wärmebild aufgenommen und identifiziert werden [19]. IRT wird auch zur Ermittlung von thermischen Eigenschaften, wie Feuchtigkeit, Wärmebrücken und Luftinfiltration eingesetzt [13]. Die Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) kann vor allem bei schweren Konstruktionen angewendet werden. Mithilfe IRT kann auch die Gebäudehülle in Bezug auf Wärmeverluste bewertet werden. Allerdings ist bei der Verwendung des IRT auf die Umweltbedingungen und auf die Durchführung der Messungen durch Fachpersonal zu achten [52]. IRT ist aufgrund der praktischen Anwendung vor Ort, geringen Kosten und Effektivität in den Vordergrund gerückt [33]. Der Einsatz von IRT wird oft mit anderen Techniken, wie GPR oder Radiographien kombiniert, um die Einsatzgebiete zu erweitern bzw. zu optimieren [8].

Thermographie

Technologie: Verarbeitung von Infrarotstrahlen

Einsatzbereich: thermische Gebäudeuntersuchung

Messergebnis: Wärmebild → Ermittlung der Wärmedurchgangskoeffizienten/Feuchtigkeit

Verwandte Verfahren:

- Aktive Thermographie
- Passive Thermographie
- Infrarotthermographie

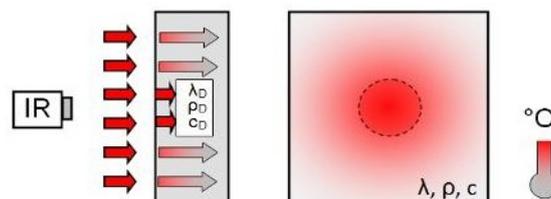


Abb. 4.20: schematischer Aufbau einer Thermographie [55]

Quelle: [51], [22], [1], [33], [13], [34], [19]

4.5.2 Wärmeflussmessungen

Laut Wegerer et al. ist eine Bestimmung von U-Wert an Bestandsobjekten nur bei wind- und luftdichten Bauteilen möglich. Es kommen Labor- oder in situ Verfahren zum Einsatz, wobei zwischen stationären und instationären Messprinzipien unterschieden wird. Bei stationären Verfahren werden Materialparameter bei einem zeitlich konstanten Wärmestrom bestimmt und instationäre Verfahren ermitteln Materialparameter bei einem zeitlich veränderlichen Wärmestrom. Stationäre Labormessverfahren sind einfach zu handhaben, benötigen allerdings eine Probenentnahme vor Ort [59].

4.5.2.1 Heizdrahtmethode

Mit der Heizdrahtmethode wird die Wärmeleitfähigkeit eines Materials durch die Wärmeausbreitung um den Heizdraht bestimmt. Es wird in einer zylindrischen Probe ein linienförmiger Heizdraht eingelegt. Diese Wärmequelle führt zu einer linienförmigen Temperierung der Probe bzw. punktförmigen Temperierung im Probenquerschnitt und ruft eine zylindrische oder kreisförmige Ausbreitung der Wärme hervor. Die Zufuhr von elektrischer Energie erwärmt den Heizdraht und leitet die Wärmeenergie an die Probe weiter (siehe Abbildung 4.21). Die gleichmäßige Energiezufuhr und Wärmeableitung führt zu einem annähernd stationären Zustand. Durch die Messung der Temperaturen an unterschiedlichen radialen Abständen kann die Wärmeleitfähigkeit rechnerisch ermittelt werden [59].

Es wird zwischen periodischer und dynamischer Heizdrahtmethode unterschieden. Die gebräuchlichere Methode ist die periodische Heizdrahtmethode. Dabei wird die Wärmeleitfähigkeit durch instationäre Temperaturschwankungen bestimmt. Es wird hierbei der Heizdraht durch zeitabhängigen Wechselstrom erwärmt. Die entstehenden thermischen Wellen breiten sich in der Probe kreisförmig aus und die Amplitude der Temperaturwelle (abhängig von Wärme- und Temperaturleitfähigkeit) kann direkt ermittelt werden [59].

Beim dynamischen Heizdrahtverfahren wird der Heizdraht auf die Probe gelegt und mit einer Dämmschicht überdeckt. Es wird unter der Annahme einer geringen Wärmeleitfähigkeit der Dämmung eine nahezu halbzylinderförmige Erwärmung der Probe hervorgerufen. Diese Art von Verfahren wird in vielen Messgeräten eingesetzt, um eine schnelle Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit eines Materials zu bekommen. Hierbei ist der Heizdraht in einem quaderförmigen Heizelement und wird direkt auf eine ebene Probenoberfläche gelegt. Die Wärmeleitfähigkeit wird wieder über die Bestimmung der Amplitude der Temperaturwelle bestimmt [59].

Heizdrahtmethode

Technologie: Wärmefluss um Heizdraht \rightarrow Temperaturunterschiede

Einsatzbereich: Laborprüfung an Probe \rightarrow thermische Bewertung

Messergebnis: Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit

Verwandte Verfahren:

- periodische Heizdrahtmethode
- dynamische Heizdrahtmethode

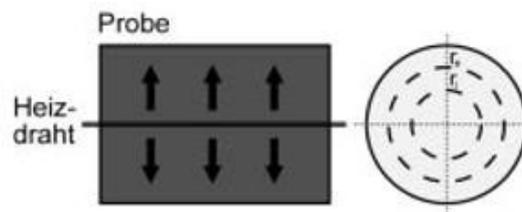


Abb. 4.21: schematische Darstellung der Heizdrahtmethode [59]

Quelle: [59]

4.5.2.2 λ -Nadelsonde

Bei der λ -Nadelsonde wird wie bei der Heizdrahtmethode der Probekörper von innen erwärmt. Dabei wird die Nadelsonde in die Probe oder in einen vorgebohrten Kanal gesteckt. Vor Probenbeginn sollte sich ein ausgeglichenes Temperaturfeld eingestellt haben. Die Spitze der Sonde erwärmt die Probe von innen und ruft eine kugelförmige Temperaturexpansion hervor (siehe Abbildung 4.22). Dieses Prinzip wird öfters zu Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit an bestehenden Objekten eingesetzt [59].

λ -Nadelsonde

Technologie: Wärmefluss durch Sonde im Bauteil \rightarrow Temperaturunterschiede

Einsatzbereich: in-situ Prüfung am Bauteil (mögliche Vorbohrung)

Messergebnis: Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit

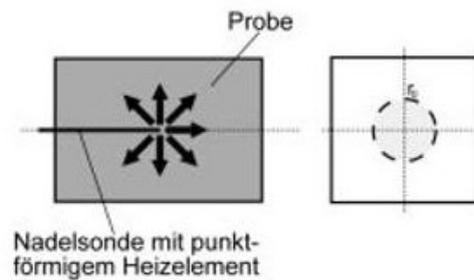


Abb. 4.22: schematische Darstellung der λ -Nadelsonde [59]

Quelle: [59]

4.5.2.3 Heizkastenverfahren (Hot Box (HB))

Die Methode des Heizkastenverfahrens basiert auf der Messung des Wärmeflusses und den entsprechenden Temperaturdifferenzen im stationären Zufluss. Der Aufbau einer Heizkastenverfahrens Messung besteht aus der Schutzkiste, der Messkiste und der Kältekiste (siehe Abbildung 4.23) [52]. Es werden zwei Arten von HB unterschieden: guarded Hot Box (GHB) und calibrated Hot Box (CHB). Beide Methoden eignen sich zur Messung von horizontalen und vertikalen Bauteilen und unterscheiden sich lediglich darin womit die Messkiste umgeben ist. Die GHB ermöglicht Messungen von größeren Proben im Vergleich zur CHB.

Nachteile bei der Durchführung von Messungen mit HB sind ein hoher Zeitaufwand, wie auch die Beschränkung der Probengrößen auf die Messkiste. Die HB kann zur thermischen Bewertung von homogenen, inhomogenen oder zusammengesetzten Proben (Wand mit Fenster) eingesetzt werden und den Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) bestimmen [52].

Heizkastenverfahren (Hot Box)

Technologie: Wärmeflüsse → Temperaturunterschiede

Einsatzbereich: Laborprüfung → größere Proben

Messergebnis: Wärmefluss und Temperaturdifferenz → Ermittlung der Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert)

Verwandte Verfahren:

- guarded Hot Box (GHB)
- calibrated Hot Box (CHB)

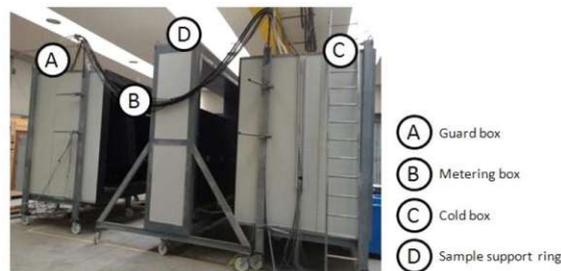


Abb. 4.23: Aufbau eines Versuches für HB [52]

Quelle: [52]

4.5.2.4 Heat Flow Meter (HFM)

Das HFM misst und analysiert Temperaturunterschiede zwischen zwei Oberflächen eines Elementes. Für gute Messergebnisse sollte ein unidirektionaler Wärmefluss vorhanden sein. Der Fokus bei dieser Methode ist die Messung der Wärmeleitung. Konvektions- und Strahlungseffekte werden vereinfacht als Randbedingung (Umgebungstemperatur) betrachtet. Die Messung beinhaltet das Wärmeflussmessgerät, Thermoelemente und Datenerfassungssysteme (siehe Abbildung 4.24) [52]. Es werden gleichzeitig Oberflächentemperaturen an der Innen- und an der Außenseite ermittelt. Durch den Temperaturunterschied zwischen Innen- und Aussenraum entsteht ein Temperaturgefälle. Dieses ist abhängig von witterungs- und nutzungsbedingten Temperaturschwankungen [59].

Die Durchführung der Messungen kann im Labor oder in-situ erfolgen [52]. Bei der in situ Durchführung werden aufgrund von nicht gleichbleibenden Temperaturen, Mittelwerte zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit herangezogen [59]. Die in-situ Versuchsdurchführung ist in der ISO 9869-1 genau beschrieben [26]. Diese Methode ist das am häufigsten verwendete Verfahren um den Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) eines Bauteiles zu bestimmen. Allerdings ist die Messung zeitaufwendig und bietet nur Ergebnisse für lokale Stellen. Weiters wird die Wärmespeicherung nicht berücksichtigt, weshalb die Methode anfällig auf Temperaturdifferenzen ist [52].

Es wird prinzipiell zwischen passiven und aktiven Verfahren unterschieden. Bei der passiven Ausführung erfolgt die Messung ohne künstliche Erzeugung eines Temperaturgradienten und die

aktive Ausführung erfolgt mit künstlicher Erzeugung eines Temperaturgradienten (Simulation durch Heizplatten), wenn kein natürlicher Temperaturgradient vorhanden ist [59].

Heat Flow Meter (HFM)

Technologie: Wärmeflüsse \rightarrow Temperaturunterschiede

Einsatzbereich: Laborprüfung oder in-situ Prüfung am Bauteil

Messergebnis: Wärmefluss und Temperaturdifferenz \rightarrow Ermittlung der Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert)

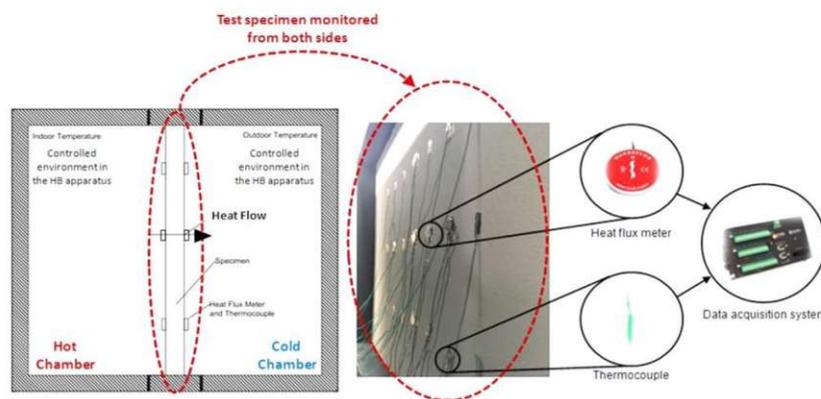


Abb. 4.24: Aufbau eines Versuchs für HFM [52]

Quelle: [52], [59]

4.5.2.5 Plattengerät (Guarded Hot Plate (GHP))

Das Prinzip der GHP ähnelt dem des HFM. Eine GHP Messung besteht aus zwei kalten Platten und einer von einem Wärmeschutzsystem (Schutzring) umgebenen Messplatte [52]. Es kann zwischen Ein- und Zweiplattenmessverfahren unterschieden werden. Häufig wird der Plattenapparat nach Poensgen mit einer Heizplatte, zwei Kühlplatten und zwei Probekörpern angewendet (siehe Abbildung 4.25) [59].

Es wird ebenfalls der Wärmefluss gemessen und anhand der Dicke der Platte wird die Wärmeleitfähigkeit bestimmt. Für ein zuverlässiges Ergebnis sollten einige Voraussetzungen, wie gleiche Geometrie und Material der Platten, ähnliche Temperaturen vom Schutzring und der Umgebung oder ein guter thermischer Kontakt zwischen Thermoelement und den Platten eingehalten werden [52].

Durch die Erwärmung der Heizplatten stellt sich zwischen Heiz- und Kühlplattenoberfläche ein Temperaturgefälle ein. Es wird dadurch ein Wärmestrom durch die Probe erzeugt. Die seitlichen Heizplatten werden auch erwärmt, um einen Wärmeabfluss über die Stirnflächen der Proben zu verhindern und es stellt sich ein annähernd konstanter eindimensionaler Wärmestrom in vertikale Richtung ein [2].

Die GHP wird zur Messung der Wärmeleitfähigkeit von mittelgroßen bis kleinen Proben unter stationären Bedingungen angewendet [52]. Gemessen werden die Oberflächentemperaturen der

Proben und die Wärmestromdichte kann durch den Energieverbrauch des Heizelements berechnet werden [2].

Anhand der Norm ISO 6946 lässt sich auch der Wärmewiderstand und der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) mit Hilfe der Messergebnisse berechnen. Wie das HFM ist auch die GHP Methode eine zeitaufwendige Messmethode [52].

Plattengerät (Guarded Hot Plate)

Technologie: Wärmeflüsse → Temperaturunterschiede

Einsatzbereich: Laborprüfung → mittelgroße bis kleine Proben

Messergebnis: Wärmefluss und Dicke einer Platte → Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit/Wärmewiderstand/Wärmedurchgangskoeffizienten

Verwandte Verfahren:

- Einplattenmessverfahren
- Zweiplattenmessverfahren

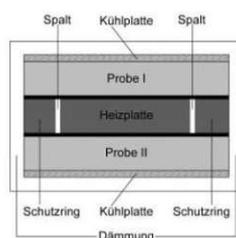


Abb. 4.25: schematischer Aufbau GHP [59]

Quelle: [52],[59], [2]

4.6 Optische Verfahren

4.6.1 Sichtprüfung

Die Sichtprüfung beschreibt die Identifikation von, mit dem Auge erkennbaren, Mängeln [7]. Diese Prüfung ist eine einfache und kostengünstige Methode. Die Inspektion kann durch den Einsatz von Kameras automatisiert werden. Die Voraussetzung für eine reibungslose Sichtprüfung ist eine saubere und komfortable Umgebung mit ausreichender Belichtung. Weiters sollte das zu untersuchende Objekt so gut wie möglich frei von Schmutz und Schutzbeschichtungen sein. Die Sichtprüfung kann mit mehreren Betrachtungstechniken erfolgen. Wahlweise kann eine direkte Betrachtung mit direktem Zugang zum untersuchenden Objekt oder eine Fernbetrachtung durch Handlupen, Messlupen etc. durchgeführt werden [33]. Erkennbare Mängel sind beispielsweise: Schwachstellen bei Schweißnähten (Kraterrisse, Schrämen, Schlackeneinschlüsse, ...), Risse, Lunken, Dellen, schlecht verarbeitete Oberflächen und falsche Querschnittsdimensionen [7].

Sichtprüfung

Technologie: Augen

Einsatzbereich: Erstkontrolle Gebäude

Messergebnis: sichtbare Schäden und Mängel (Risse,...)

Quelle: [7], [33]

4.6.2 Endoskopie

Die Endoskopie wird eingesetzt um die innere Struktur eines Bauteils zu prüfen (siehe Abbildung 4.26). Dies geschieht meist durch einen Hohlraum oder eine Öffnung. Sie gilt als indirekte Sichtprüfung, da mit einem Linsensystem und einem Lichtleiter zur Beleuchtung eine optische Bildübertragung erfolgt. Es wird zwischen starrer Endoskopie (Boreskope) und flexibler Endoskopie (Fiberskope) unterschieden. Dabei wird bei einem flexiblen Endoskop statt dem Linsensystem ein Bündel von Glasfasern verwendet. Abhängig von der Zugänglichkeit und der gewünschten Bildqualität wird je nach Situation, das passende Endoskop gewählt [55].

Eine weitere Form der Endoskopie ist die Videoskopie. Diese verwendet ein flexibles Endoskop mit einer Messsonde mit integriertem Video-Chip (siehe Abbildung 4.27). Durch die Aufnahme mit dem Videoskop ist eine spätere digitale Bildverarbeitung möglich. Die Auswertung von endoskopischen Bildern braucht ein gewisses Maß an Erfahrung [55].

Endoskopie

Technologie: Linsensystem mit Lichtleiter (indirekte Sichtprüfung)

Einsatzbereich: in-situ Prüfung am Bauteil

Messergebnis: innere Materialschäden

Verwandte Verfahren:

- starres Endoskop (Boreskop)
- flexibles Endoskop (Fiberskop)
- Videoskop



Abb. 4.26: Blick aus einem Endoskop [55]



Abb. 4.27: Darstellung eines Videoskop [55]

Quelle: [55]

4.6.3 Optische Interferometrie

- Optische Holographie

Die optische Holographie, auch bekannt als Echtzeit-Interferometrie, beruht auf der Technik der Interferenz kohärenter Lichtstrahlbündel. Das Prüfobjekt wird mit kohärentem Licht angestrahlt, um mehr Informationen zur wahren räumlichen Gestalt (Laufzeitunterschiede bzw. Phasenverschiebungen) abbilden zu können. Um diese Informationen auswerten zu können gibt es in der Holographie den Objektstrahl und den Referenzstrahl. Beide haben die gleiche Ursprungsquelle. Der Objektstrahl ist gegen das Objekt gerichtet und der Referenzstrahl ist gegen eine Fotoplatte gerichtet. Platziert wird die Fotoplatte dort wo sich die Interferenzen des Objektstrahls und Referenzstrahls bilden. Aufgenommen wird dann das Interferenzmuster. Nach der Entwicklung der Aufnahmen kann ein Hologramm des Prüfobjektes erstellt werden. Bei der Prüfung selbst wird das Ursprungsobjekt als Hologramm dargestellt und an der selben Stelle wird das Prüfobjekt mit einer Belastungsvorrichtung minimal belastet (z.B. durch lokale Erwärmung, konzentrierte Schallwellen, mechanische

Zugkräfte, ...), um kleine elastische Formänderungen hervorzurufen. Das belastete Objekt ist ebenfalls mit kohärentem Laserlicht beleuchtet. Somit liegen das minimal deformierte Objekt und dessen undeformiertes Hologramm übereinander und jede Diskontinuität ist als Interferenzmuster sichtbar (siehe Abbildung 4.28) [25].

Mit Hilfe der optischen Holographie können einerseits kleinste Diskontinuitäten an der Oberfläche eines Prüfkörpers sichtbar gemacht, aber auch anomale elastische Verzerrungen in der Nähe eines Risses in gleichmäßig belasteten Körpern identifiziert werden. Ein Nachteil ist, dass von jedem zu untersuchenden Objekt ein Hologramm erstellt werden muss [25].

- elektronische Speckle-Muster-Interferometrie (ESPI)

Die ESPI nutzt wie die optische Holographie das Prinzip der Interferenz von Wellen. Allerdings ist das ESPI eine Modifikation der klassischen Interferometrie. Da hier durch eine Kamera ein sogenanntes Speckle-Musterbild, ein zufälliges Muster von unregelmäßigen oder regelmäßigen Punkten, vom Referenzobjekt erstellt wird und nach der aufgetragenen Belastung werden die zwei Speckle-Muster miteinander verglichen und so die Verformung an der Oberfläche analysiert. ESPI wird zur Lokalisierung der Rissausbreitung in Materialien mit rauher Oberfläche, aber auch zur Ermittlung des Schermoduls von Holzproben und Holzbauwerken eingesetzt [33].

- Shearografie

Die Shearografie stellt eine Alternative zur ESPI dar. Der Unterschied zur ESPI ist, dass bei der Shearografie noch ein Scherelement eingesetzt wird, meistens der Michelson-Scher-Interferometer, um das entstandene Bild in zwei identische, verschobene Bilder aufzuzeichnen. Die beiden Bilder werden dann kohärent kombiniert und ergeben so das Specklemuster. Im Vergleich zur ESPI kann eine Messung mit Shearografie nicht durch äußere Störungen beeinflusst werden. Da das Messsystem und auch das Prüfobjekt unempfindlicher auf Bewegungen ist. Shearografie wird zur Analyse von strukturellen Reaktionen von Balken und Platten und zur Lokalisierung von Schäden verwendet. Ein großer Vorteil der Shearografie ist auch die Anwendung außerhalb von Laborbedingungen [33].

- Extrinsische Fabry-Pérot-Interferometrie (EFPI)

Bei den EFPI Sensoren werden mit Laserlicht und die Brechzahländerung im Luftspalt zwischen Zuleitungsfaser und Reflexionsfaser die Dehnung einer Matrix (Zementstein) gemessen. Bei der Messung von Dehnungen im Beton wird mit eingebetteten Faser-Bragg-Gitter-Sensoren gemessen. Dabei wird die Brechzahländerung durch das in Glasfaser eingeschriebene Gitter hervorgerufen. Bei Änderung des Gitterabstandes durch bspw. Temperaturexpansion verändert sich die Wellenlänge im Vergleich zum Ausgangszustand. Bei der Anordnung mehrere Gitter mit unterschiedlichen Abständen werden verschiedene Wellenlängen reflektiert und das Antwortsignal wird dem Gitter zugeordnet. Somit können Informationen aus unterschiedlichen Bereichen eines Bauteils durch eine Faser ermittelt werden [19].

Optische Interferometrie

Technologie: Interferenz von Wellen

Einsatzbereich: Laborprüfung

Messergebnis: Interferogramm → Spannungs- und Dehnungsmessungen

Verwandte Verfahren:

- Elektronische Speckle-Muster-Interferometrie (ESPI)
- Extrinsische Fabry-Pérot-Interferometrie (EFPI)
- Optische Holographie
- Shearographie

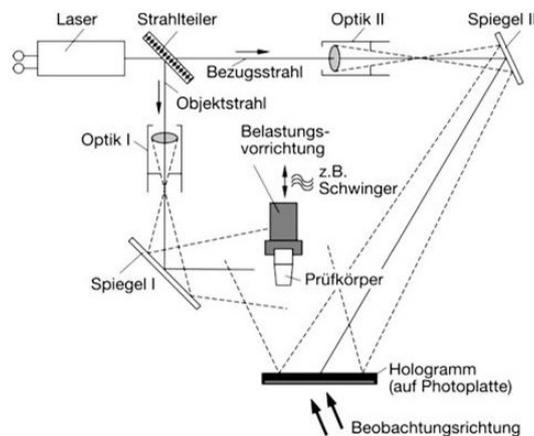


Abb. 4.28: Ablauf Echtzeit Interferometrie [25]

Quelle: [25], [33], [19]

4.6.4 Digitale Bildkorrelation (DIC)

Die digitale Bildkorrelation beschreibt ebenfalls ein Bildverarbeitungsverfahren in der Materialforschung zur Messung von Dehnungen und Verschiebungen (Längenänderungen, Risswachstum,...) von Proben unter Belastung (siehe Abbildung 4.29) [10]. Dabei werden die Probenaufnahmen mithilfe von Bildsensoren nach ihren Koordinaten, Eigenschaften und Mustern abhängig von der Zeit analysiert [24].

Digitale Bildkorrelation (DIC)

Technologie: optisches Verfahren → Bildverarbeitungsverfahren

Einsatzbereich: Laborprüfung → Proben unter Belastung

Messergebnis: Dehnungen und Verschiebungen (Längenänderungen, Risswachstum,...)

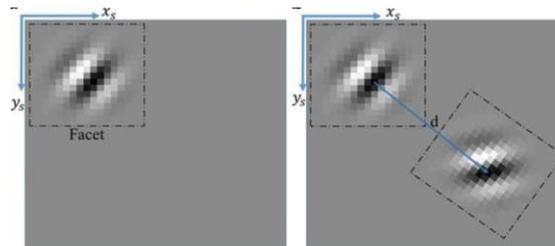


Abb. 4.29: Darstellung digitale Bildkorrelation (links: Referenz, rechts: verformte Version) [24]

Quelle: [10], [24]

4.6.5 Optische Fasersensoren

Die optischen Fasersensoren sollen eingesetzt werden, um die Kabelkraft (Stahl oder faserverstärktes Polymer,...) bei Brücken oder Gebäuden zu messen. Dabei weisen diese beispielsweise folgende Vorteile auf: leichtes Gewicht, kleine Größe, Resistenz gegen elektromagnetische Wellen (Verbesserung der Zuverlässigkeit) [61]. Optische Fasersensoren können ebenfalls zur Zustandsüberwachung von Materialien eingesetzt werden. Abhängig von der Messgenauigkeit gibt es unterschiedliche Arten von Sensoren (Langsensoren und Kurzsensoren) [24]. Allerdings gibt es in Bezug auf die optischen Fasersensoren noch Entwicklungsbedarf (z.B. optimale Platzierung der Sensoren) [61].

Optische Fasersensoren

Technologie: optisches Verfahren → Fasersensoren

Einsatzbereich: Prüfung von Brücken, Gebäude

Messergebnis: Kabelkraft (Stahl oder faserverstärktes Polymer,...)

Quelle: [61], [24]

4.6.6 Laserscanning

Beim Laserscanner wird ein Laserstrahl verwendet, um die Entfernung zwischen dem Gerät und dem Zielobjekt zu messen. Beim wiederholten Anwenden auf das ganze Sichtfeld entsteht eine Punktwolke mit der ein vereinfachtes 3D-Modell erstellt werden kann [8].

Laserscanning Systeme haben drei Entfernungsmessungsprinzipien: Time of Flight, Phasenverschiebung und Triangulation [35]. Laserscanner basieren häufig auf dem Phasenverschiebungsprinzip. Hierbei wird die Phase der Quelle mit dem reflektierten Signal verglichen [8].

Eine spezielle Anwendung des Laserscanners ist das Light Detection And Ranging (LiDAR). Der Unterschied zum üblichen Laserscanner ist die Steuerung der Datenerfassung und die Interpretation der Daten. LiDAR verwendet die Time of Flight Methode. Hier wird die Zeit, die das reflektierte Signal braucht um zur Quelle zurückzukehren, aufgezeichnet. Diese Methode ist schneller als das Prinzip der Phasenverschiebung, kann allerdings weniger Details erfassen [8]. Bei der Gebäudeaufnahme wird grundsätzlich zwischen zwei Laserscannern unterschieden:

- terrestrischer Laserscanner (siehe Abbildung 4.30): Dieser ist eine schnelle Methode, um eine 3D Punktwolke zu erstellen. Jeder Punkt in der Punktwolke enthält die räumlichen Koordinaten und die Reflexionsstärke des Laserstrahls. In Kombination mit einer Aufnahme einer Digitalkamera kann eine farbige Punktwolke erstellt werden. Für die Erfassung der Gesamtgeometrie eines Gebäudes muss der Laserscanner an mehreren Positionen Aufnahmen tätigen. Diese müssen in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt werden. Dazu gibt es mehrere Methoden, doch mittlerweile gibt es bereits auch die Möglichkeit die einzelnen Punktwolken vor Ort grob zusammenzuführen [35].
- Mobile Mapping Laserscanner: Dieser ist eine kosteneffizientere Methode zum terrestrischen Laserscanner. Da er die Hauptkomponenten: Positions- und Navigationselement für räumliche Orientierung, ein oder mehrere Sensoren für die Aufnahme und eine Zeitreferenzierung der Datensynchronisation, vereint. Somit können Daten während einer Bewegung erfasst werden. Es gibt verschiedene Möglichkeiten den Mobile Mapping Laserscanner fortzubewegen. Einerseits fahrzeuggestützt andererseits tragbar. Diese Scanner arbeiten mit einem direkten Georeferenzierungssystem (GNSS) oder mit dem Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) Algorithmus. Dieser Algorithmus verbindet die Bewegung des Scanners (Aufzeichnung des Gehweges) mit dem aufgenommenen geometrischen Daten [35].

Die mobilen Geräte können im Rucksack, mit der Hand oder mit einem Trolley geführt werden, wobei die Variante mit dem Trolley am unflexibelsten ist. Daher werden für Innenaufnahmen die Scanner mit Rucksack oder händisch getragen bevorzugt (siehe Abbildung 4.31) [35].

Die Mobile Mapping Laserscanner bieten zum terrestrischen Laserscanner ungenauere Ergebnisse [35].

Laserscanning

Technologie: Reflexion Laserstrahl

Einsatzbereich: Gebäudevermessung

Messergebnis: Punktwolke

Verwandte Verfahren: Light Detection And Ranging (LiDAR)



Abb. 4.30: Darstellung terrestrischer Laserscanner [35]



Abb. 4.31: Darstellung tragbarer Laserscanner Arten [35]

Quelle: [8], [35]

4.6.7 Photogrammetrie

Photogrammetrie beschreibt eine Technologie zur Messung eines Objektes, das durch Aufnahme von 2D-Bildern ein 3D-Modell (Punktwolke) rekonstruiert. Das Ziel ist einen digitalen Zwilling zu konstruieren. Die Aufnahmen des Objektes erfolgen oft durch die Unterstützung von Drohnenaufnahmen. Durch Photogrammetrie können im digitalen 3D-Modell nicht nur Geometrie, sondern auch Oberflächentexturen dargestellt werden. Weshalb Photogrammetrie auch zur Zustandsüberwachung historischer Gebäude eingesetzt wird [30].

Für die Aufnahme für Photogrammetrie kommen neben herkömmlichen Digitalkameras auch 360° Kameras zum Einsatz, da diese ein größeres Bildspektrum abbilden (siehe Abbildung 4.32). Dabei werden parabolische oder hyperbolische Spiegel oder Spiegelkugeln in die Kamera eingesetzt. Häufig finden Geräte mit Multisensoren oder Spiegelreflexkameras mit geradlinigen oder fischbauchigen Linsen, die auf einer Panoramadrehscheibe befestigt sind, Anwendung. Dabei

müssen Einzelfotos aus der gleichen Position herausgemacht werden, um bei der Datenerfassung den Parallaxeffekt zu verhindern. Dieser entsteht wenn kein Standpunkt definiert wurde [35]. Bei den Multisensorenkameras werden zwei Arten unterschieden:

- Multisensorische Kamera mit zwei Objektiven und Kamerasensoren: Bei diesem Modell besitzen die fischbauchigen Linsen eine Reichweite von jeweils 180° . Bei der automatischen Nachbearbeitung ergibt sich somit eine 360° Aufnahme [35]
- Multisensorische Kamera mit mehreren Objektiven und Kamerasensoren: Bei diesem Modell sind mehrere geradlinige Linsen über einen kugelförmigen Bereich ausgerichtet. Jede Linse nimmt ein Bild auf, wobei sich die benachbarten Bilder leicht überlappen [35].

Bei der Verwendung der Spiegelreflexkameras sind diese auf eine Panoramadrehzscheibe montiert. Somit können aus der Position Bilder aufgenommen werden, die sich nur in der Winkelposition unterscheiden. Dabei ist bei der Aufnahme auf eine Überlappung der Bilder von ungefähr 20° zu achten [35].

Eine Variante der Photogrammetrie ist die Nahbereichsphotogrammetrie: Diese basiert auf der Methode der Photogrammetrie und es soll anhand von 2D-Bildern ein 3D-Modell (Lage, Größe und Tiefe) erstellt werden. In der Anwendung ist die Nahbereichsphotogrammetrie eine Unterstützung zur Erkennung und Modellierung von Rissen bei Werkstoffprüfungen, Darstellungen von Verformungen wie auch zur Dokumentation [8].

Nach einem ähnlichen Prinzip von Photogrammetrie funktioniert NeRF (Neural Radiance Field). Es basiert auf der machine-learning Technik. Durch Unterstützung von AI (artificial intelligence) können 3D Modelle aus Fotos erstellt werden. Somit können fehlende Stellen bei der Verbindung der Bilder durch die Interpretation der AI befüllt werden. Das macht die Anwendung von NeRF in Bezug auf die Verarbeitung der Daten im Vergleich zur Photogrammetrie schneller und effektiver. Doch für eine Rekonstruktion von historischen Gebäuden ist die Photogrammetrie durch die präzisere Verarbeitung von geometrischen Formen noch besser geeignet. Eine zukünftige Entwicklung könnte in die Kombination beider Techniken gehen [56].

Ein weiteres ähnliches Prinzip verfolgt das 3D Gaussian-Splatting. Bei dieser Methode werden ebenfalls aus Fotos ein 3D Modell oder eine Punktwolke erstellt. Das Prinzip des 3D Gaussian Splatting basiert darauf die Punktwolke in ein sogenanntes 3D Gaussians zu konvertieren. Dabei handelt es sich um eine veränderliche Volumensdarstellung mit ansichtsabhängigen Farben und Deckkraft. Diese 3D Gaussians werden auf eine 2D Oberfläche projiziert und abhängig von ihrer Tiefe sortiert (Splatting). Diese Bilder werden mit den Originalbildern verglichen und mit Hilfe von machine learning Techniken können diese 3D Gaussians in die richtige Position gebracht werden, um ein realistisches Modell zu erstellen. Diese Methode stellt eine schnellere Technik als die volumetrischen Renderingtechniken dar, um beispielsweise VR (Virtual Reality) Darstellungen für die Baustellenüberwachung zu machen [48].

Photogrammetrie

Technologie: Kamera

Einsatzbereich: Gebäudevermessung/Gebäudeaufnahme

Messergebnis: Punktwolke

Verwandte Verfahren:

- close range photogrammetrie (CRP)
- NeRF (Neural Radiance Field)
- 3D Gaussian Splatting



Abb. 4.32: Darstellung Kameraarten [35]

Quelle: [30], [35], [56], [48], [8]

4.6.8 Drohne

Drohnen können als Unterstützung der Sichtprüfung eingesetzt werden. Die Drohneninspektion hat den Vorteil, dass auch schwer zugängliche oder gefährliche Bereiche untersucht werden können. Hierbei können Drohnen zur Risserkennung, Aufnahme der Geometrie oder zur thermographischen Inspektion eingesetzt werden. Dabei wird die Drohne mit einer Kamera bzw. Wärmebildkamera ausgestattet (siehe Abbildung 4.33) [38].

Drohne

Technologie: Kamera → Zugang zu schwer zugänglichen oder gefährlichen Bereichen

Einsatzbereich: Unterstützung Sichtprüfung

Messergebnis: Punktwolke, Wärmebild,...

Verwandte Verfahren:

- Risserkennung
- Geometrieaufnahmen
- thermographische Aufnahmen



Abb. 4.33: Darstellung einer Drohne [35]

Quelle: [38]

4.6.9 Mikroskopie

Mikroskopie kann als zerstörungsfreie Messmethode eingesetzt werden, um kleine oberflächliche Mängel zu erkennen [7]. Eine Anwendung der Mikroskopie ist allerdings nur im Labor möglich [19]. Ein Anwendungsbeispiel aus der Mikroskopie ist das Lichtmikroskop. Dieses verwendet sichtbares Licht und ein Linsensystem, um kleine Poren vergrößert darzustellen. Das Bild kann von einer lichtempfindlichen Kamera aufgenommen werden und ermöglicht so eine direkte Darstellung über den Computer [34].

Um noch kleinere Bereiche sichtbar zu machen kann die Rasterelektronen-Mikroskopie angewendet werden [19].

Mikroskopie

Technologie: Linsensystem mit sichtbarem Licht → Vergrößerung Poren

Einsatzbereich: Laborprüfung

Messergebnis: Erkennung kleiner oberflächlicher Mängel

Verwandte Verfahren:

- Lichtmikroskop
- Rasterelektronen-Mikroskop

Quelle:[7], [34], [19], [23]

4.7 Weitere Verfahren

4.7.1 Magnetpulververfahren

Das Magnetpulververfahren wird zur schnellen und einfachen Erkennung von Materialtrennungen (z.B. Risse) an der Oberfläche angewendet [51]. Einschränkend ist, dass das Verfahren nur auf Materialien mit ferromagnetischem Anteil (Eisen, Nickel, Kobalt oder einer von ihren Legierungen) angewendet werden kann. Zur Prüfung wird ein Magnetfeld am Prüfobjekt gebildet und anhand von kleinen magnetischen Partikeln (z.B.: Eisenspäne) sollen oberflächennahe Diskontinuitäten identifiziert werden [7]. Als magnetische Partikel werden auch Magnetpulversuspensionen oder Magnetpulver eingesetzt [51]. Bei der Identifikation einer Fehlstelle wird der magnetische Fluss an dieser Stelle unterbrochen und an den Ränder sammeln sich die magnetischen Partikel an (siehe Abbildung 4.34). Somit sind Risse etc. leichter und schneller erkennbar. [7]. Durch die Erkennung eines Risses kann sich auch ein magnetischer Streufluss bilden. Das bedeutet, dass sich bei großen Diskontinuitäten die erzeugten Magnetfeldlinien über die Unregelmäßigkeit umleiten [17].

Die Auswertung des Magnetpulververfahren ist einfach und gut erkennbar [17]. Nach einer erfolgten Magnetpulverprüfung müssen die Prüfobjekte wieder entmagnetisiert werden [51].

Magnetpulverprüfung

Technologie: Magnetisierung

Einsatzbereich: Prüfung an der Bauteiloberfläche

Messergebnis: Oberflächenschäden

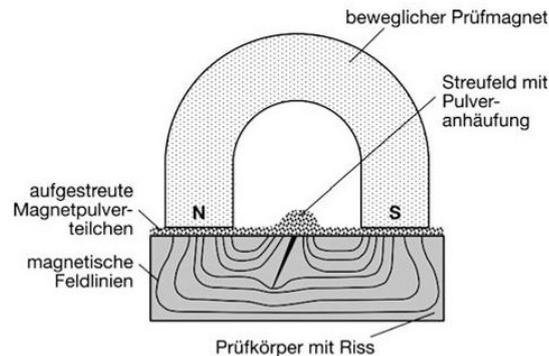


Abb. 4.34: schematische Darstellung Magnetpulverprüfung [25]

Quelle: [51], [7]

4.7.2 Penetrationsverfahren/Eindringverfahren

Das Penetrationsverfahren kann für eine schnelle Untersuchung der Oberfläche auf Risse von nicht magnetischen oder ferromagnetischen Materialien eingesetzt werden. Bei der Durchführung ist auf eine ordentliche Dokumentation mittels Protokoll und Fotos zu achten [51]. Mit diesem Verfahren werden hauptsächlich Metalle (Aluminium, Stahl, Titan, Kupfer, ...), Glas, Keramikmaterialien, Gummi und Kunststoffe getestet. Das verwendete Farbeindringmittel ist für alle Materialien (nichteisenhaltig oder eisenhaltig) einsetzbar [7].

Beim Farbeindringverfahren bzw. Flüssigkeitseindringverfahren wird eine Flüssigkeit auf eine saubere Oberfläche aufgetragen. Durch die Kapillarwirkung sollen Mängel erkennbar gemacht werden [7]. Es wird hierbei vor allem eine rotfärbende bzw. fluoreszierende Prüfflüssigkeit verwendet. Diese muss eine niedrige Oberflächenspannung aufweisen, damit sie in Spalten bzw. Risse eindringen kann [51]. Beim Einsatz von Farbstoffen als Eindringmittel muss eine zusätzliche Flüssigkeit (Entwickler) aufgebracht werden, um den Farbstoff heraus zu ziehen und die Unregelmäßigkeiten sichtbar zu machen (siehe Abbildung 4.35) [17].

Bei größeren Bauteilen wird auf das Sprüh- oder Streichverfahren zurückgegriffen. Hierbei wird die Flüssigkeit und der Entwickler über eine Spraydose auf das Material aufgebracht [51]. Dabei wird eine Flüssigkeit mit geringer Oberflächenspannung verwendet, um die Kapillarwirkung wirksam zu machen. Zur besseren Darstellung des Risses kann das Prüfobjekt in einer abgedunkelten Inspektionskabine mit Ultraviolettstrahler angestrahlt werden. Abhängig vom verwendeten Farbstoff (fluoreszierend oder nicht fluoreszierend) erfolgt die Durchführung der Prüfung unter ultraviolettem oder weißem Licht [7].

Penetrationsverfahren/Eindringverfahren

Technologie: Kapillarwirkung

Einsatzbereich: Prüfung an Bauteiloberflächen

Messergebnis: Farbfilm → Oberflächenschäden

Verwandte Verfahren:

- Farbeindringverfahren
- Flüssigkeitseindringverfahren

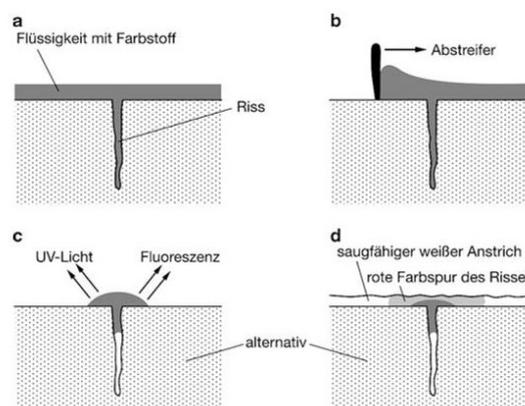


Abb. 4.35: schematische Darstellung Flüssigkeitseindringverfahren [25]

Quelle: [51], [7],

4.7.3 Feuchtigkeitsmessungen

Zur Bestimmung der Feuchtigkeit eines Materials gibt es verschiedene Möglichkeiten. Häufig werden indirekte Methoden, wie elektrische und chemische Messungen verwendet. Diese liefern ein qualitatives Ergebnis über den Wassergehalt. Im Regelfall ist dies für die Bauwerksbewertung aber ausreichend [36].

Elektrische Feuchtemessgeräte (siehe Abbildung 4.39) ermitteln nur die elektrischen Kennwerte, um anschließend auf den Feuchtegehalt zu schließen. Das Gerät basiert auf dem Prinzip der elektrischen Widerstandsmessung oder auf dem Prinzip der Ermittlung der Dielektrizitätskonstante des Baustoffes. Aufgrund der Handhabbarkeit ist die Anwendung weit verbreitet. Allerdings ist die Verwendung des Feuchtemessgerätes als Grundlage für die Sanierungsplanung ungeeignet, da lediglich Feuchtetrends angegeben werden [45].

Bei der Bestimmung des elektrischen Widerstandes ist darauf zu achten, dass jeder Baustoff eine eigene Kalibrierung benötigt [36], da auch das Vorhandensein von Salzen die Leitfähigkeit stark beeinflussen kann [23]. Zur Messung der Feuchtigkeit haben sich einige unterschiedliche Verfahren etabliert, die sich in der Methode und Anwendung unterscheiden [6]:

- kapazitive Feuchtemessverfahren

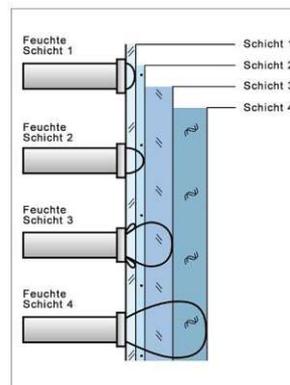


Abb. 4.36: Darstellung Schichttiefen Mikrowellensensoren [15]

Mithilfe des kapazitiven Feuchtemessverfahrens kann die qualitative Feuchteverteilung an mineralischen Baustoffen ermittelt werden. Dabei wird die Kapazität eines Kondensators im Messgerät gemessen. Je mehr Feuchtigkeit im Messfeld vorhanden ist, umso höher wird die Permittivität. Aufgrund von Messschwankungen durch beispielsweise unebener Oberflächen sollen mehrere Messverläufe erfolgen [6].

- Mikrowellenverfahren

Das Mikrowellenverfahren ist ein elektrisches Verfahren mit dem unabhängig vom Salzgehalt, Oberflächen- und Tiefenmessungen gemacht werden können. Anwendung findet das Mikrowellenverfahren vor allem bei Mauerwerkswänden [45]. Im Zuge des Mikrowellenverfahrens wird der Unterschied der Permittivitätszahl von Wasser zur Permittivitätszahl vom Baustoff gemessen [55].

Es können nicht nur Ergebnisse an der Oberfläche, sondern auch bis zu 30 cm Bauteiltiefe, erzielt werden. Allerdings hängt die Anwendung von Baustoffbeschaffenheit (Rohdichte, Porosität,...) und der Ebene der Messoberfläche ab. Ergebnisse können durch Metalle oder Hohlräume verfälscht werden. Deshalb wird dieses Verfahren ebenfalls für eine qualitative Feuchtigkeitsmessung eingesetzt [45]. Für die Mikrowellen Messsysteme gibt es Sensoren mit unterschiedlicher Erreichung der Schichttiefe (siehe Abbildung 4.36): Schicht 1 mit 3cm, Schicht 2 mit 6cm, Schicht 3 mit 10cm, Schicht 4 mit 25cm, Schicht 5 mit 80cm [15].

Im Zuge der Mikrowellenmessverfahren für Feuchtigkeit gibt es auch die Möglichkeit Rasterfeuchtemessungen durchzuführen. Dabei werden Oberflächenmessungen (bis zu 3-4cm Tiefe) und Volumenmessungen (bis zu 25cm Tiefe) im Raster durchgeführt. In einer Software kann die Feuchteverteilung, abhängig von Feuchteschaden, an der Oberfläche und innerhalb des Bauteils betrachtet werden. Da bei der Rasterfeuchtemessung viele Messwerte aufgenommen werden, ist ein fehlerbehaftetes Ergebnis unwahrscheinlicher [14].

- Neutronensonde

Die Neutronensonde erfolgt nach dem Neutronenbremsverfahren. Hierbei werden die auftretenden Neutronen von den Wasserstoffkernen gebremst. Durch die Analyse der Bremsungen kann auf den relativen Feuchtegehalt rückgeschlossen werden. Eine Anwendung bei Bauteilen bis zu 30cm Tiefe ist möglich und wird häufig zur Leckagenortung bei Flachdächern oder Wänden eingesetzt [45].

- hygrometrische Verfahren

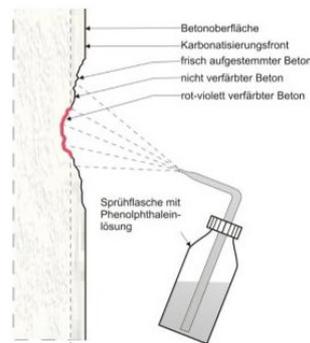


Abb. 4.37: Darstellung der Phenolphthaleinprüfung [55]



Abb. 4.38: Darstellung des Karsten'schen Wasserprüfröhrchen [54]

Das Prinzip des hygrometrischen Verfahrens basiert darauf, dass jedes Material aus der Umgebung Feuchtigkeit aufnehmen und abgeben kann. Durch Sorptionsisotherme - Messung von Sorption bzw. Desorption - kann die Materialfeuchte bestimmt werden. Dieser Vorgang ist allerdings ziemlich ungenau [6].

Zur Feuchteabschätzung können auch Farbindikatoren eingesetzt werden, das sind Stoffe, die durch das Verändern der Farbe einen Feuchtegehalt anzeigen [36]. Neben einer Feuchteabschätzung kann auch die Karbonatisierungstiefe bei Beton mit dem Farbindikator Phenolphthalein überprüft werden, dabei ist eine nicht karbonatisierte Stelle durch eine Rotfärbung zu erkennen (siehe Abbildung 4.37). Die Prüfung funktioniert nicht bei trockenem Beton [19].

Eine Methode zur groben Dichtigkeitsprüfung ist das Karsten'sche Wasserprüfröhrchen. Diese Messung kann auch zur Beurteilung der Wirksamkeit von Hydrophobierungen oder Fugenqualität eingesetzt werden [19]. Für eine Anwendung wird das Gerät an die Fassade angebracht und mit Wasser befüllt (siehe Abbildung 4.38). Der Wasserstand im Röhrchen wird beobachtet und dadurch auf die kapillare Wasseraufnahmefähigkeit der Fassade geschlossen. Nach dem gleichen Prinzip funktioniert auch die Prüfplatte nach Franke [54].

Zusätzlich zur Beurteilung der Materialfeuchte werden Messgeräte eingesetzt, mit denen das Bauteil abgetastet und somit die relative Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur ermittelt werden kann [29]. Die Messung der relativen Luftfeuchtigkeit kann beispielsweise durch ein Hygrometer geschehen. Die Messung der Raumlufttemperatur kann durch analoge oder digitale Thermometer erfolgen und bei der Messung der Oberflächentemperatur kommen z.B. Strahlungstemperaturmessgeräte oder Testtemperaturfühler zum Einsatz [23]. Es können aber auch kombinierte Geräte (Feuchtemessungen mit Leitfähigkeits- und Kapazitätsmethode) mit entsprechenden Sonden herangezogen werden [36].

Feuchtigkeitsmessungen

Technologie: elektrisch → Reflexion elektrischer Widerstand

Einsatzbereich: Gebäudeuntersuchung (Feuchtigkeit)

Messergebnis: qualitativer Feuchtegehalt

Verwandte Verfahren:

- elektrische Feuchtemessverfahren (Mikrowellenverfahren, Neutronensonden, hygrometrisches Verfahren, ...)
- chemische Feuchtemessverfahren
- Farbindikatoren
- Kombination mit Raumklimamessgeräten
- Karsten'sches Wasserprüfrohr (Dichtheitsprüfung)
- Prüfplatte nach Franke (Dichtheitsprüfung)



Abb. 4.39: Darstellung der elektrischen Feuchtigkeitsmessung [23]

Quelle: [29], [23], [36], [45], [55], [6], [14], [19], [54]

4.7.4 Potentialmessung

Die Potentialmessung ist grundsätzlich ein elektrochemisches Verfahren zur Überprüfung der Korrosionsaktivität des Bewehrungsstahls. Da der Beton für die Messung elektrisch leitfähig sein muss, wird er vor der Messung angefeuchtet, um die Leitfähigkeit zur Porenlösung im Inneren herzustellen, die nicht leitenden Beschichtungen werden entfernt. Gemessen wird dabei die Veränderungen des elektrischen Potentials (siehe Abbildung 4.40). Die gemessenen Potentialwerte werden durch Betondeckungsdicke und -leitfähigkeit, Zementart, Feuchte- und Salzgehalt, Sauerstoffzutritt und Diffusionspotentiale beeinflusst. Die Messung erfordert Erfahrung [19].

Potentialmessung

Technologie: elektrochemisch → Messung von elektrischen Potentialen

Einsatzbereich: Prüfung von Beton

Messergebnis: Veränderung des elektrischen Potentials → Erkennung von Korrosion



Abb. 4.40: Darstellung der Potentialmessung [55]

4.7.5 Spektroskopie

Laborverfahren, die zur zerstörungsfreien Bestimmung der Baustoffzusammensetzung auf Elementbasis eingesetzt werden sind:

- **LASER-induzierte Plasmaspektroskopie (LIPS):**

Durch einen kurzen und hochenergetischen Laserimpuls werden die zu untersuchenden Atome angeregt. Die hohe Intensität der Strahlung führt zu einer Verdampfung und Ionisierung der Oberfläche. Die emittierte Fluoreszenzstrahlung (Plasmaemission) wird anhand von optischer Spektroskopie analysiert und es gibt Rückschlüsse auf die in der Probe enthaltenen Elemente [55]. Das Gerät für eine LIPS ist in Abbildung 4.41 dargestellt.



Abb. 4.41: Darstellung LASER-induzierte Plasmaspektroskopie (LIPS) [55]

- **Röntgenfluoreszenzspektroskopie RFS/ Röntgenfluoreszenzanalyse RFA:**

Eine Anregung der Probe durch eine polychromatische Röntgenstrahlung sorgt für eine Umordnung der Elektronen im Element. Diese freiwerdende Energie wird durch Röntgenfluoreszenzstrahlung abgegeben und von einem Strahlungsdetektor ausgewertet. Bei der Auswertung wird zwischen: Energiedispersive Röntgenfluoreszenzanalyse EDRFA (Zerlegung der Strahlung auf elektronischem Weg) und Wellenlängendispersive Röntgenfluoreszenzanalyse WDRFA (Zerlegung der Strahlung erfolgt an einem Kristall) unterschieden. Das Röntgenfluoreszenzspektrometer kann auch mit einem handheld Gerät in-situ eingesetzt werden [55]. Das Gerät für eine RFA wird in Abbildung 4.42 gezeigt.



Abb. 4.42: Darstellung Röntgenfluoreszenzanalyse Gerät [55]

- **Energiedispersive Röntgenspektroskopie EDS/Energiedispersive Röntgenanalyse EDA:**

Ähnlich wie bei der RFS kommt es in der Probe zu einer Umordnung der Elektronen. Dabei wird die Probe durch einen Elektronenstrahl angeregt und die freiwerdende Energie als charakteristische Röntgenstrahlung ausgesendet [55]. Das Röntgenspektrometer kann zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung eines Probenmaterials in Verbindung mit der Rasterelektronen Mikroskopie eingesetzt werden [19]. Alternativ kann zur Auswertung die wellenlängendispersive Röntgenspektroskopie WDS (Zerlegung der Strahlung erfolgt an einem Kristall) angewendet werden [55]. Das Gerät für die EDS ist in Abbildung 4.43 dargestellt.



Abb. 4.43: Darstellung Energiedispersives Analysegerät Gerät [55]

- **Infrarotspektroskopie (IR-Spektroskopie):**

Die Infrarotspektroskopie nutzt die Absorption bestimmter Frequenzbereiche durch Infrarotstrahlung. Dies dient zur quantitativen Bestimmung bekannter Substanzen und zur Erkennung der Strukturzusammensetzung unbekannter Substanzen [23].

- **Atomabsorptionsspektroskopie (AAS):**

Die Atomabsorptionsspektroskopie basiert auf dem Prinzip der wellenlängenabhängigen Absorption von Licht. Dieses Verfahren wird häufig zur qualitativen und quantitativen Bestimmung von chemischen Elementen in Feststoffen oder wässrigen Lösungen eingesetzt [23].

Spektroskopie

Technologie: Reaktion auf Strahlung (Infrarot, Laserimpuls, Röntgenstrahlung,...)

Einsatzbereich: Laborprüfung

Messergebnis: Baustoffzusammensetzung

Verwandte Verfahren:

- LASER-induzierte Plasmaspektroskopie (LIPS)
- Röntgenfluoreszenzspektroskopie RFS/ Röntgenfluoreszenzanalyse RFA
- Energiedispersive Röntgenspektroskopie EDS/Energiedispersive Röntgenanalyse EDA
- Infrarotspektroskopie (IR-Spektroskopie)
- Atomabsorptionsspektroskopie (AAS)

Quelle: [55], [23]

4.7.6 Messung der Schadstoffbelastung

Im Zuge der Literaturrecherche wurde ersichtlich, dass für die Messungen von Schadstoffen, wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben, hauptsächlich durch die Beprobung von Hausstaub, Raumluft oder Material mit einer anschließenden laboranalytischen Untersuchung erfolgen [23].

Vor allem für die Beprobung der Raumluft ist auf eine gewisse Vorbereitung (geschlossener Raum von 6-8 Stunden vor Probenentnahme) zu achten. Weiters wird bei der Probenentnahme zwischen aktiver Probenentnahme (Kurzzeit) und passiver Probenentnahme (Langzeit) unterschieden [23].

Für eine mineralogische Analyse kristalliner Substanzen (Naturstein, Mörtel) kann auf die Röntgendiffraktometrie zurückgegriffen werden [23].

Messung der Schadstoffbelastung

Technologie: Beprobung (Raumluft, Material, Hausstaub) mit laboranalytischer Untersuchung

Einsatzbereich: Innen- und Außenbereiche

Messergebnis: Schadstoffmenge

Verwandte Verfahren:

- Röntgendiffraktometrie → mineralogische Analyse kristalliner Substanzen (Naturstein, Mörtel)

Quelle: [23]

4.8 Messverfahren und in situ Anwendung

Im Zuge der Literaturrecherche wurde ersichtlich, dass es in Bezug auf zerstörungsfreie Messverfahren teilweise bereits normative Regelungen gibt. Aufgrund der Vielzahl vorhandener Normen können hier nicht alle aufgelistet werden. Einige Beispiele sind:

- ÖNORM EN 1330-1 bis ÖNORM EN 1330-11: Regelungen von Terminologien einiger zerstörungsfreier Messverfahren
- ÖNORM EN ISO 9712: Regelung der Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung
- verschiedenste Normen zur Regelungen der Prüfverfahren, wie ISO 9869-1 für das Heat Flow Meter oder ÖNORM EN 16714 für die thermographische Prüfung

In Tabelle 4.1 sind zusammenfassend alle Verfahren aus diesem Kapitel aufgelistet und nach ihrer möglichen in-situ Anwendung untersucht.

Verfahren	In-situ Anwendung?
mechanische Verfahren	
Penetrometerprüfung	✓
Rückprallhammer	✓
Kratztest	✓
Bohrwiderstandsmessung (Resistographie)	✓
akustische Verfahren	
Ultraschallprüfung	✓
Schallemissionsprüfung	✓
Schallmessungen	✓
Mikroseismik	✓
Impakt Echo Verfahren	✓
elektromagnetische Verfahren	
Radar Verfahren	✓
Verfahren mit Magnetsensoren	✗
thermische Verfahren	
Thermographie	✓
Heizkastenverfahren (Hot Box)	✗
Heat Flow Meter (HFM)	✓
Plattengerät (Guarded Hot Plate)	✗
λ -Nadelsonden	✗
Heizdrahtmethode	✗
radiologische Verfahren	
Radiographie	✓
Radioskopie	✗
optische Verfahren	
Sichtprüfung	✓
Optische Interferometrie	✗
Laserscanning	✓
Photogrammetrie	✓
Mikroskopie	✗
Endoskopie	✓
weitere Verfahren	
Magnetpulverprüfung	✓
Penetrationsverfahren/Eindringverfahren	✓
Feuchtigkeitsmessungen	✓
Potentialmessung	✓
Spektroskopie	✗
Auswertung der Schadstoffmessung	✗

Tab. 4.1: Übersicht der Verfahren und eine in-situ Anwendung

Kapitel 5

Parameterkatalog für Bestandsaufnahme

In diesem Kapitel werden die aus der Literaturrecherche gewonnen Ergebnisse zu einem Parameterkatalog zusammengeführt und anhand eines Auswahlkataloges in Microsoft Excel mit den zerstörungsfreien Messverfahren in Beziehung gesetzt.

5.1 Ergebnisse aus der Literaturrecherche

Die durchgeführte Literaturrecherche hat einen groben Überblick über mögliche zerstörungsfreie/semi-zerstörungsfreie Gebäudeerkundungsmethoden gegeben und auch gezeigt welche Schritte für eine gründliche Bestandsaufnahme als Grundlage einer Bausanierung notwendig sind. Folgend wird anhand der Ergebnisse ein Zusammenhang zwischen möglichen Messergebnissen und einer Bauwerksuntersuchung gestellt.

Es wurde ersichtlich, dass Verfahren die zur Beurteilung der Tragfähigkeit bzw. Materialfestigkeit, insbesondere für Stahlbeton, bereits Anwendung in der Gebäudeerkundung finden. Auch Verfahren zu Bewertung des Schallschutzes, Feuchtigkeit und Raumklimas kommen zum Einsatz. Dies bezieht sich primär auf die Nutzerbehaglichkeit im Innenraum. Auch für die thermische Bewertung eines Bestandsgebäudes finden bereits die unterschiedlichsten Methoden ihre Anwendung. Verfahren zum Thema Schadstoffbelastungen waren in der Literatur nicht so präsent.

Das Thema der geometrischen Gebäudeaufnahme ist vor allem für eine ordentliche Bauwerksbeschreibung wichtig und wurde auch unter den Verfahren wiedergefunden. Die Schadensaufnahme bzw. Zustandserfassung beinhaltet neben Untersuchung der Oberflächen, auch die Bewertung von inneren Mängeln und Schwachstellen an der Konstruktion. In Bezug auf die Erhebung von Bauteildicken oder Aufbauten waren Möglichkeiten, gerade für eine in situ Anwendung, begrenzt.

Zu einer Bauaufnahme gehören auch die Begutachtung haustechnischer Anlagen sowie die Erstellung eines Brandschutzkonzeptes. Wobei in diesem Zusammenhang keine bis kaum zerstörungsfreie Messmethoden gefunden wurden.

Die Ergebnisse aus der Literaturrecherche zeigen, dass durchaus ein Zusammenspiel zwischen der Untersuchung eines Gebäudes und Messergebnissen zerstörungsfreier Verfahren ermöglicht werden kann.

5.2 Parameterkatalog für eine Bestandsaufnahme

Aus den gewonnen Daten der Literaturrecherche wurde ein Parameterkatalog angefertigt. Dabei sind die angeführten Parameter als erweiterbar zu betrachten und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es ergeben sich für einen Parameterkatalog für eine Bestandsaufnahme fünf Hauptkategorien: Baudokumentation, Materialgesundheit, Konstruktive Eigenschaften, Bauphysikalische Eigenschaften und Gebäudetechnische Eigenschaften, die für eine vollständige Bauwerksanalyse notwendig sind und deren Ergebnisse durch zerstörungsfreie Verfahren erhoben werden können (siehe Abbildung 5.1).

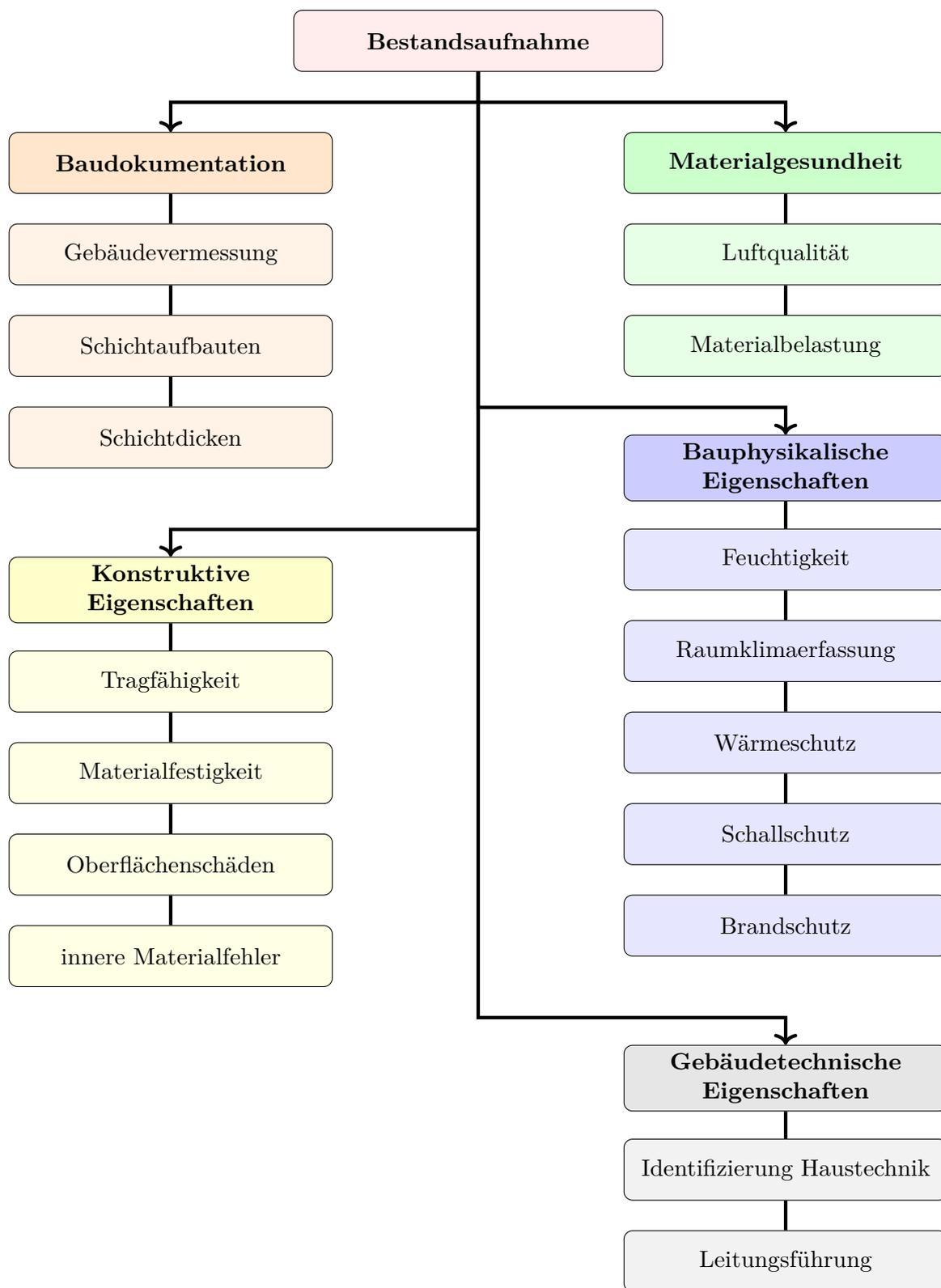


Abb. 5.1: Überblick Parameterkatalog [eigene Darstellung]

5.2.1 Baudokumentation

Zur Kategorie der Baudokumentation zählen:

- Gebäudevermessung
- Schichtdicken
- Schichtaufbauten

Für die Bewertung eines Bestandsgebäudes dient in erster Linie die Gebäudevermessung als Grundlage. Als Unterstützung werden hierbei Bestandsunterlagen über das Gebäude bei der Behörde eingeholt. Diese beinhalten Bestandspläne, als auch eine Beschreibung zum jeweiligen Objekt [6]. Die Beschreibung dient als Ergänzung zur planerischen Darstellung. Inhaltlich werden die Geschosse im einzelnen beschrieben, wie auch eine Beschreibung der Oberflächen (Fußboden, Wand, Decke, . . .) beigefügt [36]. Da es Abweichungen in den Bestandsunterlagen zum Ist-Zustand des Gebäudes geben kann, sollten diese sorgfältig durchgesehen und durch Vor-Ort-Aufnahmen adaptiert werden [36].

5.2.2 Materialgesundheit

Die Kategorie Materialgesundheit beinhaltet die Parameter:

- Luftqualität
- Materialbelastung

Diese Parameter beziehen sich einerseits auf die Untersuchung der möglichen Schadstoffbelastung in Innenräumen (siehe Kapitel 3.2.3) und andererseits auf die Schadstoffbelastungen am Material. Dabei soll im besten Fall nicht nur der vorhandene Schadstoff, sondern auch die Quelle identifiziert werden [20].

5.2.3 Konstruktive Eigenschaften

Zur Kategorie Konstruktive Eigenschaften werden folgende Parameter gezählt:

- Tragfähigkeit
- Materialfestigkeit
- Oberflächenschäden
- innere Materialfehler

Bei der Beurteilung der Konstruktiven Eigenschaften wird das Augenmerk auf die Tragkonstruktion gelegt. Dabei wird darauf geachtet, in welchem Zustand sich die Bauteile bzw. das Gesamtsystem befinden. Gleichzeitig dient sie als Kontrolle und Bewertung der Standsicherheit [16].

5.2.4 Bauphysikalische Eigenschaften

Die Parameter in der Kategorie Bauphysikalische Eigenschaften sind:

- Feuchtigkeit
- Raumklimaerfassung
- Wärmeschutz
- Schallschutz
- Brandschutz

Die Bauphysikalischen Eigenschaften sind wie die Materialgesundheit essentiell für die Bewertung der Nutzerbehaglichkeit (Schallschutz, Wärmeschutz,...) und auch in Bezug auf die zukünftige Nutzung (besonders Brandschutzanforderungen) [6].

5.2.5 Gebäudetechnische Eigenschaften

Unter die Kategorie Gebäudetechnische Eigenschaften fallen die Parameter:

- Identifizierung Haustechnik
- Leitungsführung

Im Zuge einer Zustandserfassung und vollständigen Bauwerksanalyse sind auch Informationen über den Zustand der eingebauten haustechnischen Anlagen zu identifizieren [23].

5.2.6 Zusammenführung der Parameter

In Tabelle 5.1 sind alle Parameter noch einmal aufgelistet und genauer beschrieben.

5.3 Parameterkatalog als Tool für zerstörungsfreie Messverfahren

In Microsoft Excel wurde ein Zusammenhang zwischen den Parametern und den zerstörungsfreien Messverfahren aus dem Kapitel 4 aufgestellt. Dabei wurden zuerst alle Verfahren in einem Arbeitsblatt aufgelistet und den einzelnen Parameter zugeordnet.

Im Auswahlkatalog kann eine der definierten Hauptkategorien aus einem Dropdownmenü ausgewählt werden. Abhängig von der ausgewählten Hauptkategorie kann ein Parameter aus dieser Kategorie ebenfalls aus einem Dropdownmenü selektiert werden. Nach Auswahl eines Parameters leuchten alle Verfahren, die zur Messung des jeweiligen Parameters angewendet werden können gelb auf.

Zusätzlich sind die Steckbriefe aus Kapitel 4 in das Excel Arbeitsblatt eingearbeitet und können in der Spalte neben dem jeweiligen Verfahren ausgewählt werden. Ergänzend ist neben jeden Verfahren gekennzeichnet, ob eine in-situ Anwendung möglich wäre.

Abbildung 5.2 zeigt die Oberfläche des Auswahlkatalogs und die oben genannten beschriebenen Funktionen.

Nr.	Parameter	Beschreibung
Baudokumentation		
D1	Gebäudevermessung	Ermittlung Geometrie (Vergleich mit Bestandsunterlagen)
D2	Schichtdicken	Ermittlung von Schichtdicken
D3	Schichtaufbauten	Ermittlung von Schichtaufbauten
Materialgesundheit		
M1	Luftqualität	Beurteilung der Luftqualität durch Untersuchung nach Schadstoffen
M2	Materialbelastung	Beurteilung der Materialien durch Schadstoffbelastung
Konstruktive Eigenschaften		
K1	Tragfähigkeit	Untersuchung der Tragfähigkeit/Bodenuntersuchung
K2	Materialfestigkeit	Untersuchung der Materialfestigkeit (Druckfestigkeit, Haftzugfestigkeit, ...)
K3	Oberflächenschäden	Ermittlung von Schäden bzw. Mängel an der Oberfläche eines Bauteils (Risse, Einkerbungen...)
K4	innere Materialfehler	Ermittlung von Schäden bzw. Mängel innerhalb eines Bauteils (Korrosion, Löcher,...)
Bauphysikalische Eigenschaften		
B1	Feuchtigkeit	Ermittlung von Feuchtigkeit/Salzgehalt am Gebäude
B2	Raumklimaerfassung	Ermittlung von Luftfeuchte, Lufttemperatur, Luftströmung (Luftdichtheit) und Oberflächentemperatur zur Beurteilung der Nutzerbehaglichkeit
B3	Wärmeschutz	Beurteilung von Wärmebrücken/Wärmedurchgangskoeffizient und Untersuchung der thermischen Gebäudehülle
B4	Schallschutz	Beurteilung des Luftschalls und Trittschalls
B5	Brandschutz	Beurteilung von Brandschutzmaßnahmen
Gebäudetechnische Eigenschaften		
G1	Identifizierung Haustechnik	Ortung bzw. Ermittlung des Zustandes der Haustechnik (Lüftung, ...)
G2	Leitungsführung	Ermittlung des Verlaufes der Haustechnikleitungen

Tab. 5.1: Beschreibung Parameterkatalog [23],[6],[20],[36]

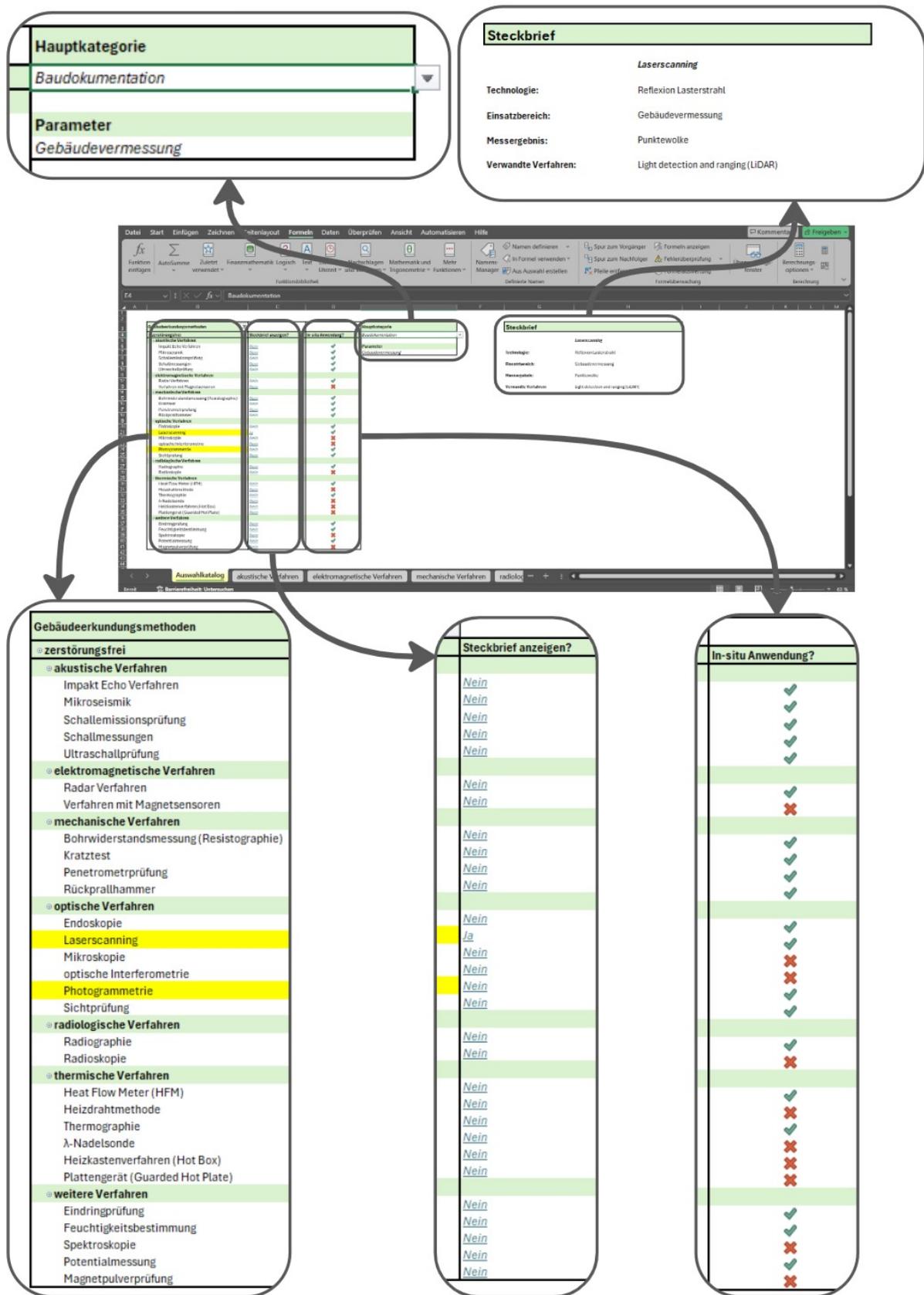


Abb. 5.2: Darstellung Auswahlkatalog [eigene Darstellung]

Kapitel 6

Untersuchung und Bewertung der ausgewählten Messverfahren

In diesem Kapitel werden sechs Messverfahren genauer betrachtet: Laserscanning, Photogrammetrie, Thermographie, Ground Penetrating Radar, Schadstoffbelastungsmessungen und Heat Flow Meter. Die Auswahl der sechs Messmethoden wurde anhand des Parameterkatalogs und deren Verbindung zu den möglichen Verfahren getroffen. Daraus ergab sich folgende Wahl:

- Laserscanning und Photogrammetrie: Verfahren, die für geometrische Aufnahmen in einem Gebäude bereits etabliert sind und somit auch für Testmessungen zur Verfügung standen
- Thermographie: Ein Verfahren, das für die thermische Bewertung eines Gebäude bereits etabliert ist und somit auch für Testmessungen zur Verfügung stand
- Ground Penetrating Radar (GPR): Eines der wenigen Verfahren, das die Möglichkeit für Messungen von Schichtaufbauten lieferte
- Schadstoffbelastungsmessungen: Ein Verfahren, das in der Literaturrecherche gerade in Bezug auf in-situ Anwendungsmöglichkeiten bzw. Auswertung nicht so häufig behandelt wurde
- Heat Flow Meter (HFM): Eines der wenigen Verfahren, das eine direkte U-Wertbestimmung in einem Gebäude ermöglichte

Für eine genauere Betrachtung der ausgewählten Methoden wurden Expert:inneninterviews durchgeführt, um ihren Praxisbezug zu evaluieren. Die Interviews waren Leitfadengestützt (siehe Kapitel 2). Im Zuge der Auswertung der Interviews werden die Aussagen der Expert:innen bzgl. Vor- und Nachteile, aber auch Funktionalität, Anwendung, Auswertung und Entwicklung vorgestellt und zusätzlich zu jedem Verfahren anhand der Auswertung der Interviews ein Workflow erstellt. Nach der Vorstellung der Ergebnisse aus den Interviews werden die Ergebnisse empirischer Testmessungen von drei der sechs Verfahren (Laserscanning, Photogrammetrie, Thermographie) präsentiert und ebenfalls ein Workflow über die empirische Testmessung und deren Ergebnisse angefertigt. Abbildung 6.1 gibt zusammenfassend einen Überblick über die Auswahl der Verfahren.

6.1 Ergebnisse aus Expert:inneninterviews

Es wurden neun Interviewpartner:innen anhand eines Leitfadens befragt. Folgend sind die Interviewpartner:innen vorgestellt und der Fragenkatalog aufgeführt.

Interviewpartner:innen

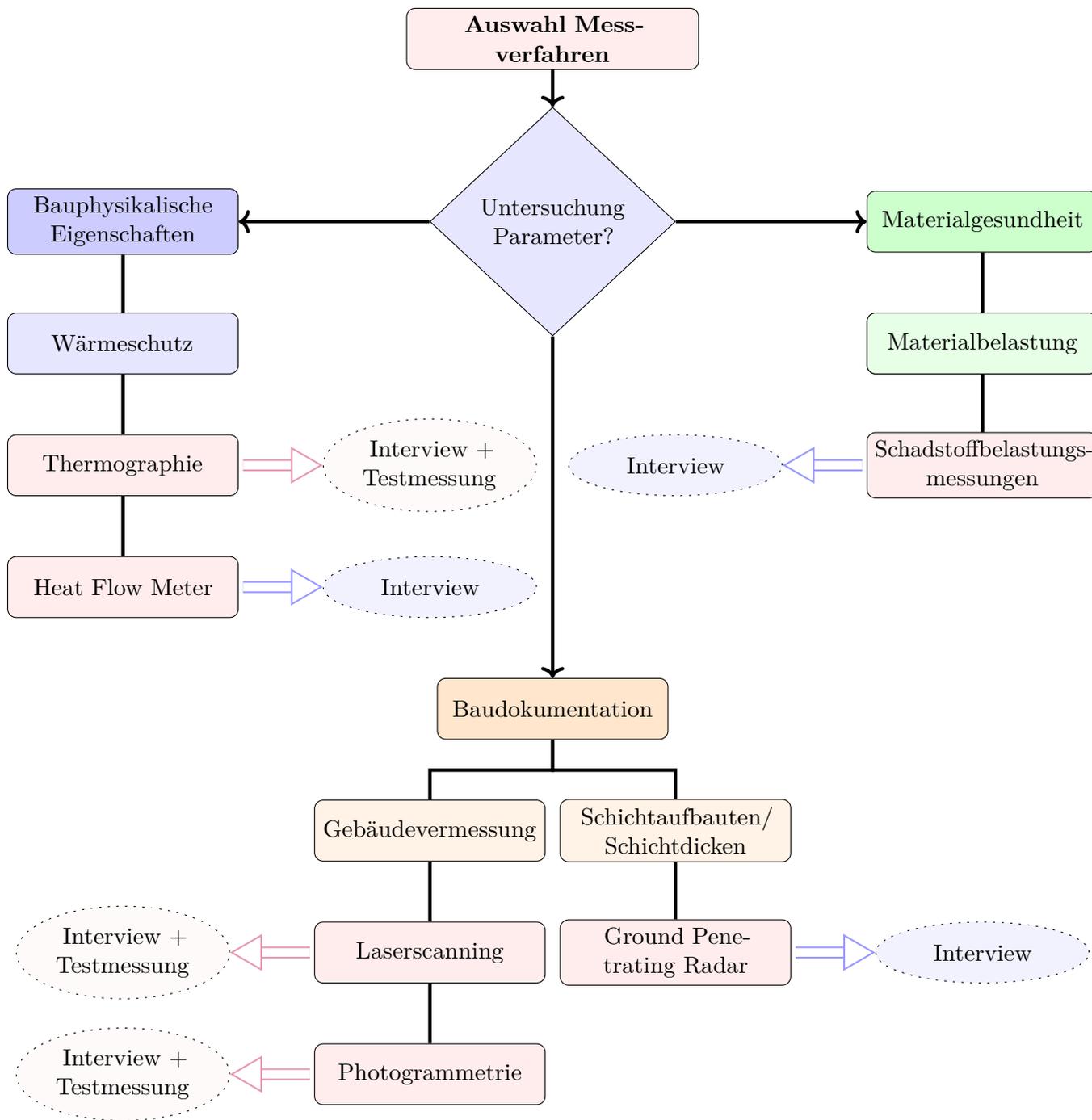


Abb. 6.1: Darstellung Auswahl der Verfahren [eigene Darstellung]

- IP1 (*Verfahren: Laserscanning und Photogrammetrie*) ist in der Bereichsleitung Architektur und Gebäudevermessung in einem Vermessungsbüro tätig und beschäftigt sich im Zuge der Bestandsvermessung (auch für Gebäudesanierungen) mit Laserscanning und Photogrammetrie.
- IP2 (*Verfahren: Laserscanning und Photogrammetrie*) ist in der Forschung im Bereich der Geodäsie tätig, mit dem Fokus der Weiterentwicklung geodätischer Methoden (Erfassung von Objekten wie Vegetation, Gebäude, Infrastruktur) in Bezug auf Automation, Zuverlässigkeit, Genauigkeit und Geschwindigkeit.
- IP3 (*Verfahren: Laserscanning und Photogrammetrie*) ist Vermessungsingenieur in einem Vermessungsbüro und beschäftigt sich mit der Aufnahme und Datenauswertung von Bestandsgebäuden.
- IP4 (*Verfahren: Thermographie*) ist im öffentlichen Dienst tätig und beschäftigt sich mit Prüfungen, Inspektionen und Zertifizierung in unterschiedlichen Bereichen (Bauphysik, Bautechnik, Lichttechnik,...).
- IP5 (*Verfahren: Thermographie*) ist Geschäftsführer für den Bereich Bautechnik für nicht akkreditierte Dienstleistungen und beschäftigt sich mit Erstellung von Sanierungskonzepten.
- IP6 (*Verfahren: Heat Flow Meter*) ist im Bereich Forschung und Entwicklung bei einem Generalunternehmer tätig und beschäftigt sich mit Gebäudesanierung.
- IP7 (*Verfahren: Schadstoffbelastungsmessungen*) ist im Bereich der Sachverständigung für Schadstoffe in Innenräumen.
- IP8 (*Verfahren: Schadstoffbelastungsmessungen*) ist im Bereich der chemischen Analytik im Baubereich, spezialisiert auf Holzbau tätig.
- IP9 (*Verfahren: Ground Penetrating Radar*) ist als Gruppenleitung in der Abteilung der oberflächennahen Geophysik zuständig.

Zusammenfassend sind die Interviewpartner:innen nach Tätigkeitsfeld und dem Verfahren zu dem sie interviewt wurden in Tabelle 6.1 aufgelistet:

Tab. 6.1: Expert:innen der Interviews

Expert:innen	Tätigkeitsbereich	Verfahren
IP 1	Vermessungsbüro	Laserscanning & Photogrammetrie
IP 2	Forschung	Laserscanning & Photogrammetrie
IP 3	Vermessungsbüro	Laserscanning & Photogrammetrie
IP 4	Prüfstelle	Thermografie
IP 5	Prüfstelle	Thermografie
IP 6	Forschung	Heat Flow Meter
IP 7	Sachverständigung	Schadstoffbelastungsmessung
IP 8	Analytik	Schadstoffbelastungsmessung
IP 9	Geophysik	Ground Penetrating Radar

Fragenkatalog

1. Welche Verfahren abseits der Raumluftprobenentnahme gibt es zur Messung der Schadstoffbelastungen in einem Bestandsgebäude? (Zusatzfrage bei einem Verfahren)
 - a) Messungen direkt am Material
 - b) Messungen aus der Luft
 - c) Direkte in-situ Messungen
2. Wie funktioniert das Verfahren?
 - a) Ablauf der Messung
 - b) Dauer der Messung
 - c) Messergebnis
3. Was sind die Vorteile des Verfahrens?
 - a) Einsatzbereiche
 - b) Benutzerfreundlichkeit
 - c) Häufigkeit der Anwendung
 - d) Kosten/Nutzen
4. Was sind die Nachteile des Verfahrens?
 - a) Einsatzbereiche
 - b) Benutzerfreundlichkeit
 - c) Häufigkeit der Anwendung
 - d) Kosten/Nutzen
5. Was sind Probleme in der Anwendung?
 - a) Limitierung des Einsatzbereiches
 - b) Schwankungen der Messergebnisse
6. Wie funktioniert die Datenauswertung der Messergebnisse?
 - a) Schwierigkeitsgrad der Auswertung
 - b) Weiterbearbeitung der Daten
7. Wie hat sich Ihrer Meinung nach das Verfahren im Laufe der Zeit entwickelt und wie sieht der Zukunftstrend aus?
 - a) Bezug: technische Entwicklungen und Rolle als Erkundungsmethode bei Bestandsgebäuden

6.1.1 Laserscanning und Photogrammetrie

In Bezug auf Laserscanning und Photogrammetrie wurden drei Expert:innen interviewt (siehe Tabelle 6.1). Die Ergebnisse werden in den folgenden Unterkapiteln vorgestellt. Laserscanning und Photogrammetrie sind beides optische Methoden, die zur Aufnahme von Objekten (in der Größenordnung von ein paar Zentimeter bis ein paar 100 Kilometer) eingesetzt werden [IP2].

6.1.1.1 Laserscanning

Laserscanning ist in der modernen Gebäudesanierung essentiell, da es ein schnelles Verfahren ist, das eine zentimetergenaue Vermessung eines Gebäudes ermöglicht und somit auch Kosten reduziert [IP1]. Mit Laserscanning kann nicht nur die Geometrie erfasst, sondern auch feuchte Stellen (bei der Kenntnis des vorhandenen Materials) an Bauteilen verdeutlicht werden [IP2].

Es gibt mehrere Modelle von Laserscannern. Häufig wird zwischen terrestrischen Laserscannern (siehe Abbildung 6.2) und Handscannern (siehe Abbildung 6.3) unterschieden. Der terrestrische Laserscanner wird auf ausgewählte Punkte im Raum gestellt (abhängig von der Dichte der Aufnahme) und nimmt die Umgebung auf [IP1]. Dieser ist oft auf einem Stativ montiert und ist gut für die Aufnahme von Innenräumen geeignet [IP2].

Mit dem Handscanner wird im Gebäude entlang gegangen, dabei muss auf die Wegeführung geachtet werden, da ein mögliches Auseinanderklaffen der Wege bei der Auswertung Probleme verursacht [IP1]. Alternativ kann der Scanner auch von Robotern getragen oder auch auf andere dynamische Plattformen montiert werden, wie z.B. auf Flugzeugen (bemannt oder unbemannt). Dies eignet sich vor allem für die Aufnahme der Gebäudehülle gut [IP2]. Eine Anwendung mit einer Drohne beispielsweise ist momentan aber noch ungenauer, da die verwendeten Gerätschaften kleiner sind [IP3].



Abb. 6.2: terrestrischer Laserscanner [eigene Aufnahme]



Abb. 6.3: Handscanner [eigene Aufnahme]

Abb. 6.4: Modelle von Laserscannern [eigene Aufnahmen]

Funktion: Laserscanning funktioniert im Großen und Ganzen wie ein Tachymeter. Dabei wird ein Laserstrahl über einen Spiegel abgelenkt und tastet den Raum dreidimensional ab. Im Gegensatz zum Tachymeter (Entfernungsinformation) kommt eine Oberflächeninformation heraus [IP1]. Dabei befindet sich der Laserstrahl nur auf einer Wellenlänge. Neben den geometrischen Informationen, kann der Laserscan auch die Rückstrahlstärke messen. Das heißt, dunkle Oberflächen bei denen weniger Licht zurückgestreut wird sind heller in der Darstellung. Somit können eben auch feuchte Stellen an Bauteilen, bei denen das Material bekannt ist, interpretiert werden [IP2].

Zusätzlich kann das Gerät auch Bilder aufnehmen und diese auf die Messdaten projizieren. Somit würde eine farbige Punktwolke entstehen, die allerdings nur geometrische Informationen enthält und keine weiteren Angaben über Oberflächen bzw. Material gibt [IP1]. Vorteilhaft ist auch, dass die Prozesse Aufnahme und Auswertung bei einer Anwendung mit dem Laserscanner getrennt betrachtet werden können [IP2].

Dauer: Die Dauer einer Messung mit einem Laserscanner ist abhängig von der Dichtigkeit der Messung, aber auch vom verwendeten Gerät. Grundsätzlich hat das Gerät eine Zeitspanne von ungefähr 26 Sekunden (schnellste Variante) und 1 Minute 20 Sekunden (langsamste Variante) [IP1]. Handscanner bzw. Mobils Scanner mit SLAM Versionen verfolgen die Trajekturen vom Gerät, die in dem Gebäude durchgegangen werden. Dies funktioniert schneller (ca. zwei- bis dreimal) als ein terrestrischer Scanner [IP3].

Einsatzbereiche: Der Einsatzbereich von Laserscanner ist sehr flexibel. Die Anwendung ist überall möglich, wo eine dreidimensionale Information gefordert ist. Allerdings sollte im Zuge der Messung die gebaute Struktur, die aufgenommen werden sollte, erkennbar sein. Probleme machen meist viele Einrichtungsgegenständen [IP1].

Bei der Aufnahme ist auch auf die Oberflächenstrukturen zu achten, da nicht alle Oberflächen gut zu erkennen sind (Edelstahl, Glas,...) [IP1]. Ein Problem beispielsweise bei Glasflächen ist, dass jeweils zwei Entfernungen aufgenommen werden (Entfernung zur Glasfläche und Entfernung hinter der Glasfläche). Spiegelflächen bilden ein ähnliches Problem, da hier ebenfalls die Spiegelfläche, aber auch das gespiegelte Objekt gemessen wird. Dadurch kann es zu Schwierigkeiten bei der Auswertung kommen, da die gespiegelten Flächen dann zu eliminieren sind [IP2].

Benutzerfreundlichkeit: Die Verwendung eines Laserscanners ist sehr einfach geworden und kann leicht angewendet werden [IP1]. Es ist keine lange Einschulung für die Anwendung des Laserscans notwendig [IP3]. Da der Laserscan die ganze Szenerie dokumentiert, können Informationen im Zuge der Aufnahme nicht irrtümlich vergessen werden [IP2].

Im Zuge der Aufnahme ist mitzubedenken, welche Informationen aufgenommen werden sollen. Beispiel dafür ist der blinde Fleck, das sind Stellen die möglicherweise nicht bei der Aufnahme gemessen bzw. nicht gesehen werden können [IP1]. Ebenfalls ist bei der Messung darauf zu achten, dass es genügend Überlappung zwischen den Standpunkten gibt. Es sollten ungefähr 20-30 % in den Punktwolken, die zu überlappen sind, enthalten sein. Ist dies nicht gegeben können die Punktwolken nicht ausgewertet werden [IP3].

Weiters ist bei der Anwendung eines Handscanners auf die Gehgeschwindigkeit zu achten. Ebenfalls sollte die Wahl des Startpunktes gleich sein, um geschlossene Trajekturen zu erhalten. Eine praktische Funktion bei der Anwendung des Handscanners ist das Beobachten der Zwischenschritte auf einem Tablet oder Handy [IP3]. Sollte die Messung mit einer Drohne gemacht werden, muss hier auch auf eine geschlossene Wegeführung geachtet werden. Diese wird automatisiert vor der Aufnahme auf dem Handy oder auf dem Controller vorgegeben [IP3].

In Bezug auf Aufnahmen im Denkmalschutzbereich (historische Dachstühle) ist Fachkenntnis von Vorteil, um eine präzise Auswertung zu gewährleisten und ein gewisses Fachverständnis die Aufnahme (bzgl. was soll wirklich sichtbar sein) vereinfacht [IP1].

Die Art und Weise der Funktionalität des Scanners ist einfach verständlich [IP2]. Abhängig von den Genauigkeitsanforderungen können kleinere und billigere Laserscanner herangezogen werden. Die benötigte Technologie und Kosten sind mit den Anforderungen der Bedürfnisse verknüpft [IP2]. Da bei Laserscanning Batterien notwendig sind, ist auch auf ausreichend Batterieladung ein Augenmerk zu legen [IP2].

Auswertung: Das Messergebnis eines Laserscanners ist eine Punktwolke [IP1]. Abhängig vom verwendeten Gerät unterscheidet sich die Software für die Auswertung [IP3]. Neben einer einfachen Technologie der Aufnahme sind auch meistens die Produkte für die Nachbearbeitung der Daten einfacher geworden [IP2].

Ein Laserscanner produziert sehr viele Daten, somit sind starke Computerressourcen notwendig [IP2]. Vorteilhaft ist die direkte 3D Aufnahme [IP2]. Im Zuge der Bearbeitung der Punktwolke ist diese in ein Referenzsystem zuzuführen (in Österreich in das Gauß-Krüger System) [IP3].

Es wird bei der Aufnahme bereits eine Vorregistrierung durchgeführt, die durch die Kamerafunktion im Gerät unterstützt wird. Die aufgenommenen Punktwolken sind anschließend mit einer Software zu einer gesamten Punktwolke zusammenzufügen. Dabei ist vor allem die Auswertung der Daten des Handscanners mühsamer, da es weniger Manipulationsmöglichkeiten gibt [IP1].

Aus der entstandenen Punktwolke sind in den meisten Fällen 2D Pläne zu erstellen [IP1]. Eine Auswertung in 2D ist einfacher, da durch die Punktwolke horizontale Schnitte gemacht werden und diese dann vektorisiert werden können und eine Weiterverarbeitung in Pläne schneller funktioniert [IP3].

Eine automatisierte Erstellung eines 3D BIM-Modelles ist momentan noch nicht möglich. Da bei der Nachbearbeitung der Punktwolke die Struktur nachzuzeichnen ist, ist bei der Auswertung ein gewisses Fachwissen vorauszusetzen, um richtige und ordentliche Pläne zu erstellen [IP1]. Eine Auswertung in 3D erfordert mehr Erfahrung in der Aufnahme (Orientierung der Punktwolke) und ist dadurch etwas komplizierter [IP3].

Zusätzlich zur Geometrie sind in der Auswertung der Punktwolke auch sehr große Schäden an Bauteilen in der Punktwolke sichtbar [IP1].

Entwicklung: Der Laserscanner hat sich vor allem im Laufe der Zeit in Bezug auf Geschwindigkeit deutlich verbessert. Eine weitere Entwicklung könnte im Bereich der verbesserten Genauigkeit von Mobilgeräten liegen [IP1].

Laut IP3 sind auch Pilotprojekte zu einer Integration von KI (künstliche Intelligenz), um die Vektorisierung der Punkte in der Punktwolke zu automatisieren, am Laufen. Eine Umsetzung sieht IP3 aber nicht in den nächsten 10 Jahren, da eine Anwendung dieser Systeme noch zu ungenau ist [IP3].

Eine weitere Entwicklung ist eine Standardisierung der Datenformate, um auch den Austausch der Daten reibungsloser zu gestalten. Da der Laserscan in vielen Bereichen Anwendung findet (Landschaften, Gebäuden, Straßenraum,...) wird es ständig Weiterentwicklungen geben [IP2]. Laut IP2 wäre eine weitere interessante Entwicklung die Ausstrahlung von mehreren Wellenlängen. Da somit die Reflexionstärken aus unterschiedlichen Wellenlängen betrachtet werden und somit auch eine eventuelle Klassifizierung von Materialeigenschaften möglich wäre [IP2].

Eine weitere Entwicklung laut IP2 wäre die automatische Erstellung eines Modelles während der Aufnahme. So könnte auch die Vollständigkeit vor Ort überprüft werden [IP2].

Weiters wären auch robotergestützte Plattformen anzudenken, die durch das Gebäude gehen und die Vermessung durchführen [IP2].

Vor-und Nachteile:

Tab. 6.2: Vorteile und Nachteile Laserscanning [IP1],[IP2],[IP3]

Vorteile	Nachteile
schnelle Geschwindigkeit	hohe Gerätegrundkosten
Aufnahme gesamter Informationen	blinder Fleck
flexibler Einsatzbereich	keine mobilen Geräte (Gewicht der Geräte)
benutzerfreundlich	Oberflächenproblem
getrennte Prozesse (Aufnahme und Auswertung)	hohe Rechenleistung

In Abbildung 6.5 wurde aus den Interviewergebnissen ein Workflow erstellt.

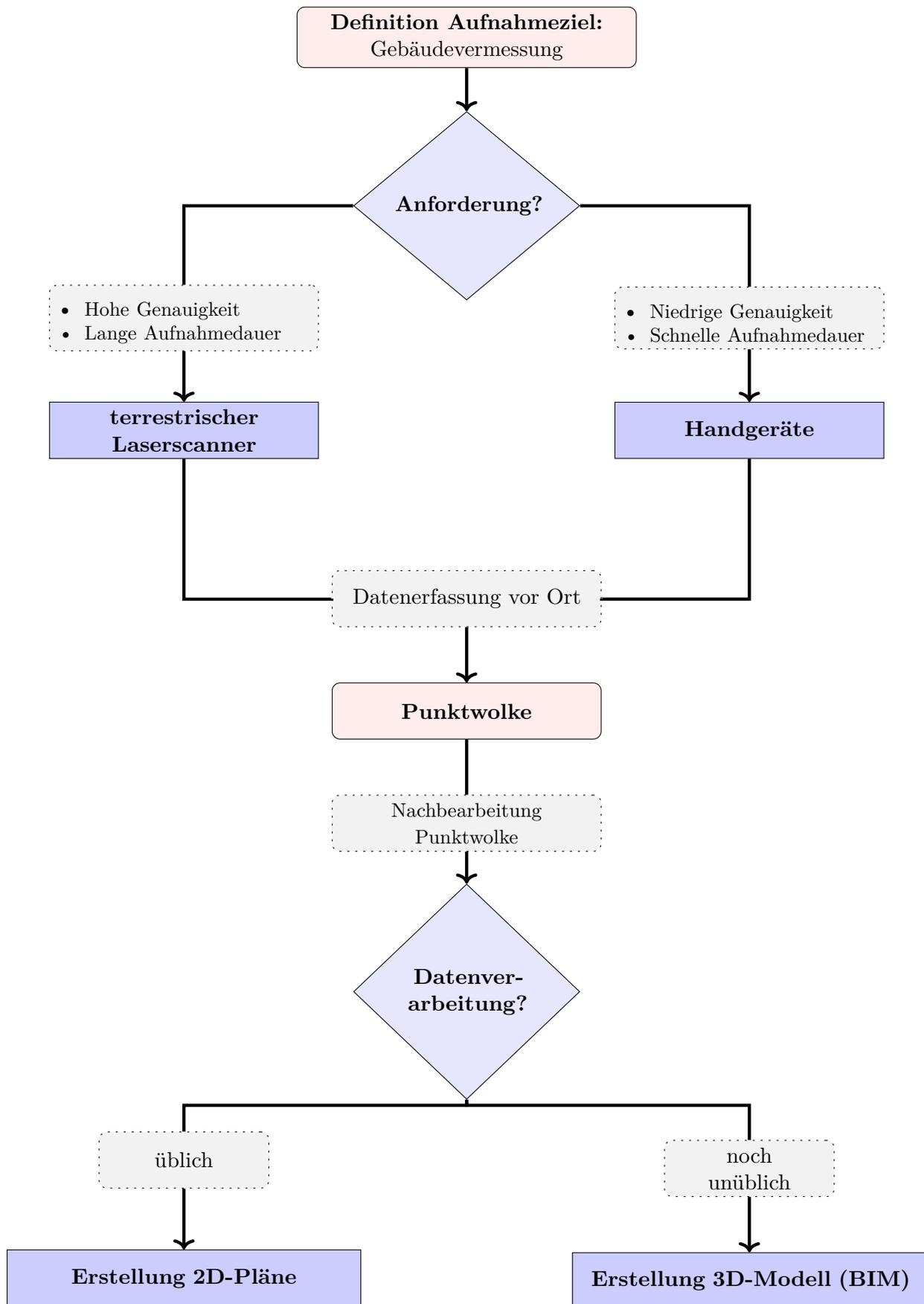


Abb. 6.5: Workflow Laserscanning [eigene Darstellung]

6.1.1.2 Photogrammetrie

Photogrammetrie ist vor allem ein wichtiges Werkzeug im Denkmalschutzbereich, da beispielsweise der Zustand von Wänden analysiert werden kann. Allerdings wird Photogrammetrie tendenziell eher für die Aufnahme von Details eingesetzt werden und nicht zwingend für ein gesamtes Gebäude [IP1].

Laut IP3 ist eine Anwendung der Photogrammetrie im Bestandsbau für reine Vermessungsaufgaben fraglich, da Laserscanner bereits gut entwickelt sind. Bei der Notwendigkeit eines fotorealistischen Modelles ist aber Photogrammetrie eine gute Anwendungsmöglichkeit, da Farben und Texturen bereits vorhanden sind [IP3]. Mehr Einsatz findet Photogrammetrie tendenziell in großflächigen Bereichen, wie Tagebau [IP1].

Funktion: Prinzipiell ist Photogrammetrie eine Methode die auf Fotos basiert [IP2]. Es geht um die Bearbeitung bzw. Entzerrung von Bildern bzw. Fotos. Heutzutage gibt es auch schon Entwicklungen zur Erstellung eines 3D Modelles nur aus Fotos. Die Aufnahmen mit photogrammetrischen Messungen können ultragenau werden (Genauigkeit von bis unter einem Millimeter) [IP1]. Bei Fotos ist eine Blickfeldbegrenzung von bis zu 80 Grad gegeben, deswegen ist es notwendig mehrere Fotos von einem Standort aus zu machen, um alles rundherum aufzunehmen. Da bei der Aufnahme von Fotos eine Dimension verloren geht (von 3D zu 2D), ist die Identifizierung eines Referenzpunktes relevant, um bei der Auswertung das Problem des Dimensionsverlustes zu lösen [IP2].

Dauer: Durch sehr dichte Aufnahmen, brauchen diese Messungen Zeit. Im Vergleich zum Laserscanning dauern die Aufnahmen deutlich länger [IP1].

Einsatzbereiche: Der Einsatzbereich ist prinzipiell flexibel, ähnlich eines Laserscanners [IP1]. Photogrammetrie hat aber ebenfalls die Oberflächenproblematik: Einerseits bei Spiegeln und Glasflächen. Andererseits aber auch bei sehr glatten, weißen Flächen, da hier keine genauen Referenzpunkte gefunden werden können. Bei strukturierten Flächen funktioniert eine Anwendung gut [IP2].

Benutzerfreundlichkeit: Für die Messungen ist auch mehr Einschulung notwendig und sie sollten präferiert von Fachpersonal durchgeführt werden [IP3]. Bei Anwendung der Photogrammetrie ist der Aufwand dem Nutzen gegenüberzustellen, da eine Aufnahme mit Photogrammetrie durch die dichteren Aufnahmen, viel aufwendiger ist und somit auch die Personalkosten erhöht [IP1]. Obwohl die Anschaffung von Kameras deutlich billiger ist als ein Laserscanner [IP2].

Auswertung: Photogrammetrie liefert im Gesamten eine Farbinformation. Somit kann das Ergebnis visuell interpretiert werden [IP2]. Es werden Orthofotos in ein Softwareprogramm eingespielt. Diese Fotos werden dann in eine Punktwolke transformiert. Darüber läuft ein Meshmodell und es wird Farbe in das 3D Modell integriert [IP3].

Die Auswertung der Photogrammetrie funktioniert über ein Softwareprogramm aus dem Spieleentwicklerbereich. Im Gegensatz zum Laserscanning lassen sich die Zwischenergebnisse nicht vor Ort begutachten [IP1].

Das Messergebnis der Photogrammetrie ist eine Punktwolke und produziert wie der Laserscanner sehr viele Daten, somit sind starke Computerressourcen notwendig [IP2].

Entwicklung: Die Photogrammetrie ist momentan am Stand des Laserscanners vor ungefähr 10 bzw. 15 Jahren. Die Entwicklung wird aber laufend besser. Eine mögliche Entwicklung könnte

durch die Anwendung von KI (Künstliche Intelligenz) sein. Da mit Hilfe von KI eventuell Strukturen in Bildern erkennbar gemacht werden können und somit momentane Probleme bei der Auswertung, wie Lücken zwischen Fotos, lösen könnte. Auch eine Entwicklung zu mobilen Geräten wäre möglich [IP1].

Eine weitere Entwicklung wird die Optimierung der Hardware sein. Computer werden schneller und bieten mehr Speicherplatz [IP2].

Laut IP3 gibt es für Photogrammetrie wenig Entwicklungspotential für Innenaufnahmen im Bestandsbau, da für eine reine Vermessung eines Objektes der Laserscan mehr Vorteile bietet. Ist eine Virtual Reality (VR) Aufnahme gefragt, bietet sich Photogrammetrie allerdings gut an [IP3].

Gemäß IP1 ist die Anwendung von Photogrammetrie unsicher, da eine genaue Abbildung durch photogrammetrische Aufnahmen sehr viel Rechenleistung fordern und auch fraglich ist, ob ein Bildformat in Zukunft noch lesbar sein wird, wo im Vergleich zum Laserscanner eine Punktinformation immer lesbar bleiben wird [IP1].

Vor- und Nachteile:

Tab. 6.3: Vorteile und Nachteile Photogrammetrie [IP1],[IP2],[IP3]

Vorteile	Nachteile
Genauigkeit der Messergebnisse	keine Skalierung
günstige Anschaffung (Kamera)	hohe Personalkosten
höhere Auflösung	Messaufwand
Farbinformation	hohe Rechenleistung
	Oberflächenproblematik

Abbildung 6.6 gibt einen Überblick über die Anwendung von Photogrammetrie anhand der gewonnenen Ergebnisse.

Ein klares Entwicklungspotential gibt es in der Kombination der Verfahren Laserscanning und Photogrammetrie. Es wird dadurch aber die Anforderung hinsichtlich Speicherplatz erhöht [IP2].

Eine Kombination aus Laserscanning und Photogrammetrie ist anzudenken, da der Laserscan die Koordinateninformation liefert und die Photogrammetrie die Oberflächeninformationen [IP1].

Das Problem ist, dass die Auswertungssoftwares von Photogrammetrie und Laserscanning nicht kompatibel sind und somit zwei verschiedene Datenformate vorhanden sind. Nur wenige Softwareprogramme können beide Methoden bearbeiten [IP3].

Neuentwicklungen in diesen Bereichen sind aber in der Praxis schnell spürbar, ungefähr alle 5 Jahre erfolgt so ein großer Entwicklungsschritt [IP1].

6.1.2 Thermographie

In Bezug auf Thermographie wurden zwei Expert:innen interviewt (siehe Tabelle 6.1). Die Ergebnisse werden in diesem Unterkapitel vorgestellt.

Thermographie ist ein zerstörungsfreies Messverfahren, das überall angewendet werden kann wo Wärmedifferenzen vorherrschen (Gebäude, Kabelsträngen, PV-Anlagen,...) [IP4]. Für die Erstellung eines Sanierungskonzeptes und einer Objektsicherheitsprüfung nach ÖNORM B 1300/1301 ist Thermographie ein wesentlicher Teil [IP5]. Laut IP5 werden im Zuge der Thermographieaufnahmen zwei Zugänge für die Indikation von Wärmebrücken unterschieden:

- qualitative Einschätzung: Beispielsweise mit einem Wärmebildkameraaufsatz für Handys

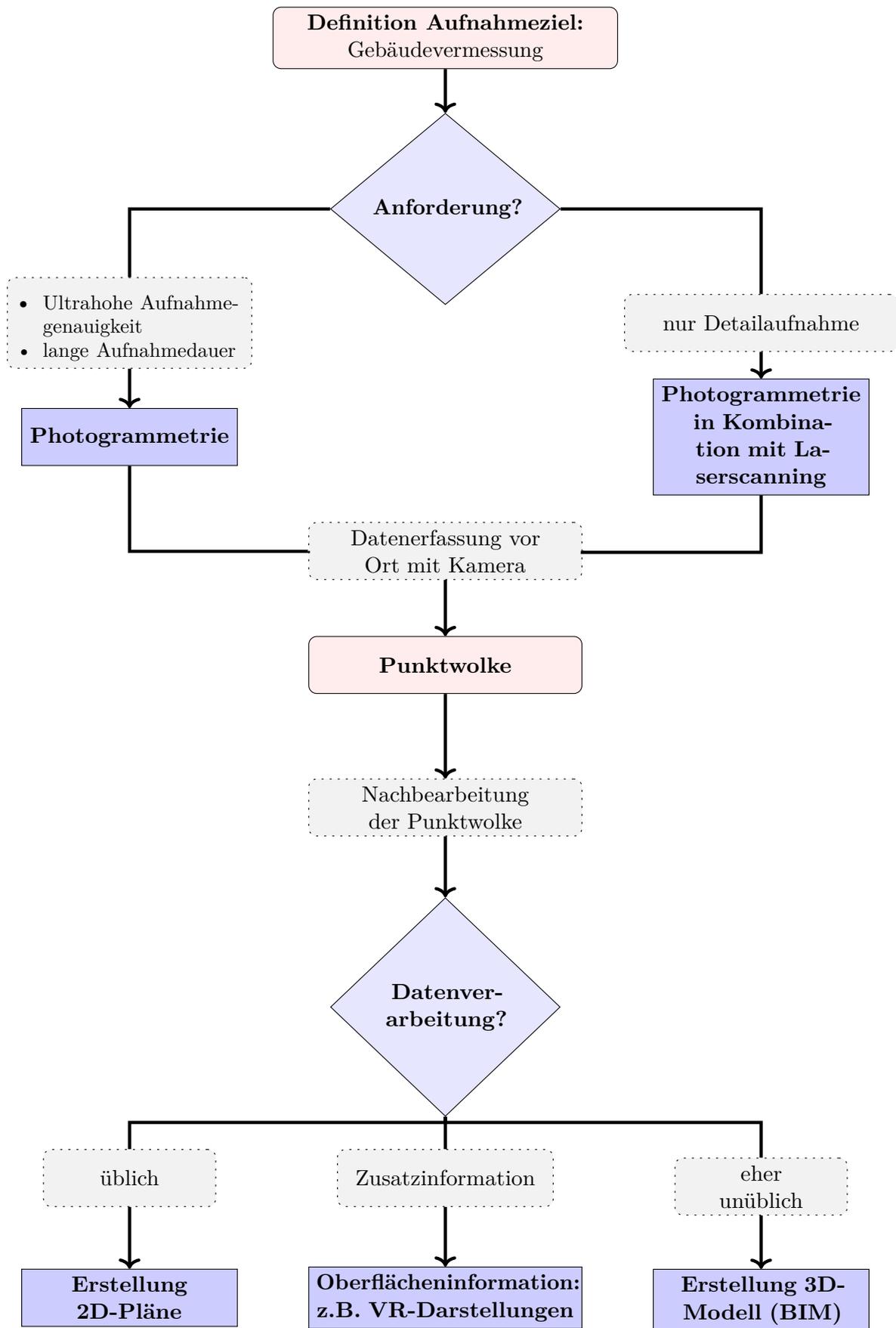


Abb. 6.6: Workflow Photogrammetrie [eigene Darstellung]

- Gutachten: Benutzung eines jährlich kalibrierten Gerätes (siehe Abbildung 6.7)

Mittlerweile gibt es auch schon Wärmemessgeräte die den U-Wert von Fenstern in Bestand bestimmen sollen bzw. zumindest können diese die Reduktion des U-Werts über die Zeit abschätzen [IP4].

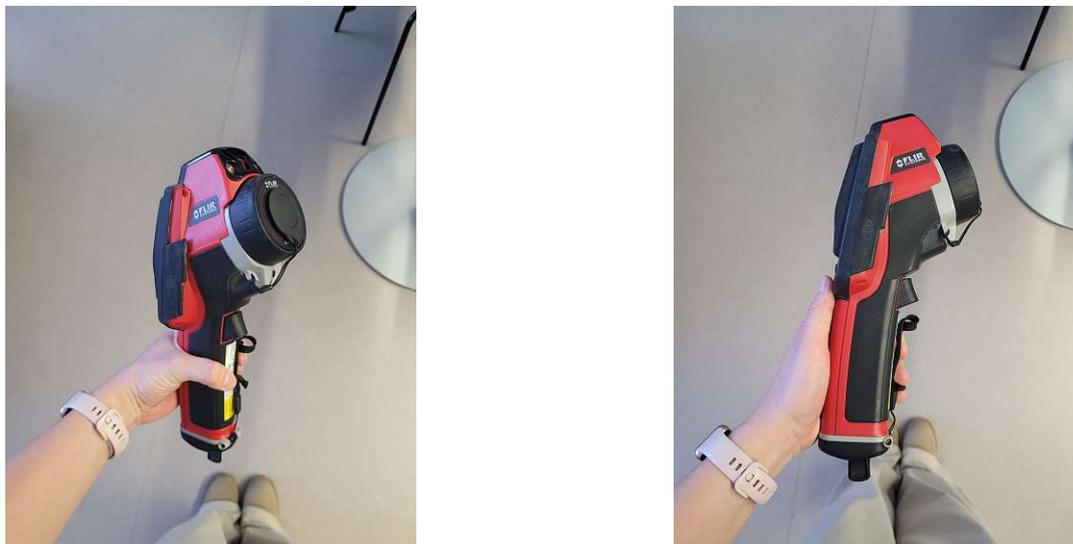


Abb. 6.7: Thermographiekamera [eigene Aufnahmen]

Funktion: Bei der Thermographie werden elektromagnetische Wellen im thermischen Infrarot eingesetzt. Hier werden Bilder in der Zentralperspektive gemacht [IP2]. Wichtig bei der Messung mit Thermographiekameras ist das Berücksichtigen von Rahmenbedingungen. Es muss ein Temperaturunterschied zwischen innen und außen herrschen, damit ein Wärmefluss entsteht, der gemessen werden kann [IP4]. Somit kann Thermographie indikativ Wärmebrücken detektieren [IP5].

Dauer: Die Dauer der Messung ist abhängig vom Ausmaß der Messung, wird beispielsweise eine Wohnung gemessen, dauert die Aufnahme ungefähr eine Stunde [IP4]. IP5 hat als Richtwert für ein Gründerzeithaus mit 1500 m² einen Zeitrahmen von 1 - 1 1/2 Stunden angegeben. Dies liegt daran, dass auch Zeit für die Temperaturanpassungen der Kamera an die Umgebung einzurechnen ist [IP5].

Benutzerfreundlichkeit: Bei den Messungen ist darauf zu achten, dass das Messgerät ins Temperaturgleichgewicht kommt [IP4]. Der Idealfall wäre, dass eine Person mit Fachkompetenz die Aufnahmen mit der Thermographiekamera macht, um diese auch richtig auszuwerten. Da diese Person die Randbedingungen bei der Aufnahme kennt und somit Fehlinterpretationen vermieden werden können (z.B. Wärmestau bei Balkonplatten oder Fenstersturzbereiche) [IP4]. Es ist zudem auf die Ladung der Batterie zu achten [IP5].

Einsatzbereiche: Grundsätzlich kann Thermographie überall dort angewendet werden, wo ein Wärmefluss existiert und Zugänglichkeit gegeben ist [IP4]. Laut IP4 ist eine Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenraum von mindestens 10-15 Kelvin ausreichend, weil die Messsysteme sich stark verbessert haben. Laut IP5 muss mindestens ein Temperaturunterschied von 20 Kelvin vorherrschen [IP5]. Bei der Aufnahme ist auf den Einfallswinkel zu achten, da Infrarotstrahlung am besten frontal aufgenommen wird [IP4]. Denn prinzipiell ist bei thermogra-

phischen Aufnahmen anzuraten, zuerst ein Überblicksbild zu machen, bevor Detailaufnahmen gemacht werden [IP5].

Häufig werden beispielsweise Hubsteiger oder Drohnen als Hilfsmittel genommen. Drohnen haben oftmals das Problem der Entfernung, weshalb mit diesen meist nur Überblicksaufnahmen gemacht werden. Dies liegt auch daran, dass die Kameras auf Drohnen kleiner und leichter sind und somit nicht die gleiche Genauigkeit wie die Handgeräte aufweisen [IP4].

Die Hauptjahreszeit für thermographische Messungen ist der Winter, da Sonneneinstrahlung auf Bauteile das Wärmebild negativ beeinflussen kann. Deswegen werden Messungen oft in Abend-, Nacht- oder frühen Morgenstunden durchgeführt [IP4].

Auch bei Thermographie ist eine gewisse Oberflächenproblematik gegeben, da Fensterflächen und Metallflächen die Infrarotstrahlung reflektieren [IP4].

Auswertung: Das Ergebnis einer thermographischen Aufnahme ist das Wärmebild [IP4].

Bei einer gutachtlichen Auswertung wird nach der Interpretation ein Gutachten erstellt, ob eine Wärmebrücke wahrscheinlich ist oder nicht. Das Wärmebild ist hierbei kein eindeutiger Beweis für eine Wärmebrücke [IP4].

Im Zuge eines Gutachtens sollten ebenfalls Innentemperatur, Außentemperatur, Luftfeuchtigkeit gemessen werden, sowie eine Thermographie von innen und außen durchgeführt werden [IP5].

Laut IP4 ist auch von einer U-Wertberechnung mit Hilfe einer Infrarotkamera abzuraten, da die Messungen von reinen Oberflächentemperaturen, die mehr oder weniger genau sind, keine genaue Bestimmungen hergeben.

Entwicklung: Thermographiekameras sind im Laufe der Zeit immer kleiner und handlicher geworden. Teilweise gibt es auch schon Handyanwendungen, die oft als Anhaltspunkt herangezogen werden. Für eine gutachtliche Messung sind aber kalibrierte Kameras notwendig [IP4].

Laut IP5 wird die Entwicklung zu noch präziseren Messgeräten hingehen, obwohl der heutige Standard schon sehr gut ist. Ein wichtiger Punkt ist die einfache Umsetzung. Notwendigkeit in der Entwicklung wird bei der Schnittstelle von qualitativen Messungen, beispielsweise das Einspielen in die Software bzw. teilweise die Software selber, gesehen [IP5].

Vor-und Nachteile:

Tab. 6.4: Vorteile und Nachteile Thermographie [IP4],[IP5]

Vorteile	Nachteile
flexibler Einsatzbereich	Oberflächenproblematik
leistbare Kosten	anspruchsvolle Interpretation
benutzerfreundlich	

Abbildung 6.8 zeigt einen Workflow für die Anwendung der Thermographie aus den oben präsentierten Ergebnissen.

6.1.3 Ground Penetrating Radar (GPR)

In Bezug auf das GPR wurde ein/e Expert:in interviewt (siehe Tabelle 6.1). Die Ergebnisse werden im folgenden Unterkapitel vorgestellt.

GPR wird bereits als Methode für die Betonbauteilprüfung angewendet. Es lassen sich mit diesem Verfahren gut Betondicken und die Lage der Bewehrung bestimmen. Als Gebäudeerkundungsmethode findet das GPR noch eher selten Anwendung in der Praxis, wäre aber auch in

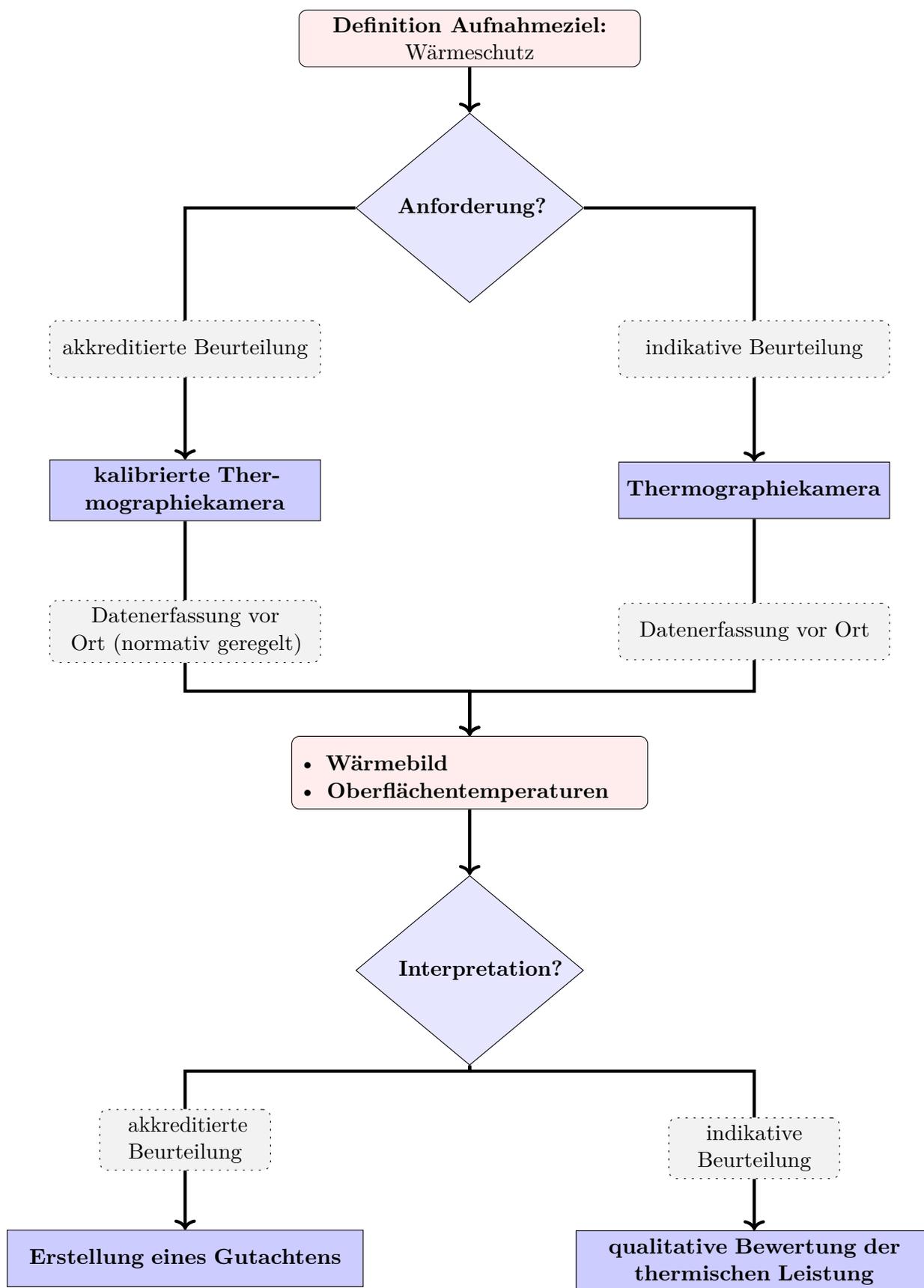


Abb. 6.8: Workflow Thermographie [eigene Darstellung]

Bezug auf kreislaufwirtschaftliche Betrachtung (Recycling, Reuse, ...) eines Gebäudes sinnvoll [IP9].



Abb. 6.9: GPRs mit unterschiedlichen Frequenzen [eigene Aufnahmen]

Funktion: Beim GPR werden elektromagnetische Wellen eingesetzt, die viel länger sind und deswegen in das Material eindringen können [IP2]. GPR ist in der Geophysik eines der hochauflösendsten und detailreichsten Verfahren. Dabei werden in sehr kurzen Abständen Signale von einem Transmitter abgesandt und die reflektierten Signale werden von einem Receiver aufgezeichnet. Transmitter und Receiver treten immer als ein Antennenpaar auf [IP9]. Dabei hängt die Eindringtiefe der Signale mit der Grundfrequenz zusammen: je niedriger die Frequenz, umso tiefer dringt das Signal ein mit der Konsequenz einer niedrigeren Auflösung. Es gibt Geräte mit unterschiedlicher Frequenz von Megahertz bis Gigahertz (siehe Abbildung 6.9). Beispielsweise erreichen Antennen mit 1GHz Tiefen von 2-3cm [IP9].

Die Entwicklung der Geräte wurde von einem Einkanalsystem, auf Mehrkanalsysteme erweitert. Somit kann man nicht nur die Impulse von Abständen hintereinander messen, sondern auch die lateralen Abstände. Dies ermöglicht die Darstellung eines dreidimensionalen Volumens [IP9].

Dauer: Eine Messung mit einem Georadar funktioniert ziemlich schnell. Es gibt die Möglichkeit mit händischen Messsystemen zu messen (da liegt die Messreichweite bei ungefähr einem Hektar pro Tag) oder motorisierte Messsysteme anzuwenden (da liegt die Messreichweite bei einer Fahrgeschwindigkeit von 15 km/h bei 23 Hektar pro Tag). Das GPR ist aber von den geophysikalischen Messmethoden das Schnellste [IP9].

Benutzerfreundlichkeit: Für die Handhabung des GPRs wird ein geophysikalisches Basiswissen vorausgesetzt. Bauingenieur:innen können dieses Verfahren mit heutigem Stand noch nicht alleine ausführen. Momentan ist das GPR aber auch teuer in der Anschaffung (hohe Gerätekosten). Eine vermehrte Verwendung des GPRs in der Baubranche würde eine Anschaffung und Umsetzung leistbarer machen [IP9].

Einsatzbereiche: Der Einsatzbereich des GPRs ist sehr flexibel, es kann indoor wie auch outdoor angewendet werden. Indoor können Messungen an Wänden, Boden oder Überkopf erfolgen. Die einzige Voraussetzung ist, dass Zugänglichkeit (Kästen,...) gegeben ist [IP9].

Dabei werden bei der Aufnahme jeweils immer in zwei Raumrichtungen (quer und längs/parallel) aufgenommen. Einschränkungen gibt es beispielsweise bei Ecksituationen, da hier das Gerät keinen direkten Kontakt aufbauen kann. Abhilfe kann in diesem Fall eine Messung von außen an der Gebäudehülle sein. Dabei ist allerdings auf die sicherheitstechnischen Vorgaben (Verwendung

von Hebebühnen) zu achten [IP9].

Auswertung: Das Messergebnis ist das Radargramm (2D Schnitt). Wird eine flächige Aufnahme gemacht, kann auch das 3D Volumen dargestellt werden. Das Ergebnis wird mit einer Software für eine Interpretation aufbereitet. Anschließend werden die Interpretationsergebnisse in ein BIM Modell eingearbeitet bzw. ansprechend visualisiert [IP9].

Mit dem GPR können Bauteildicken und Schichtdicken (bis zu einer Minstdicke von 2cm) gut identifiziert werden. Eine grobe Einschätzung kann dabei durch das Messbild direkt vor Ort geschehen (siehe Abbildung 6.10) [IP9].

Die Interpretation von Schichtaufbauten kann noch nicht problemlos ohne einer Eichung (Bohrkernentnahme) gemacht werden. Hierfür fehlt die Standardisierung, da auch die Materialien abhängig von ihrem Zustand (Feuchtigkeit) nicht immer die gleiche Reflexion bieten [IP9].

Im Zuge einer flächigen Aufnahme und Erstellung eines Horizontalschnittes können auch die Leitungsführung in einer Wand detektiert und dargestellt werden [IP9].

Für eine ordentliche Auswertung ist fachliche Expertise aus dem Bereich der Geophysik notwendig [IP9].

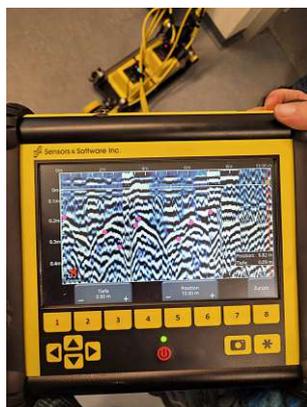


Abb. 6.10: GPR Messergebnis

Entwicklung: Eine mögliche Entwicklung des GPRs könnte in Bezug auf die Auswertungsarbeiten, eine KI basierte Standardmethode für die Interpretation der Radargramme darstellen. Diese könnte durch reine Mustererkennung auch eine Identifizierung der Schichtaufbauten ermöglichen. Auch eine robotergestützte Ausführung oder eine Anwendung von Drohnen (Messung von Außenfassaden) ist teilweise schon in Verwendung, wird aber auch noch stetig weiterentwickelt [IP9].

Die interdisziplinäre Anwendung mit den Gerätschaften erfordert auch eine Adaptierung des Fachvokabulars und eine intensive Kommunikation. Eine klare Aufgabenstellung vereinfacht und verschnellert den Workflow [IP9].

Vor-und Nachteile:

Abbildung 6.11 zeigt überblicksmäßig die Interviewergebnisse zum GPR Prozess.

6.1.4 Schadstoffbelastungsmessung

In Bezug auf Schadstoffbelastungsmessungen wurden zwei Expert:innen interviewt (siehe Tabelle 6.1). Die Ergebnisse werden im folgenden Unterkapitel vorgestellt.

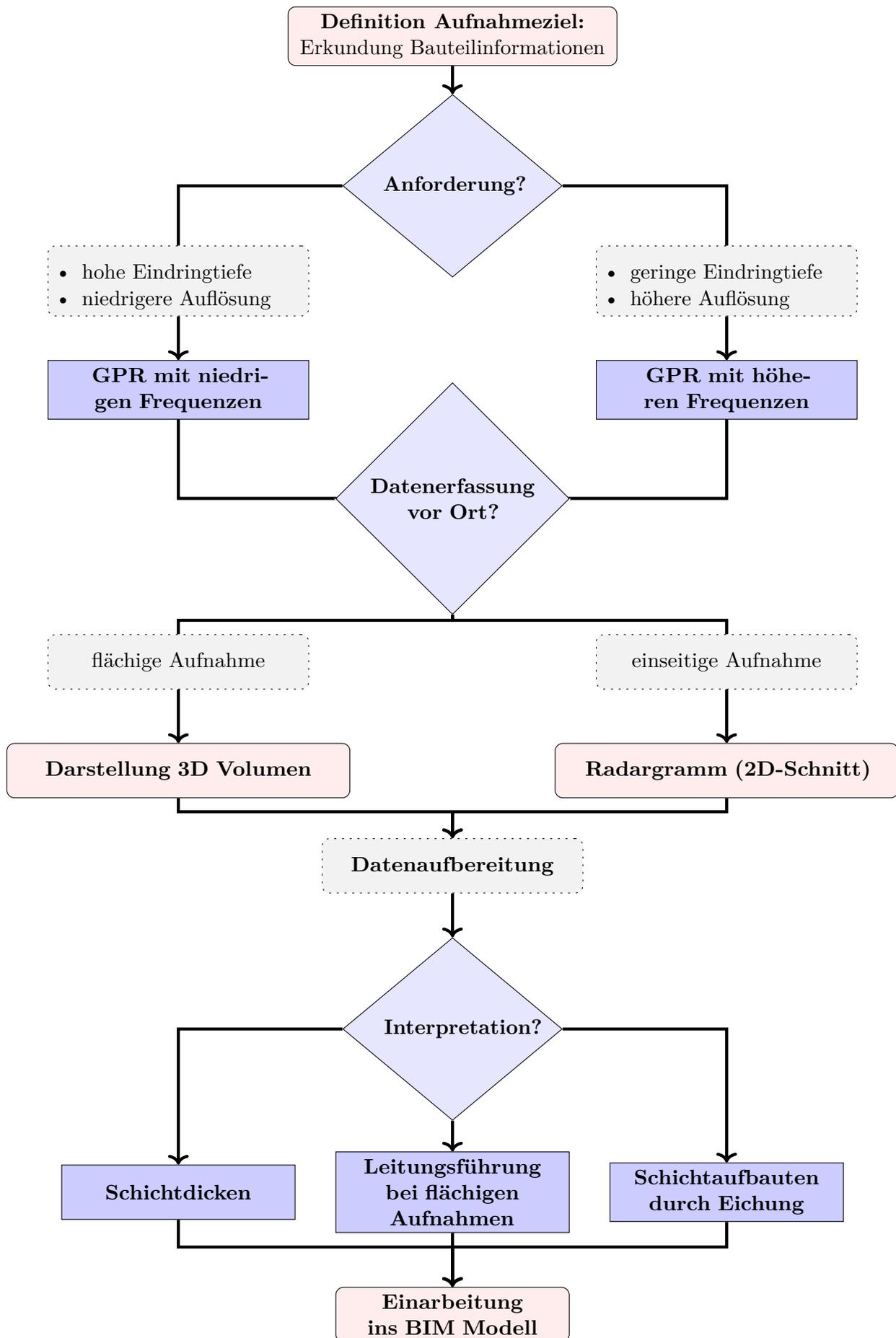


Abb. 6.11: Workflow GPR [eigene Darstellung]

Tab. 6.5: Vorteile und Nachteile Ground Penetrating Radar [IP9]

Vorteile	Nachteile
schnelle Geschwindigkeit	Expertise notwendig
zerstörungsfrei	begrenzte Auflösungsvermögen
linienhafte und flächige Aufnahmen	hohe Anschaffungs- und Personalkosten
flexibler Einsatzbereich	
unterschiedliche Gerätegröße	

In Altbauten können oft Altlasten, wie Pentaphenol, PCBS etc. und Gerüche problematisch sein [IP7]. Aber auch eine Belastung am Material, wie ehemalige Holzschutzmittelwirkstoffe oder Flammschutzmittel sind im Bestandsbau ein Thema [IP8].

Grundsätzlich sind bei Messungen von Schadstoffbelastungen Probenentnahme und Auswertung streng getrennt voneinander zu betrachten. Die Vorgehensweise ist normativ geregelt. Dabei werden Proben aus der Luft oder Proben vom Material entnommen und analysiert [IP7]. Für die Analyse von Luft und Emissionen gibt es, aufgrund der sehr komplexen Analytik, keine schnellen Methoden [IP8].

Funktion: Die Untersuchungen für die Schadstoffbelastungen funktionieren grundsätzlich mit einer Probeentnahme und einer Auswertung im Labor [IP7].

Raumluftmessungen erfolgen durch eine Raumluftprobenentnahme. Ganz wenige Stoffe könnten vor Ort gemessen werden, wie beispielsweise Ammoniak. Dies passiert aber tendenziell selten. Alternativen zur konventionelle Methode sind zu wenig empfindlich und zu unspezifisch, da viele Stoffe gleichzeitig mit gemessen werden und dadurch eine Differenzierung schwer erfolgen kann [IP7].

Dauer: Die Dauer einer Probenentnahme ist im Mittel eine halbe Stunde. Sie ist aber abhängig von der Aufgabenstellung (= dem zu untersuchenden Stoff) [IP7]. Abhängig vom Verfahren kann die Luftprobenentnahme auch eineinhalb Stunden dauern [IP8].

Die Aufbereitung der Räumlichkeiten für eine Luftprobenentnahme dauert vergleichsweise lang. Der Raum soll vor der Messung 8 Stunden verschlossen bleiben [IP7]. Hierbei wird das Messgerät (siehe Abbildung 6.12) aufgestellt und durch Ansaugen der Luft wird die Luft durch Adsorbentien in Flüssigkeit gebunden. Ähnlich funktioniert die Untersuchung von Schimmelsporen (siehe Abbildung 6.13) [IP7].

**Abb. 6.12:** Gerät für Luftprobenentnahme [eigene Aufnahmen]



Abb. 6.13: Gerät für Schimmelpollenentnahme [eigene Aufnahmen]

Benutzerfreundlichkeit: Die Probenentnahme kann durch Fachpersonal oder durch die Instruktion von Fachpersonal durch den betroffenen Haushalt geschehen und dem Labor geschickt werden [IP8]. Für eine ordentliche Diagnose ist eine Begehung aber unerlässlich [IP7]. Da bei der Probenentnahme auch oft die Fehlerquelle liegt. Klassische Beispiele hierfür sind, dass im Zuge der Luftprobenentnahme gelüftet oder bei Materialprobenentnahmen keine sinnvollen Proben entnommen werden [IP8].

Einsatzbereiche: Abhängig von der Aufgabenstellung werden Luftproben oder Materialproben entnommen. Auch Staub ist ein guter Untersuchungsindikator, da er verschiedene Stoffe aus der Luft ansammelt [IP7]. Oft können nicht flüchtige Stoffe (wie PCB) durch Abrieb in die Luft gelangen und sich im Hausstaub absetzen. Da können dann über längere Zeit gesammelte Staubsaugerbeutel untersucht werden [IP8].

Bei der Untersuchung von Schadstoffen am Material funktioniert die Beprobung (Entnahme von Spänen) immer gleich. Die Laborauswertung ist abhängig von dem zu untersuchenden Stoff (GCMS Analytik, GCED Analytik,...)

Direkte in-situ Messverfahren sind unpraktisch. Eine Messung beispielsweise mit einem tragbaren GCMS (Gaschromatographie mit Massenspektrometrie) ist langwierig, ähnlich bei mikrobiologischen Proben, die eine Bebrütungsdauer für die Kultivierung (siehe Abbildung 6.14) brauchen. Da sind Ergebnisse vor Ort nicht gut sichtbar [IP7].

Auswertung: Die Auswertung der Proben kann nur durch ein Labor gemacht werden [IP8]. Ein Schadstoff kann qualitativ und quantitativ nachgewiesen werden [IP8]. Aber im Endeffekt wird nach der Auswertung die Konzentration der Substanz mit den Richtwerten verglichen und ein Gutachten erstellt. Wichtig zu erwähnen ist, dass eine erhöhte Konzentration nicht gleich einen Schaden bedeutet. Es bedeutet lediglich, dass die Substanz vorhanden ist [IP7]. Bei dem Vergleich der Konzentrationslast mit den verordneten Grenzwerten ist auf die Richtlinien zu achten, diese sind vom Ministerium vorgegeben ¹. Für Arbeitsplätze gelten andere Grenzwerte als für Innenräume [IP7].

Auch in Bezug auf eine kreislaufwirtschaftliche Betrachtung (Weiterverarbeitung von Holzwerkstoffen beispielsweise) ist auf die Grenzwerte zu achten, ob das Material noch wiederverwertet werden kann oder nicht. In Innenräumen ist die Frage wie stark der Schadstoff vorhanden ist und wie die Substanz verfügbar ist. Ein Austausch ist nicht zwingend erforderlich, oft kann auch eine Maskierung des Materials Abhilfe schaffen [IP8]. Beispielsweise ist fest gebundener Asbest unbedenklich, da er sich nicht in die Raumluft absetzt [IP7].

¹Link zu den Richtlinien vom Ministerium

Eine Auswertung im Labor kann beispielsweise durch eine Gaschromatographie Massenspektrometrie funktionieren. Hierbei wird eine Probe in das Gerät gesteckt und nach den unterschiedlichen Stoffen ausgewertet [IP7]. Im Gerät werden die Stoffe desorbiert und mit dem GCMS (siehe Abbildung 6.15) und einer vorgeschalteten Thermodesorption untersucht [IP8].

Bei der Untersuchung von Schadstoffen am Material werden Proben entnommen, üblicherweise Späne an unauffälligen Stellen. Diese werden aufgemahlen und nach dem entsprechenden Stoff analysiert [IP8].

Prinzipiell gibt es auch mobile Methoden, wie die Röntgenfluoreszenzanalytik, die zerstörungsfrei einsetzbar sind. Je kleiner die Probe desto genauer ist die Auswertung [IP8]. Bei den Handgeräten ist eine Anwendung schwierig, da die Geräte abhängig von ihrer Kalibrierung sind. Diese unterscheidet sich je nach Messziel. Problematisch ist ebenfalls, dass mit einer Anwendung nur qualitative Aussagen getroffen werden können. Dabei werden Proben in das Gerät eingelegt und aufgrund der gemessenen Elementzusammensetzung können Rückschlüsse gezogen werden. Doch für eine genaue Untersuchung ist eine Spanform als Probe essentiell. Die Röntgenfluoreszenzanalyse wird gern als Nachweis in der Schwermetallanalytik eingesetzt [IP8].



Abb. 6.14: Schimmelkultivierung [eigene Aufnahme]



Abb. 6.15: GCMS Gerät [eigene Aufnahme]

Abb. 6.16: Beispiele für Labormessgeräte [eigene Aufnahmen]

Entwicklung: Eine Entwicklung für in-situ Messverfahren sieht IP7 als unrealistisch, da eine vor Ort Messung sehr zeitaufwendig ist und Qualitätsprobleme mit sich bringt. Da vor Ort keine Differenzierung der Messergebnisse erfolgen kann und somit eine Auswertung deutlich ungenauer bzw. unspezifisch ist [IP7].

Für eine qualitative Bewertung könnte eine Weiterentwicklung von Handgeräten, wie NIR (Nahinfrarot-Spektroskopie) anzudenken sein. Aber die quantitativen Auswertungen sind zu komplex, um sinnvolle Schnellmethoden herzustellen [IP8].

Vor- und Nachteile:

Beide Interviewpartner:innen waren sich einig, dass weder Vor- und Nachteile in Bezug auf die Schadstoffbelastungsmessungen aufgestellt werden können. Da die Messung von Schadstoffbelastungen Standardverfahren bzw. die einzigen Verfahren sind, die sinnvolle Ergebnisse liefern.

Abbildung 6.17 zeigt nochmals den Prozess einer Schadstoffbelastungsmessung anhand der gewonnenen Ergebnissen.

6.1.5 Heat Flow Meter (HFM)

In Bezug auf das Heat Flow Meter Verfahren wurde ein/e Expert:in interviewt (siehe Tabelle 6.1) und zusätzlich im Zuge des Interviews zwei Literaturquellen: *Modernisierung eines Gründerzeitgebäudes unter Anwendung eines AerogelDämmputzes*[31] und *BP-Treffen 2019 - Gesamtbericht* [2] empfohlen. Die Ergebnisse werden im folgenden Unterkapitel vorgestellt.

Das HFM kann in-situ und im Labor angewendet werden. Im Zuge des Interviews wurde die in-situ Methode betrachtet. Dieses Verfahren wird gemäß ISO 6869-1 [26] durchgeführt. Laut IP6 findet das Verfahren in der Praxis aber nicht so wirklich Anwendung, obwohl es die einzige genaue Methode ist, um in-situ einen U-Wert zu bestimmen [IP6].

Funktion: Essentiell für die Anwendung des Verfahrens ist ein eindimensionaler Wärmestrom. An dieser Stelle wird an der wärmeren Seite (Innenseite) eine Wärmestromfolie aufgebracht (siehe Abbildung 6.18). Diese wird luftdicht an die Wand geklebt [IP6]. Durch die Verwendung von Wärmeleitpaste kann eine bessere luftdichte Verbindung hergestellt werden [2].

Dann wird innen und außen jeweils ein Temperaturfühler angebracht. Dies stellt den Minimalversuchsaufbau dar. Für ein genaueres Messergebnis werden mehrere Temperaturfühler angebracht, um bei der Auswertung einen Mittelwert bilden zu können. Dadurch werden Wärmebrückeneffekte oder Inhomogenitäten innerhalb des Bauteils (Fehlerquelle) berücksichtigt [IP6]. In Abbildung 6.19 ist der Prozess schematisch dargestellt.

Dauer: Die Dauer des Verfahrens ist prinzipiell in der ISO 9869-1 [26] mit mindestens 72 Stunden geregelt. Laut IP6 ist eine ausreichend lange Messphase wichtig, damit sich die Messphasen mit nicht konstanten Rahmenbedingungen, wie die Hysterese der Temperatur und unregelmäßige Außentemperaturbedingungen (Tag und Nacht, Solareinstrahlung,..) herausmitteln. Die Messdaten werden täglich überprüft und dabei auch entschieden ob die Messungen abgebrochen werden können oder nicht [IP6]. Die Messdauer ist abhängig von den Umgebungsbedingungen und der Wärmekapazität des Bauteils. Je mehr die Randbedingungen schwanken und je größer die spezifische Wärmekapazität des Bauteils, desto länger sollte die Messdauer sein [2].

Benutzerfreundlichkeit: Eine Anwendung dieses Verfahren ist laut IP6 relativ aufwendig. Sie behandelt folgende Schritte:

1. Identifizierung von Messstellen
2. Aufbau des Equipments
3. Generierung von Messdaten
4. Versuchsabbau
5. Auswertung

Einsatzbereiche: Messungen werden tendenziell im Winter durchgeführt. Wichtig ist auch, dass die Temperaturfühler kalibriert sind und eine Temperaturdifferenz von 20 Kelvin vorherrscht

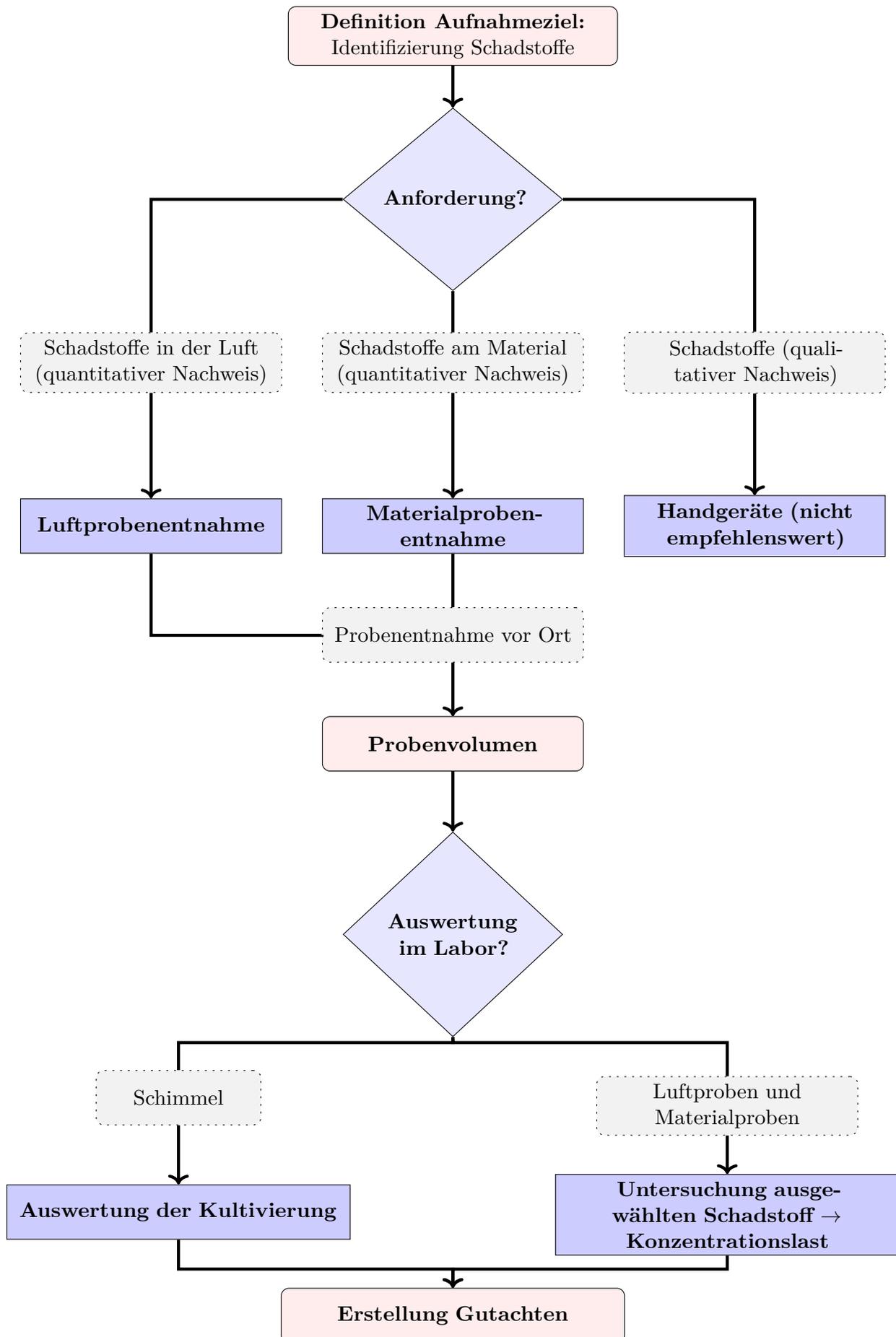


Abb. 6.17: Workflow Schadstoffbelastungsmessungen [eigene Darstellung]



Abb. 6.18: Versuchsaufbau HFM [31]

[IP6]. Anwendbar ist das Verfahren ansonsten in Bereichen, wo ein eindimensionaler Wärmestrom herrscht. Da bei einer in-situ Anwendung allerdings das optimale Klima nicht gegeben und oft kein Temperaturgradient in der Wand vorherrscht, wird als Hilfsmittel häufig eine Vorrichtung angebracht, die künstlich beheizt ist [IP6]. Diese Vorrichtung wird als Hilfswand bezeichnet und dient auch zur Erhöhung der Messgenauigkeit bzw. der Verkürzung der Messdauer. Durch die Hilfswand sind konstante Temperaturen gewährleistet [2].

Messungen mit mehreren Messstellen sind prinzipiell aufgrund der Verhinderung von Ausreißern aussagekräftiger [IP6].

Auswertung: Messergebnis des HFM ist der Wärmestrom und der Temperaturverlauf an der Oberfläche und/oder in der Luft. Aus den zwei Oberflächentemperaturen und dem Wärmestrom wird der Wärmedurchlasswiderstand ermittelt [IP6]. Der Zusammenhang aus Wärmestromdichte und Temperaturdifferenz zwischen innen und außen lässt sich rechnerisch wie folgt darstellen [31].

$$q = -\lambda * \frac{T_{eo} - T_{io}}{d} = -\frac{1}{R_t} * (T_{eo} - T_{io}) \quad (6.1)$$

Unter Berücksichtigung der Übergangswiderstände kann der U-Wert bestimmt werden [IP6]. Daraus ergibt sich rechnerisch [31]:

$$U = \frac{1}{R_{si} + R_t + R_{se}} \quad (6.2)$$

Alternativ kann der U-Wert direkt gemessen werden. Dabei werden nicht nur die Oberflächentemperaturen gemessen, sondern auch die Lufttemperaturen. Allerdings wären in diesem Fall auch die Luftströmungsbewegungen mitzuberechnen [IP6].

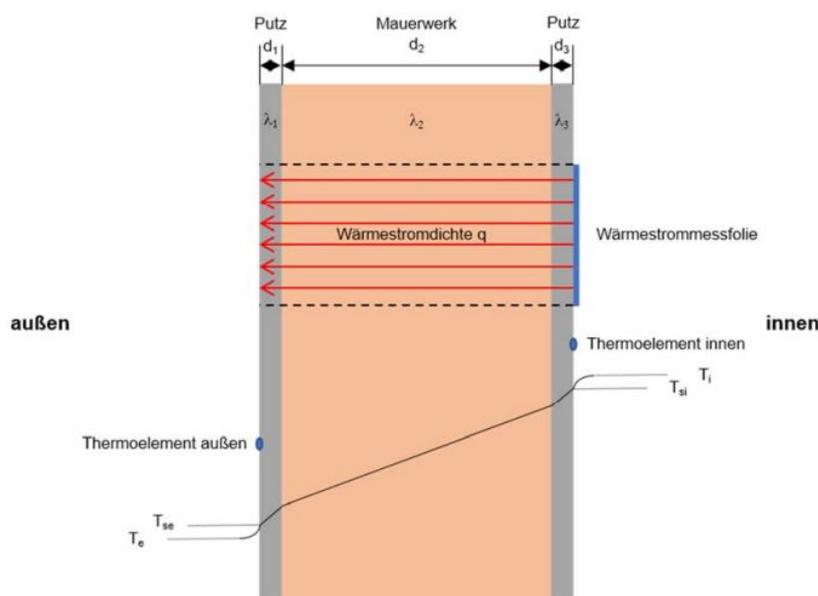


Abb. 6.19: schematische Darstellung des Prozesses des HFM [2]

Im Artikel aus dem Bauphysiker-Treffen 2019 [2] wurde anhand von Versuchen mittels dem Heat Flow Meter Verfahren mit unterschiedlichsten Bedingungen herausgefunden, dass die Auswertung an einzelnen Messungen nicht zuverlässig ist. Da aufgrund von Inhomogenitäten oder geometrischen Wärmebrücken einzelne Messungen nicht repräsentativ waren [2].

Bei der Umsetzung des HFM ist auf eine ausreichend lange Mittelwertbildung zu achten (Angabe aus der ISO 9869-1 [26] sind für die Praxis oft zu kurz) und die Ergebnisse sind laufend auf Plausibilität zu überprüfen (mehrere Messstellen oder dynamische thermische Simulation). Folgende Bedingungen sollten eingehalten werden [2]:

- Umgebungsbedingungen sollen möglichst konstant sein (Hilfswand verwenden)
- Solareinstrahlung sollte vermieden werden
- die äußere Oberflächentemperatur sollte kleiner als die innere Oberflächentemperatur sein

Deswegen ist für die Auswertung eine Fehlerrechnung zu berücksichtigen. Dafür gibt die ISO 9869-1 [26] auch Korrekturterme für Wärmespeicherung und notwendige Genauigkeiten für gültige Messungen an [2].

Entwicklung: Da der Aufwand zur Bestimmung des U-Wertes relativ groß ist und ohnedies in der Praxis hauptsächlich mit Erfahrungswerten gearbeitet wird, findet das in-situ HFM Verfahren nicht sehr häufig Anwendung in der Praxis [IP6]. Laut IP6 wäre eine modernisierte Version des Verfahrens mit direkter Messung mit Hilfe von Mobilgeräten und sofortiger digitalen Auswertung am Handy, eine neue Alternative für das in-situ HFM Verfahren [IP6].

In Abbildung 6.20 ist der Prozess des HFM anhand der Ergebnisse dargestellt.

6.2 Ergebnisse der empirischen Testmessungen

Im Zuge der Ausarbeitung der Arbeit wurden auch Testmessungen an einem vom Forschungsprojekt zur Verfügung gestellten Objekt gemacht. Dabei wurden das Laserscanning, die Pho-

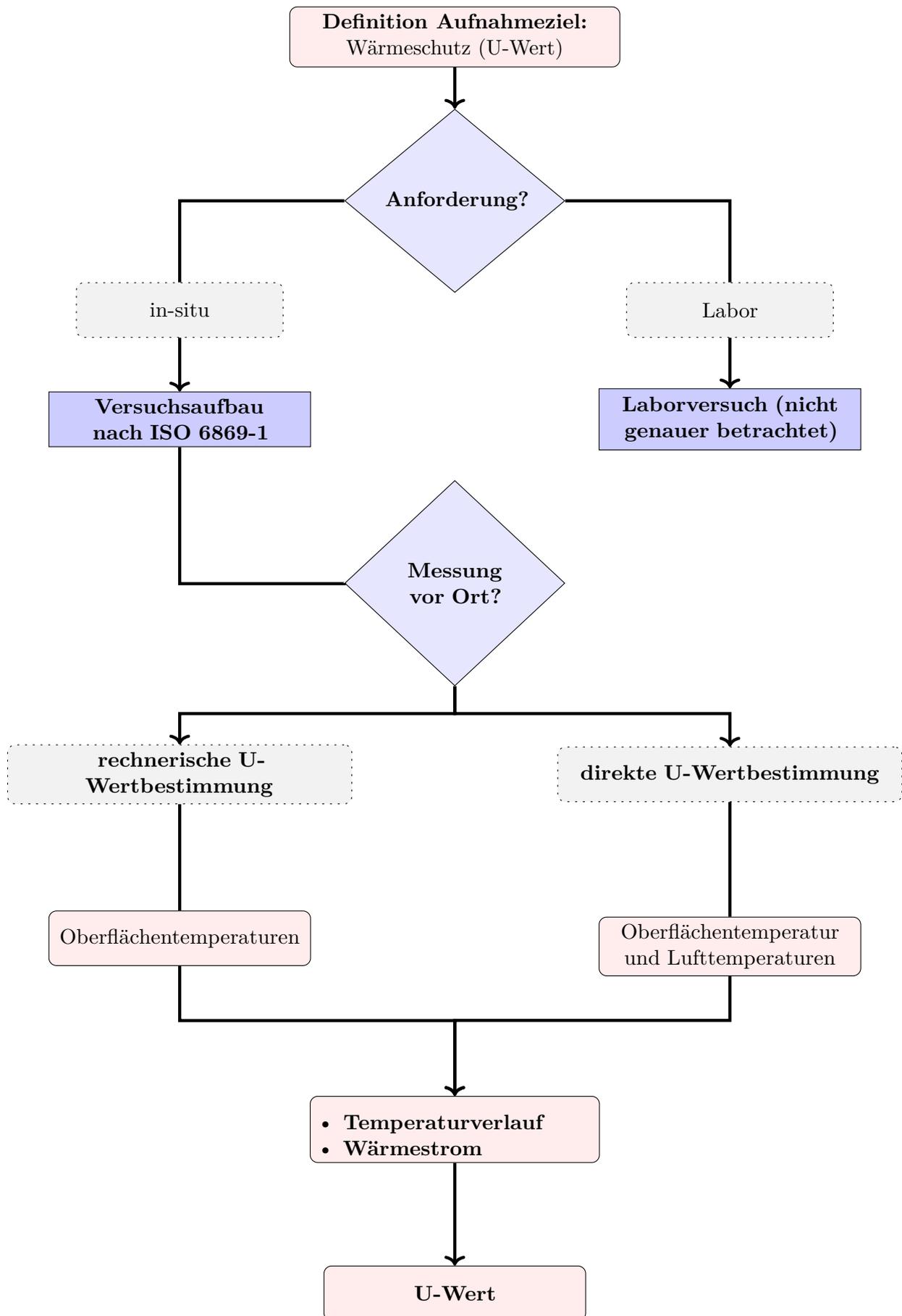


Abb. 6.20: Workflow HFM [eigene Darstellung]

togrammetrie und die Thermographie mittels einer empirischen Fallstudie nochmals genauer beleuchtet.

Da das Heat Flow Meter, wie schon im vorherigen Kapitel angedeutet, aufwendiger ist und sowieso selten in der Praxis angewendet wird, wurde auf eine Testmessung verzichtet. Die Verfahren zur Schadstoffbelastungsmessung und das Ground Penetrating Radar wurden in einer 'Trockenübung' im Labor vorgezeigt und erklärt. Diese Ergebnisse wurden im Zuge der Auswertung der Interviews (siehe Kapitel 6.1) integriert.

6.2.1 Untersuchungsobjekt

Das Untersuchungsobjekt ist ein Gebäude aus den 1990er Jahren und befindet sich im zweiten Wiener Gemeindebezirk. Es handelt sich um einen Stahlbetonbau, der im Innenraum durch Teppichböden und abgehängten Decken geprägt ist. Momentan befinden sich Teile des Gebäudes im Rohzustand. Im Zuge des Forschungsprojekts waren zwei Geschoße für die Messungen zugänglich.

Vor den Messungen wurde eine vereinfachte Form der Bauwerksanalyse durchgeführt:

- Durchsicht verfügbarer Unterlagen
- Bauwerksbegehung
- Identifizierung Schadstoffe
- Durchführung der Messungen

Die durchgeführten Messungen sind zwei geometrische Aufnahmen und eine thermische Aufnahme. Folgend werden die Verfahren aus eigener Erfahrung bewertet. Auf eine genaue Auswertung bzw. Weiterverarbeitung der Messergebnisse zu Plänen oder Modellen wurde im Zuge dieser Arbeit verzichtet.

6.2.2 Auswertung des Laserscannings

Für die Aufnahme mit dem Laserscanner wurde ein Handscanner mit einer SLAM Version vom Institut Hoch- und Industriebau der TU Wien zur Verfügung gestellt. Es handelt sich dabei um einen GEO SLAM (siehe Abbildung 6.21).

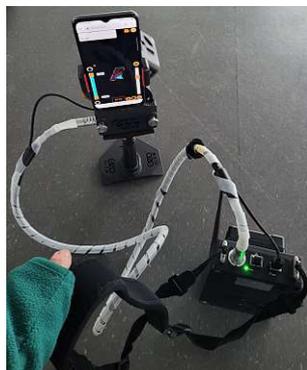


Abb. 6.21: verwendetes Messgerät für Laserscanning [eigene Aufnahme]

Folgend werden die Ergebnisse aus der Verwendung des Laserscans vorgestellt:

- **Durchführung**

Die Aufnahmen gingen schnell und waren unkompliziert. Das verwendete Gerät war sehr benutzerfreundlich. Nach einer kurzen Einschulung war es leicht zu bedienen. Die Anwendung ist prinzipiell überall möglich.

Bei der Kalibrierung (vor Start der Messung) ist darauf zu achten, dass ausreichend Punkte für das Gerät einzufangen sind. Ansonsten ist die geometrische Aufnahme für das Gerät kein Problem. Auch gebogene oder kreisförmige Geometrien können gut aufgenommen werden. Allerdings sollte hierbei auch auf eine ausreichende Umgehung der Objekte geachtet werden. Während der Durchführung ist auf die Gehgeschwindigkeit zu achten, vor allem bei Übergangsbereichen (Türen) in neue Räume, damit sich das Gerät neu orientieren kann. Hilfreich dafür ist die Funktion der Sichtbarkeit der Zwischenergebnisse am Handy.

Bei der Aufnahme mehrerer einzelner Punktwolken sollte auf eine ausreichende Überschneidung der einzelnen Punktwolken geachtet werden, um die Auswertung zu erleichtern. Zusätzlich wurden während der Messaufnahmen auch Videoaufnahmen gemacht, die bei der Auswertung mit der Punktwolke verknüpft werden sollten.

- **Datenauswertung**

Für die Datenauswertung ist eine eigene Software notwendig. Im Zuge dieser Arbeit wurde die Software 'FaroConnect' zum Zusammenführen der einzelnen Punktwolken verwendet. Die Software 'GeoSLAM HUB' wird zum Anknüpfen der Videoaufnahmen der Punktwolke angewendet, dies hat aber im Zuge der Auswertung der Punktwolken nicht funktioniert. Abbildung 6.22, Abbildung 6.23 und Abbildung 6.24 zeigen die einzelnen Punktwolken inklusive der aufgezeichneten Wegführung. Abbildung 6.25 zeigt das Endergebnis der zusammengeführten Punktwolken.

Eine Weiterbearbeitung der Punktwolken in Pläne ist anschließend mit anderen Softwares möglich. Auf eine genauere Weiterbearbeitung der Punktwolke zu Plänen oder einem Modell wurde im Zuge der Ausarbeitung dieser Arbeit aber verzichtet. In einer anderen Diplomarbeit „Effiziente Workflows zur Erstellung von BIM-Modellen auf Basis von Punktwolken“ von Kriegler wird auch beschrieben, dass eine BIM Modellierung anhand einer Punktwolke grundsätzlich ein aufwendiges und zeitintensives Vorhaben ist. Dabei konnte auch kein optimaler Workflow mit einer bestimmten Software erzielt werden. Jede Software besitzt ihre Stärken und Schwächen [32]. Aus Sicht der Autorin ist für eine saubere Auswertung auch Erfahrung von Vorteil.

Zusammenfassend charakterisieren folgende Eigenschaften das Laserscanning aus der Erfahrung der Autorin:

- schnelle Aufnahmen
- einfache Handhabung
- Zwischenergebnisse sofort sichtbar
- benötigte Erfahrung für Bearbeitung der Punktwolke

6.2.3 Auswertung der Photogrammetrie

Für die Durchführung der Photogrammetrie wurde zur Aufnahme der Fotos eine 360 Grad Kamera von Insta360 vom Institut für Hoch- und Industriebau der TU Wien zur Verfügung

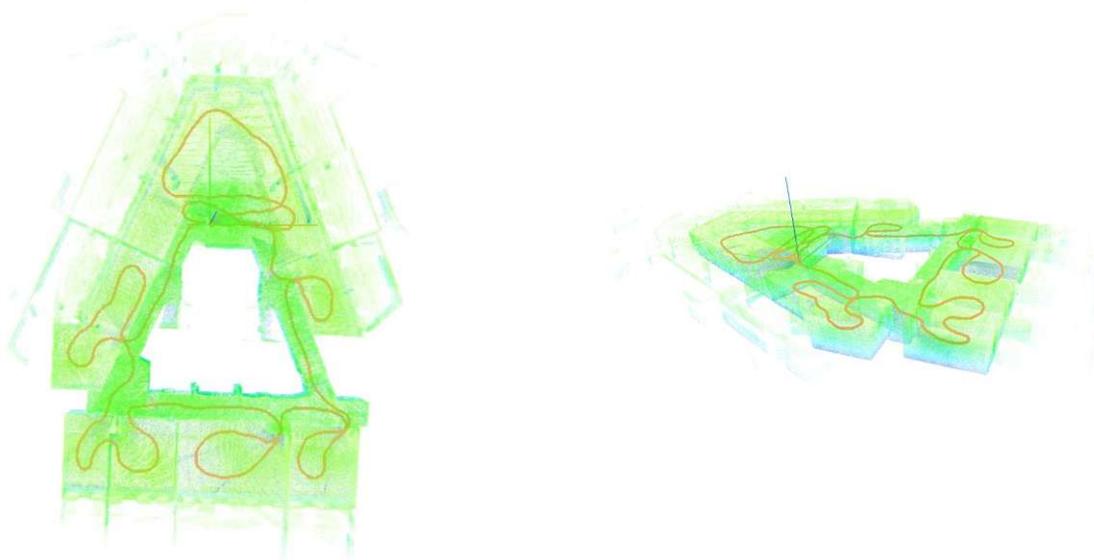


Abb. 6.22: Punktwolke 1 inkl. Wegführung [eigene Darstellung]



Abb. 6.23: Punktwolke 2 inkl. Wegführung [eigene Darstellung]

gestellt (siehe Abbildung 6.26). Für eine gute Aufnahme der Fotos ist ein Stativ von Vorteil, welches leider im Zuge der Aufnahme für diese Arbeit nicht vorhanden war.

Folgend werden die Ergebnisse aus der Verwendung der Photogrammetrie vorgestellt:

- **Anwendung**

Die Anwendung der 360° Kamera ist prinzipiell simpel. Bei der Aufnahme ist auf die Perspektive der Fotos zu achten. Dabei sollten viele Überschneidungen gegeben sein, um die Fotos bei der Auswertung miteinander verschneiden zu können. Diese präzisen Aufnahmen machen die Ausführung sehr mühsam und zeitaufwendig. Prinzipiell ist dieses Verfahren aber überall anwendbar. Die Einzelaufnahmen sind in der App Insta360 direkt einsehbar. Ein Bild aus der 360° Kamera aus beiden Perspektiven wird in Abbildung 6.27 gezeigt.

- **Datenauswertung**

Die Bildaufnahmen konnten in Insta360 Studio eingespielt und bearbeitet werden. Abbildung 6.28 zeigen einige Beispiele für die getätigten Aufnahmen.

Für die Weiterverarbeitung der Bilder ist wieder eine eigene Software notwendig. Die benötigten Softwares sind kostenpflichtig, weshalb auf ein Einspielen der Fotos in eine

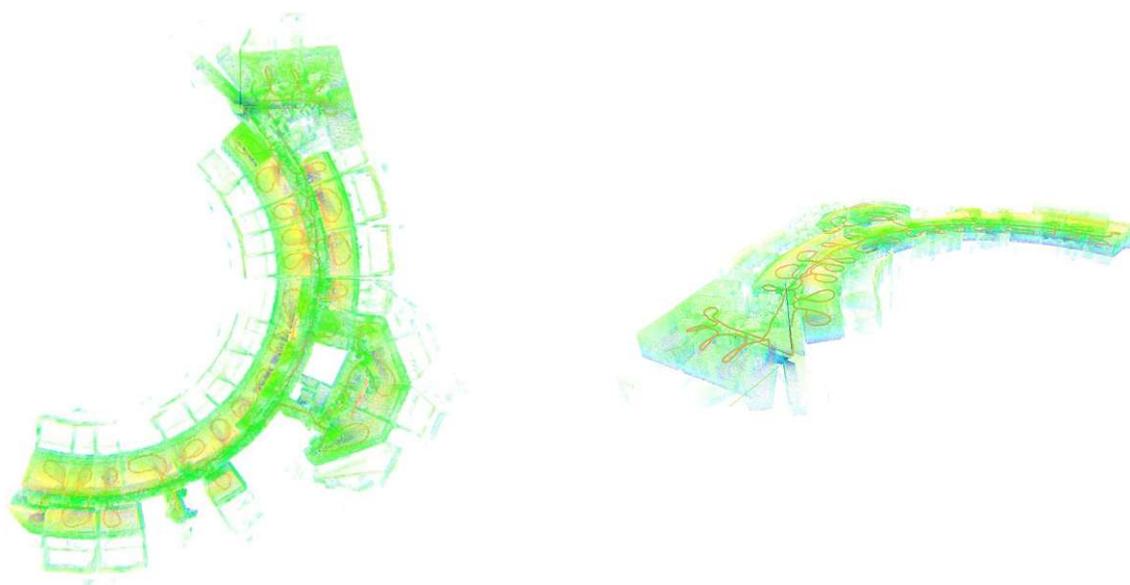


Abb. 6.24: Punktwolke 3 inkl. Wegführung [eigene Darstellung]

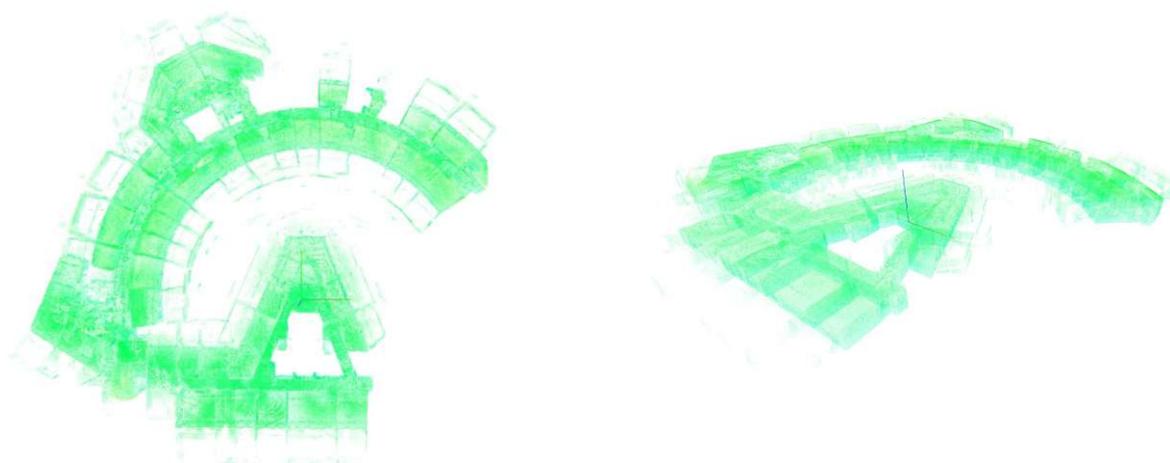


Abb. 6.25: zusammengeführte Punktwolke [eigene Darstellung]

Software um eine Punktwolke zu erstellen, verzichtet wurde. Dazu sind die entstandenen Aufnahmen nicht für eine Weiterverarbeitung geeignet.

Zusammenfassend charakterisieren folgende Eigenschaften die Photogrammetrie aus der Erfahrung der Autorin:

- aufwendiger Aufnahmeprozess
- einfache Handhabung durch Kamera
- Eignung für Detailaufnahmen



Abb. 6.26: verwendetes Gerät für Photogrammetrie [eigene Aufnahme]



Abb. 6.27: Aufnahme einer 360° Kamera [eigenen Aufnahme]

6.2.4 Auswertung der Thermographie

Für die thermographischen Aufnahmen wurde die Thermographiekamera Flir b60 (siehe Abbildung 6.29) verwendet. Dieses Gerät wurde von der MA39 - Magistrat der Stadt Wien, die Prüf-, Inspektions- und Zertifizierungsstelle- zur Verfügung gestellt.

Folgend werden die Ergebnisse aus der Verwendung der Thermographiekamera vorgestellt:

- **Anwendung**

Die Anwendung der Thermographiekamera war ebenfalls sehr simpel. Eine Bedienung des Gerätes ist relativ einfach. Es stehen auf der Kamera mehrere Aufnahmefunktionen zur Verfügung - Digitalkamera, Infrarotkamera (unterschiedliche Temperaturmeseinstellungen), Bild in Bild usw. Für eine saubere Messung ist einerseits auf den Messzeitpunkt zu achten (wie schon bei den Expert:inneninterviews erwähnt), andererseits auf die Kalibrierung des Gerätes auf die Umgebungstemperatur. Ferner ist die Bildgröße der Infrarotkamera kleiner der Digitalkamera, somit ist auf die Ausrichtung der Kamera auf die Aufnahmestellen (z.B. Bereiche zwischen Fenstern) aufzupassen. Auch ist auf die Skalierung für scharfe Bilder zu achten. Die Aufnahme mit der Thermographiekamera ist prinzipiell schnell und unkompliziert.

- **Datenauswertung**

Auf eine Interpretation der Wärmebilder wird im Zuge der Ausarbeitung dieser Arbeit



Abb. 6.28: Raumaufnahme mit 360° Kamera [eigene Aufnahmen]



Abb. 6.29: verwendetes Messgerät für Thermographie [eigene Aufnahme]

verzichtet. Da einerseits die Randbedingungen nicht ganz genau erfüllt wurden und eine Interpretation ausreichend Erfahrung erfordert.

Anmerkung: Bei den Außenaufnahmen wurden zwei Wärmebilder zu unterschiedlichen Zeitpunkten erstellt, da bei der ersten Aufnahme die Skalierung nicht gut eingestellt war und deswegen die Wärmebilder unscharf (siehe Abbildung 6.30, mittleres Bild) sind.

Abbildung 6.30 und Abbildung 6.31 zeigen Beispiele aus den Wärmebildaufnahmen.

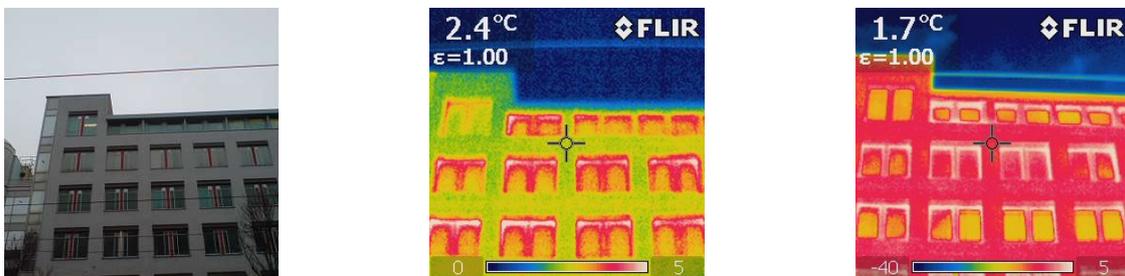


Abb. 6.30: Außenaufnahmen mit Thermographie

Zusammenfassend charakterisieren folgende Eigenschaften die Thermographie aus der Erfahrung der Autorin:

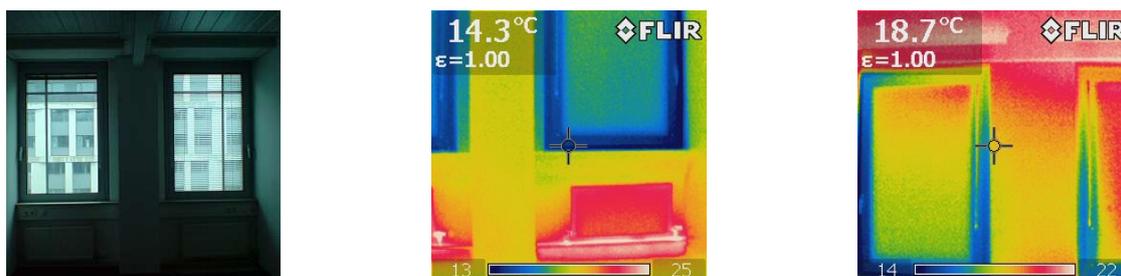


Abb. 6.31: Innenaufnahmen mit Thermographie

- schnelle Aufnahmen
- einfache Handhabung
- Eignung für Detailaufnahmen
- Zwischenergebnisse direkt sichtbar
- komplizierte Auswertung
- Erfahrung für sinnvolle Aufnahmen unverzichtbar

6.2.5 Zusammenführung der Ergebnisse

Der Prozess der Testmessungen wurde in einem Workflow (siehe Abbildung 6.32) zusammengefasst.

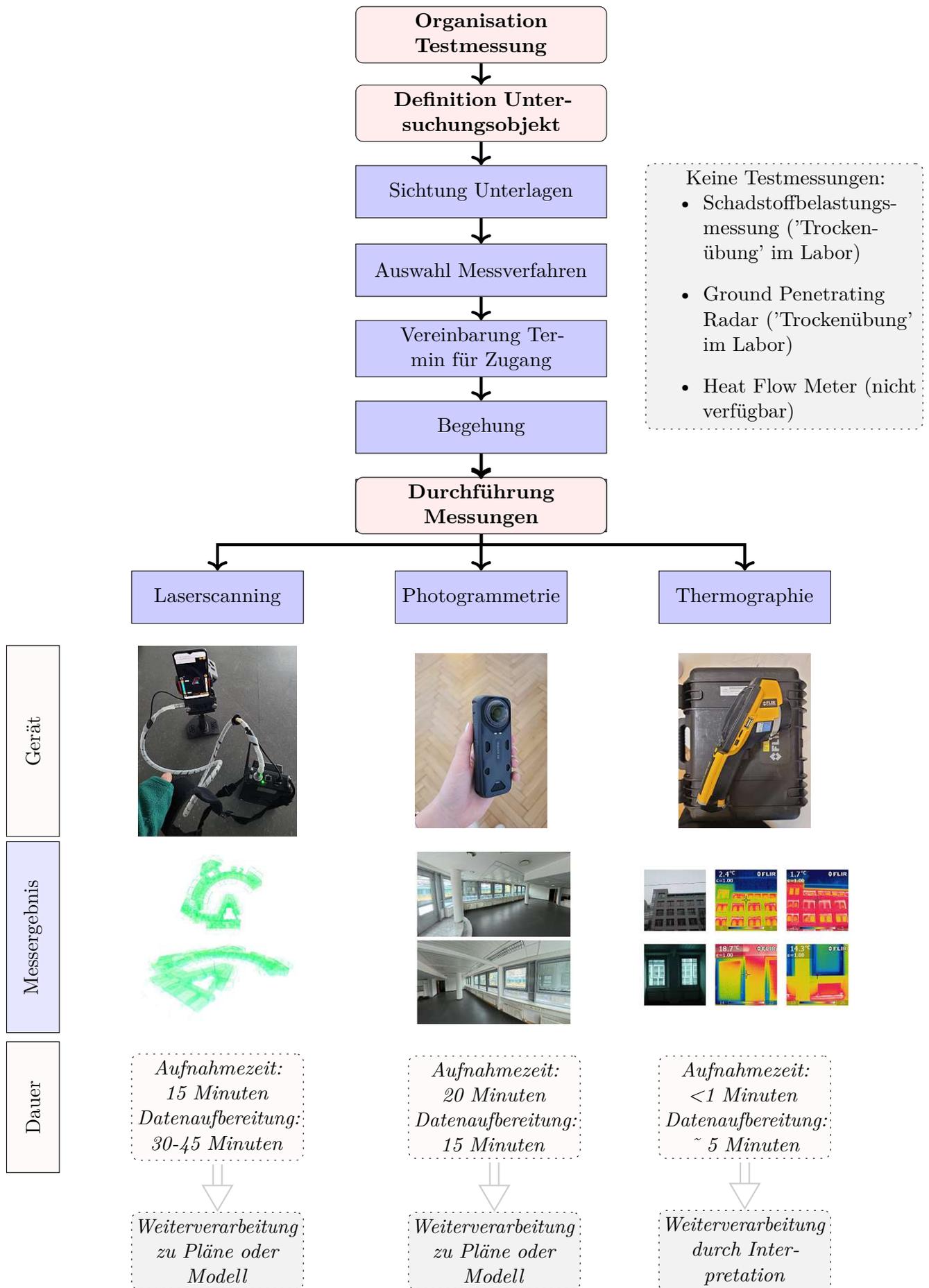


Abb. 6.32: Workflow Testmessungen [eigene Darstellung]

Kapitel 7

Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Zuge dieses Kapitels werden die ausgearbeiteten Ergebnisse diskutiert, Forschungsfragen beantwortet und zusammengefasst.

Diese Arbeit wurde mittels Literaturrecherche, Expert:inneninterviews und einer empirischen Fallstudie bearbeitet. Basierend auf den formulierten Forschungsfragen liegt der Fokus der Arbeit auf den zerstörungsfreien Messverfahren und deren Adaptierung in der Bauwerksanalyse bzgl. einer Bausanierung.

Im ersten Schritt wurde analysiert welche Messverfahren laut Literatur als zerstörungsfrei gelten (in-situ und Labor) und momentan auch eingesetzt werden bzw. sich in Entwicklung befinden. Die Literaturrecherche ergab, dass zerstörungsfreie Messverfahren häufig in Bezug auf die ihnen zugrundeliegende Technologie unterteilt werden (siehe Abbildung 4.1). Daher wurde für jedes Verfahren ein 'Steckbrief' angefertigt, um sich damit einen schnelleren Überblick zu verschaffen.

Im zweiten Teil der Literaturrecherche wurde der Prozess einer Bauwerksanalyse als Grundlage einer Bausanierung ausgeführt und häufige Schäden und Schadstoffe im Bestandsbau beschrieben. Die ausgearbeiteten Ergebnisse mit Augenmerk auf Ziele der Gebäudeuntersuchung und möglichen Messergebnissen aus zerstörungsfreien Messverfahren wurden zu einem Parameterkatalog zusammengeführt (siehe Abbildung 5.1). Anhand eines entwickelten Exceltools wurde ein Auswahlkatalog erstellt, der für die jeweiligen Parameter die passenden Verfahren aus der Literaturrecherche filtert.

Zur Analyse der Gebäudeuntersuchung für die Betrachtung der Nutzerbehaglichkeit, in Bezug auf Wärmeschutz, Materialgesundheit und geometrischen Gebäudeaufnahmen wurden sechs Verfahren (Laserscanning, Photogrammetrie, Ground Penetrating Radar, Schadstoffbelastungsmessung, Thermographie und Heat Flow Meter) ausgewählt und genauer betrachtet. Dafür wurden Expert:innen aus der Praxis interviewt, die die Verfahren in Bezug auf Funktionalität, Dauer, Einsatzbereiche, Auswertung und Entwicklung der Verfahren einschätzten. Zusätzlich wurde anhand der Methoden (Laserscanning, Photogrammetrie, Thermographie) auch eine empirische Fallstudie an einem ausgewählten Untersuchungsobjekt durchgeführt und anhand der Aspekte aus den Expert:inneninterviews verglichen.

Die Ergebnisse der Literaturrecherche ergaben, dass bereits viele zerstörungsfreie Messverfahren angewendet bzw. auch stetig weiterentwickelt werden und häufig auch auf kombinierte Verfahren gesetzt wird. Doch benötigt es hier noch viel mehr Anwendungsbedarf in der Praxis, um die Verfahren zu optimieren und diese auch zum Stand der Technik in der Baubranche werden zu lassen.

Anzumerken ist, dass auch nicht alle Parameter, des im Zuge dieser Arbeit erstellten Parameterkatalogs, nach heutigem Stand zerstörungsfrei messbar sind. Dabei stellt sich allerdings die Frage, ob es überhaupt möglich bzw. notwendig ist, alle Parameter zerstörungsfrei in-situ messbar zu machen und auch optimale Messergebnisse zu gewährleisten. In Abbildung 7.1 wurden die Parameter, die für eine gründliche Bestandsaufnahme relevant sind, den Ergebnissen aus Literaturrecherche, Interviews und Messungen gegenübergestellt.

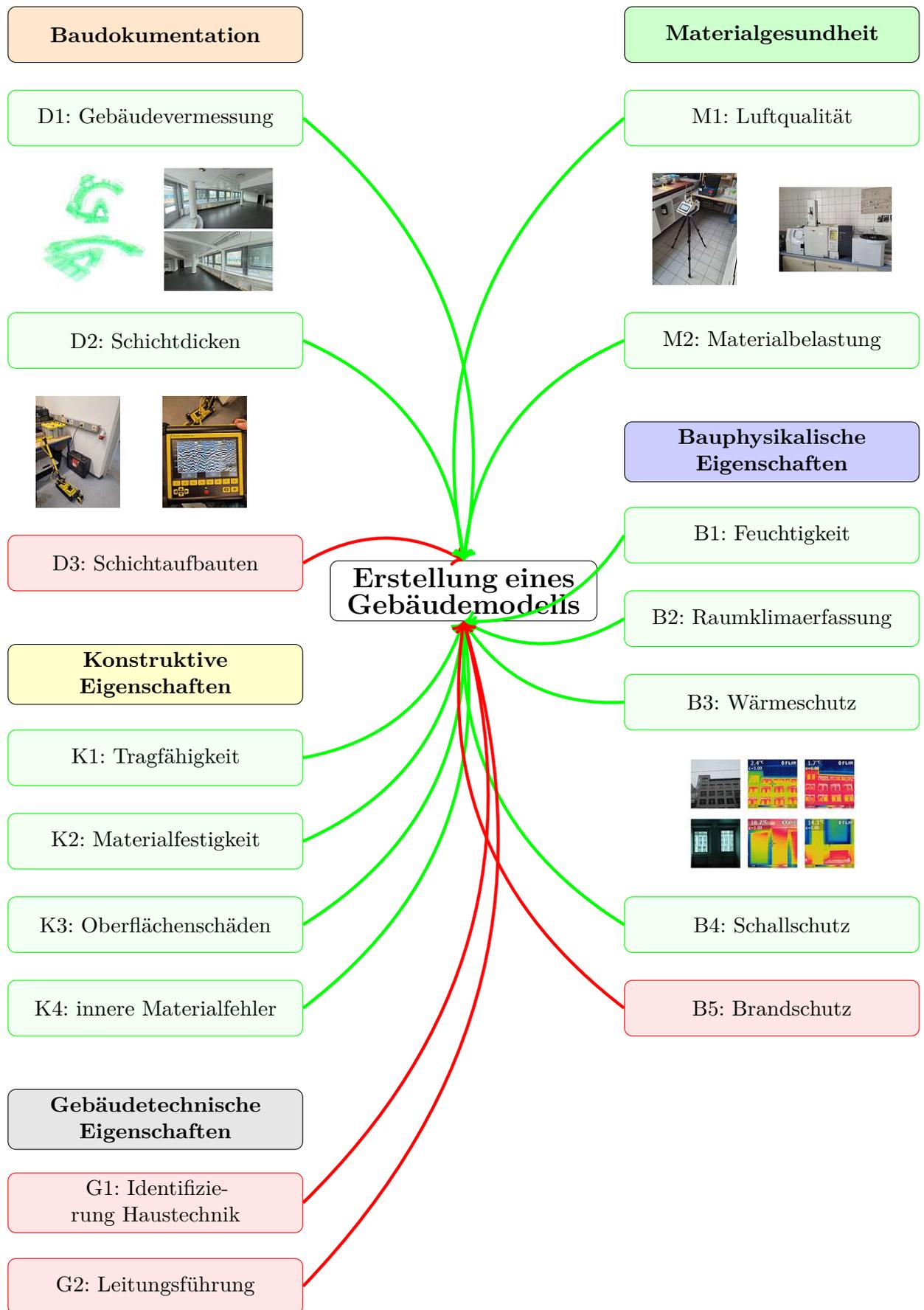


Abb. 7.1: Auswertung Parameterkatalog [eigene Darstellung]

Die Auswertung dieser Abbildung ergab sich aus den Ergebnissen der Literaturrecherche, Interviews und Testmessungen und zeigt welche Parameter bereits sinnvolle Messergebnisse liefern und welche Parameter noch mehr Entwicklungsfokus benötigen.

Im Zuge der Literaturrecherche wurde deutlich, dass bereits einige Verfahren zur Untersuchung der Tragstruktur (entspricht den Konstruktiven Eigenschaften) vorhanden sind und viele sich auf die Erkundung von Bewehrung in Stahlbeton fokussieren. Auch bauphysikalische Parameter, gerade in Bezug auf die Nutzerbehaglichkeit (Raumklima, Schallschutz) lassen sich in-situ gut messen, wie auch die Bewertung des Bestandes auf Feuchtigkeit und Wärmeschutz. Ebenfalls gut anwendbar sind Messverfahren zur Gebäudevermessung und Schichtdickenbestimmung.

Messverfahren für die Schadstoffbelastung wiederum zerstörungsfrei bzw. in-situ auszuwerten, ist laut der Expert:innenaussagen kritisch zu betrachten. Diese Art von Messungen basieren auf einer sehr komplexen Analytik und liefern bei zerstörungsfreien bzw. in-situ Messungen unsichere Ergebnisse, wodurch keine genauen Aussagen über Sanierungsgrundlagen erfolgen können. Gleichzeitig kann angemerkt werden, dass die derzeitige Vorgangsweise zum Nachweis für Schadstoffbelastung reibungslos funktioniert und Luftprobenentnahme, wie auch meist die minimale Materialprobenentnahme, wenig bzw. gar keinen Schaden auf den Bestand haben.

Die Parameter Schichtaufbauten, Brandschutz und Untersuchungen der gebäudetechnischen Eigenschaften wurden in der Literatur kaum bis gar nicht erwähnt. Lediglich in den Interviews wurde mit dem Ground Penetrating eine mögliche Anwendung zur Messung von Schichtaufbauten und Leitungsführungen gezeigt.

Auch im Zuge der Interviews wurde deutlich, dass einige Verfahren, wie Laserscanning und Thermografie schon fundierte Methoden in der Gebäudeerkundung darstellen. Andere, wie Heat Flow Meter oder Photogrammetrie, demgegenüber als teilweise überholt oder auch als nicht zwingend notwendig gesehen werden. Da sie in der Durchführung als zu aufwendig und somit auch als zu teuer gelten.

Das Ground Penetrating Radar wiederum wird als Verfahren mit viel Potential gesehen. Allerdings ist für eine optimale Ausnutzung dieser Methode momentan eine enge interdisziplinäre Zusammenarbeit verknüpft, da dieses Verfahren viel Erfahrung erfordert und auch eine Optimierung der Auswertungsprozesse, um das gesamte Potential auszuschöpfen.

Auf Basis der ausgearbeiteten Ergebnisse der Interviews wurden die Methoden bezüglich: Benutzerfreundlichkeit, schnelle Aufnahme, einfache Auswertung, Praxisanwendung, Weiterentwicklung zusammenfassend tabellarisch (siehe Tabelle 7.1) nach gut (grün), mittel (orange) und schlecht (rot) ausgewertet.

Abschließend wurde für die drei Methoden: Laserscanning, Photogrammetrie und Thermographie, wie bei den Interviews eine tabellarische Analyse angefertigt. Dabei stützt sich die Auswertung an der Erfahrung der Autorin anhand der Interviewgespräche und der empirischen Testmessung:

Im Anschluss an die präsentierten Ergebnisse können die Forschungsfragen nun wie folgt beantwortet werden:

- Welche zerstörungsfreien Messmethoden gibt es und wie können diese mit dem Prozess einer Bestandsaufnahme als Grundlage für eine Bausanierung in Beziehung gesetzt werden?

Grundsätzlich lassen sich zerstörungsfreie Messverfahren nach ihren zugrundeliegenden Technologien kategorisieren (siehe Abbildung 4.1). Eine klare Abgrenzung zwischen zerstörungssarmen und zerstörungsfreien Verfahren ist nicht möglich, der Übergang ist fließend.

Die Messergebnisse der zerstörungsfreien Verfahren sind tendenziell als qualitative Ergebnisse anzusehen. Auskunft über die Einsatzbereiche und die Messergebnisse der einzelnen Verfahren sind in Kapitel 4 nachzulesen.

	Benutzerfreundlichkeit	schnelle Aufnahme	einfache Auswertung	Praxisanwendung	Weiterentwicklung	
Laserscanner	●	●	●	●	●	<i>Legende</i> ● gut ● mittel ● schlecht
Photogrammetrie	●	●	●	●	●	
Thermographie	●	●	●	●	●	
Ground Penetrating Radar	●	●	●	●	●	
Schadstoffbelastungsmessung	●	●	●	●	●	
Heat Flow Meter	●	●	●	●	●	

Tab. 7.1: Auswertung der Interviews

	Benutzerfreundlichkeit	schnelle Aufnahme	einfache Auswertung	Praxisanwendung	Weiterentwicklung	
Laserscanner	●	●	●	●	●	<i>Legende</i> ● gut ● mittel ● schlecht
Photogrammetrie	●	●	●	●	●	
Thermographie	●	●	●	●	●	

Tab. 7.2: Auswertung der empirischen Testmessungen

Angelehnt an den zerstörungsfreien Messverfahren und den Grundlagen einer Bauwerksanalyse wurde ein Parameterkatalog für eine gründliche Bestandsaufnahme erstellt (siehe Tabelle 7.3). Darin werden die Messergebnisse der Verfahren mit dem Ablauf einer Bestandsuntersuchung in Beziehung gesetzt. In einem interaktivem Excel Tool wurde der Parameterkatalog mit den Messverfahren verknüpft.

- Wie schaut eine praktische Anwendung von zerstörungsfreien Messverfahren aus?

Zur Untersuchung der praktischen Anwendung von zerstörungsfreien Messverfahren wurden aus dem Parameterkatalog vier Parameter aus den Kategorien: Baudokumentation,

Nr.	Parameter	Beschreibung
Baudokumentation		
D1	Gebäudevermessung	Ermittlung Geometrie (Vergleich mit Bestandsunterlagen)
D2	Schichtdicken	Ermittlung von Schichtdicken
D3	Schichtaufbauten	Ermittlung von Schichtaufbauten
Materialgesundheit		
M1	Luftqualität	Beurteilung der Luftqualität durch Untersuchung nach Schadstoffen
M2	Materialbelastung	Beurteilung der Materialien durch Schadstoffbelastung
Konstruktive Eigenschaften		
K1	Tragfähigkeit	Untersuchung der Tragfähigkeit/Bodenuntersuchung
K2	Materialfestigkeit	Untersuchung der Materialfestigkeit (Druckfestigkeit, Haftzugfestigkeit, ...)
K3	Oberflächenschäden	Ermittlung von Schäden bzw. Mängel an der Oberfläche eines Bauteils (Risse, Einkerbungen...)
K4	innere Materialfehler	Ermittlung von Schäden bzw. Mängel innerhalb eines Bauteils (Korrosion, Löcher,...)
Bauphysikalische Eigenschaften		
B1	Feuchtigkeit	Ermittlung von Feuchtigkeit/Salzgehalt am Gebäude
B2	Raumklimaerfassung	Ermittlung von Luftfeuchte, Lufttemperatur, Luftströmung (Luftdichtheit) und Oberflächentemperatur zur Beurteilung der Nutzerbehaglichkeit
B3	Wärmeschutz	Beurteilung von Wärmebrücken/Wärmedurchgangskoeffizient und Untersuchung der thermischen Gebäudehülle
B4	Schallschutz	Beurteilung des Luftschalls und Trittschalls
B5	Brandschutz	Beurteilung von Brandschutzmaßnahmen
Gebäudetechnische Eigenschaften		
G1	Identifizierung Haustechnik	Ortung bzw. Ermittlung des Zustandes der Haustechnik (Lüftung, ...)
G2	Leitungsführung	Ermittlung des Verlaufes der Haustechnikleitungen

Tab. 7.3: Beschreibung Parameterkatalog [23],[6],[20],[36]

Materialgesundheit und Bauphysikalische Eigenschaften ausgewählt und durch Interviews und Testmessungen genauer beleuchtet.

Zu jedem dieser sechs Verfahren wurde anhand der Ergebnisse der Interviews ein Workflow erstellt, der den Prozess der jeweiligen Verfahren aufzeigt. Zusätzlich wurde auch ein Workflow über die Testmessungen erstellt, der die Organisation der Datenaufbereitung visualisiert (Prozess vor Messdurchführung, Messergebnisse der Verfahren, geschätzter Zeitrahmen der Messdauer).

Kapitel 8

Conclusio und Zukunftsausblick

Grundsätzlich ist das Vorhaben einer Bausanierung einen aufwendigen Prozess. Eine gründliche Untersuchung des Gebäudes ermöglicht effiziente Sanierungskonzepte. Wichtig in diesem Zusammenhang ist vor allem die Schonung des Bestandes. Da somit auch im Sinne der Kreislaufwirtschaft auf den Lebenszyklus eines Gebäudes bzw. von Bauteilen Rücksicht genommen wird. Damit rücken zerstörungsfreie in-situ Untersuchungsmethoden immer mehr in den Vordergrund.

Diese Arbeit fokussiert sich auf zerstörungsfreie Messverfahren und deren Anwendung in der Gebäudeerkundung. Oft ist der Übergang von zerstörungsfreien Messverfahren auf semi zerstörungsfreie Messverfahren fließend und nicht ganz eindeutig abzugrenzen. Doch die ausgearbeiteten Ergebnisse zeigen, dass bereits viel Potential in einer zerstörungsfreien Gebäudeerkundung steckt.

Dabei zeigt die Arbeit, dass eine Bestandsuntersuchung für eine Bausanierung ein komplexes und aufwendiges Vorhaben darstellt und eine intensive Planung benötigt. In Bezug auf die Bauwerksuntersuchung werden momentan Probenentnahmen bzw. Laboruntersuchungen am Objekt unumgänglich sein, um quantitative Messergebnisse erzielen zu können. Im Zuge der Literaturrecherche konnten viele unterschiedliche Messverfahren identifiziert werden, die aber schwerpunktmäßig auf eine Anwendung für Stahlbeton bzw. ferromagnetische Materialien beschränkt sind. Messverfahren der Gebäudevermessung und bauphysikalischen Eigenschaften, vor allem Feuchtigkeit, Raumklimaerfassung, Wärmeschutz und Schallschutz, sind bereits gut entwickelt und in der Praxis etabliert. Seltener sind beispielsweise Methoden für Messungen von Schichtaufbauten in Bestandsgebäuden, da sie noch zu wenig ausgereift bzw. zu teuer sind. In Bezug auf Materialgesundheit wird ein Einsatz von zerstörungsfreien Verfahren auch in Zukunft tendenziell unrealistisch sein, da die zu untersuchenden Komponenten zu komplex sind und eine zerstörungsfreie Messung zu ungenauen Ergebnissen führt. Außerdem bedingt eine Anwendung vieler zerstörungsfreier Messverfahren, primär in Bezug auf die Auswertung, ein höheres Maß an Erfahrung und Kompetenz. Eine enge und zeitnahe Zusammenarbeit aller Beteiligten hingegen, kann den Planungsprozess beschleunigen und optimieren. Das konnte auch im Zuge der Interviews und der Fallstudie gezeigt bzw. nachgewiesen werden.

Prinzipiell gehören einige zerstörungsfreie Methoden noch stark weiterentwickelt, wobei die Digitalisierung eine tragende Rolle übernehmen wird. Ein Trend zu roboterunterstützten Aufnahmen, KI (Künstliche Intelligenz) basierten Auswertungen und Anfertigung sowie Bearbeitung von BIM (Building Information Modelling) Modellen ist klar erkennbar. Aus heutiger Sicht steckt noch sehr viel Potential in diesen Bereichen und kann somit auch den Aufwand einer Gebäudeaufnahme und nachträglichen Weiterbearbeitung deutlich vereinfachen. Einfache Aufnahmeprozesse und gut entwickelte Auswertungssoftwares können im Planungsverlauf, gerade in Bezug auf Kosten und Zeit Gamechanger, sein. Doch abgesehen zu den vorher genannten Faktoren ist und bleibt eine klare und verständliche Kommunikation zwischen allen Disziplinen essentiell für einen erfolgreichen und reibungslosen Planungsprozess.

In der Grafik 8.1 sind wichtige Faktoren für die Entwicklung einer optimierten Gebäudeerkundung zusammengefasst.

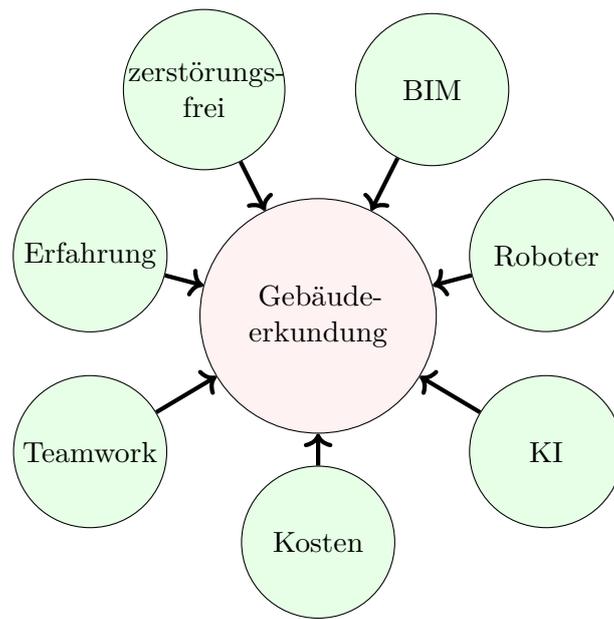


Abb. 8.1: Entwicklungsfaktoren einer Gebäudeerkundung [eigene Darstellung]

Zusammenfassend ist zu betonen, dass schon viele zerstörungsfreie Messverfahren zur Verfügung stehen, allerdings noch weitere Forschungsschritte und vermehrte Nutzung in der Praxis benötigt werden, um zu benutzerfreundlichen und nachhaltigen Resultaten zu gelangen.

Literatur

- [1] E. Barreira und V. P. de Freitas. „Evaluation of building materials using infrared thermography“. In: *Construction and Building Materials* 21.1 (Jan. 2007), S. 218–224. ISSN: 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2005.06.049.
- [2] Bauphysik Treffen. *BP-Treffen 2019 - Gesamtbericht*. 2019. URL: http://www.bauphysik.at/fileadmin/user_upload/BP-Treffen_2019_-_gesamt.pdf (Zugriff am 10.04.2025).
- [3] BMK und Klima- und Energiefonds. *Innovatives Bauen. Ressourcenschonend, energieeffizient und klimaneutral*. Apr. 2021. URL: https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/nw_pdf/eia/eia_214_de.pdf (Zugriff am 10.04.2025).
- [4] P. Diem. *Zerstörungsfreie Prüfmethode für das Bauwesen*. Wiesbaden: Bauverl., 1982, S. 217. ISBN: 3762514151.
- [5] D. Donath, Hrsg. *Bauaufnahme und Planung im Bestand. Grundlagen — Verfahren — Darstellung — Beispiele*. SpringerLink. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2008. ISBN: 9783834892362. DOI: 10.1007/978-3-8348-9236-2.
- [6] D. Dörner, Hrsg. *Bauen im Bestand. Katalog für die Altbauerneuerung*. 3., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Bauen im Bestand. Köln: Rudolf Müller, 2015, S. 1529. ISBN: 9783481032340.
- [7] S. K. Dwivedi, M. Vishwakarma und P. Soni. „Advances and Researches on Non Destructive Testing: A Review“. In: *Materials Today: Proceedings* 5.2 (2018), S. 3690–3698. ISSN: 2214-7853. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.11.620.
- [8] Y. El Masri und T. Rakha. „A scoping review of non-destructive testing (NDT) techniques in building performance diagnostic inspections“. In: *Construction and Building Materials* 265 (Dez. 2020), S. 120542. ISSN: 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120542.
- [9] A. D. Eslamlou, A. Ghaderiaram, E. Schlangen und M. Fotouhi. „A review on non-destructive evaluation of construction materials and structures using magnetic sensors“. In: *Construction and Building Materials* 397 (Sep. 2023), S. 132460. ISSN: 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132460.
- [10] Fraunhofer Institute for Physical Measurement Techniques IPM. *DIC Bildkorrelation*. 2025. URL: <https://www.ipm.fraunhofer.de/de/gf/produktionskontrolle-inlinemesstechnik/komp/dic-bildkorrelation.html> (Zugriff am 10.04.2025).
- [11] S. Friedrichsen. *Nachhaltiges Planen, Bauen und Wohnen. Kriterien für Neubau und Bauen im Bestand*. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage, korrigierte Publikation 2024. SDG - Forschung, Konzepte, Lösungsansätze zur Nachhaltigkeit. Berlin: Springer Vieweg, 2024, S. 330. ISBN: 9783662682036.
- [12] L. Gambilongo, A. Barontini, R. A. Silva und P. B. Lourenço. „Evaluation of non-destructive techniques for mechanical characterisation of earth-based mortars in masonry joints“. In: *Construction and Building Materials* 392 (Aug. 2023), S. 131960. ISSN: 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131960.

- [13] I. Garrido, M. Solla, S. Lagüela und M. Rasol. „Review of InfraRed Thermography and Ground-Penetrating Radar Applications for Building Assessment“. In: *Advances in Civil Engineering* 2022.1 (Jan. 2022). Hrsg. von A. Rasulo. ISSN: 1687-8094. DOI: 10.1155/2022/5229911.
- [14] A. Göller. „Mikrowellen-Rasterfeuchtemessungen – morphologische Beschreibung typischer Feuchteschäden in Bauwerken“. In: *Mauerwerk* 11.2 (Apr. 2007), S. 111–115. ISSN: 1437-1022. DOI: 10.1002/dama.200790021.
- [15] A. Göller und B. Jungstand. *Mikrowellen-Feuchtemessung in Schichtaufbauten*. 2024. URL: <https://www.ndt.net/article/dgzfp-bau-2024/papers/P14.pdf> (Zugriff am 10.04.2025).
- [16] R. Graefe. *Altbausanierung. Ratgeber für die Praxis - Richtig planen und ausführen*. Bauen im Bestand. Köln: Rudolf Müller, 2017, S. 252. ISBN: 348103508X.
- [17] M. Gupta, M. A. Khan, R. Butola und R. M. Singari. „Advances in applications of Non-Destructive Testing (NDT): A review“. In: *Advances in Materials and Processing Technologies* 8.2 (Apr. 2021), S. 2286–2307. ISSN: 2374-0698. DOI: 10.1080/2374068x.2021.1909332.
- [18] R. Heidelberg. *Praxishandbuch Brandschutz im Bestand. Bewertung - Planung - Konzepte - Maßnahmen : mit 36 Tabellen : mit digitalen Arbeitshilfen auf www.feuertrutz.de*. Köln: Feuertrutz-Verl., 2013, S. 459. ISBN: 9783862351091.
- [19] B. Hillemeier und A. Taffe. *Aktuelle Regelwerke der Bauwerksdiagnostik*. Feb. 2012. DOI: 10.1002/9783433601235.ch3.
- [20] R. Hoffmann. *Altbauten instand setzen. Bauschäden und Schadstoffe erkennen und beseitigen*. Online-Ausg. Franzis Energietechnik. Poing: Franzis Verlag GmbH, 2013, S. 288. ISBN: 9783645650427.
- [21] J. Hóla und L. Runkiewicz. „METHODS AND DIAGNOSTIC TECHNIQUES USED TO ANALYSE THE TECHNICAL STATE OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES“. In: *Structure and Environment* 10.4 (Dez. 2018), S. 309–337. ISSN: 2081-1500. DOI: 10.30540/sae-2018-030.
- [22] S. D. Holland und R. S. Reusser. „Material Evaluation by Infrared Thermography“. In: *Annual Review of Materials Research* 46.1 (Juli 2016), S. 287–303. ISSN: 1545-4118. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070115-032014.
- [23] K. Horn. *Bauwerksanalyse*. Bauen im Bestand. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2020, S. 239. ISBN: 9783410256083.
- [24] N. Ida und N. Meyendorf, Hrsg. *Handbook of advanced nondestructive evaluation*. Springer Nature eReference. Cham: Springer, 2019. ISBN: 9783319265520. DOI: 10.1007/978-3-319-26553-7.
- [25] B. Ilschner. *Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik. Eigenschaften, Vorgänge, Technologien*. Hrsg. von R. F. Singer. 6. Aufl. 2016. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, S. 1511. ISBN: 9783642538919.
- [26] International Organization for Standardization. *ISO 9869-1: Thermal insulation — Building elements — In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance — Part 1: Heat flow meter method*. Geneva, Switzerland, 2014.
- [27] N. Işık, F. M. Halifeoğlu und S. İpek. „Detecting the ground-dependent structural damages in a historic mosque by employing GPR“. In: *Journal of Applied Geophysics* 199 (Apr. 2022), S. 104606. ISSN: 0926-9851. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2022.104606.

- [28] J. Jaskowska-Lemańska und J. Sagan. „Non-Destructive Testing Methods as a Main Tool Supporting Effective Waste Management in Construction Processes“. In: *Archives of Civil Engineering* 65.4 (Dez. 2019), S. 263–276. ISSN: 2300-3103. DOI: 10.2478/ace-2019-0059.
- [29] R. Kastner. *Altbauten. Beurteilen, bewerten. 2., überarb. und erw. Aufl.* Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verl., 2004, S. 206. ISBN: 3816761879.
- [30] X. Kong und R. G. Hucks. „Preserving our heritage: A photogrammetry-based digital twin framework for monitoring deteriorations of historic structures“. In: *Automation in Construction* 152 (Aug. 2023), S. 104928. ISSN: 0926-5805. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.104928.
- [31] M. Krempl, W. Hüttler und I. Wall. *Modernisierung eines Gründerzeitgebäudes unter Anwendung eines AerogelDämmputzes.* 2019. URL: https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/schriftenreihe-2019-26-enerphit.pdf (Zugriff am 10. 04. 2025).
- [32] M. Kriegler. „Effiziente Workflows zur Erstellung von BIM-Modellen auf Basis von Punktwolken“. 2023. DOI: 10.34726/HSS.2023.112743.
- [33] A. Kroworz und A. Katunin. „Non-destructive testing of structures using optical and other methods: A review“. In: *SDHM Structural Durability and Health Monitoring* 12 (Apr. 2018). DOI: 10.3970/sdhm.2018.012.001.
- [34] S. Kumar und D. Mahto. „Recent Trends In Industrial And Other Engineering Applications Of Non Destructive Testing: A Review“. In: *International Journal of Scientific & Engineering Research* 4 (9 Okt. 2013). ISSN: 2229-5518.
- [35] M. G. Masciotta, L. J. Sanchez-Aparicio, D. V. Oliveira und D. Gonzalez-Aguilera. „Integration of Laser Scanning Technologies and 360° Photography for the Digital Documentation and Management of Cultural Heritage Buildings“. In: *International Journal of Architectural Heritage* 17.1 (Mai 2022), S. 56–75. ISSN: 1558-3066. DOI: 10.1080/15583058.2022.2069062.
- [36] G. F. Moschig. *Bausanierung. Grundlagen - Planung - Durchführung.* 4th ed. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2014, S. 454. ISBN: 9783834822598.
- [37] P. K. M. Nkwari, S. Sinha und H. C. Ferreira. „Through-the-Wall Radar Imaging: A Review“. In: *IETE Technical Review* 35.6 (Sep. 2017), S. 631–639. ISSN: 0974-5971. DOI: 10.1080/02564602.2017.1364146.
- [38] P. Nooralishahi, C. Ibarra-Castanedo, S. Deane, F. López, S. Pant, M. Genest, N. P. Avdelidis und X. P. V. Maldague. „Drone-Based Non-Destructive Inspection of Industrial Sites: A Review and Case Studies“. In: *Drones* 5.4 (Sep. 2021), S. 106. ISSN: 2504-446X. DOI: 10.3390/drones5040106.
- [39] *ÖNORM B 1300: Objektsicherheitsprüfung für Wohngebäude.* Österreichisches Normungsinstitut (ASI). Beuth Verlag. 2018.
- [40] *ÖNORM B 1301: Objektsicherheitsprüfung für Nicht-Wohngebäude.* Österreichisches Normungsinstitut (ASI). Beuth Verlag. 2018.
- [41] *ÖNORM EN 16283-1: Akustik – Messung der Schallübertragung durch Bauprodukte und Baukonstruktionen – Teil 1: Messung der Trittschalldämmung.* Österreichisches Normungsinstitut (ASI). Beuth Verlag. 2014.
- [42] *ÖNORM EN 16283-2: Akustik – Messung der Schallübertragung durch Bauprodukte und Baukonstruktionen – Teil 2: Messung des Luftschalls.* Österreichisches Normungsinstitut (ASI). Beuth Verlag. 2014.

- [43] F.-A. Pitten. „Schimmelpilze im Innenraum: Was ist zu tun?“ In: *Krankenhaus-Hygiene + Infektionsverhütung* 29.2 (Mai 2007), S. 44–48. ISSN: 0720-3373. DOI: 10.1016/j.khinf.2007.02.010.
- [44] A. Raabe und P. Holstein. *Akustik und Raumklima: Raumkomfortbewertung und Energieeffizienz*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021. ISBN: 9783658333249. DOI: 10.1007/978-3-658-33324-9.
- [45] A. C. Rahn und M. Bonk. *Feuchtediagnostik als zwingende Planungs-grundlage bei Bau-maßnahmen im Bestand*. März 2018. DOI: 10.1002/9783433607831.ch15.
- [46] K.-H. Renner. *Das Interview. Grundlagen und Anwendung in Psychologie und Sozialwissen-schaften*. Hrsg. von N.-C. Jacob. 1. Aufl. 2020. Basiswissen Psychologie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020, S. 149. ISBN: 9783662604410.
- [47] R. Rosenberger. *Bauwirtschaft und CO₂-Emissionen*. 2024. URL: <https://www.wko.at/ooe/gewerbe-handwerk/bau/bauwirtschaft-co2-emissionen.pdf> (Zugriff am 10.04.2025).
- [48] S. Rüter, K. Waldow, N. Bartels und A. Fuhrmann. „3D Gaussian Splatting for Construction Sites“. In: *24th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality (CONVR 2024)*. Nov. 2024.
- [49] K. Schabowicz. „Non-Destructive Testing of Materials in Civil Engineering“. In: *Materials* 12.19 (Okt. 2019), S. 3237. ISSN: 1996-1944. DOI: 10.3390/ma12193237.
- [50] F. Schnelle und R. Kurz. „Messung und Beurteilung von Nutzergeräuschen. DAGA“. In: *Fortschritte der Akustik*. Hrsg. von S.-R. Mehra. Berlin: Dt. Ges. für Akustik, 2007. ISBN: 3980865932.
- [51] L. Schögl. *Praxishandbuch Werkstoffprüfung. Methoden der zerstörenden und zerstörungs-freien Werkstoffprüfung*. 2. Ausgabe. Technik. Brunn am Gebirge: TÜV Austria Fachverlag, 2018, S. 211. ISBN: 9783901942990.
- [52] N. Soares, C. Martins, M. Gonçalves, P. Santos, L. S. da Silva und J. J. Costa. „Laboratory and in-situ non-destructive methods to evaluate the thermal transmittance and behavior of walls, windows, and construction elements with innovative materials: A review“. In: *Energy and Buildings* 182 (Jan. 2019), S. 88–110. ISSN: 0378-7788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.10.021.
- [53] M. Stahr, Hrsg. *Bausanierung. Erkennen und Beheben von Bauschäden*. 7., vollständig überarbeitete Auflage. Springer eBook Collection. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2022, S. 1162. ISBN: 9783658281489.
- [54] M. Stelzmann. „In-situ-Messgerät für die zerstörungsfreie Messung der kapillaren Wasser-aufnahme von Fassaden“. In: *24. Hanseatische Sanierungstage, Messen Planen Ausführen, Heringsdorf 2013*. Nov. 2013.
- [55] A. Taffe und J. Wiese. *Erfassung, Beschreibung, Bewertung und Verknüpfung der ZfPBau-Verfahren und Techniken für Ingenieurbauwerke bei Straße und Schiene*. 2021. DOI: 10.48755/DZSF.210012.01.
- [56] K. Themistocleous und D. Abate. „The use of photogrammetry and NeRF techniques to document built heritage“. In: *Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications XV*. Hrsg. von K. Schulz, K. G. Nikolakopoulos und U. Michel. SPIE, Nov. 2024, S. 46. DOI: 10.1117/12.3031605.

- [57] Ö. Ulus, F. E. Davarcı und E. E. Gültekin. „Non-destructive testing methods commonly used in aviation“. In: *International Journal of Aeronautics and Astronautics* 5.1 (Juni 2024), S. 10–22. ISSN: 2757-6574. DOI: 10.55212/ijaa.1418742.
- [58] Umweltbundesamt GmbH. *Klimaschutzbericht 2024*. URL: <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0913.pdf> (Zugriff am 10.04.2025).
- [59] P. Wegerer, C. Deseyve und T. Bednar. *In-situ-Bestimmung thermischer Eigenschaften von Baukonstruktionen: Herrn Univ.-Prof. DI DDr. Jürgen Dreyer zum 70. Geburtstag gewidmet*. Feb. 2012. DOI: 10.1002/9783433601235.ch8.
- [60] B. Weller und L. Scheuring. *Denkmal und Energie 2020: Energieeffizienz, Nachhaltigkeit und Nutzerkomfort*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020. ISBN: 9783658287535. DOI: 10.1007/978-3-658-28753-5.
- [61] Y. Yao, M. Yan und Y. Bao. „Measurement of cable forces for automated monitoring of engineering structures using fiber optic sensors: A review“. In: *Automation in Construction* 126 (Juni 2021), S. 103687. ISSN: 0926-5805. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103687.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Globale Energie und Emissionen [3]	11
1.2	Unterteilung Gebäudeerkundungsmethoden in Anlehnung an [49]	13
1.3	Darstellung Prozess Bauen im Bestand [eigene Darstellung]	15
2.1	Darstellung des Ablaufes der Methodik [eigene Darstellung]	18
3.1	Ablauf einer Bauwerksanalyse in Anlehnung an [23]	23
4.1	Überblick Kategorisierung zerstörungsfreier Messverfahren [eigene Darstellung]	27
4.2	Darstellung Penetrometerprüfung [12]	28
4.3	Darstellung Schmidt Hammer [12]	29
4.4	Darstellung Pendelrückprallhammer [12]	29
4.5	Darstellung Kratztest [12]	30
4.6	Darstellung Bohrwiderstandsprüfung [23]	31
4.7	Darstellung Schema der Ultraschallprüfung [55]	33
4.8	Darstellung Schema der Ultraschallprüfung(Impuls Echo Verfahren) [25]	33
4.9	Darstellung Schema der Mikroseismischen Prüfung [55]	34
4.10	schematische Darstellung und Funktionsweise der akustischen Kamera [44]	35
4.11	schematische Darstellung Luftschallprüfung [4]	37
4.12	schematische Darstellung Trittschallprüfung [4]	37
4.13	Darstellung System Gösele [4]	37
4.14	Darstellung der Impakt-Echo Prüfung [55]	38
4.15	schematische Darstellung des GPR [27]	40
4.16	Darstellung AMR-GMR-TMR [9]	41
4.17	schematische Darstellung der Wirbelstromprüfung [57]	44
4.18	schematische Darstellung Remanenzmagnetismus [55]	44
4.19	Aufbau Röntgengrobstrukturprüfung [34]	46
4.20	schematischer Aufbau einer Thermographie [55]	48
4.21	schematische Darstellung der Heizdrahtmethode [59]	50
4.22	schematische Darstellung der λ -Nadelsonde [59]	51
4.23	Aufbau eines Versuches für HB [52]	52
4.24	Aufbau eines Versuches für HFM [52]	53
4.25	schematischer Aufbau GHP [59]	54
4.26	Blick aus einem Endoskop [55]	56
4.27	Darstellung eines Videoskop [55]	56
4.28	Ablauf Echtzeit Interferometrie [25]	58
4.29	Darstellung digitale Bildkorrelation (links: Referenz, rechts: verformte Version) [24]	59
4.30	Darstellung terrestrischer Laserscanner [35]	61
4.31	Darstellung tragbarer Laserscanner Arten [35]	61
4.32	Darstellung Kameraarten [35]	63
4.33	Darstellung einer Drohne [35]	64
4.34	schematische Darstellung Magnetpulverprüfung [25]	66
4.35	schematische Darstellung Flüssigkeitseindringverfahren [25]	67

4.36	Darstellung Schichttiefen Mikrowellensensoren [15]	68
4.37	Darstellung der Phenolphthaleinprüfung [55]	69
4.38	Darstellung des Karsten'schen Wasserprüfröhrchen [54]	69
4.39	Darstellung der elektrischen Feuchtigkeitsmessung [23]	70
4.40	Darstellung der Potentialmessung [55]	71
4.41	Darstellung LASER-induzierte Plasmaspektroskopie (LIPS) [55]	71
4.42	Darstellung Röntgenfluoreszenzanalyse Gerät [55]	72
4.43	Darstellung Energiedispersives Analysegerät Gerät [55]	72
5.1	Überblick Parameterkatalog [eigene Darstellung]	77
5.2	Darstellung Auswahlkatalog [eigene Darstellung]	81
6.1	Darstellung Auswahl der Verfahren [eigene Darstellung]	83
6.2	terrestrischer Laserscanner [eigene Aufnahme]	86
6.3	Handscanner [eigene Aufnahme]	86
6.4	Modelle von Laserscannern [eigene Aufnahmen]	86
6.5	Workflow Laserscanning [eigene Darstellung]	89
6.6	Workflow Photogrammetrie [eigene Darstellung]	92
6.7	Thermographiekamera [eigene Aufnahmen]	93
6.8	Workflow Thermographie [eigene Darstellung]	95
6.9	GPRs mit unterschiedlichen Frequenzen [eigene Aufnahmen]	96
6.10	GPR Messergebnis	97
6.11	Workflow GPR [eigene Darstellung]	98
6.12	Gerät für Luftprobenentnahme [eigene Aufnahmen]	99
6.13	Gerät für Schimmelprobenentnahme [eigene Aufnahmen]	100
6.14	Schimmelkultivierung [eigene Aufnahme]	101
6.15	GCMS Gerät [eigene Aufnahme]	101
6.16	Beispiele für Labormessgeräte [eigene Aufnahmen]	101
6.17	Workflow Schadstoffbelastungsmessungen [eigene Darstellung]	103
6.18	Versuchsaufbau HFM [31]	104
6.19	schematische Darstellung des Prozesses des HFM [2]	105
6.20	Workflow HFM [eigene Darstellung]	106
6.21	verwendetes Messgerät für Laserscanning [eigene Aufnahme]	107
6.22	Punktwolke 1 inkl. Wegführung [eigene Darstellung]	109
6.23	Punktwolke 2 inkl. Wegführung [eigene Darstellung]	109
6.24	Punktwolke 3 inkl. Wegführung [eigene Darstellung]	110
6.25	zusammengeführte Punktwolke [eigene Darstellung]	110
6.26	verwendetes Gerät für Photogrammetrie [eigene Aufnahme]	111
6.27	Aufnahme einer 360° Kamera [eigenen Aufnahme]	111
6.28	Raumaufnahme mit 360° Kamera [eigene Aufnahmen]	112
6.29	verwendetes Messgerät für Thermographie [eigene Aufnahme]	112
6.30	Außenaufnahmen mit Thermographie	112
6.31	Innenaufnahmen mit Thermographie	113
6.32	Workflow Testmessungen [eigene Darstellung]	114
7.1	Auswertung Parameterkatalog [eigene Darstellung]	116
8.1	Entwicklungsfaktoren einer Gebäudeerkundung [eigene Darstellung]	122

Tabellenverzeichnis

4.1	Übersicht der Verfahren und eine in-situ Anwendung	75
5.1	Beschreibung Parameterkatalog [23],[6],[20],[36]	80
6.1	Expert:innen der Interviews	84
6.2	Vorteile und Nachteile Laserscanning [IP1],[IP2],[IP3]	88
6.3	Vorteile und Nachteile Photogrammetrie [IP1],[IP2],[IP3]	91
6.4	Vorteile und Nachteile Thermographie [IP4],[IP5]	94
6.5	Vorteile und Nachteile Ground Penetrating Radar [IP9]	99
7.1	Auswertung der Interviews	118
7.2	Auswertung der empirischen Testmessungen	118
7.3	Beschreibung Parameterkatalog [23],[6],[20],[36]	119